ISSN (печать) 2079-6161
ISSN (онлайн) 2789-6323

КАЗГИДРОМЕТ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

Ежеквартальный
научно-технический журнал

АСТАНА

ISSN 2079-6161
eISSN 2789-6323

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯ

«Қазгидромет» РМК

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

РГП «Казгидромет»

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

RSE «Kazhydromet»

2026

№3 (123) шығарылым

Выпуск №3 (123)

Issue №3 (123)

1995 жылдан бастап шығады
Издается с 1995 года
Founded in 1995

Жылына 4 рет шығады
Выходит 4 раза в год
Published 4 times a year

Астана – Астана – Astana

БАС РЕДАКТОР

Алимбаева Д.К., Бас директор

БАС РЕДАКТОР ОРЫНБАСАРЫ

Қалиев Ә.С., Бас директордың бірінші орынбасары

РЕДАКЦИЯ

Дюсенова Ж.А., т.ғ.к., жетекші ғылыми қызметкер

Жаксыбаева А.Е., жетекші ғылыми қызметкер

Нүрхан М.Қ., жетекші ғылыми қызметкер

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ

Абдрахимов Р.Г. (Алматы, Қазақстан)

Волчек А.А. (Брест, Беларусь)

Гафуров А. (Потсдам, Германия)

Елтай А.Ғ. (Астана, Қазақстан)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Қазақстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Қазақстан)

Опп К. (Марбург, Германия)

Островская Е.В. (Астрахань, Ресей)

Полякова С.Е. (Алматы, Қазақстан)

Саиров С.Б. (Тараз, Қазақстан)

Сальников В.Г. (Алматы, Қазақстан)

Степанов Б.С. (Алматы, Қазақстан)

Терехов А.Г. (Алматы, Қазақстан)

Тілләкәрім Т.А. (Астана, Қазақстан)

Чередниченко А.В. (Алматы, Қазақстан)

Яфязова Р.К. (Алматы, Қазақстан)

Редакция мекенжайы: Қазақстан, Астана қ., Мәңгілік Ел даңғылы, 11/1

E-mail: hydromet.journal@gmail.com

Сайт: https://journal.kazhydromet.kz

Меншік иесі: «Қазгидромет» РМК

Қазақстан Республикасы ақпарат және қоғамдық даму министрлігімен тіркелген 15.05.2023 ж.

№ KZ13VPY00070023 қайта есепке қою туралы куәлігі.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Алимбаева Д.К., Генеральный директор

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Калиев А.С., Первый заместитель генерального директора

РЕДАКЦИЯ

Дюсенова Ж.А., к.т.н., ведущий научный сотрудник

Жаксыбаева А.Е., ведущий научный сотрудник

Нүрхан М.Қ., ведущий научный сотрудник

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абдрахимов Р.Г. (Алматы, Казахстан)

Волчек А.А. (Брест, Беларусь)

Гафуров А. (Потсдам, Германия)

Елтай А.Г. (Астана, Казахстан)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Казахстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Казахстан)

Опп К. (Марбург, ФРГ)

Островская Е.В. (Астрахань, Россия)

Полякова С.Е. (Алматы, Казахстан)

Саиров С.Б. (Тараз, Казахстан)

Сальников В.Г. (Алматы, Казахстан)

Степанов Б.С. (Алматы, Казахстан)

Терехов А.Г. (Алматы, Казахстан)

Тілләкәрім Т.А. (Астана, Казахстан)

Чередниченко А.В. (Алматы, Казахстан)

Яфязова Р.К. (Алматы, Казахстан)

Адрес редакции: Казахстан, г. Астана, проспект Мәңгілік Ел, 11/1

E-mail: hydromet.journal@gmail.com

Сайт: https://journal.kazhydromet.kz

Собственник: РГП «Казгидромет»

Зарегистрировано Министерством информации и общественного развития Республики Казахстан. Свидетельство о постановке на переучет **№ KZ13VPY00070023** от 15.05.2023 г.

CHIEF EDITOR

Alimbayeva D., General Director

DEPUTY CHIEF EDITOR

Kaliev A., First Deputy General Director

EDITORIAL STAFF

Dyussenova Zh., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher

Zhaksybayeva A., Leading Researcher

Nurkhan M., Leading Researcher

EDITORIAL BOARD

Abdrakhimov R. (Almaty, Kazakhstan)

Volchek A. (Brest, Belarus)

Gafurov A. (Potsdam, Germany)

Yeltay A. (Astana, Kazakhstan)

Murtazin E. (Almaty, Kazakhstan)

Mustafayev Zh. (Almaty, Kazakhstan)

Opp C. (Marburg, Germany)

Ostrovskaya E. (Astrakhan, Russia)

Polyakova S. (Almaty, Kazakhstan)

Sairov S. (Taraz, Kazakhstan)

Salnikov V. (Almaty, Kazakhstan)

Stepanov B. (Almaty, Kazakhstan)

Terekhov A. (Almaty, Kazakhstan)

Tillakarim T. (Astana, Kazakhstan)

Cherednichenko A. (Almaty, Kazakhstan)

Yafyazova R. (Almaty, Kazakhstan)

Editorial address: 11/1, Mangilik El Avenue, Astana, Kazakhstan

E-mail: hydromet.journal@gmail.com

Website: https://journal.kazhydromet.kz

Proprietary: RSE «Kazhydromet»

Registered by the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan. Rediscount certificate **№ KZ13VPY00070023** dated 15.05.2023.

МАЗМҰНЫ

ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

Нурлиза К. Ержанова, Жанар О. Озгелдинова
ШУ ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ АҒЫСЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ РЕЖИМІНІҢ ТҰРАҚСЫЗДЫҒЫ ЖӘНЕ ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ЫҚТИМАЛДЫҚ-СТАТИСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРДІҢ РӨЛІ 11

Айсулу А. Турсунова, Жанат Т. Салаватова , Нурила Ж. Турсын
ЕРТІС ӨЗЕНІ АЛАБЫНДАҒЫ СУ ТАСҚЫНДАРЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ 25

Бақыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Ақмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жақсыбаева, Айдарбек М. Султанкулов
2024-2025 жж. ҚЫСҚЫ МАУСЫМДАҒЫ ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ҚАР ЖАМЫЛҒЫСЫ ЖАЙ-КҮЙІ МЕН ӨЗГЕРІСТЕРІ МОНИТОРИНГІ 45

Талшын Р. Оразбаева, Азамат С. Мадибеков, Лаура Т. Исмуханова, Айша А. Мадибекова, Ботакоз М. Султанбекова
ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНЫҢ МАУСЫМДЫҚ ДИНАМИКАСЫ 55

Виталий К. Хлюстов, Юрий П. Демаков, Юрий Г. Безбородов
КҮНТІЗБЕЛІК ЖЫЛДАРДЫҢ ТИПОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ЖАһАНДЫҚ ЖЫЛЫНУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ЖЫЛУ РЕЖИМІНІҢ ДИНАМИКАСЫ: АЛМАТЫ ҚАЛАСЫ ҮШІН ҚАТЕРЛЕРДІ БАҒАЛАУ 67

Гульсезим К. Жусупова, Даникер В. Чепашев, Диас Б. Мерекеев, Эльмира С. Жилкибаева, Дастан Аманкешұлы
ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ӨРТ ҚАУПІН FWI ЖӘНЕ FFDI ИНДЕКСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БАҒАЛАУ 79

Айқын А. Нұрахмет, Аманбек Зандыбай, Гульнур С. Нурахметова
КОНСЕРВАЦИЯЛАНҒАН «ШАҢТӨБЕ»УРАН КЕН ОРНЫНЫҢ КУТУНГУЗ ӨЗЕНІНЕ РАДИОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ 97

Нариман А. Әмірғалиев, Азамат С. Мадибеков, Лаура Т. Исмуханова, Айнұр Мұсақұлқызы, Ботакоз М. Султанбекова, Асхат Ө. Жәди, Арай Ә. Сұлтанаева
ЖЕТІСУ ОБЛЫСЫНЫҢ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ПОЛИХЛОРЛАНҒАН БИФЕНИЛДЕРМЕН ЛАСТАНУЫН БАҒАЛАУ 112

Наталья В. Серая, Гульжан К. Даумова, Ольга А. Петрова, Жанат К. Идришева, Арина А. Полякова, Игорь А. Денисов
ӨНЕРКӘСІПТІК ӘСЕР ЕТУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ҮЛБІ ӨЗЕНІНІҢ ЖЕР ҮСТІ СУЛАРЫНЫҢ ГИДРОХИМИЯЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ ЛАЙЛЫЛЫҒЫ 125

Берикжан К. Оксикбаев, Еркин А. Токпанов, Мырзабай А. Джетимов, Ерлан С. Андасбаев, Данагуль М. Мукашева
ШЫЖЫ ЖӘНЕ ҚОРА ӨЗЕНДЕРІ АЛАПТАРЫНДАҒЫ МҰЗДЫҚТАРДЫҢ АЗАЮЫ КЕЗЕҢІНДЕГІ ҚАРАТАЛ ӨЗЕНІНІҢ СУ ЛАСТАНУЫНЫҢ ӨЗГЕРІСТЕРІ 142

Равиль И. Мұхамедиев, Адилхан Сымағұлов, Ян И. Кучин, Алексей Г. Терехов, Людмила А. Городецкая
ТАУ ЕТЕГІНДЕ ОРНАЛАСҚАН МЕГАПОЛИСТЕГІ ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ БӨЛШЕКТЕРМЕН АУАНЫҢ ЛАСТАНУЫНЫҢ НЕГІЗГІ КӨЗДЕРІ: АЛМАТЫ ҚАЛАСЫ МЫСАЛЫНДА 153

Арман Б. Маханбетов, Тулкинжон Э. Гаипов, Давлат Х. Юлдашбек, Арнур М. Кенжегалиев, Жулдыз А. Дюсенова, Гульмира Д. Исенова, Гульнисам О. Рвайдарова
КҮКІРТ ҚҰРАМДЫ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ҚАЙТА ӨҢДЕУ ӨНІМДЕРІНІҢ АЛМА ЗИЯНКЕСТЕРІНЕ ҚАРСЫ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ 167

Наталья Серая, Гульжан Даумова, Ольга Петрова, Макпал Кайсина, Арина Полякова, Ольга Васильева, Игорь Денисов
БРАЖИНСКИЙ БҰЛАҒЫНЫҢ (ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН) БЕТКІ СУЛАРЫНЫҢ ЛАСТАНУЫ МЕН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНА КӨПКОМПОНЕНТТІ БАҒА БЕРУ 177

Гаухар К. Бишимбаева, Сауле М. Нурмакова, Рустем В. Шарипов, Карлыгаш Ж. Буленова, Закен А. Искаков, Айдана А. Мырзабекова, Амантай Далбанбай, Ербол М. Карманов, Магзум Ж. Садыков
УРАН КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ СИРЕК ЖЕР ЭЛЕМЕНТТЕРІ ӘЛЕУЕТІН МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ 193

Нурия Е. Айкенова, Г. Мурат, Гузель У. Абилова, Умбеталы К.Сарсембин, Ерик С. Меркибаев, Сауле М.Нурмакова
МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНЕРКӘСІБІНІҢ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ҚАЛДЫҒЫМЕН ӨНДІРІСТІК КӘСІПОРЫНДАРДЫҢ САРҚЫНДЫ СУЛАРЫН ФЕНОЛДАРДАН ТАЗАРТУ 204

Ержан Н. Сагатбаев, Тангал Т. Турсынова, Айман Б. Карабалаева
ЕРТІС ӨЗЕНІ АЛАБЫНЫҢ ШЕКАРАЛЫҚ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МӘСЕЛЕЛЕРІН ШЕШУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ АУМАҚТЫҚ ЖОСПАРЛАУ 218

Айнұр Д. Каранеева, Жанат З. Төлеубекова, Забида Н. Құрманғалиева, Толқын К. Қуанышбек
ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАННЫҢ БЕТКЕЙЛІ АУМАҚТАРЫНДАҒЫ КОНТУРЛЫҚ ВАЛ-АРЫҚТАРДЫ ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ СҮЙЕМЕЛДЕУ ЖӘНЕ СПЕКТРАЛДЫ МОНИТОРИНГТІҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ 230

Қуат Т. Сапаров, Акерке М. Нурпеисова, Айгуль Е. Егинбаева, Айгуль М. Сергеева
ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫНЫҢ ЕРЕКШЕ ҚОРҒАУҒА АЛЫНҒАН ТАБИҒИ ЖӘНЕ КИЕЛІ НЫСАН АТАУЛАРЫ 240

Алтын А. Жангужина
ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫ ОРМАНДАРЫНЫҢ ЖЕРҮСТІ ЖАМЫЛҒЫСЫНА ОРМАН ӨРТТЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ 254

Баян С. Керімбай, Нұржан Н. Керімбай, Қуат М. Баймырзаев, Лаура С. Байбатырова
ШӨЛЕЙТТІ АУМАҚ ЛАНДШАФТТАРЫНЫҢ КЕҢІСТІКТІК - УАҚЫТТЫҚ ДИНАМИКАСЫНЫҢ ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГІ 273

Ғалымжан С. Әбдіманап, Татьяна В.Дедова, Лариса А. Балакай, Данияр Б. Нурсеитов, Серик М. Нуракынов
НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛІК МОДЕЛЬДЕРДІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, PLANETSCOPE КЕСКІНДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ЖЕРЛЕРДІҢ МҰНАЙМЕН ЛАСТАНУЫН СЕМАНТИКАЛЫҚ СЕГМЕНТТЕУ 289

ШОЛУ

Leman Max, Айнура Е. Алдиярова, Ерболат Т. Кайпбаев, Айнур Н. Калмашова
СУ РЕСУРСТАРЫН СЦЕНАРИЙЛІК МОДЕЛЬДЕУ ТӘСІЛДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ 304

ХРОНИКА

Игорь Васильевич Северскийдің 90 жылдық мерейтойына орай 319

Игорь Михайлович Мальковскийді еске алу 322

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Нурлиза К. Ержанова, Жанар О. Озгелдинова
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШУ И РОЛЬ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ 11

Айсулу А. Турсунова, Жанат Т. Салаватова , Нурила Ж. Турсын
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВОДНЕНИЙ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЕРТИС 25

Бакыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Акмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жаксыбаева, Айдарбек М. Султанкулов
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В КАЗАХСТАНЕ В ЗИМНИЙ СЕЗОН 2024-2025 гг. И ЕГО МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ 45

Талшын Р. Оразбаева, Азамат С. Мадибеков, Лаура Т. Исмуханова, Айша А. Мадибекова, Ботакоз М. Султанбекова
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА 55

Виталий К. Хлюстов, Юрий П. Демаков, Юрий Г. Безбородов
ТИПОЛОГИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ЛЕТ И ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ АЛМАТЫ 67

Гульсезим К. Жусупова, Даникер В. Чепашев, Диас Б. Мерекеев , Эльмира С. Жилкибаева, Дастан Аманкешулы
ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА НА ОСНОВЕ ИНДЕКСОВ FWI И FFDI 79

Айқын А. Нұрахмет, Аманбек Зандыбай, Гульнур С. Нурахметова
ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНСЕРВИРОВАННОГО УРАНОВОГО РУДНИКА «ШАНТОБЕ» НА РЕКУ КУТУНГУЗ 97

Нариман А. Амиргалиев, Азамат С. Мадибеков, Лаура Т. Исмуханова, Айнұр Мұсақұлқызы, Ботакоз М. Султанбекова, Асхат Ө. Жәди, Арай Ә. Сұлтанаева
ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОБЛАСТИ ЖЕТЫСУ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫМИ БИФЕНИЛАМИ 112

Наталья В. Серая, Гульжан К. Даумова, Ольга А. Петрова, Жанат К. Идришева, Арина А. Полякова, Игорь А. Денисов
ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МУТНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕКИ УЛЬБА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 125

Берикжан К. Оксикбаев, Еркин А. Токпанов, Мырзабай А. Джетимов, Ерлан С. Андасбаев, Данагуль М. Мукашева
ИЗМЕНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ В РЕКЕ КАРАТАЛ В ПЕРИОД СОКРАЩЕНИЯ ЛЕДНИКОВ В БАССЕЙНАХ РЕК ШЫЖЫ И КОРА 142

Равиль И. Мухамедиев, Адилхан Сымагулов, Ян И. Кучин, Алексей Г. Терехов, Людмила А. Городецкая
ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПРЕДГОРНОМ МЕГАПОЛИСЕ НА ПРИМЕРЕ АЛМАТЫ 153

167

Арман Б. Маханбетов, Тулкинжон Э. Гаипов, Давлат Х. Юлдашбек, Арнур М. Кенжегалиев, Жулдыз А. Дюсенова, Гульмира Д. Исенова, Гульнисам О. Рвайдарова
ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОТИВ ВРЕДИТЕЛЕЙ ЯБЛОНИ

Наталья Серая, Гульжан Даумова, Ольга Петрова, Макпал Кайсина, Арина Полякова, Ольга Васильева, Игорь Денисов
МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД БРАЖИНСКОГО РУЧЬЯ (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН) 177

Гаухар К. Бишимбаева, Сауле М. Нурмакова, Рустем В. Шарипов, Карлыгаш Ж. Буленова, Закен А. Искаков, Айдана А. Мырзабекова, Амантай Далбанбай, Ербол М. Карманов, Магзум Ж. Садыков
МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 193

Нурия Е. Айкенова, Г. Мурат, Гузель У. Абилова, Умбеталы К.Сарсембин, Ерик С. Меркибаев, Сауле М.Нурмакова
ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ФЕНОЛОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ОТХОДОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА 204

Ержан Н. Сагатбаев, Тангал Т. Турсынова, Айман Б. Карабалаева
ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БАССЕЙНА РЕКИ ИРТЫШ 218

Айнур Д. Каранеева, Жанат З. Толеубекова, Забида Н. Курмангалиева, Толкын К. Қуанышбек
ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА КОНТУРНЫХ ВАЛОКАНАВ НА СКЛОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА 230

Куат Т. Сапаров, Акерке М. Нурпеисова, Айгуль Е. Егинбаева, Айгуль М. Сергеева
ТОПОНИМЫ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ И САКРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ 240

Алтын А. Жангужина
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА НАПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЛЕСОВ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ 254

Баян С. Керімбай, Нұржан Н. Керімбай, Қуат М. Баймырзаев, Лаура С. Байбатырова
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННО - ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ЛАНДШАФТОВ ПОЛУПУСТЫННОЙ ТЕРРИТОРИИ 273

Ғалымжан С. Әбдіманап, Татьяна В.Дедова, Лариса А. Балакай, Данияр Б. Нурсеитов, Серик М. Нуракынов
СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПО СНИМКАМ PLANETSCOPE С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ 289

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

Leman Max, Айнура Е. Алдиярова, Ерболат Т. Кайпбаев, Айнур Н. Калмашова
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СЦЕНАРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ 304

ХРОНИКА

К 90-летнему юбилею Игоря Васильевича Северского 319

Памяти Игоря Михайловича Мальковского 322

CONTENT

SCIENTIFIC ARTICLE

Nurliza K. Yerzhanova, Zhanar O. Ozgeldinova
ASSESSING HYDROLOGICAL REGIME INSTABILITY AND HYDRAULIC STRUCTURE RELIABILITY IN THE LOWER SHU RIVER USING PROBABILISTIC–STATISTICAL METHODS 11

Aisulu A. Tursunova, Zhanat T. Salavatova, Nurila Zh. Tursyn
HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF FLOODS IN THE ERTIS RIVER BASIN 25

Bakyt T. Zhezdibayeva. Aruzhan A. Abilkadi, Akmaral B. Smagulova, Aizat E. Zhaxybayeva, Aidarbek M. Sultankulov
MONITORING OF SNOW COVER CONDITIONS IN KAZAKHSTAN AND THEIR CHANGES DURING THE WINTER SEASON 2024-2025 45

Talshyn Orazbayeva, Azamat Madibekov, Laura Ismukhanova, Aisha Madibekova, Botakoz Sultanbekova
SEASONAL DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN SOUTH-EASTERN KAZAKHSTAN 55

Vitaly K. Khlyustov, Yuri P. Demakov, Yuri G. Bezborodov
TYPOLOGY OF CALENDAR YEARS AND THERMAL REGIME DYNAMICS UNDER GLOBAL WARMING: RISK ASSESSMENT FOR ALMATY 67

Gulsezim K. Zhussupova, Daniker V. Chepashev, Dias B. Merekeyev, Elmira S. Zhilkibayeva, Dastan Amankeshuly
ASSESSMENT OF WILDFIRE DANGER IN KAZAKHSTAN USING THE FWI AND FFDI INDICES 79

Aikyn A. Nurakhmet, Amanbek Zandybay, Gulnur S. Nurakhmetova
ASSESSMENT OF THE RADIOECOLOGICAL IMPACT OF THE CONSERVED SHANTOBE URANIUM MINE ON THE KUTUNGUZ RIVER 97

Nariman Amirgaliyev, Azamat Madibekov, Laura Ismukhanova, Ainur Mussakulkyzy, Botakoz Sultanbekova, Askhat Zhadi, Aray Sultanayeva
ASSESSMENT OF SOIL COVER CONTAMINATION BY POLYCHLORINATED BIPHENYLS IN THE ZHETYSU REGION 112

Natalya V. Seraya, Gulzhan K. Daumova, Olga A. Petrova, Zhanat K. Idrisheva, Arina Polyakova, Igor Denisov
HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS AND TURBIDITY OF THE SURFACE WATERS OF THE ULBA RIVER UNDER INDUSTRIAL IMPACT 125

Berikjan Oxikbayev, Yerkin Tokpanov, Myrzabay Jetimov, Yerlan Andasbayev, Danagul Mukasheva
CHANGES IN WATER POLLUTION IN THE KARATAL RIVER DURING GLACIER SHRINKAGE IN THE SHYZHY AND KORA RIVER BASINS 142

Ravil Mukhamediev, Adilkhan Symagulov, Yan Kuchin, Alexey Terekhov, Liudmila Gorodetskaia
MAJOR SOURCES OF FINE PARTICULATE AIR POLLUTION IN FOOTHILL MEGACITY: THE CASE OF ALMATY 153

Arman B. Makhanbetov, Tulkinzhon E. Gaipov, Davlat Kh. Yuldashbek, Arnur M. Kenzhegaliev, Zhuldyz A. Dyussenova, Gulmira D. Issenova, Gulnissam O. Rvaidarova
STUDY OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF SULFUR-CONTAINING WASTE RECYCLING PRODUCTS AGAINST APPLE PESTS 167

Natalya Seraya, Gulzhan Daumova, Olga Petrova, Makpal Kaissina, Arina Polyakova, Olga Vasilyeva, Igor Denissov
MULTICOMPONENT ASSESSMENT OF POLLUTION AND ECOLOGICAL STATUS OF SURFACE WATERS OF THE BRAZHINSKY STREAM (EASTERN KAZAKHSTAN) 177

Gaukhar K. Bishimbayeva, Saule M. Nurmakova, Rustem V. Sharipov, Karlygash Zh. Bulenova, Zaken A. Iskakov, Aidana Myrzabekova, Amantay Dalbanbay, Yerbol M. Karmanov, Magzum Zh. Sadykov
MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSIS OF THE RARE EARTH POTENTIAL OF TECHNOGENIC WASTES FROM URANIUM DEPOSITS 193

Nuriya E. Aikenova, G. Murat, Guzel U. Abilova, Umbetaly K. Sarsembin, Yerik S. Merkibayev, Saule M. Nurmakova
REMOVAL OF PHENOLS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER USING MODIFIED METALLURGICAL WASTE 204

Erzhan N. Sagatbaev, Tangal T. Tursynova, Aiman B. Karabalaeva
TERRITORIAL PLANNING AS A TOOL FOR SOLVING TRANSBOUNDARY ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF THE IRTYSH RIVER BASIN 218

Ainur D. Karaneeva, Zhanat Z. Toleubekova, Zabida N. Kurmangalieva, Tolkyn K. Quanyshbek
GEODETIC SUPPORT AND PROSPECTS FOR SPECTRAL MONITORING OF CONTOUR SWALES ON SLOPING TERRITORIES OF EASTERN KAZAKHSTAN 230

Kuat Saparov, Akerke M. Nurpeisova, Aigul Yeginbayeva, Aigul Sergeyeva
TOPONYMS OF SPECIALLY PROTECTED NATURAL AND SACRED SITES OF THE KOSTANAY REGION 240

Altyn Zhanguzhina
ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FOREST FIRES ON THE FOREST FLOOR COVER OF THE FORESTS OF KOSTANAY REGION 254

Bayan S. Kerimbay, Nurzhan N. Kerimbay, Kuat M. Baimyrzayev, Laura S. Baibatyrova
GEOECOLOGICAL MONITORING OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF SEMI-ARID TERRITORY LANDSCAPES 273

Galymzhan S. Abdimanap, Tatyana V. Dedova, Larissa A. Balakay, Daniyar B. Nurseitov, Serik M. Nurakynov
SEMANTIC SEGMENTATION OF OIL-CONTAMINATED LAND FROM PLANETSCOPE IMAGERY USING NEURAL NETWORK MODELS 289

REVIEW ARTICLE

Leman Max, Ainura E. Aldiyarova, Yerbolat T. Kaipbayev, Ainur N. Kalmashova
COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO SCENARIO MODELLING OF WATER RESOURCES 304

CHRONICLE

On the 90th Anniversary of Igor Vasilievich Seversky 319

In Memory of Igor Mikhailovich Malkovsky 322

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

ШУ ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ АҒЫСЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ РЕЖИМІНІҢ ТҰРАҚСЫЗДЫҒЫ ЖӘНЕ ГИДРОТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ЫҚТИМАЛДЫҚ-СТАТИСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРДІҢ РӨЛІ

Нурлиза К. Ержанова*, Жанар О. Озгелдинова PhD

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; nur66gidro@mail.ru (НКЕ), ozgeldinova@mail.ru (ЖОО)
* Автор корреспондент: Нурлиза К. Ержанова, nur66gidro@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Гидрологиялық режим, гидротехникалық құрылымдар, гидробекет, Шу өзені, цифрлық модель, ықтималдық-статистикалық әдістер, жылдық ағын, ағынның тұрақсыздығы.

АБСТРАКТ

Мақалада Шу өзенінің төменгі ағысындағы Кіші Арна – Уланбел ауылы гидробекет учаскесінде 1967...2022 жылдар аралығында бақыланған орташа жылдық ағынның көпжылдық өзгергіштігі жан-жақты зерттелген. Зерттеудің мақсаты – жылдық ағынның статистикалық сипаттамаларын анықтау және ықтималдық-статистикалық әдістер негізінде алынған есептік параметрлерді гидротехникалық құрылымдардың сенімділігі мен пайдалану қауіпсіздігін негіздеуде қолдану мүмкіндігін бағалау. Зерттеу барысында көпжылдық бақылау деректері қалпына келтіріліп, моменттер әдісі мен ең жоғары ықтималдық әдісі негізінде статистикалық өңдеу жүргізілді. Жылдық ағынның вариация коэффициенті жоғары ($\boldsymbol{C_v}$=1,1), ал асимметрия коэффициенті оң мәнге ие (C_s=1,7) екені анықталды, бұл өзен ағынының айқын өзгермелі әрі тұрақсыз сипатын көрсетеді. Айырымдық интегралдық қисықты талдау нәтижесінде суы аз кезеңдердің ұзаққа созылуы және суы мол кезеңдердің салыстырмалы түрде қысқа әрі қарқынды сипатта болуы анықталды. Қамтамасыздық ықтималдықтары бойынша есептелген су шығындары 50% қамтамасыздықта 4,10 м³/с және 4,20 м³/с, 10 % қамтамасыздықта 15,38 м³/с және 15,60 м³/с, ал 90% қамтамасыздықта 0,47 м³/с және 0,48 м³/с мәндерін құрады. Статистикалық критерийлер бойынша гидрологиялық қатардың біртектілігі расталып, алынған есептік параметрлерді одан әрі қолданудың негізділігі көрсетілді. Зерттеу нәтижелері Шу өзенінің төменгі ағысының қарастырылып отырған учаскесіндегі гидротехникалық құрылымдарды жобалау және пайдалану кезінде есептік су шығындары мен пайдалану режимдерін негіздеуге, сол арқылы олардың сенімділігі мен пайдалану қауіпсіздігін арттыруға бағытталған ғылыми негізделген есептік дерек ретінде пайдаланылуы мүмкін.

1. КІРІСПЕ

Су ресурстары аймақтардың орнықты әлеуметтік-экономикалық дамуын айқындайтын негізгі факторлардың бірі болып табылады, әсіресе олардың тапшылығы мен аумақ бойынша біркелкі таралмауы жағдайында [1, 2]. Орталық Азияның қуаң және шөлейт аймақтарында, соның ішінде Шу өзені алабында, өзен ағынын ұтымды пайдалану, реттеу және сенімді басқару мәселелері ерекше маңызға ие [3]. Сумен жабдықтаудың тұрақтылығы ауыл шаруашылығының, суару жүйелерінің, өнеркәсіптік және коммуналдық нысандардың тиімді жұмыс істеуін, сондай-ақ гидротехникалық құрылымдардың қауіпсіз пайдаланылуын айқындайды [4, 5].

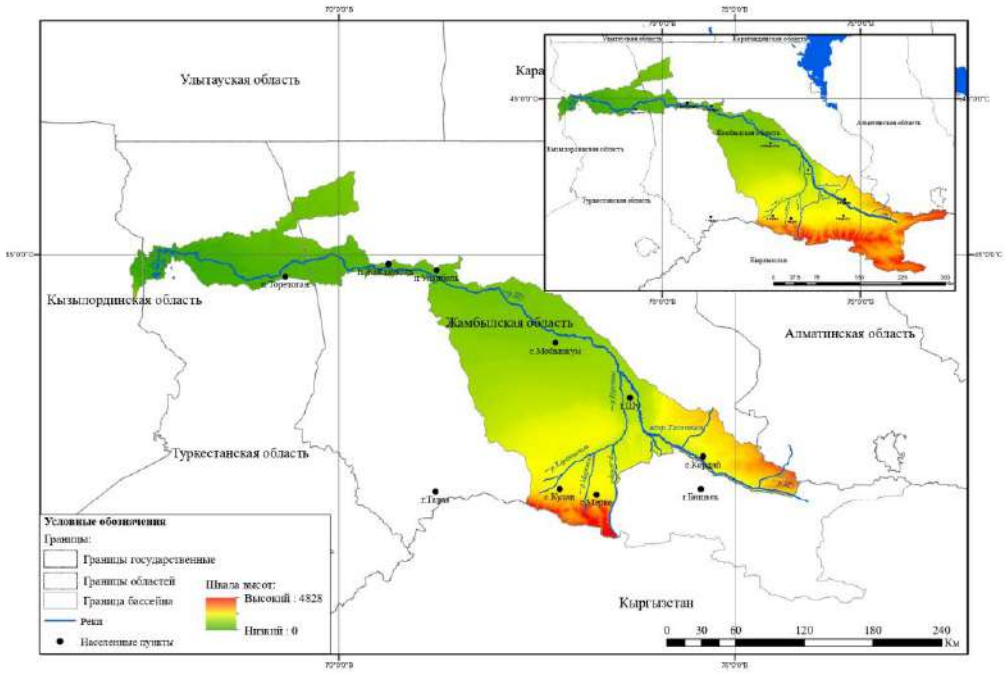
Гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін бағалау өзендердің гидрологиялық режимін талдаумен тығыз байланысты, өйткені көпжылдық жылдық ағын сипаттамалары есептік жүктемелерді, су өткізу жағдайларын және гидротехникалық нысандардың пайдалану режимдерін анықтайды [6]. Осыған байланысты өзендердің гидрологиялық сипаттамаларын, жылдық ағынның ұзақ мерзімді өзгергіштігін және ағын

Мақала жайында:
Жіберілді: 08.02.2026
Қайта қаралды: 27.02.2026
Қабылданды: 16.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Дәйексөз үшін:
Ержанова Н., Озгелдинова Ж., Шу өзенінің төменгі ағысының гидрологиялық режимінің тұрақсыздығы және гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін арттырудағы ықтималдылық-статистикалық әдістердің рөлі// Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 11-24.

қалыптасуының статистикалық ерекшеліктерін жан-жақты зерттеу маңызды болып табылады [6, 7].

Шу өзені өңірдің маңызды су артерияларының бірі болып табылады және Қазақстанның оңтүстігіндегі су шаруашылығы жүйесінде елеулі рөл атқарады. Алдыңғы зерттеулер өзен ағынының айқын көпжылдық ауытқуларын, сондай-ақ оның климаттық өзгерістер мен антропогендік әсерлерге жоғары сезімталдығын көрсетеді [8, 9]. Шу өзені алабы қуаң климаттық жағдайлармен және қар, жауын-шашын және мұздық сулары есебінен қалыптасатын қоректену түрлерінің үйлесуімен сипатталады, бұл жылдық ағынның күрделі әрі өзгермелі режимін қалыптастырады [9, 10]. Аталған ерекшеліктер Шу өзеніндегі гидротехникалық құрылымдарды жобалау және пайдалану барысында сенімді есептік әдістерді қолдану қажеттігін көрсетеді [8...10]. Шу өзені бассейнінің цифрлық моделі (сурет 1) аумақтың биіктік құрылымын, жер бедерінің әртектілігін және өзен аңғарының жалпы морфологиялық ерекшеліктерін көрсетеді. Бассейннің жоғарғы бөлігінде таулы және тауалды жер бедерінің басым болуы ағыс еңістерінің үлкен болуына және су ағынының жоғары энергиясына әкеледі, ал төменгі ағысында жазық және шөлейтті аумақтардың басым болуы ағын жылдамдығының төмендеуіне және шөгінді материалдардың аккумуляциясына жағдай жасайды. Цифрлық модель деректері өзен аңғарының кеңейген жайылмалық бөліктерін, арнаның бүйірлік даму аймақтарын және арналық деформациялар ықтималдығы жоғары учаскелерді анықтауға мүмкіндік береді. Бұл жағдайлар Шу өзеніндегі ағын қалыптасуының кеңістіктік заңдылықтарын түсіндіруге, сондай-ақ гидротехникалық құрылымдарды орналастыру және есептік қималарды таңдау кезінде бастапқы ғылыми негіз ретінде қызмет етеді.



Сурет 1. *Шу өзені бассейнінің цифрлық моделі (ЦМР)*

Өзен арнасының қазіргі морфологиялық жағдайын нақтылау үшін Google Earth сервисінің жоғары айырымдылықтағы ғарыштық суреттері қолданылды (сурет 2).

Уланбел ауылы маңындағы өзен учаскесінде арнаның айқын иректелуі, жекелеген тармақтардың қалыптасуы, жайылмалық пішіндердің дамуы және бұрынғы арна іздері байқалады. Аталған морфологиялық белгілер қарастырылып отырған учаскеде арналық үдерістердің белсенді жүретінін және өзен арнасының кеңістіктік өзгергіштігін көрсетеді. Бұл жағдайда ғарыштық сурет арналық өзгерістердің антропогендік себептерін тікелей дәлелдеу үшін емес, Шу өзенінің төменгі ағысындағы арнаның қазіргі морфологиялық

жағдайын бағалау үшін пайдаланылды. Арна процестерінің қалыптасуына табиғи арна түзуші факторлармен қатар жоғары орналасқан су шаруашылығы объектілерінің өзен ағынын реттеуіне байланысты гидрологиялық режим мен шөгінділердің өзгеруі әсер етуі мүмкін.

Сурет 2. *Шу өзенінің Уланбел ауылы маңындағы арнасының ғарыштық суреті (Google Earth)*

Уланбел ауылы маңындағы өзен учаскесінде арнаның айқын иректелуі, жекелеген тармақтардың қалыптасуы, жайылмалық пішіндердің дамуы және бұрынғы арна іздері байқалады. Аталған морфологиялық белгілер қарастырылып отырған учаскеде арналық үдерістердің белсенді жүретінін және өзен арнасының кеңістіктік өзгергіштігін көрсетеді. Бұл жағдайда ғарыштық сурет арналық өзгерістердің антропогендік себептерін тікелей дәлелдеу үшін емес, Шу өзенінің төменгі ағысындағы арнаның қазіргі морфологиялық жағдайын бағалау үшін пайдаланылды. Арна процестерінің қалыптасуына табиғи арна түзуші факторлармен қатар жоғары орналасқан су шаруашылығы объектілерінің өзен ағынын реттеуіне байланысты гидрологиялық режим мен шөгінділердің өзгеруі әсер етуі мүмкін.

Гидрологиялық зерттеулердің нәтижелері гидротехникалық құрылыс саласында ерекше маңызға ие. Бөгеттерді, су қоймаларын, гидротораптарды, каналдар мен суару жүйелерін жобалау және пайдалану кезінде есептік су шығындарын, олардың қамтамасыздық ықтималдықтарын және шекті мәндерін дәл анықтау талап етіледі [11, 12]. Жылдық ағын және оның көпжылдық өзгергіштігі құрылымдардың су өткізу қабілетін, су деңгейлерін, еңістердің тұрақтылығын және гидротехникалық нысандардың жалпы пайдалану қауіпсіздігін анықтаудың негізін құрайды [12, 13].

Соңғы онжылдықтарда өзен ағынын талдауда статистикалық әдістер гидротехникалық тәжірибеде кеңінен қолданылып келеді. Бұл әдістер су ресурстарының орташа мәндерін ғана емес, олардың өзгергіштігін, таралу асимметриясын және шектен тыс гидрологиялық режимдердің ықтималдығын бағалауға мүмкіндік береді [14, 15]. Ағынның қамтамасыздық қисықтарын талдау, вариация және асимметрия коэффициенттерін есептеу, сондай-ақ гидрологиялық қатарлардың біртектілігін тексеру инженерлік есептерде қолданылатын параметрлердің сенімділігін арттырады [15...17].

Осы зерттеу Шу өзенінің Кіші Арна гидробекеті бойынша 1967...2022 жылдар аралығындағы көпжылдық жылдық ағынды талдауға және ықтималдық-статистикалық әдістер негізінде алынған есептік сипаттамаларды гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін арттыру мақсатында қолдану мүмкіндігін бағалауға арналған. Жұмыста орташа жылдық ағын анықталып, жылдық ағынның негізгі гидрологиялық сипаттамалары есептелді, оның ұзақ мерзімді өзгергіштігі талданды және есептік қамтамасыздық қисықтары тұрғызылды [8, 9]. Сонымен қатар статистикалық критерийлерді қолдану арқылы гидрологиялық қатардың біртектілігі тексеріліп, оны кейінгі ықтималдық-статистикалық есептеулерде қолданудың негізділігі бағаланды [16...18].

Қазақстан аумағында Шу өзенінің нақты айқындалған сағасы жоқ және оның ағынының едәуір бөлігі Мойынқұм құмдарының таралу аймағында жоғалады. Осыған байланысты зерттеу барысында Кіші Арна гидробекеті есептік учаске ретінде қабылданды. Бұл учаске төменгі ағыстың қарастырылып отырған бөлігіндегі ағын трансформациясының ерекшеліктерін сипаттауға мүмкіндік береді.

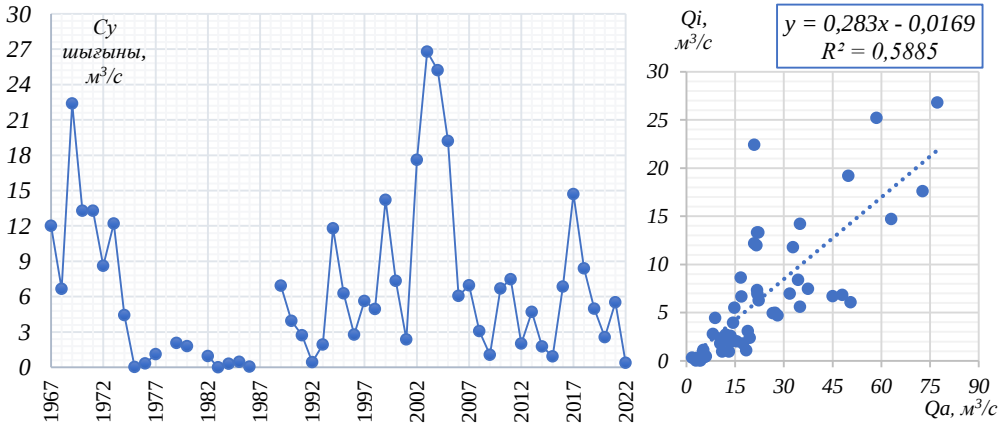
Кіші Арна гидробекеті учаскесін таңдау бақылаулардың ұзақ мерзімділігімен және сенімділігімен, сондай-ақ Шу өзенінің төменгі ағысының қарастырылып отырған учаскесіндегі ағынның көпжылдық өзгергіштігін сипаттау мүмкіндігімен негізделеді [8, 19]. Бұл аталған учаскедегі ағынның көпжылдық өзгергіштігін гидротехникалық құрылымдардың сенімділігі тұрғысынан бағалауға мүмкіндік береді [19].

Зерттеудің ғылыми маңыздылығы Шу өзенінің Кіші Арна гидробекеті учаскесіндегі жылдық ағынның көпжылдық өзгеру заңдылықтарын анықтаумен және гидрологиялық режимнің тұрақсыздығы жағдайында ықтималдық-статистикалық әдістерді гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін бағалау үшін қолдануды негіздеумен анықталады. Зерттеудің практикалық маңызы алынған есептік сипаттамаларды гидротехникалық нысандарды жобалау, пайдалану және олардың қауіпсіздігін бағалау барысында, сондай-ақ су ресурстарын жоспарлау және инженерлік шешімдерді негіздеу кезінде қолдану мүмкіндігімен сипатталады.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеудің әдістемелік негізі Шу өзенінің Кіші Арна гидробекеті учаскесіндегі 1967...2022 жылдар аралығындағы орташа жылдық ағынның көпжылдық қатарларын кешенді статистикалық өңдеуге негізделген. Жүргізілген талдау жылдық ағынның таралуының негізгі статистикалық сипаттамаларын анықтауға, оның уақыт бойынша өзгергіштігін бағалауға, сондай-ақ гидротехникалық құрылымдарды жобалау және су ресурстарын жоспарлау үшін қажетті теориялық және эмпирикалық қамтамасыздық қисықтарын тұрғызуға бағытталған (кесте 1).

Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы гидробекеті учаскесі бойынша орташа жылдық су шығындарының көпжылдық қатары 1967...2022 жылдар аралығында талданды (сурет 3). Зерттелетін қатардың уақыт бойынша өзгергіштігін бағалау айдаланылды. Зерттеудің негізгі статистикалық талдауы Кіші Арна – Уланбел ауылы гидробекетінің 1967...2022 жылдардағы қалпына келтірілген орташа жылдық ағын қатары бойынша жүргізілді. Бұл учаскені таңдау екі қиманың бір алапта орналасуымен, гидрологиялық режимдерінің ұқсастығымен және бақылау қатарларының ұзақ әрі сенімді болуымен негізделді. Қысқа бақылау қатарын ұзақ мерзімді қатарға келтіру мақсатында зерттелетін өзеннің (Q_i) және өзен-аналогтың (Q_a) орташа жылдық су шығындары пайдаланылды.



Сурет 3. *Шу өзенінің орташа жылдық су шығындары (Кіші Арна – Уланбел ауылы, 1967...2022 жж.) және олардың өзен-аналогпен салыстырмалы хронологиялық өзгерісі*

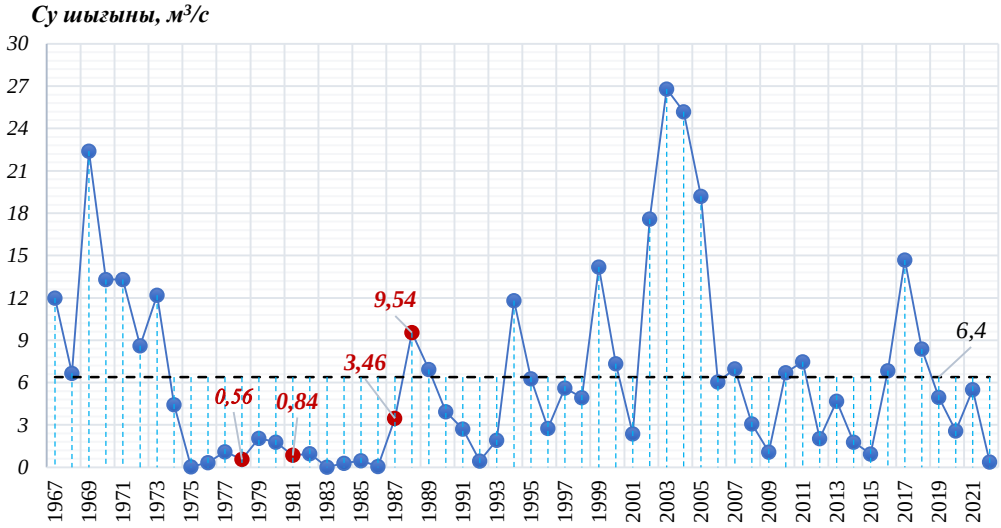
Кесте 1

Негізгі қолданылған статистикалық әдістер [20]

1	**Моменттер әдісі**	
1)	Ағынның модульдік коэффициенті келесі өрнекпен анықталады:	$k_i = Q_i/Q_{\text{орташа}}$ (1) мұнда Q_i - жылдағы орташа жылдық су шығыны, $Q_{\text{орташа}}$ - көпжылдық орташа жылдық су шығыны
2)	Жылдық ағынның эмпирикалық қамтамасыздық ықтималдығы орташа жылдық су шығындарының кему ретімен орналасқан қатарын пайдалана отырып есептелді:	$P = m/n + 1 * 100\%$ (2) мұнда m – ағын мәнінің кему ретімен алынған реттік нөмірі, n – бақылау қатарының ұзындығы
3)	Есептеулердің дұрыстығы келесі шарттар арқылы тексерілді:	$\sum K_i \approx n; \sum(K_i - 1) \approx 0$ (3) мұндағы рұқсат етілген ең жоғарғы қателік 0,3…0,5%-дан аспауы тиіс
4)	Вариация (C_v) және асимметрия (C_s) коэффициенттері есептелген:	$\widetilde{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(K_i-1)}{n-1}}$ (4) $\widetilde{C}_s = \frac{n\cdot\sum_{i=1}^{n}(K_i-1)^3}{(n-1)\cdot(n-2)\cdot\widetilde{C}_v^3}$ (5)
5)	Бақылау қатарының жеткіліктілігі салыстырмалы қателіктер арқылы бағаланды:	$\varepsilon_Q = \frac{C_v}{\sqrt{n}}\cdot 100\%$ (6) $\varepsilon_{C_v} = \sqrt{\frac{1+C_v^1}{2\cdot n}}\cdot 100\%$ (7)
6)	Қатардағы көршілес мәндер арасындағы автокорреляция келесі формуламен есептелді:	$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1}(Q_i-\bar{Q}_1)\cdot(Q_{i+1}-\bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Q_i-\bar{Q}_1)^2\cdot\sum_{i=1}^{n-1}(Q_{i+1}-\bar{Q}_2)^2}}$ (8)
2	**Максималды ықтималдық әдісі**	
1)	Статистика λ_2:	$\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} lglg\ K_i}{n-1}$ (9)
2)	Статистикаλ_3:	$\lambda_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i\cdot lglg\ K_i}{n-1}$ (10)

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша 1967...2022 жылдар аралығындағы қалпына келтірілген орташа жылдық су шығындары негізінде өзен ағынының уақыт бойынша өзгеру ерекшеліктері мен көпжылдық заңдылықтарына талдау жүргізілді (сурет 4).

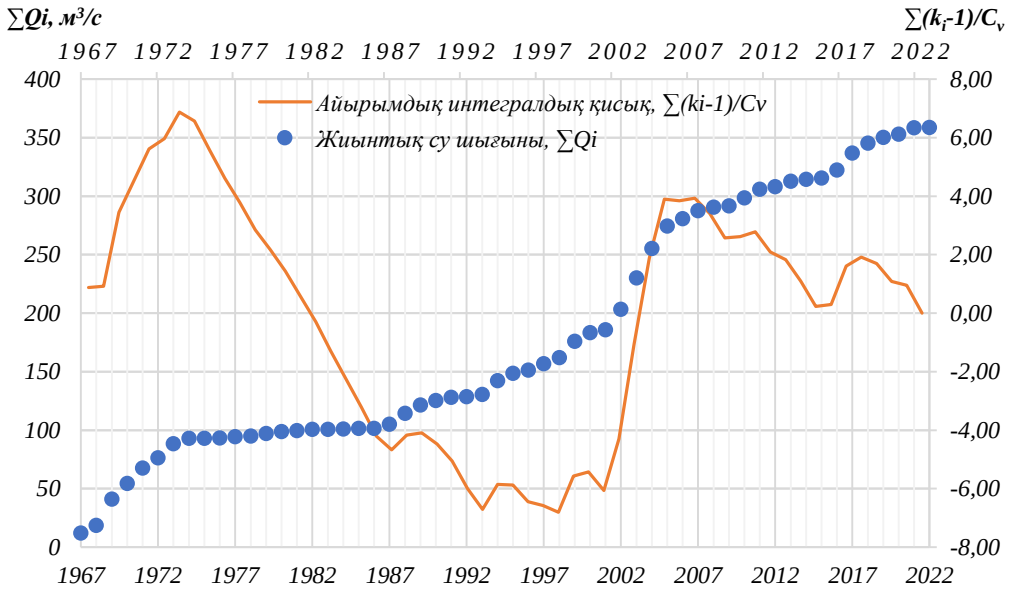


Сурет 4. *Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел учаскесі бойынша қалпына келтірілген орташа жылдық су шығындары (1967...2022 жж.)*

Талдау нәтижелері зерттелетін учаскеде өзен ағынының айқын тұрақсыз әрі жоғары өзгергіш сипатта екенін көрсетті. Хронологиялық графикті талдау орташа жылдық су шығындарының кең ауқымда ауытқитынын дәлелдейді. Қарастырылып

отырған кезеңде ең төменгі орташа жылдық су шығыны 0,018 м³/с-қа дейін төмендеген болса, ең жоғары мәні 26,8 м³/с-қа жеткен. Мұндай үлкен айырмашылық Шу өзенінің төменгі ағысына тән қуаң климаттық жағдайлармен, өзен ағынының қарқынды антропогендік реттелуімен және су шаруашылық жүйесіндегі қайта бөліну процестерімен түсіндіріледі. Хронологиялық қатардан 1974...1987-жылдар аралығында және сондай-ақ келесі 1990...1993, 1996...1998, 2001, 2008...2009, 2012...2015, 2019...2022 жылдар аралығында ұзаққа созылған төмен сулы кезеңдердің байқалатыны анықталды. Бұл кезеңдерде орташа жылдық су шығындарының көпжылдық орташа мәннен айтарлықтай төмен болуы өзен ағынының тапшылығын көрсетеді. Керісінше, 1969...1971, 1999, 2002...2005 жылдары және 2017 жылы салыстырмалы түрде суы мол жылдар байқалып, ағынның уақытша күшеюі тіркелген.

Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша қалпына келтірілген орташа жылдық су шығындары негізінде жиынтық су шығыны $\boldsymbol{\Sigma Q_i}$ және айырымдық интегралдық қисық (АИҚ) $\boldsymbol{\Sigma(k_i-1)/C_v}$ тұрғызылды (сурет 5). Айырымдық интегралдық қисық өзен ағынының көпжылдық өзгеру құрылымын және суы мол мен суы аз кезеңдердің ұзақ мерзімді алмасу сипатын бағалау үшін пайдаланылды. АИҚ-тың бастапқы бөлігінде (1967...1973 жж.) қисықтың салыстырмалы түрде баяу өсуі байқалады, бұл кезеңде жылдық ағынның орташа көпжылдық мәндерге жуық болғанын көрсетеді. Алайда 1974 жылдан бастап АИҚ-тың айқын төмен бағытталуы байқалады, бұл 1974...1987 жылдар аралығында ұзаққа созылған суы аз кезеңнің қалыптасқанын көрсетеді. Аталған кезеңде модульдік коэффициенттердің ($\boldsymbol{k_i}$) көпшілігі 1-ден едәуір төмен болып, ағын тапшылығының жинақталуы байқалады. АИҚ-тың ең төмен мәндері 1983...1986 жылдарға сәйкес келеді, бұл жылдары орташа жылдық су шығындарының өте төмен деңгейде болғаны байқалады. Бұл кезең қарастырылып отырған учаскедегі суы аз кезеңдердің бірі ретінде сипатталады. 1988...1990 жылдары АИҚ-та қысқа мерзімді оң бағыттағы өзгеріс байқалғанымен, ол ұзақ мерзімді су тапшылығы кезеңінің жалпы сипатын өзгерткен жоқ. 1991...1993 жылдар аралығында қисықтың қайтадан төмен бағыттауы жалғасып, суы аз кезеңнің жалғасқанын көрсетеді. Бұл жағдай қарастырылып отырған кезеңдегі өзен ағынының айқын көпжылдық өзгергіштігін көрсетеді. Су ағынының айтарлықтай артуы 1999 жылдан бастап байқалады. Әсіресе 2002...2005 жылдары АИҚ-тың күрт жоғары бағытталуы байқалып, бұл кезең суы мол жылдар тізбегі ретінде сипатталады.



Сурет 5. *Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша жиынтық су шығыны және айырымдық интегралдық қисық*

Аталған уақытта модульдік коэффициенттердің жоғары мәндері ($\boldsymbol{k_i}$ > 2,0) тіркеліп, жылдық ағын көлемінің көпжылдық орташа мәннен бірнеше есе жоғары болғанын көрсетеді. Бұл құбылыс гидрометеорологиялық жағдайлардың қолайлылығымен қатар, өзен ағынының реттелу ерекшеліктерімен де байланысты болуы мүмкін.

2006...2015 жылдар аралығында АИҚ-тың салыстырмалы түрде тұрақтануы байқалады, алайда бұл кезеңде де жекелеген жылдарда теріс ауытқулар тіркеледі. 2016...2018 жылдары АИҚ-тың қайтадан жоғары бағытталуы байқалса, 2019...2022 жылдары қисықтың төмендеу үрдісі орын алады. 2019...2022 жылдары АИҚ-тың төмендеу үрдісі байқалып, осы кезеңдегі ағынның салыстырмалы төмендеуін көрсетеді. АИҚ-тың соңғы нүктесіндегі жинақталған ауытқудың нөлге жақындамауы қарастырылған кезең соңында көпжылдық нормадан жинақталған ауытқудың сақталғанын көрсетеді. Анықталған көпжылдық өзгергіштік су ресурстарын жоспарлау және гидротехникалық құрылымдарды пайдалану кезінде ағынның ұзақ мерзімді ауытқуларын ескеру қажеттігін көрсетеді. Жалпы алғанда, АИҚ талдауы қарастырылған кезеңде өзен ағынының жоғары көпжылдық өзгергіштігін және суы мол мен суы аз кезеңдердің алмасуын көрсетеді. Суы аз кезеңдердің ұзақтығы мен суы мол кезеңдердің салыстырмалы түрде қысқа әрі қарқынды болуы есептік су шығындарын анықтауда ықтималдық-статистикалық әдістерді қолданудың қажеттілігін негіздейді. Алынған нәтижелер Шу өзеніндегі гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін бағалау және су ресурстарын басқару кезінде ағынның көпжылдық өзгергіштігін ескеру үшін бастапқы ғылыми негіз болып табылады.

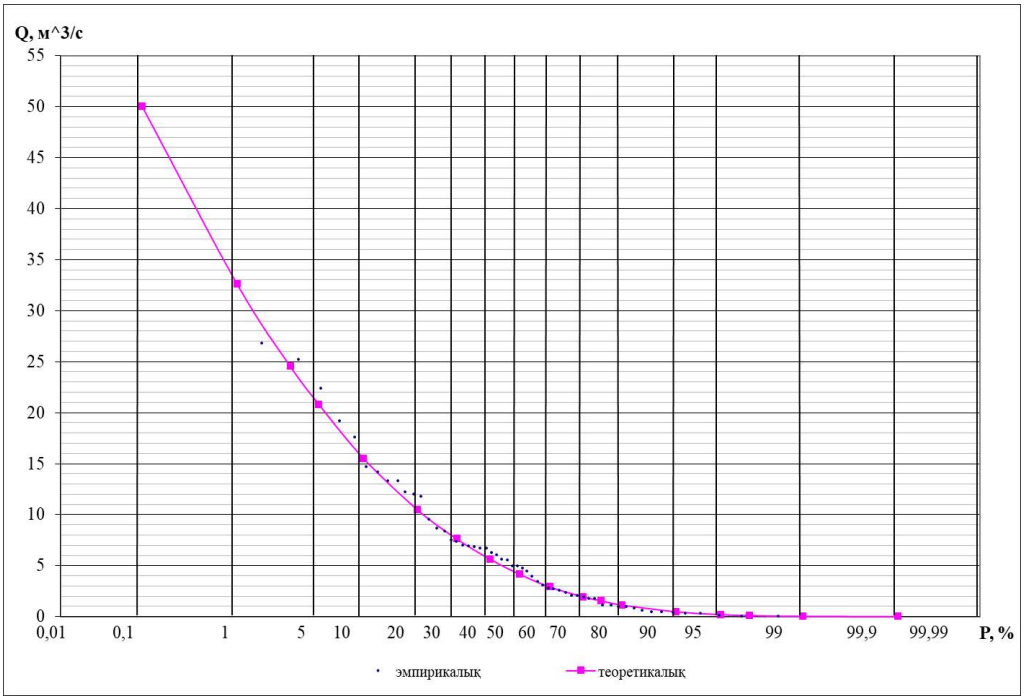
Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша орташа жылдық су шығындарының көпжылдық бақылау қатарының біртектілігі Стьюдент және Фишер критерийлері негізінде бағаланды. Талдау барысында гидрологиялық қатар шартты түрде екі кезеңге (1967...1994 және 1995...2022 жж.) бөлініп, олардың орташа мәндері мен дисперсиялары салыстырылды. Есептеу нәтижелері бойынша Стьюдент критерийінің есептік мәні $\boldsymbol{t} = -0{,}4122$ болып, сенімділік деңгейі α = 0,05 кезінде кестелік мәннен ($\boldsymbol{t}_{\text{табл}} = 2{,}005$) аспайтыны анықталды, бұл орташа жылдық су шығындары арасындағы айырмашылықтың статистикалық тұрғыдан мәнсіз екенін көрсетеді. Сонымен қатар, Фишер критерийі бойынша алынған $\boldsymbol{F} = 0{,}66$ мәні кестелік $\boldsymbol{F}_{\text{табл}} = 1{,}93$-тен төмен болып, екі кезеңдегі дисперсиялардың өзара айырмашылығы да статистикалық тұрғыдан маңызды емес екені дәлелденді. Жүргізілген талдау нәтижелері 1967...1994 және 1995...2022 жылдар кезеңдері арасында орташа мән мен дисперсия бойынша статистикалық маңызды айырмашылық анықталмағанын көрсетеді. Осылайша, қалпына келтірілген деректерді қоса алғанда, алынған гидрологиялық қатар қолданылған Стьюдент және Фишер критерийлері бойынша біртекті деп қабылданды және оны ықтималдық-статистикалық әдістермен әрі қарай өңдеуге, есептік қамтамасыздық қисықтарын тұрғызуға, сондай-ақ гидротехникалық құрылымдардың сенімділігі мен пайдалану қауіпсіздігін бағалауда бастапқы дерек ретінде қолдануға болады.

1. Моменттер әдісі

Шу өзенінің Кіші Арна учаскесінде орташа жылдық ағындарды зерттеу үшін моменттер әдісі қолданылды, бұл әдіс ағынның өзгергіштігін (вариациясын) және қисықтық сипатын (асимметриясын) бағалауға мүмкіндік береді. Есептеулердің бастапқы кезеңінде ағын мәндері модульдік коэффициент $\boldsymbol{k_i} = \boldsymbol{Q_i}/\boldsymbol{Q}_{\text{орташа}}$ арқылы қалыпқа келтірілді. Эмпирикалық кесте бойынша орташа ағын $\boldsymbol{Q}_{\text{орташа}} = 6{,}41\ м^3/с$ құрады, ал модульдік коэффициенттердің квадраттық және кубтық шамалары сәйкесінше 56,877 және 81,182 болып есептелді. Вариацияның $\widetilde{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{v}}$=1,0 және асимметрияның $\widetilde{\boldsymbol{C}}_{\boldsymbol{s}}$=1,5 ығысу коэффициенттерінің мәндері анықталды. Бұл көрсеткіштер ағынның айтарлықтай вариативті және оң асимметриялы екенін білдіреді: яғни жоғары ағындар жиі кездеседі, ал төмен ағындар сирек. Қатардың жеткіліктілігі $\boldsymbol{\varepsilon_Q}$ =9,38 %<5−10 % және $\boldsymbol{\varepsilon_{C_v}}$ =13,36 %<10−15 % көрсеткіштері арқылы расталды, демек деректер ұзақ мерзімді және сенімді болып табылады, оларды нормалар мен есептік ағындарды анықтауда

қолдануға болады. Коэффициенттерді түзету арқылы үшпараметрлі гамма- және биномиальды үлестірімдер үшін есептелген коэффициенттер: C_v =1,1, C_s =1,7, ал олардың қатынасы C_s/C_v =2, бұл ағынның орташа және максималды мәндерінің арасындағы өзара байланысын көрсетеді. Автокорреляция коэффициенті *r(1)=0,60* қатардың өзара тәуелділігін білдіреді, яғни бір жылдағы ағын келесі жылдағы ағынға айтарлықтай әсер етеді.

Эмпирикалық қамтамасыздық қисығы және теориялық қисық салыстырмалы түрде келесі мәндерді көрсетті: 50 % қамтамасыздықта орташа ағын Q_p =4,10 $м^3/с$, 10 % қамтамасыздықта жоғары ағын Q_p =15,38 $м^3/с$, ал 90 % қамтамасыздықта төмен ағын Q_p=0,47 $м^3/с$. Бұл талдау Шу өзені ағынының кең ауқымда өзгеретінін және суы мол әрі суы аз жағдайлар арасындағы айырмашылықтың елеулі екенін көрсетеді. Есептелген ағынның модульдік коэффициенттері k_i мен эмпирикалық қамтамасыздық ықтималдықтары Р негізінде ағынның эмпирикалық қамтамасыздық қисығы тұрғызылды (сурет 6). Теориялық қамтамасыздық қисығы үш параметрлі гамма-таралу және биномиалдық қамтамасыздық қисығының ординаталары бойынша, C_s/C_v=2 қатынасы ескеріле отырып тұрғызылды. Эмпирикалық және теориялық қисықтарды салыстыру есептік су шығындарын әртүрлі қамтамасыздық деңгейлерінде бағалауға және суы мол әрі суы аз жағдайларға сәйкес келетін ағын шамаларын анықтауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер су ресурстарын жоспарлау, ағынды реттеу және гидротехникалық құрылымдардың есептік параметрлерін негіздеу үшін бастапқы дерек ретінде пайдаланылуы мүмкін.



Сурет 6. *Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесіндегі орташа жылдық ағынның қамтамасыздық қисығы (1967...2022 жж., моменттер әдісі)*

Қамтамасыздық ықтималдық қисығының есептелген ординаталары және әртүрлі қамтамасыздық деңгейлеріне сәйкес келетін ағын шығындарының мәндері 2-кестеде келтірілген. Бұл деректер сирек кездесетін суы мол жылдардан бастап аса төмен сулы кезеңдерге дейінгі ықтималдықтардың кең ауқымында өзен ағынының шамасын сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер гидротехникалық құрылымдарды жобалау және су ресурстарын жоспарлау кезінде практикалық маңызға ие.

Кесте 2

1967...2022 жылдар аралығындағы Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша ағынның теориялық қамтамасыздық қисығының мәндері

Теориялық қамтамасыздық қисығының мәндері									
Ағынның қамтамасыздығы, P,%	0,1	1	3	5	10	20	30	40	50
Модульдік коэффициент, K_p	7,750	5,050	3,800	3,220	2,400	1,620	1,180	0,870	0,640
Өзен ағынының шығыны, Q_p, м^3/с	49,7	32,4	24,3	20,6	15,4	10,4	7,6	5,6	4,1
Ағынның қамтамасыздығы, P, %	60	70	75	80	90	95	97	99	99,9
Модульдік коэффициент, K_p	0,450	0,300	0,241	0,175	0,074	0,030	0,016	0,005	0,000
Өзен ағынының шығыны, Q_p, м^3/с	2,88	1,92	1,54	1,12	0,47	0,19	0,10	0,03	0,00

Қорытындылай келе, моменттер әдісі ағынның вариативтілігі мен асимметриясын сандық бағалауға мүмкіндік беріп, гидрологиялық сипаттамаларды дәл анықтауға жол ашады. Ағынның C_v=*1,1* және C_s=*1,7* көрсеткіштері оның жоғары өзгергіштігін және оң асимметриясын айқындайды, бұл гидротехникалық жобалау мен су ресурстарын реттеуде шешуші мәнге ие.

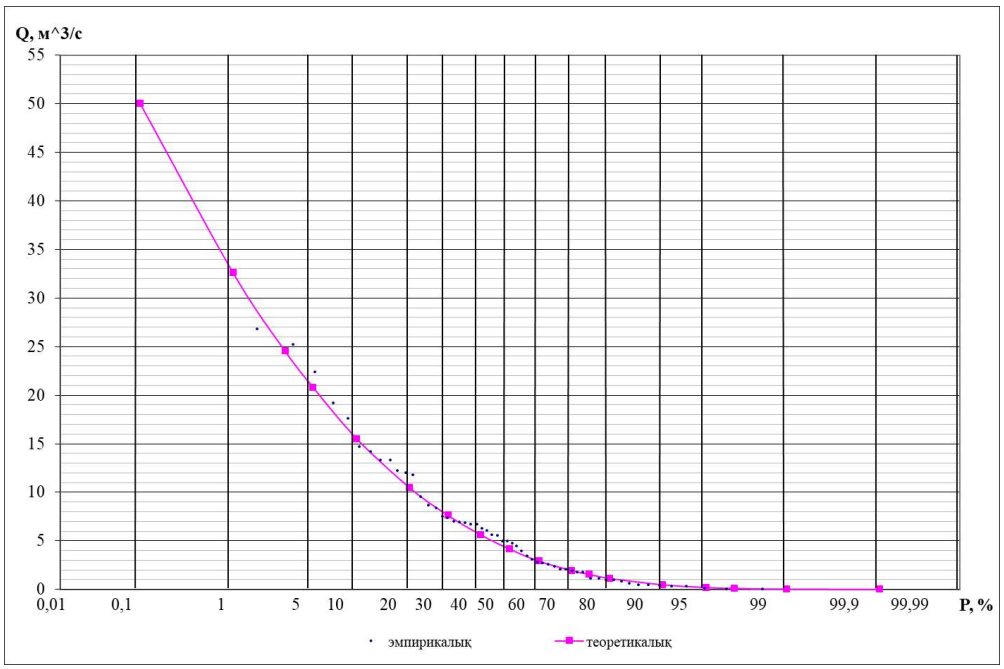
2. Максималды ықтималдық әдісі бойынша талдау

Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша жылдық ағынның берілген қамтамасыздығын анықтау үшін максималды ықтималдық әдісі қолданылды. Бұл әдіс көпжылдық бақылау деректерінің статистикалық заңдылықтарын неғұрлым дәл сипаттауға және ағынның ықтималдық сипаттамаларын сенімді бағалауға мүмкіндік береді. Есептеулер 1967...2022 жылдар аралығындағы орташа жылдық су шығындары негізінде жүргізілді, бақылау қатарының ұзындығы n = 56 жылды құрайды, бұл статистикалық тұрғыдан жеткілікті болып саналады.

Алдымен орташа жылдық су шығындары кему ретімен орналастырылып, әр жыл үшін ағынның модульдік коэффициенттері k_i есептелді. Осы мәндер негізінде максималды ықтималдық әдісіне сәйкес λ_2 және λ_3 статистикалық көрсеткіштері анықталды. Есептеу нәтижесінде λ_2 =−0,337, ал λ_3 =0,197 мәндерін қабылдады. Бұл көрсеткіштер жылдық ағын қатарында асимметрияның бар екенін және ағынның таралуы симметриялы емес екенін көрсетеді.

Алынған λ_2 және λ_3 статистикалары негізінде ағынның теориялық қамтамасыздық қисығын тұрғызуға қажетті параметрлер анықталды. Теориялық қисық үш параметрлі гамма-таралымға сәйкес есептеліп, эмпирикалық қамтамасыздық мәндерімен салыстырылды. Салыстыру нәтижелері теориялық және эмпирикалық қисықтардың жалпы түрде бір-біріне жақын екенін көрсетті, бұл таңдалған теориялық үлестірімнің қарастырылып отырған гидрологиялық қатарға сәйкес келетінін көрсетеді.

Есептелген теориялық мәндер бойынша қамтамасыздыққа сәйкес келетін жылдық су шығыны суы аз жылдарды сипаттайды және өзен ағынының төмен мәндерін бағалауға мүмкіндік береді. Мұндай қамтамасыздық деңгейіндегі ағын мәндері су ресурстарын жоспарлау, суармалы егіншілікті ұйымдастыру, сондай-ақ гидротехникалық құрылымдардың жұмыс режимін негіздеу үшін ерекше маңызға ие. Есептелген ағынның модульдік коэффициенттері k_i мен эмпирикалық қамтамасыздық ықтималдықтары P негізінде ағынның эмпирикалық қамтамасыздық қисығы тұрғызылды (сурет 7).



Сурет 7. *Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесіндегі орташа жылдық ағынның қамтамасыздық қисығы (1967...2022 жж.)*

Қамтамасыздық ықтималдық қисығының есептелген ординаталары және әртүрлі қамтамасыздық деңгейлеріне сәйкес келетін ағын шығындарының мәндері 3-кестеде келтірілген. Бұл деректер сирек кездесетін суы мол жылдардан бастап аса төмен сулы кезеңдерге дейінгі ықтималдықтарының кең ауқымында өзен ағынының шамасын сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер гидротехникалық құрылымдарды жобалау және су ресурстарын жоспарлау үшін практикалық маңызға ие.

Кесте 3

1967...2022 жылдар аралығындағы Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесі бойынша ағынның теориялық қамтамасыздық қисығының мәндері

Теориялық қамтамасыздық қисығының мәндері									
Ағынның қамтамасыздығы, P,%	0,1	1	3	5	10	20	30	40	50
Модульдік коэффициент, K_p	7,750	5,050	3,800	3,220	2,400	1,620	1,180	0,870	0,640
Өзен ағынының шығыны, Q_p, м^3/с	50,3	32,8	24,7	20,9	15,6	10,5	7,7	5,6	4,2
Ағынның қамтамасыздығы, P,%	60	70	75	80	90	95	97	99	99,9
Модульдік коэффициент, K_p	0,450	0,300	0,241	0,175	0,074	0,030	0,016	0,005	0,000
Өзен ағынының шығыны, Q_p, м^3/с	2,92	1,95	1,56	1,14	0,48	0,19	0,10	0,03	0,00

Осылайша, ең үлкен ықтималдық әдісі Шу өзенінің Кіші Арна учаскесіндегі жылдық ағынның ықтималдық сипаттамаларын жан-жақты бағалауға мүмкіндік беріп, ағынның төмен және жоғары экстремалдық мәндерін сенімді түрде анықтауға жағдай жасайды. Алынған нәтижелер су ресурстарын тиімді басқару мен ағынды реттеу мәселелерін ғылыми тұрғыда негіздеуге пайдаланылуы мүмкін.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу Шу өзенінің Кіші Арна – Уланбел ауылы учаскесіндегі жылдық ағынның жоғары дәрежеде өзгермелі және тұрақсыз гидрологиялық режимімен сипатталатынын көрсетті. 1967...2022 жылдар аралығындағы көпжылдық деректерді талдау нәтижесінде ағынның ең төменгі орташа жылдық мәні 0,018 м³/с-қа дейін төмендеп, ал ең жоғары мәні 26,8 м³/с-қа дейін жететіні анықталды. Мұндай кең ауқымды

ауытқулар қарастырылып отырған учаскедегі ағынның жоғары көпжылдық өзгергіштігін сипаттайды және табиғи-климаттық жағдайлар мен өзен ағынын реттеу әсері жағдайында қалыптасады.

Айырымдық интегралдық қисықты талдау суы аз кезеңдердің (1974...1987 және 1991...1998 жж.) ұзаққа созылуын және суы мол жылдардың (2002...2005 жж.) салыстырмалы түрде қысқа әрі қарқынды сипатта болуын көрсетті. Бұл нәтижелер қарастырылған кезеңдегі өзен ағынының айқын көпжылдық өзгергіштігін және әртүрлі сулылық кезеңдерінің алмасуын көрсетеді. Стьюдент және Фишер критерийлері бойынша жүргізілген талдау жылдық ағын қатарының біртектілігін растады, бұл қалпына келтірілген деректерді қоса алғанда, алынған гидрологиялық қатарды есептік мақсатта қолдануға мүмкіндік береді.

Моменттер әдісі арқылы анықталған вариация коэффициентінің (C_v=1,1) және оң асимметрия коэффициентінің C_s =1,7) жоғары мәндері жылдық ағынның елеулі өзгергіштігін және оның таралуының айқын асимметриялы сипатын көрсетті. Қамтамасыздық ықтималдықтары бойынша есептелген су шығындары гидротехникалық құрылымдарды жобалау кезінде су өткізу қабілетін, қауіпсіздік деңгейін және пайдалану режимдерін негіздеу үшін маңызды. Максималды ықтималдық әдісі бойынша алынған нәтижелер төмен және жоғары ағынды жылдарға сәйкес келетін есептік су шығындарын бағалауға мүмкіндік берді.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Шу өзенінің төменгі ағысының қарастырылып отырған учаскесіндегі гидрологиялық режимнің тұрақсыздығы жағдайында су ресурстарын басқару және гидротехникалық құрылымдардың сенімділігін арттыру үшін ықтималдық-статистикалық әдістерді қолданудың маңыздылығын көрсетеді. Бұл әдістер әртүрлі қамтамасыздық деңгейлеріне сәйкес келетін есептік су шығындарын анықтауға және гидротехникалық құрылымдардың есептік параметрлері мен пайдалану режимдерін негіздеуге мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері өңірлік су шаруашылығы жүйесін жоспарлау және су ресурстарының тапшылығы жағдайында тиімді басқару үшін ғылыми негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар «Казгидромет» РМК дереккөздерден алды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – ЕНК; Деректерді басқару – ЕНК; Ресми талдау – ЕНК; Әдістеме – ЕНК; Бағдарламалық қамтамасыз ету – ЕНК; Қадағалау – ЕНК; Визуализация – ОЖО; Бастапқы жобаны жазу – ЕНК; Шолу жазу және редакциялау – ЕНК.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Bai B., Huang Q., Wang P., Liu S., Zhang Y., Wang T., Pozdniakov S.P., Frolova N.L., Yu, J. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain // Water, – 2023. – Vol. 15. – P.2678. https://doi.org/10.3390/w15152678
2. Yang Y., Yang L., Villarini G., Zhao F., Huang D., Vecchi G.A., Wang Q., Sun Y., Tian F. Synchronization of global peak river discharge since the 1980 // Nat. Clim. Chang. – 2025. – Vol. 15. – P.1084–1090. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02427-6
3. Seyam M., Othman F. Long-term variation analysis of a tropical river's annual streamflow regime over a 50-year period // Theor. Appl. Climatol, – 2014. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1225-9
4. Hansford M.R., Plink-Björklund P., Jones E.R. Global quantitative analyses of river discharge variability and hydrograph shape with respect to climate types // Earth-Sci. Rev., – 2020. – Vol. 15. – P.102977. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102977
5. Aryal A., Shrestha M., Aryal Sh., Upadhyay S., Maharjan M. Spatio-temporal variability of streamflow in major and medium rivers of Nepal // J. Hydrol.: Reg. Stud., – 2023. – P.101590. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101590
6. Pekárová P., Halmová D., Mitková V.B., Poórová J., Blaškovičová L., Pekár J., Leščešen I., Bajtek Z. Temporal variability of average and low flows in Slovak rivers: A 90-year perspective // J. Hydrol.: Reg. Stud., – 2025. – P.102560. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102560
7. Morovati K, Zhang K., Shi L., Pokhrel Ya., Wu M., Someth P., Ly S., Tian F. On the cause of large daily river flow fluctuations in the Mekong River // Hydrol. Earth Syst. Sci., – 2024. – Vol. 28. – P.5133–5147. https://doi.org/10.5194/hess-28-5133-2024
8. Kaliyeva K., Punys P., Zhaparkulova Y. The impact of climate change on hydrological regime of the transboundary River Shu Basin (Kazakhstan–Kyrgyzstan): forecast for 2050 // Water, – 2021. – Vol. 13(20). – P.2800. https://doi.org/10.3390/w13202800
9. Mustafayev Z.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M. Climatic changes in the basin of the transboundary shu river // SERIÂ AGRARNYH NAUK, – 2019. – Vol. 1. – P.104. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-68-5-68-76

10. Tazhiyev S., Murtazin Y., Rakhimova V., Rakhmetov I., Adenova D., Koshpanova K., Sotnikov Y., Abdizhalel M., Akylbayeva A., Yerezhep D. Applied Hydrogeological Assessment and GIS-Based Modeling of Transboundary Aquifers in the Shu River Basin // Water, – 2025. – Vol. 17(16). – P.2476. https://doi.org/10.3390/w17162476
11. Ivancic T.J., Shaw S.B. Examining why trends in very heavy precipitation should not be mistaken for trends in very high river discharge // Climatic Change. – 2015. – Vol. 133. – P. 681-693. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1476-1
12. Milly P.C., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. Stationarity is dead: Whither water management? // Science, – 2008. – Vol. 319. – P. 573-574. https://doi.org/10.1126/science.1151915
13. Kundzewicz Z.W., Robson A. Change detection in hydrological records—A review of the methodology // Hydrol. Sci. J., – 2004. – Vol. 49. – P. 7-19. https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.44369
14. Shi X., Qin T., Nie H., Weng B., He S. Changes in major global river discharges directed into the ocean // International journal of environmental research and public health. – 2019. – Vol. 16. – P. 1469. https://doi.org/10.3390/ijerph16081469
15. Vorosmarty C.J. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth // Science. – 2000. – Vol. 289. – P. 284-288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284
16. Haddeland I. Global water resources affected by human interventions and climate change // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111. – P. 3251-3256. https://doi.org/10.1073/pnas.1222475110
17. Didovets I., Lobanova A., Krysanova V., Menz C., Babagalieva Z., Nurbatsina A., Hattermann F.F. Central Asian Rivers under Climate Change: Impacts assessment in eight representative catchments // Journal of Hydrology: Regional Studies. – 2021. – No.34. – P.100779. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779
18. Сенников М.Н., Ержанова Н.К. Совершенствование управления трансграничными водными ресурсами по Шу-Таласскому бассейну Республики Казахстан // Материалы Международной конференции СВО ВЕКЦА «Проблемы управления речными бассейнами в условиях изменения климата» 18-19 мая 2017 года, г.Москва, РФ, сб. научн.тр. вып. 10. НИЦ МКВК, 2017.- Ташкент, - С.89-95
19. Ержанова Н.К., Сенников М.Н. Трансграничное сотрудничество в сфере управления рисками паводков // Международная научно-практическая конференция «Теоретические и прикладные проблемы географии», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2024. – Астана, - С.244-248
20. МСП 3.04-101-2005. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Астана, 2005.

REFERENCES

1. Bai B., Huang Q., Wang P., Liu S., Zhang Y., Wang T., Pozdniakov S.P., Frolova N.L., Yu, J. Long-Term Variability of the Hydrological Regime and Its Response to Climate Warming in the Zhizdra River Basin of the Eastern European Plain // Water, – 2023. – Vol. 15. – P.2678. https://doi.org/10.3390/w15152678
2. Yang Y., Yang L., Villarini G., Zhao F., Huang D., Vecchi G.A., Wang Q., Sun Y., Tian F. Synchronization of global peak river discharge since the 1980 // Nat. Clim. Chang. – 2025. – Vol. 15. – P.1084–1090. https://doi.org/10.1038/s41558-025-02427-6
3. Seyam M., Othman F. Long-term variation analysis of a tropical river's annual streamflow regime over a 50-year period // Theor. Appl. Climatol, – 2014. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1225-9
4. Hansford M.R., Plink-Björklund P., Jones E.R. Global quantitative analyses of river discharge variability and hydrograph shape with respect to climate types // Earth-Sci. Rev., – 2020. – Vol. 15. – P.102977. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102977
5. Aryal A., Shrestha M., Aryal Sh., Upadhyay S., Maharjan M. Spatio-temporal variability of streamflow in major and medium rivers of Nepal // J. Hydrol.: Reg. Stud., – 2023. – P.101590. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101590
6. Pekárová P., Halmová D., Mitková V.B., Poórová J., Blaškovičová L., Pekár J., Leščešen I., Bajtek Z. Temporal variability of average and low flows in Slovak rivers: A 90-year perspective // J. Hydrol.: Reg. Stud., – 2025. – P.102560. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102560
7. Morovati K, Zhang K., Shi L., Pokhrel Ya., Wu M., Someth P., Ly S., Tian F. On the cause of large daily river flow fluctuations in the Mekong River // Hydrol. Earth Syst. Sci., – 2024. – Vol. 28. – P.5133–5147. https://doi.org/10.5194/hess-28-5133-2024
8. Kaliyeva K., Punys P., Zhaparkulova Y. The impact of climate change on hydrological regime of the transboundary River Shu Basin (Kazakhstan–Kyrgyzstan): forecast for 2050 // Water, – 2021. – Vol. 13(20). – P.2800. https://doi.org/10.3390/w13202800
9. Mustafayev Z.S., Kozykeyeva A.T., Kamaliyev A.M. Climatic changes in the basin of the transboundary shu river // SERIÂ AGRARNYH NAUK, – 2019. – Vol. 1. – P.104. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2019-68-5-68-76
10. Tazhiyev S., Murtazin Y., Rakhimova V., Rakhmetov I., Adenova D., Koshpanova K., Sotnikov Y., Abdizhalel M., Akylbayeva A., Yerezhep D. Applied Hydrogeological Assessment and GIS-Based Modeling of Transboundary Aquifers in the Shu River Basin // Water, – 2025. – Vol. 17(16). – P.2476. https://doi.org/10.3390/w17162476
11. Ivancic T.J., Shaw S.B. Examining why trends in very heavy precipitation should not be mistaken for trends in very high river discharge // Climatic Change. – 2015. – Vol. 133. – P. 681-693. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1476-1
12. Milly P.C., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. Stationarity is dead: Whither water management? // Science, – 2008. – Vol. 319. – P. 573-574. https://doi.org/10.1126/science.1151915
13. Kundzewicz Z.W., Robson A. Change detection in hydrological records—A review of the methodology // Hydrol. Sci. J., – 2004. – Vol. 49. – P. 7-19. https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.44369
14. Shi X., Qin T., Nie H., Weng B., He S. Changes in major global river discharges directed into the ocean // International journal of environmental research and public health. – 2019. – Vol. 16. – P. 1469. https://doi.org/10.3390/ijerph16081469
15. Vorosmarty C.J. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth // Science. – 2000. – Vol. 289. – P. 284-288. https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284
16. Haddeland I. Global water resources affected by human interventions and climate change // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 111. – P. 3251-3256. https://doi.org/10.1073/pnas.1222475110
17. Didovets I., Lobanova A., Krysanova V., Menz C., Babagalieva Z., Nurbatsina A., Hattermann F.F. Central Asian Rivers under Climate Change: Impacts assessment in eight representative catchments // Journal of Hydrology: Regional Studies. – 2021. – No.34. – P.100779. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779
18. Sennikov M.N., Yerzhanova N.K. (2017). Sovershenstvovanie upravleniya transgranichnimi vodnimi resursami po Shu-Talasskomu basseinu Respubliki Kazakhstan [Improving the management of transboundary water resources in the Shu-Talas basin of the Republic of Kazakhstan]. Materiali Mezhdunarodnoi konferentsii SVO VEKTsA «Problemi upravleniya rechnimi basseinami v usloviyakh izmeneniya klimata» 18-19 maya 2017, g. Moskva. NITs MKVK, - Tashkent, pp.89-95 [in Russian].
19. Yerzhanova N.K., Sennikov M.N. (2024). Transgranichnoe sotrudnichestvo v sfere upravleniya riskami pavodkov [Transboundary Cooperation in Flood Risk Management]. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Teoreticheskie i prikladnie

problemi geografii» [International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Problems of Geography»]. L.N. Gumilyov Eurasian National University, - Astana, pp.244-248 [in Russian].
20. MSP 3.04-101-2005. (2005). Opredelenie osnovny`x raschetny`x gidrologicheskix xarakteristik [Determination of design hydrological performance]. – Astana, pp. [in Russian].

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ШУ И РОЛЬ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Нурлиза К. Ержанова*, Жанар О. Озгелдинова PhD

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан; nur66gidro@mail.ru, ozgeldinova@mail.ru
* Автор корреспондент: Нурлиза К. Ержанова, nur66gidro@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Гидрологический режим, гидротехнические сооружения, гидропост, река Шу, цифровая модель, вероятностно-статистические методы, годовой сток, неустойчивость стока.

По статье:
Получено: 08.02.2026
Пересмотрено: 27.02.2026
Принято: 16.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

В статье всесторонне исследована многолетняя изменчивость среднегодового стока, наблюдавшегося в период 1967...2022 гг. на участке гидропоста Малая Арна – село Уланбель в нижнем течении реки Шу. Целью исследования является определение статистических характеристик годового стока и и оценка возможности применения полученных расчетных параметров для обоснования надежности и эксплуатационной безопасности гидротехнических сооружений. В ходе исследования были восстановлены данные многолетних наблюдений и выполнена их статистическая обработка на основе метода моментов и метода максимального правдоподобия. Установлено, что коэффициент вариации годового стока имеет высокое значение (C_v =1,1), а коэффициент асимметрии является положительным (C_s =1,7), что свидетельствует о выраженной изменчивости и неустойчивости речного стока. Анализ разностной интегральной кривой показал, что периоды маловодья отличаются продолжительностью, тогда как многоводные периоды являются относительно кратковременными, но интенсивными. Расчетные расходы воды по вероятностям обеспеченности составили: 4,10...4,20 м³/с при 50 % обеспеченности, 15,38...15,60 м³/с при 10 % обеспеченности и 0,47...0,48 м³/с при 90 % обеспеченности. Статистические критерии подтвердили однородность гидрологического ряда, что обосновывает дальнейшее применение полученных расчетных параметров. Результаты исследования могут быть использованы в качестве научно обоснованных расчетных данных при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на рассматриваемом участке нижнего течения реки Шу, способствуя повышению их надежности и безопасности.

ASSESSING HYDROLOGICAL REGIME INSTABILITY AND HYDRAULIC STRUCTURE RELIABILITY IN THE LOWER SHU RIVER USING PROBABILISTIC–STATISTICAL METHODS

Nurliza Yerzhanova*, Zhanar Ozgeldinova PhD

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; nur66gidro@mail.ru, ozgeldinova@mail.ru
*Author correspondent: Nurliza Yerzhanova, nur66gidro@mail.ru

KEY WORDS

Hydrological regime, hydraulic structures, hydrological post, Shu River, digital model, probabilistic and statistical methods, annual flow, flow instability.

ABSTRACT

The article presents a comprehensive analysis of the long-term variability of mean annual runoff observed during the period 1967...2022 at the Malaya Arna–Ulanbel section of the Chu River in its lower reaches. The aim of the study is to determine the statistical characteristics of annual runoff and to assess the applicability of the derived design parameters for substantiating the reliability and operational safety of hydraulic structures. In the course of the study, long-term observation data were reconstructed

and statistically processed using the method of moments and the maximum likelihood method. It was established that the coefficient of variation of annual runoff is relatively high (C_v = 1.1), while the coefficient of skewness is positive (C_s = 1.7), indicating pronounced variability and instability of river runoff. Analysis of the difference integral curve showed that low-flow periods vary in duration, whereas high-flow periods are relatively short but intensive. The design water discharges for different exceedance probabilities were estimated at 4.10...4.20 m³/s for a 50 % exceedance probability, 15.38...15.60 m³/s for a 10 % exceedance probability, and 0.47...0.48 m³/s for a 90 % exceedance probability. Statistical tests confirmed the homogeneity of the hydrological series, providing a basis for the further application of the derived design parameters. The results of the study can be used as scientifically justified design data for the planning, design, and operation of hydraulic structures in the investigated section of the lower reaches of the Shu River, thereby contributing to improved reliability and safety.

About article:
Received: 08.02.2026.
Revised: 27.02.2026
Accepted: 16.09.2026
Published: 30.09.2026

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАВОДНЕНИЙ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ЕРТИС

Айсулу А. Турсунова[1] к.г.н., ассоц.проф., Жанат Т. Салаватова[1,2]* , Нурила Ж. Турсын[1]

[1] Институт географии и водной безопасности, г. Алматы, Казахстан; ais.tursun@bk.ru (ААТ), salavatova.07@gmail.com (ЖТС), Nurila_t@bk.ru (НЖТ)
[2] Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; salavatova.07@gmail.com (ЖТС)
*Автор корреспондент: Жанат Т. Салаватова, salavatova.07@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

река Ертис,
максимальный сток,
максимальные уровни,
наводнение, половодье

АБСТРАКТ

В работе на основе многолетних гидрологических наблюдений представлен комплексный анализ параметров экстремального стока и характеристик гидрологической опасности наводнений рек Ертисского водохозяйственного бассейна. Она относится к трансграничным рекам и интенсивно используется двумя соседними государствами – Китайской Народной Республикой и Российской Федерацией. Целью работы является комплексная оценка статистических характеристик максимальных расходов воды (Qmax) и наивысших уровней (Hmax), проверка однородности гидрологических рядов, определение расчетных значений расходов и уровней различной обеспеченности (1 %, 3 %, 5 %), а также их сопоставление с отметками выравнивания поймы и историческими наводнениями в регионе для обоснования границ затопления.

На первом этапе проведена обработка данных, восстановление отсутствующих данных наблюдений и анализ однородности рядов максимальных расходов воды. Для проверки статистической однородности использованы критерии Фишера, Стьюдента и Вилкоксона, а также критерии Манна–Кендалла, Петтитта и Буишанда, что позволило оценить устойчивость, отсутствие системных сдвигов и сопоставимость гидрологических наблюдений на различных гидрологических постах бассейна.

На основе проверенных рядов выполнен статистический анализ максимальных расходов воды с определением основных параметров распределения, включая коэффициент вариации (Cv) и коэффициент асимметрии (Cs), а для водосборов с высокой изменчивостью применены усеченные функции распределения Крицкого–Менкеля. Полученные статистические характеристики использованы для расчета максимальных расходов и уровней воды различной обеспеченности (1 %, 3 %, 5 %). Проведен сравнительный анализ многолетней динамики максимальных расходов воды на гидрологических постах бассейна.

Проведена комплексная обработка многолетних данных, включающая восстановление пропущенных значений максимальных уровней воды и анализ их многолетней динамики. На основе сопоставления фактических уровней с отметками выхода воды на пойму установлены конкретные годы затопления пойменных территорий, и рассчитаны параметры максимальных уровней различной вероятности превышения (1 %, 3 % и 5 %).

МРНТИ 37.27.19 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-25-44 УДК 556.166

По статье:
Получено: 28.04.2026
Пересмотрено:11.09.2026
Принято: 11.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Турсунова А., Салаватова Ж., Турсын Н., Гидрологические характеристики наводнений в бассейне реки Ертис// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 25-44.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на глобальный технический прогресс в области гидротехнического строительства, наводнения остаются одним из наиболее непредсказуемых и разрушительных природных вызовов современности. Мировая статистика последних лет подтверждает, что даже высокоразвитая инфраструктура не гарантирует полной защиты от экстремальных гидрологических явлений. Для аридных и семиаридных регионов, к которым относится значительная часть территории Казахстана, характерна экстремальная неравномерность стока. По данным международных отчетов [1], порядка 75 % территории республики подвержено рискам стихийных бедствий, где наводнения занимают ведущее место по масштабам социально-экономического ущерба. Среднегодовые потери от затоплений в Казахстане оцениваются в сотни миллионов долларов [2], что диктует необходимость постоянной актуализации гидрологических расчетов.

В гидрологическом режиме рек максимальные расходы и уровни воды представляют собой предмет первоочередных исследований, так как превышение их критических значений может иметь катастрофические последствия в виде затопления территорий, тогда как при недостаточном наполнение русла, возникает опасность к деградации и иссушению речных экосистем [3, 4].

Целью настоящего исследования является комплексная оценка параметров экстремального стока (Qmax. Hmax) и характеристик гидрологической опасности наводнений в Ертисском водохозяйственном бассейне. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: верификация и продление многолетних рядов наблюдений (до 2023 г.); статистический анализ однородности и трендов; определение расчётных максимумов редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %); сопоставление критических отметок выхода воды на пойму с историческими катастрофическими затоплениями в регионе.

Методический и практический результат проведенного исследования заключается в получении обновленных оценок максимальных расходов (Qmax) и наивысших уровней воды (Hmax) редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %) по данным наблюдений до 2023 года, а также определены условия и критические пороги выхода воды на пойму. Расчеты выполнены с применением трехпараметрического гамма-распределения Крицкого–Менкеля (включая усеченные функции для малых водосборов с Cv ≥0,60), что обеспечило высокую точность подбора кривых в зоне редких максимумов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Водохозяйственные бассейны Казахстана представляют собой фундаментальные гидрографические единицы, организованные по бассейновому принципу для эффективного управления, охраны и распределения водных ресурсов в условиях природного дефицита. Территория республики разделена на восемь ключевых водохозяйственных бассейнов, особое место в этой системе занимает Ертисский водохозяйственный бассейн, который признан самым многоводным и стратегически значимым регионом страны.

Река Ертис – одна из главных водных артерий Казахстана, берет начало на склонах Монгольского Алтая в Китайской Народной Республике, где под названием Кара Ертис течет в Казахстан и впадает в проточное озеро Жайсан (Зайсан), и далее проходит через каскад ГЭС, в Российскую Федерацию, впадает в р. Обь. Длина р. Ертис составляет 4280 км (618 км на территории КНР, 1698 км на территории РК и 1964 км на территории РФ) [5…7], это самая длинная река-приток в мире. В верховьях, до выхода на равнину, Ертис принимает ряд притоков, из которых наиболее многоводны реки Курчум, Нарым, Бухтарма, Ульба, Уба и др. [8] (рис. 1).

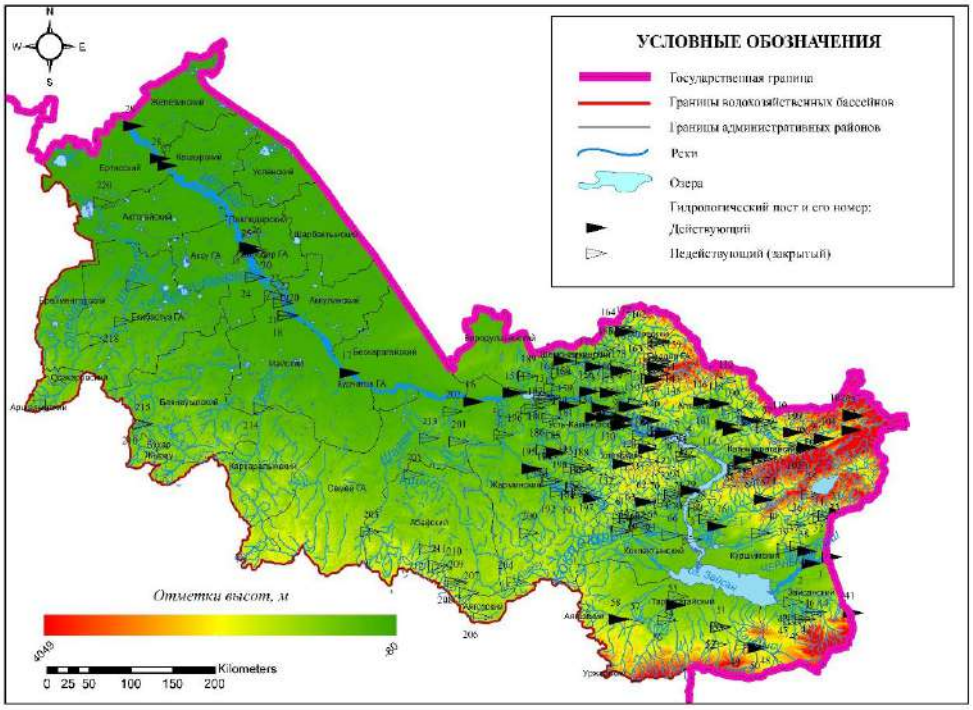


Рисунок 1. *Схема расположения гидрологических постов в Ертисском водохозяйственном бассейне*

Наводнения в бассейне реки Ертис и её притоков представляют собой одно из наиболее распространённых и опасных гидрологических явлений региона.

По своему генезису они подразделяются на три основных типа:

– снеговые, формирующиеся в период весеннего половодья при дружном снеготаянии в горной и предгорной зонах, в весенний период (апрель-май). Характеризуется значительным объемом стока и продолжительным стоянием высоких уровней воды;

– дождевые (смешанные), возникающие при наложении обильных осадков на тающие высокогорные снега, наблюдается в летне-осенний период и характеризуются резким («взрывным») подъемом уровней и высокими пиковыми расходами;

– заторно-зажорные, обусловленные стеснением русла шугой и льдом в периоды осеннего замерзания и весеннего вскрытия горных водотоков, наблюдаются в период промерзания (ноябрь-декабрь) и вскрытия рек (апрель).

Сочетание этих факторов нередко приводит к формированию высоких паводков взрывного характера, быстрому подъёму уровней воды и затоплению пойменных территорий. Наиболее уязвимыми оказываются населённые пункты и хозяйственные объекты, расположенные в поймах и прибрежных зонах, где паводковые воды способны вызывать значительные социально-экономические последствия и нарушать функционирование инфраструктуры [9, 10]. В связи с этим, точность определения расчетных максимумов расходов и уровней критически важна для территорий с высокой плотностью населения и развитой промышленной инфраструктурой Восточного Казахстана.

В качестве исходной базы данных использованы гидрометрические наблюдения РГП «Казгидромет» по максимальным расходам и уровням воды 9 гидрологических постов за общий период с 1931 по 2023 гг. В зависимости от поста продолжительность рядов наблюдений составляет от 59 до 92 лет

Для значительной части малых и средних рек изучаемого бассейна имеющиеся ряды наблюдений либо отсутствуют, либо являются прерывистыми и краткими, что не позволяет сформировать статистически достоверные выборки для прямого расчета

параметров распределения. В таких условиях данные не позволяют сформировать полные выборки, необходимые для прямого расчета параметров распределения (среднемноголетнего стока, коэффициентов вариации и асимметрии).

Ввиду отсутствия или репрезентативной недостаточности данных гидрометрических наблюдений (максимальные расходы, максимальные уровни) определение расчетных характеристик выполнено с применением метода гидрологической аналогии. Данный подход регламентирован нормативными документами СНиПа 2.01.14 – 83 [11] и является достоверным способом восстановления максимальных расходов и уровней воды для неизученных или слабоизученных водотоков. Восстановление рядов в Ертисском водохозяйственном бассейне является важным этапом гидрологического анализа, связывает историю наблюдений с прогнозными моделями будущего.

Для получения качественного анализа была проведена работа по восстановлению данных о максимальных уровнях. Восполнение пропусков, возникших из-за отсутствия наблюдений, позволило оценить многолетний ход уровней и сформировать надежную базу для дальнейших исследований.

Для верификации восстановленных рядов следует проводить проверку гипотезы об их однородности, для дальнейших гидрологических расчетов. Проверка однородности гидрологических временных рядов обеспечивает достоверность статистического анализа и является необходимым условием для корректного гидрологического моделирования. Однородность ряда означает постоянство статистических свойств (среднего и дисперсии) во времени, то есть стационарность процесса [12, 13]. Для решения этой задачи в мировой практике наиболее часто используется сочетание параметрических и непараметрических тестов. Оценка статистической значимости различий между эмпирическими выборками осуществляется с помощью комплекса параметрических и непараметрических критериев: критерия Фишера [14] для проверки равенства дисперсий, критерия Стьюдента [15] для оценки стабильности средних значений и критерия Вилкоксона [16], позволяющего выявить сдвиги в распределении данных без привязки к закону нормального распределения.

Для углубленной оценки стационарности и структуры процессов дополнительно применяются непараметрические тесты Манна–Кендалла [17] с оценкой наклона Сена [18] (выявление и оценка скорости монотонных трендов), а также критерии Петтитта [19] и Буишанда (обнаружение точек излома и сдвигов в среднем) [20]. Совместное использование данных методов обеспечивает высокую верификацию того, что восстановленные максимальные расходы могут быть использованы для определения расчетных характеристик стока.

Подтверждение однородности рядов позволяет перейти к следующему этапу анализа - аналитической оценкее кривых обеспеченности и определению расчетных максимальных расходов и уровней воды различной вероятности превышения (P = 1 %, 5 %, 10 %) согласно нормативным методикам.

Расчетные значения Qmax и Hmax обеспеченностью P = 1 %, 3 %, 5 % определялись путем аналитической подбора трехпараметрического гамма-распределения (Крицкого–Менкеля) к эмперическим точкам. Для постов с высокой изменчивостью стока Cv > 0.60 применялись усеченные аналитические функции, позволившие исключить влияние нулевых и минимальных значений и повысить точность расчетов в зоне редкой обеспеченности P ≤ 5 %.

В проведенных ранее исследованиях [4], авторы подчеркивают необходимость тестирования данных перед расчетами, используют критерии Фишера и Стьюдента для проверки однородности дисперсий и средних значений. Авторы Павленко А.В. [21] и другие провели подробный анализ рек Ертисского водохозяйственного бассейна в пределах Восточно-Казахстанской области на несколько групп, провели сбор, структуризацию данных с гидрологических постов наблюдений. Исследования

наводнений и максимального стока в Казахстане охватывают широкий спектр направлений: от классического статистического анализа до современного цифрового моделирования. П.А. Плеханов [22] классифицировал более 30 типов гидрологических рисков в республике, отметив, что за последние десятилетия на равнинных реках частота высоких половодий снизилась, в то время как на горных реках участились паводки и сели из-за климатических изменений. Работы М.А. Бейсембаевой [4] и соавторов на р. Ертис показали существенное снижение средних максимумов в 1,5 раза и падение уровней (на 1,11 м у Павлодара для 1 % обеспеченности) вследствие зарегулирования стока водохранилищами и нарушению генетической однородности рядов из-за появления зимних максимумов. Аналогичное снижение после зарегулирования р. Есиль отметили Р.И. Гальперин и А. Авезова, предложив использовать метод усеченных распределений для корректных расчетов [23].

Б.И. Гартсман [24] обосновал методологическое преимущество стохастических подходов (метод L-моментов, распределения GLO/GEV) над устаревшими нормативами для оценки редких экстремумов в условиях нестационарности. Современный этап, представленный исследованиями М.А. Алагуджаевой, С.Р. Садвакасовой и М.С. Оспанова [25...28], базируется на интеграции ГИС, высокодетальных данных ДЗЗ (Sentinel, Planet) и гидродинамического моделирования в HEC-RAS для предиктивного картирования зон затопления. Анализ катастрофических паводков 2024 года на р. Жайык авторами Турсунова А.А. и др. [3] подтверждает критическую важность расчетов времени добегания волны для оперативного управления рисками. Авторами С.Р. Садвакасова и др было описано затопление жилых районов [26, 27]

Таким образом, использованный комплекс методов обеспечивает надежность и достоверность полученных результатов. Проверка рядов с помощью параметрических и непараметрических критериев (Фишера, Стьюдента, Вилкоксона, Манна–Кендалла, Петтитта и Буишанда) подтвердила их однородность. Восстановление данных по рекам-аналогам и применение усеченных функций Крицкого–Менкеля позволили снизить погрешности и получить точные расчетные значения максимальных расходов (Qmax) и наивысших уровней воды (Hmax) редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнена оценка максимального стока и максимальных уровней на основе данных наблюдений за период от начала функционирования выбранных гидрологических постов до 2023 г. Проведён анализ полноты и качества рядов наблюдений. В исследование включены 9 гидрологических постов региона, расположенных на основных реках Ертисского водохозяйственного бассейна и находящихся в ведении РГП «Казгидромет».

Анализ представленных гидрологических данных свидетельствует о высокой степени репрезентативности выборки: длительность рядов наблюдений варьируется в широком диапазоне от 36 до 90 лет. При восстановлении пропущенных периодов использовался метод гидрологической аналогии, где значения коэффициента корреляции (r) составили от 0,71 до 0,81. Согласно нормативным требованиям, такие показатели оцениваются как хорошие, поскольку значения $r > 0,70$ подтверждают тесную стохастическую связь между исследуемыми объектами и реками-аналогами.

Для верификации восстановленных рядов в Ертисском бассейне была проведена проверка гипотезы об их однородности, что является обязательным условием для дальнейших гидрологических расчетов. Применение данных методов в совокупности обеспечивает высокую надежность подтверждения того, что восстановленные максимальные расходы могут быть использованы для определения расчетных характеристик стока (таб. 1).

Таблица 1

Основные статистические характеристики исследуемых гидрологических постов

№ п/п	Река - створ	Период наблюдений	Критерий Фишера		Критерий Стьюдента		Критерий Вилькоксона		Коэффициент корреляции r	Основные статистические характеристики			
										Кол-во лет	Qср	Cv	Cs
1	р. Кара Ертис - с. Боран	1938…2023	+	F = 1,42 Fa = 1,924	+	t = 1,641 ta = 1,993	+	U = 1097 U1 = 697,569 U2 = 1151,431	0.71	85	1407	0,29	0,16
2	р. Бухтарма - с. Печи (выше устья р. Соколовки (с. Барлык)	1940…2023	+	F = 1,156 Fa = 1,944	+	t = 0,435 ta = 1,994	+	U = 803 U1 = 662,909 U2 = 1101,091	0.74	83	662	0,30	1,15
3	р. Бухтарма - с. Берель	1958…2023	+	F = 1,107 Fa = 2,116	+	t = 0,934 ta = 2,003	+	U = 467 U1 = 391,667 U2 = 697,333	0.79	65	257	0,28	0,53
4	р. Левая Березовка - с. Средигорное	1948…2023	+	F = 1,469 Fa = 2,02	+	t = 1,11 ta = 1,998	+	U = 807 U1 = 533,334 U2 = 910,666	0.92	75	9,98	0,60	0,99
5	р. Ульба - с. Ульба Перевалочная (в 300 м, ниже устья р. Малой Ульбы)	1931…2023	+	F = 1,308 Fa = 1,848	+	t = 1,358 ta = 1,988	+	U = 870 U1 = 825,931 U2 = 1336,069	0.81	92	932	0,41	1,41
6	р. Уба - г. Шемонаиха	1954…2021	+	F = 1,782 Fa = 2,078	-	t = 2,07 ta = 2,001	+	U = 762 U1 = 445,636 U2 = 779,364	0.79	59	1736	0,28	0,73
7	р. Курчум - с. Вознесенское (Вознесенка)	1935…2023	+	F = 1,138 Fa = 1,924	+	t = 0,577 ta = 1,993	+	U = 871 U1 = 697,569 U2 = 1151,431	0.74	88	480	0,4	0,65
8	р. Улкен Бокен - с. Джумба (Малороссийка)	1957…2023	+	F = 2,081 Fa = 2,097	+	t = 0,481 ta = 2,002	+	U = 559 U1 = 404,715 U2 = 717,285	0.79	66	121	0,69	1,56
9	р. Тургусун - с. Кутиха	1949…2023	+	F = 1,61 Fa = 2,001	-	t = 2,193 ta = 1,997	+	U = 882 U1 = 517,177 U2 = 886,823	0.79	74	378	0,37	0,57

Проведённый анализ показывает, что для большинства рассматриваемых гидрологических постов гипотеза об однородности многолетних рядов максимального стока статистически подтверждается. Восстановление и приведение рядов Qmax к единому периоду выполнялось методом гидрологической аналогии с использованием парных регрессионных зависимостей, высокая надежность которых подтверждается коэффициентами корреляции 0,71…0,92 (таб. 1).

В ходе анализа установленных характеристик была выявлена значительная пространственная дифференциация условий формирования максимального стока в Ертисском бассейне. Коэффициент вариации Cv варьируется в пределах от 0,28 до 0,69, при этом наименьшая изменчивость характерна для наиболее крупных и полноводных рек, таких как Бухтарма и Уба, в то время как максимальные значения вариации (свыше 0,60) фиксируются на малых водотоках (р. Улкен Бокен, р. Левая Березовка). Это объясняется малыми площадями их водосборов и их высокой чувствительностью локальным осадкам, оттепелям и весеннему снеготоянию, тогда как крупные реки за счет больших площадей усредняют и сглаживают такие экстремумы [11, 29, 30].

Согласно критерию Фишера, расчетные значения F во всех створах не превышают критических величин Fa при 5 % уровне значимости, что указывает на стабильность дисперсий и отсутствие значимых расхождений. Проверка по критерию Стьюдента показывает отсутствие существенных сдвигов в средних значениях для большинства постов ($t < t\alpha$). Исключение составляют створы р. Уба - г. Шемонаиха и р. Тургусун - с. Кутиха, где расчетные значения t (2,07 и 2,193 соответственно) незначительно превышают критические $t\alpha$. Данное отклонение может быть обусловлено как естественной многолетней цикличностью стока, так и локальными особенностями формирования экстремальных максимумов в данных бассейнах. Тем не менее, проверка по непараметрическому критерию Вилкоксона показала положительный результат для всех без исключения постов, включая вышеуказанные створы. Это подтверждает, что ряды принадлежат к одной и той же генеральной совокупности.

Однако традиционной проверки статистической однородности выборок по параметрическим и непараметрическим критериям (Фишера, Стьюдента, Вилкоксона) не всегда достаточно для полной оценки структуры гидрологических рядов в условиях меняющегося климата. Для более глубокого анализа возможной климатической или антропогенной направленности процессов, а также для проверки требований к стационаренности рядов при построении кривых обеспеченности, был выполнен комплексный непараметрический анализ. С помощью критерия Манна–Кендалла с оценкой наклона Сена, а также тестов Петтитта и Буишанда была проведена проверка наличия монотонных трендов и возможных точек излома (структурных сдвигов) во временных рядах Qmax. Полученные результаты статистического тестирования на стационарность приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка стационарности и непараметрический анализ трендов исследуемых гидрологических постов

№ п/п	Река – гидрологический пост	Период наблюдений	n (лет)	Критерий Манна–Кендалла (Mann–Kendall)			Критерий Петтитта (Pettitt)	Критерий Буишанда (Buishand)
				Статистика Z	Уровень знач. (Signif.)	Наклон Сена Q (м³/с в год)	Точка излома, год	
1	р. Кара Ертис – с. Боран	1938…2023	86	-1.46	NS	-2.53	однороден	однороден
2	р. Бухтарма – с. Печи	1940…2023	84	-0.11	NS	-0.1	однороден	однороден
3	р. Бухтарма – с. Берель	1958…2023	59	-0.35	NS	-0.22	однороден	однороден

4	р. Левая Березовка – с. Средигорное	1948…2023	78	2.68	**	1.03	1953	Не однороден
5	р. Ульба – с. Перевалочная	1931…2023	70	-1,93	+	-3.42	2004	однороден
6	р. Уба – с. Шемонаиха	1954…2023	70	-2,25	*	-6.36	2017 год при α= 0.05	Однороден при 1%
7	р.Курчум – с. Вознесенское	1938…2023	86	2,75	**	0.56	1959	однороден
8	р.Улкен Бокен- с. Джумба	1957…2023	67	-0,09	NS	-0.03	однороден	однороден
9	р. Тургусын – с. Кутиха	1949…2023	74	-2,44	*	-1.95	1998 год при α=0.05	Однороден

*Примечание: Уровень значимости тренда по критерию Манна–Кендалла: NS — тренд статистически незначим (p> 0.10); + — слабый тренд (0.05 < p < 0.10); * — значимый тренд на уровне α= 0.05 (0.01 < p < 0.05); *** ** — сильный тренд (α = 0.01).*

Результаты тестов Петтитта и Буишанда продемонстрировали высокую степень сходимости между собой. Для большинства постов оба критерия подтверждают отсутствие статистически значимых структурных сдвигов (p> 0.05). На створах, где тестом Петтитта зафиксированы локальные вероятные точки излома (например, р. Тургусын и р. Уба), критерий Буишанда подтверждает однородность выборок. При этом анализируемые ряды сохраняют однородность на более строгом 1%-ном уровне значимости (α = 0.01), что характеризует их как условно стационарными рядами. Выраженная неоднородность по обоим критериям зафиксирована лишь на отдельных малых водосборах (р. Левая Березовка и р. Курчум), что объясняется локальными физико-географическими условиями формирования паводков.

Подтвержденная однородность и репрезентативность многолетних рядов позволяют перейти к детальному анализу циклической изменчивости и определению расчетных характеристик экстремальной водности. На основе полученных параметров распределения была исследована многолетняя динамика не только максимальных расходов, но и соответствующих им уровней воды, что позволило выявить фазы повышенной водности и установить расчетные величины различной обеспеченности Данные показатели характеризуют экстремальные значения стока и высотные отметки уровней, вероятность превышения которых возможна в среднем один раз в 10, 50 или 100 лет (Р = 10 %, 5 %, 2 %, 1 %). Установленные вероятностные характеристики служат необходимой базой для последующего определенного описания русловых процессов и корректного определения зон возможного затопления в Ертисском бассейне.

Динамика максимальных расходов воды

Для оценки циклической изменчивости гидрологического режима были проанализированы многолетние ходы максимальных расходов воды по опорным створам (рис. 2, 3). Хронологический анализ динамики стока позволяет наглядно проследить чередование многоводных и маловодных периодов, а также оценить репрезентативность восстановленных данных в контексте исторических экстремумов.

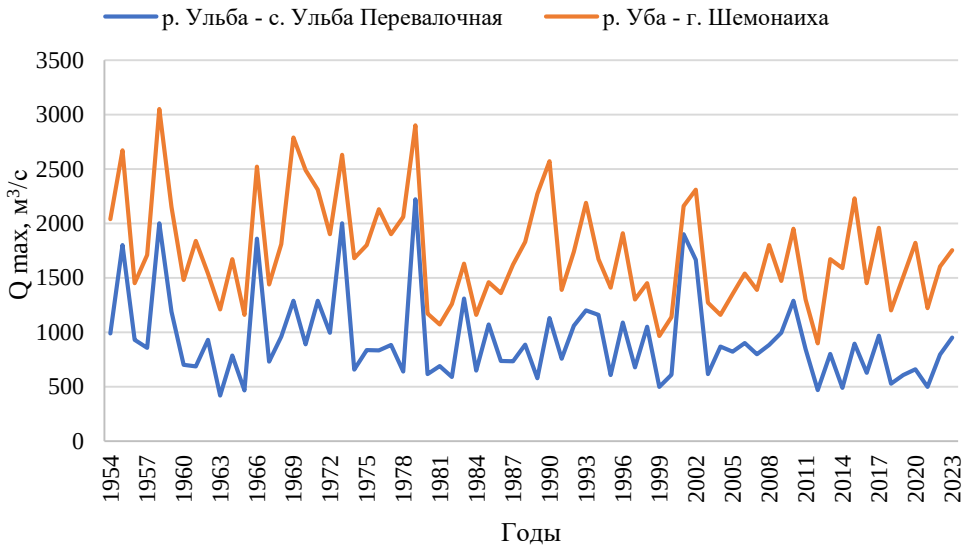


Рисунок 2. *Динамика максимальных расходов воды на реках Ульба – с. Ульба Перевалочная и Уба – с. Шемонаиха*

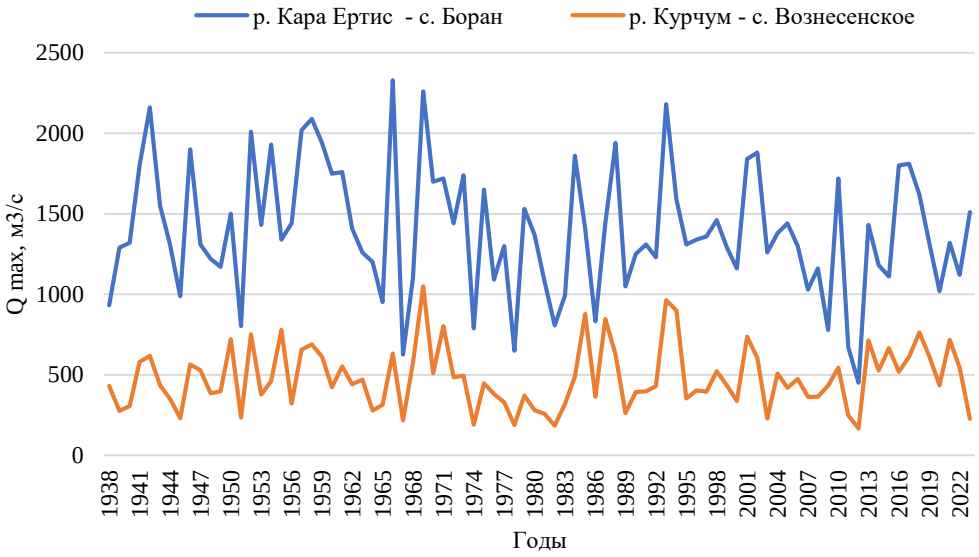


Рисунок 3. *Динамика максимальных расходов воды на реках Кара Ертис – с. Боран и Курчум – с. Вознесенское*

Анализ графиков многолетнего хода максимальных расходов воды подтверждает высокую пространственно-временную связность гидрологических процессов в регионе. Для большинства рек характерна выраженная цикличность с четким чередованием многоводных и маловодных фаз.

На реках правобережной части бассейна (р. Уба -г. Шемонаиха и р. Ульба - с. Ульба Перевалочная) абсолютные максимумы за весь период наблюдений фиксировались в 1958 и 1979 годах, когда максимальные расходы воды на р. Уба достигали 3100 м³/с, а на р. Ульба превышали 2200 м³/с. Также выраженными пиками стока характеризуются 1969, 1990 и 2001...2002 годы (расходы на р. Уба превышали 2300…2600 м³/с). Маловодные фазы с понижением Qmax до 1200...1400 м³/с на р. Уба и 450...600 м³/с на р. Ульба отмечались в середине 1960-х, начале 1980-х и в 2011...2012 годах. На реках южной и юго-восточной части (р. Кара Ертис - с. Боран и р. Курчум – с. Вознесенское) исторические пики экстремумов с расходами свыше 2300 м³/с (р. Кара Ертис) и 1000 м³/с (р. Курчум) наблюдались в 1966, 1969 и 1993 годах. Маловодные периоды со снижением пиковых

расходов Qmax фиксировались в 1974...1978 гг. и в конце 1990-х годов. В целом за весь период наблюдений (с середины XX века по 2023 год) хронологические ряды демонстрируют слабую тенденцию к снижению максимальных расходов воды. Начиная с 2010-х годов, динамика Qmax вошла в фазу относительной стабилизации с умеренной амплитудой межгодовых колебаний, за исключением локального повышения стока в 2016...2017 гг.

Определение расходов различной обеспеченности

Выполнен расчет расходов воды заданной вероятности превышения (обеспеченности) для оценки экстремальной водности. Определение расходов различной обеспеченности устанавливает количественные параметры максимального стока, которые могут быть достигнуты или превышены один раз в 10, 50 или 100 лет (P = 10 %, 3 %, 2 %, 1 %). Данный этап анализа базируется на ранее подтвержденной однородности рядов и использовании аналитических кривых распределения, что обеспечивает необходимую точность при определении расчетных гидрологических характеристик.

В расчетах применялись как полные кривые распределения, так и усеченные кривые обеспеченности. По каждому створу определены значения максимальных расходов обеспеченностью 1 %, 3 % и 5 %. Применение двух вариантов построения кривых обеспечило сопоставимость результатов и позволило оценить влияние экстремальных наблюдений на параметры распределения максимального стока (таб. 3).

Таблица 3

Расчет максимальных расходов воды различной обеспеченности

Река - створ	F, км^2	Hср, м	Расходы различной обеспеченности					
			1 %		3 %		5 %	
			Q, м^3/с	Исторические годы	Q, м^3/с	Исторические годы	Q, м^3/с	Исторические годы
р. Кара Ертис - с. Боран	55900	1290	2495	—	2242	1966, 1969	2114	1942, 1966, 1969, 1993
Улкен Бокен - с. Джумба	758	1150	388	2010, 2015	314	2010, 2015	278	2010, 2013, 2015
р. Бухтарма - с. Печи	6860	1850	1363	—	1166	1961, 1969, 1993, 2014	1054	1961, 1969, 1993, 2014
р. Бухтарма - с. Берель	1850	2200	469	—	420.4	1961, 1969	395.8	1961, 1969, 2006, 2007
р. Левая Березовка - с. Средигорное	251	850	29.7	—	24.4	1968, 2014	21.8	1968, 1970, 2014, 2021
р. Ульба - с. Ульба Перевалочная	4900	960	2383	—	1910	1958, 1973, 1979	1697	1937, 1955, 1958, 1966, 1973, 1979, 2001
р. Тургусун - с. Кутиха	1200	1470	792	—	692	1955, 1958, 1971	643	1955, 1958, 1971
р. Уба - г. Шемонаиха	8470	900	3177	—	2798	1958, 1979	2624.83	1955, 1958, 1969, 1973, 1979
р. Курчум - с. Вознесенское	5840	1350	1052	—	911	1969, 1993	842.98	1969, 1985, 1987, 1993, 1994

Сравнительный анализ фактических данных и расчетных характеристик (Таблица 2) позволил выделить ключевые периоды экстремальной водности в Ертисском бассейне. Наиболее масштабным по охвату признан 1969 год, когда расходы воды на 6 из 9 гидропостов превысили порог 5 % обеспеченности. Основной причиной такого

масштабного паводка послужило аномальное накопление снегозапасов зимой 1969 года, значительно превысившее климатическую норму [31]. Также значительные паводки 3 % и 5 % обеспеченности наблюдались в 1958, 1961 и 1993 годах, преимущественно на крупных притоках. В XXI веке фаза экстремальности проявилась в 2014...2015 годах. В 2014 году превышение 3 % и 5 % обеспеченности отмечено на р. Бухтарма и р. Левая Березовка. Отдельно выделяется 2015 год, когда на реке Большая Буконь отмечен редкий максимум, соответствующий 1 % обеспеченности (388 м³/с). Для большинства створов фактические исторические значения не достигли расчетного уровня 1 % обеспеченности.

Анализ и расчет максимальных уровней воды

Анализ максимальных уровней воды имеет решающее значение для понимания физического воздействия водного потока на территорию. В отличие от расходов, уровни напрямую определяют глубину затопления пойменных участков, прилегающих к руслу рек. Именно уровенный режим фиксирует фактическую границу соприкосновения воды с сушей, что необходимо для точного картирования зон затопления населенных пунктов.

Изучение хода максимальных уровней за многолетний период дает возможность выявить экстремальные отметки, которые когда-либо достигались в регионе (рис. 4, 5).

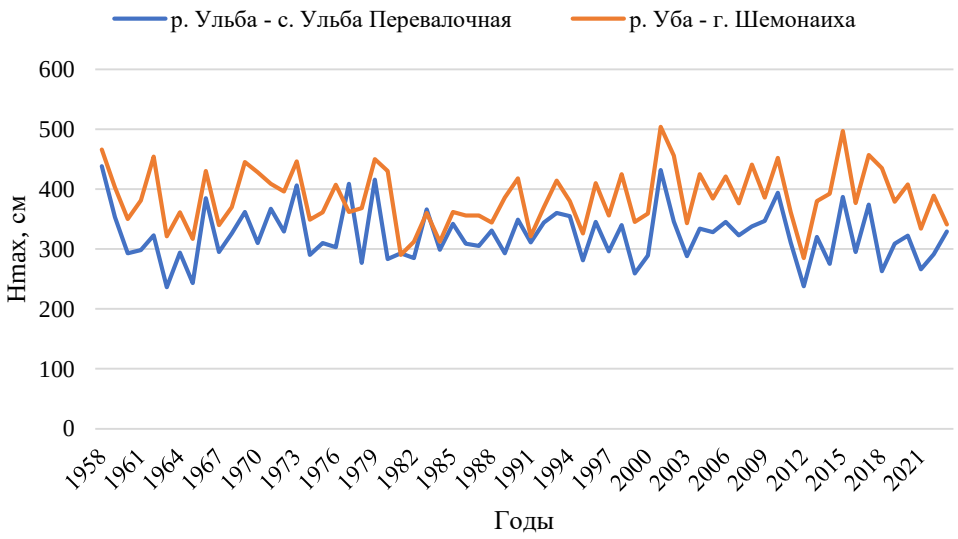


Рисунок 4. *Динамика максимальных уровней воды на реках Ульба и Уба*

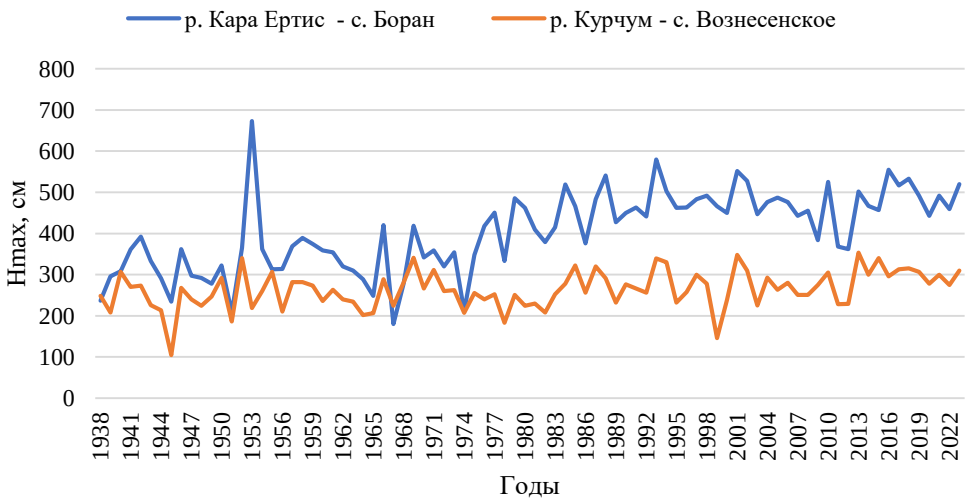


Рисунок 5. *Динамика максимальных расходов воды на реках Кара Ертис и Курчум*

Анализ многолетних рядов максимальных уровней воды выявил характерные особенности водного режима региона. В отличие от расходов воды, динамика уровней характеризуется меньшей изменчивостью: в отдельные маловодные периоды их отметки сохраняются на относительно высоких значениях. Это объясняется морфометрическими особенностями пойменных участков, а также проявлением заторных явлений и гидравлического подпора, удерживающих уровень воды. На графиках четко прослеживается цикличность экстремальных подъемов.

Река Кара Ертис характеризуется более высокими амплитудами подъема уровня, с абсолютным историческим максимумом, зафиксированным в 1953 году (673 см). Наблюдается постепенный рост многолетнего фона максимальных уровней воды, начавшийся с середины 1970-х годов. В то же время анализ последних десятилетий (с начала 2000-х годов по настоящее время) свидетельствует о наступлении фазы относительной стабилизации высших уровней воды, которая характеризуется снижением амплитуды их межгодовой изменчивости. Для р. Курчум уровенный режим более стабилен и сосредоточен в диапазоне 200...300 см, однако и здесь в последние 20 лет (период 2000...2023 гг.) частота выходов уровней за пределы 300 см стала выше, чем в середине прошлого века.

Общая картина многолетнего хода свидетельствует о том, что уровенный режим рек Ертисского бассейна находится в фазе относительной стабилизации с регулярными всплесками экстремальной активности. Современные максимумы (2010...2018 гг.) наглядно показывают, что опасность значительных подъемов воды не снижается, что требует постоянного контроля и актуализации данных о критических отметках для защиты населенных пунктов.

Для оценки рисков затопления территорий решающее значение имеет сопоставление расчетных уровней с отметками выхода воды на пойму, при которых начинается подтопление хозяйственных объектов и населенных пунктов.

Ниже представлены графики уровней воды, наглядно демонстрирующие динамику превышения критических отметок и повторяемость гидрологических ситуаций, связанных с выходом реки из основного русла (рис. 6).

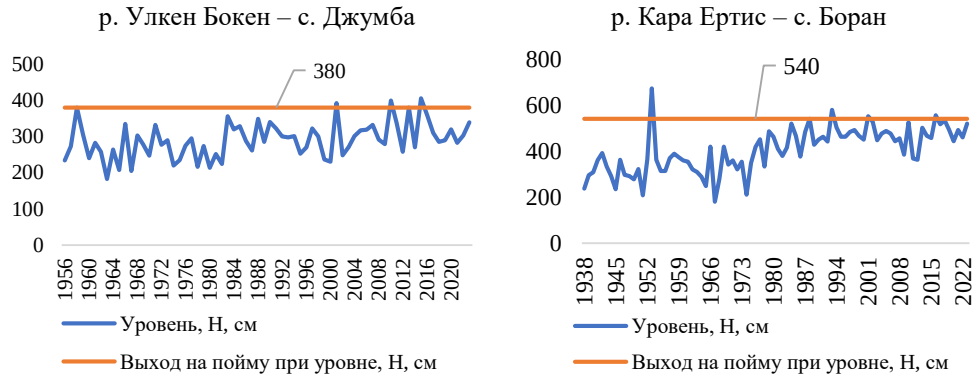


Рисунок 6. *Динамика максимальных уровней воды с указанием отметки выхода на пойму*

Анализ графиков уровенного режима на постах р. Улкен Бокен – с. Джумба и р. Кара Ертис – с. Боран наглядно подтверждает высокую паводковую опасность региона, обусловленную регулярным достижением и превышением критических отметок выхода воды на пойму. Исторически река Улкен Бокен характеризуется относительной стабильностью, однако с 2000-х годов наблюдается учащение пиков, достигающих или кратковременно превышающих отметку выхода на пойму (около 380 см) [32], что коррелирует с общей тенденцией роста экстремальности стока. Створ реки Кара Ертис демонстрирует высокую динамичность. Отметка выхода на пойму (около 550 см) [32] регулярно достигалась в 1950-е, 1990-е и 2010-е годы. Тот факт, что в последние

десятилетия уровни стабильно приближаются к критической черте, подтверждает необходимость использования восстановленных максимумов для уточнения зон гидрологического риска.

На основе многолетних рядов наблюдений и анализа кривых распределения были определены расчетные значения максимальных уровней воды по основным гидрологическим постам Ертисского ВХБ.

В следующей таблице представлены расчетные максимальные уровни воды для различных сценариев обеспеченности. Данные значения характеризуют предельно возможные подъемы воды: от ежегодных паводков (10 %) до катастрофических уровней, вероятных один раз в сто лет (1 %). Эти показатели являются итоговым результатом гидрологического анализа и служат базой для зонирования территорий по степени паводковой опасности.

В процессе анализа применялись как полные, так и усеченные кривые обеспеченности. Использование усеченных кривых позволило исключить влияние аномальных статистических выбросов и более точно определить расчетные точки в области высокой и средней обеспеченности (таб. 4).

Таблица 4

Уровни различной обеспеченности Ертисского ВХБ

Река - створ	F, км^2	$H_{ср}$, м	Уровни различной обеспеченности					
			1 %		3 %		5 %	
			Уровень	Исторические годы	Уровень	Исторические годы	Уровень	Исторические годы
р. Кара Ертис - с. Боран	55900	1290	653	1953	598	1953	570	1953, 1993
р. Улкен Бокен - с. Джумба	758	1150	423	—	393	2010, 2015	378	1958, 2001, 2010, 2013, 2015
р. Бухтарма - с. Печи	6860	1850	436	1995	385	1995	360	1990, 1995, 2011, 2016
р. Бухтарма - с. Берель	1850	2200	323	—	306	1998, 2014	297	1961, 1998, 2014
р. Ульба - с. Ульба Перевалочная	4900	960	453	—	420	1958, 2001	404	1958, 1973, 1977, 1979, 2001
р. Тургусун - с. Кутиха	1200	1470	527	—	477	2001	451	1998, 2001, 2004
Уба - г. Шемонаиха	8470	900	512	—	485	2001, 2015	471	2001, 2015
р. Курчум - с. Вознесенское	5840	1350	370	—	348	2001, 2013	336	1952, 1969, 1993, 2001, 2013, 2015
р. Левая Березовка - с. Средигорное	251	850	308	2018	273	1996, 2018	256	1996, 2018

Наиболее критические подъемы уровней, соответствующие и превышающие порог 3 % и 5 % обеспеченности, на крупных артериях (реки Кара Ертис, Уба, Ульба) зафиксированы в большинстве случаев в середине XX века (1953, 1958 гг.). В современном периоде (2001…2018 гг.) наблюдается смещение экстремальных отметок на средние и малые реки, такие как Улкен Бокен, Тургусун и Левая Березовка, где уровни воды неоднократно достигали расчетных значений высокой повторяемости. Особый интерес представляют редкие случаи достижения уровня 1 % обеспеченности,

зафиксированные на реке Левая Березовка в 2018 г. и реке Бухтарма в 1995 г., которые являются единственными примерами событий столетней вероятности в исследуемом регионе. Полученное увеличение пиковых уровней 3 % и 5 % обеспеченности на малых водосборах в последние два десятилетия указывает на изменение гидрологического режима региона и возрастающую амплитуду колебаний уровней в современных климатических условиях.

Сопоставление расчетных параметров с данными гидрометрических наблюдений показало, что полученные значения уровней редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %) тесно связаны с отметками реальных исторических экстремумов в Ертисском водохозяйственном бассейне. На графиках многолетнего хода уровней отчетливо прослеживается регулярность превышения критических порогов выхода воды на пойму (540 см для р. Кара-Ертис – с. Боран и 380 см для р. Улкен-Бокен – с. Джумба). При этом расчетный максимальный уровень 1 % обеспеченности на р. Кара-Ертис (653 см) прямо соответствует значению исторического максимума снегового половодья 1953 года [33, 34], а уровни 3 % и 5 % обеспеченности на реках Бухтарма, Ульба, Уба, Тургусун и Курчум (диапазон 33...485 см) находят свое отражение в зафиксированных катастрофических пиках 1969, 1993, 2014 и 2015 годов [35...38].

Историко-генетические условия наводнений и оценка расчетных пиковых уровней на уязвимых участках бассейна

Пространственно-временной анализ проявления опасных гидрологических явлений на территории Ертисского водохозяйственного бассейна подтверждает высокую частоту затопления прибрежных населенных пунктов (таб. 5).

Таблица 5

Ключевые участки проявления наводнений и их повторяемость на территории Ертисского водохозяйственного бассейна

№ п/п	Бассейн реки	Населенный пункт	Годы проявления наводнений	Повторяемость наводнений
1	р.Ертис	г. Семей, п. Восточный, с. Семиярское Комсомол с. Богатырево	2010; 2011; 2014 2008; 2015; 2022	6
2	р.Бухтырма	ВКО, Малеевка, Зубовка, Парыгино, Снегирёво; Комсомол, Соловьевский, Зыряновск, Катон-Карагайский район, село Сенное, верховья р. Бухтарма	2004; 2007 2009; 2010; 2011; 2015	6
3	Куршим	ВКО	2015	1
4	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	2010; 2011; 2015	3
5	р. Уба	с. Красный Яр Бородулихинского района	2010; 2015	2
6	р. Улкен Бокен	Восточно-Казахстанская область	2011	1
7	р. Глубочанка	Восточно-Казахстанская область	2011; 2015	2

Оценка частоты наводнений проведена по систематизированным данным обзоров опасных гидрометеорологических явлений, опубликованным в научно-техническом журнале «Гидрометеорология и экология» за период 1993...2025 гг. [39]. На основе обобщения данных систематических наблюдений можно выделить ключевые участки с наибольшей повторяемостью катастрофических наводнений:

– Река Ертис (г. Семей, с. Семиярское). За рассматриваемый период зафиксировано не менее 6 крупных наводнений (2008, 2010, 2011, 2014, 2015, 2022 гг.),

сопровождавшихся выходом воды на пойму, подтоплением жилых массивов и нарушением работы инфраструктуры;

– Река Бухтарма (с. Богатырево, Малеевка, Зубовка, Парыгино, г. Зыряновск/Алтай). Является одним из наиболее уязвимых притоков. Отмечено 6 выраженных паводковых периодов (2004, 2007, 2009, 2010, 2011, 2015 гг.), характеризующихся регулярным превышением критических отметок за счет сочетания интенсивного снеготаяния и дождевых осадков в горной части бассейна;

– Река Ульба (г. Усть-Каменогорск). Характеризуется высокой паводковой активностью (наводнения 2010, 2011, 2015 гг.). Из-за высокогорных уклонов и «взрывного» характера снеготаяния подъем уровней воды в черте города и прилегающих поселках происходит в крайне сжатые сроки;

– Реки Уба и Глубочанка (с. Красный Яр, Глубоковский район). Повторяемость наводнений составляет от 2 до 3 раз за наблюдаемый период (в частности, паводки 2010 и 2015 гг.), что обусловлено заторными явлениями и высокой изменчивостью максимального стока.

Сопоставление расчетных параметров с данными наблюдений показало, что полученные уровни редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %) соответствуют отметкам реальных исторических экстремумов в Ертисском бассейне. На графиках многолетнего хода хорошо видно регулярное превышение критических порогов выхода воды на пойму (540 см для р. Кара-Ертис – с. Боран и 380 см для р. Улкен-Бокен – с. Джумба), причем максимальный уровень 1 % обеспеченности на р. Кара-Ертис (653 см) сопоставим с абсолютным пиком 1953 года, а уровни 3 % и 5 % обеспеченности отражают исторические максимумы 1993, 2010 и 2015 годов на реках Улкен-Бокен, Ульба, Бухтарма и Уба. Сравнительный анализ подтверждает высокую частоту затопления прибрежных населенных пунктов. Таким образом, данные таблицы 4 наглядно иллюстрируют, что расчетные значения Qmax и Hmax редкой обеспеченности (P = 1 %, 3 %, 5 %) применимы к конкретным участкам риска и служат основой для картирования зон затопления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен комплексный статистический анализ максимальных расходов и максимальных уровней воды рек Ертисского водохозяйственного бассейна на основе длительных рядов гидрологических наблюдений. Проведенная проверка однородности исходных данных с использованием критериев Фишера, Стьюдента и Вилкоксона подтвердила их статистическую сопоставимость и надежность для последующих расчетов.

Определены основные параметры распределения максимальных расходов и уровней воды, включая коэффициенты вариации и асимметрии, что позволило выполнить расчет значений различной обеспеченности (1 %, 3 %, 5 %). Учет как расходов, так и уровней обеспечил более полное представление о гидрологическом режиме и экстремальных проявлениях стока в бассейне.

Дополнительно построены графики многолетней динамики максимальных расходов и графики максимальных уровней воды, анализ которых выявил выраженную пространственно-временную согласованность гидрологических процессов. Для большинства рек характерна цикличность с чередованием многоводных и маловодных фаз, при этом крупнейшие пики стока (1966, 1979, 1993 гг.) проявляются синхронно как на главных реках, так и на их притоках. На фоне общей устойчивости рядов прослеживается тенденция к некоторому снижению максимальных расходов за весь период наблюдений.

Экстремальные подъемы носят циклический характер, а исторические максимумы середины XX века сопоставимы с современными значениями. Для отдельных гидропостов выявлена высокая паводковая опасность, обусловленная регулярным

достижением и превышением критических отметок выхода воды на пойму. Отмечено учащение экстремальных уровней в последние десятилетия, а также тенденции к росту амплитуды колебаний и повышению базисных значений на отдельных реках.

Проведённые в настоящем исследовании расчёты сопоставимы сработами опубликованными ранее: в монографии «Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление» [30], «Ресурсах поверхностных вод» [33], авторами Чигринец Л.Ю и Байсакова М.К. [40]. Небольшие расхождения объясняются значительным удлинением рядов наблюдений и применением усеченных кривых обеспеченности максимальных расходов воды. Полученные результаты подтверждаются корректностью применённого методического подхода и проведенного расчета и свидетельствует о достоверности полученных оценок максимальных расходов и уровней воды.

Полученные и проанализированные ряды наблюдений, характеристики максимального стока и уровней, расчетные значения обеспеченностей послужат основой для более детальных исследований на основе моделирования, построения карт затоплений, получения прогноза и экспертных оценок.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из открытых источников РГП «Казгидромет».

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ААТ; Управление данными – ЖТС и НЖТ; Формальный анализ – ЖТС и НЖТ; Методология - ААТ; Программное обеспечение – НЖТ; Отслеживание – ААТ; Визуализация – ЖТС и НЖТ; Написание исходного проекта – ЖТС; Написание и редактирование обзора – ААТ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (программно-целевое финансирование по научным, научно-техническим программам №BR28713279 «Научно-прикладные основы управления рисками наводнений на равнинной и мелкосопочной территории Казахстана в условиях современных климатических изменений»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Bank, 2024 , Устойчивость к бедствиям. ЮНИСЕФ. Казахстан. [Электрон. ресурс]. – URL: https://www.unicef.org/kazakhstan/(дата обращения: 20.04.2026).
2. Азиатский банк развития. Профиль страновых рисков: Казахстан. — Март 2022. — 24 с. — URL: https://carecprogram.org/uploads/Country_Risk_Profiles_Kazakhstan_RU.pdf (дата обращения: 20.04.2026)
3. Турсунова, А. А. Историческая справка о гидрологических характеристиках наводнений на реке Жайык / А. А. Турсунова [и др.] // География и водные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 40–51. – DOI: 10.55764/2957-9856/2024-2-40-51.
4. Бейсембаева М. А., Дубровская Л. И., Земцов В. А. Антропогенные изменения водных ресурсов и максимальных уровней реки Иртыш в равнинной части бассейна в Республике Казахстан //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №. 3. – С. 6-15
5. Отчет о деятельности Ертисской бассейновой инспекции по регулированию использования и охране водных ресурсов КВР МСХ РК за 1999–2016 гг.
6. Винокуров Ю. И., Пузанов А. В., Безматерных Д. М. Современное состояние водных ресурсов и функционирование водохозяйственного комплекса бассейнов Оби и Иртыша. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 236 с. – ISBN 978-5-7692-1293-2.
7. Baspakova G. R., Alimkulov S. K., Sarkynov E. S., Tursunova A. A., Zagidullina A. R., Saparova A. A., Kulebayev K. M. Impact of climate change and anthropogenic factors on the runoff of the Ertis River // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. – 2022. – No. 5 (455). – P. 6–22. – DOI: 10.32014/2518-170X_2022_5_455_6-22.
8. Болдырев В.И. Реки восточного Казахстана // Природные условия и естественные ресурсы Восточного Казахстана. – Ал маАта: Наука, 1978. – С. 106–120.
9. Тореханова Н. С., Алдиярова А. Е., Зулпыхаров Б. А. Особенности формирования гидрологического режима реки Ертис на территории Казахстана в условиях антропогенной деятельности //Проблемы развития сельскохозяйственных мелиораций и водохозяйственного комплекса на базе цифровых технологий. – 2019. – Т. 2. – С. 218.
10. Малковский И. М. Территориальное перераспределение водных ресурсов Казахстана: возможность и целесообразность. – Алматы, 2012. – 414 с.
11. СНиП 2.01.14–83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М. : Стройиздат, 1985
12. Dahmen E. R., Hall M. J. Screening of hydrological data: tests for stationarity and relative consistency. – Wageningen : ILRI, 1990. – Publ. No. 49.
13. СП 33–101–2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.

14. Фролова Н. Л., и др. Многолетние колебания стока рек в бассейне Селенги // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 3. – С. 243–255.
15. Mengistu T. D., Chung I. M., Talpur Z., Alemayehu E. Quantifying regional low flows under data-scarce conditions // Heliyon. – 2024. – Vol. 10, № 7. – Art. e28728. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e28728.
16. Tan Kesgin R. İ. Revisiting trend stability using Mann–Kendall and Wilcoxon signed-rank tests through innovative method comparisons // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, № 23. – Art. 10454.
17. Memarian H., Balasundram S. K. Hydrological trend analysis integrated with landscape analysis at the watershed scale (case study: Langat basin, Malaysia) //Landscape Ecology-The Influences of Land Use and Anthropogenic Impacts of Landscape Creation. – IntechOpen, 2016.
18. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journal of the American Statistical Association. — 1968. — Vol. 63, No. 324. — P. 1379–1389.
19. Pettitt A. N. A non-parametric approach to the change-point problem // Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics). — 1979. — Vol. 28, No. 2. — P. 126–135.
20. Buishand T. A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records // Journal of Hydrology. — 1982. — Vol. 58, No. 1-2. — P. 11–27.
21. Павленко А. В., Мансурова А. К., Кызырканов А., Черных Д. В. Система мониторинга и обеспеченность данными прогноза наводнений Восточно-Казахстанской области // Вестник Карагандинского университета. Серия «Биология. Медицина. География». – 2024. – Т. 29, № 4 (116). – С. 183–196. – DOI: 10.31489/2024BMG4/183-196.
22. Plekhanov P.A. Natural hydrological risks and their prevention in Kazakhstan / P.A. Plekhanov // Cent Asian J Water Res (CAJWR). — 2017. — Vol. 3, No 1. — P. 2084. https://doi.org/10.15406/ijh.2019.03.00154
23. Гальперин Р. И., Авезова А. Максимальные расходы воды на казахстанском участке р. Есиль //География и водные ресурсы. – 2012. – №. 1. – С. 40-44
24. Gartsman B. I. et al. Methodological Approaches To Calculating Maximum River Discharge In The Upper Irtysh Basin //GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. – 2025.
25. Алагуджаева М. А. и др. Условия формирования наводнений на территории Центрального Казахстана // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 4 (111). – С. 61–73. – DOI: 10.54668/2789-6323-2023-111-4-61-73.
26. Алагуджаева М. А., Садвакасова С. Р., Елбасиева Б. Б., Аимбетов А. А. Гидрологическое цифровое прогнозное моделирование зон затопления территории Северного Казахстана на основе высокодетальной цифровой модели рельефа // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 4 (111). – С. 74–84. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2023-111-4-74-84
27. Садвакасова С. Р., Шыныбек А. Ұ., Мусина Т. С. Анализ затопления территории Восточно-Казахстанской области // Гидрометеорология и экология. – 2022. – № 4 (107). – С. 36–44
28. Оспанова М. С. Есіл өзені алабының су басу қаупін бағалау және басқару : дис. ... д-ра философии (PhD) : 6D061000. – Алматы, 2023. – 136 с
29. Рождественский, А. В. Статистические методы в гидрологии / А. В. Рождественский, А. И. Чеботарев. — Л. : Гидрометеоиздат, 1974. — 324 с.
30. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление : монография / под ред. Н.Н. Пальговой. — Алматы : Институт географии, 2012. — Т. 1. — 600 с.
31. Гидрологический ежегодник. 1969. Т. 6 : Бассейн Карского моря (западная часть). Вып. 4–6, 8, 9 : Бассейн рек Иртыша (без бассейна р. Тобола), Оби ниже устья р. Иртыша и рек Обской губы к западу до границы с Баренцевым морем.
32. Государственный водный кадастр Республики Казахстан. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши за 2000 год. Выпуск 1. Бассейн реки Ертис / РГП «Казгидромет». — Алматы : Казгидромет, 2001.
33. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 15. Алтай и Западная Сибирь. Выпуск 1. Подбассейн Верхний Иртыш / Под ред. В. А. Семенова. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 504 с.
34. Многолетние данные о режиме и ресурсах суши. Том 1. Выпуск 22. Бассейн р. Иртыш (в пределах Казахской ССР). — Алма-Ата: Казгидромет, 1987. — 380 с.
35. Гальперин, Р. И. Структура и динамика экстремального стока рек Казахстанского Алтая / Р. И. Гальперин, М. А. Бейсембаева // Водные ресурсы и водопользование. — 2008. — № 4. — С. 15–22.
36. Сборник научно-прикладных работ по гидрометеорологии и экологии. Выпуск 2. Опасные гидрометеорологические явления в Республике Казахстан. — Алматы: РГП «Казгидромет», 1995. — С. 45–58.
37. Плеханов, П. А. Классификация и оценка рисков гидрологических чрезвычайных ситуаций в Восточно-Казахстанской области / П. А. Плеханов, Е. М. Стародубцев // Гидрометеорология и экология. — 2016. — № 2 (81). — С. 73–85.
38. Обзоры опасных и стихийных гидрометеорологических явлений на территории Казахстана за 2014–2015 гг. — Алматы: РГП «Казгидромет», 2016. — 112 с.
39. Гидрометеорология и экология : научно-технический журнал / РГП «Казгидромет». — Алматы. — URL: https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro (дата обращения: 28.07.2026).
40. Чигринец Л.Ю., Байсакова М.К. Исследование и расчёт максимального стока воды рек Казахстанского Алтая // Гидрометеорология и экология. 2014. № 3.

REFERENCES

1. World Bank. (2024). Disaster resilience. UNICEF Kazakhstan. https://www.unicef.org/kazakhstan/
2. CAREC Program. (n.d.). Country risk profile: Kazakhstan. https://www.carecprogram.org/uploads/Country_Risk_Profiles_Kazakhstan_RU.pdf
3. Tursunova, A. A., Alimkulov, S. K., & Saparova, A. A. (2024). Istoricheskaya spravka o gidrologicheskih harakteristikah navodnenij na reke Zhajyk [Historical overview of the hydrological characteristics of floods on the Zhayik River]. Geografiya i Vodnye Resursy, (2), 40–51. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-2-40-51
4. Bejsembaeva, M. A., Dubrovskaya, L. I., & Zemcov, V. A. (2018). Antropogennye izmeneniya vodnyh resursov i maksimal'nyh urovnej reki Irtysh v ravninnoj chasti bassejna v Respublike Kazahstan [Anthropogenic changes to water resources and maximum water levels of the Irtysh River in the lowland part of the basin in the Republic of Kazakhstan]. Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov, 329(3), 6–15.
5. Irtysh Basin Inspection for Water Resources Regulation and Protection. (2016). Otchet o deyatel'nosti Ertisskoj bassejnovoj inspekcii po regulirovaniyu ispol'zovaniya i ohrane vodnyh resursov KVR MSKH RK za 1999–2016 gg. [Report on activities of the Irtysh Basin Inspection for Regulation of Use and Protection of Water Resources of the Committee for Water Resources of the Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan for 1999–2016].

6. Vinokurov, Y. I., Puzanov, A. V., & Bezmaternykh, D. M. (2012). Sovremennoe sostoyanie vodnyh resursov i funkcionirovanie vodohozyajstvennogo kompleksa bassejnov Obi i Irtysha [The current state of water resources and the functioning of the water management system in the Ob and Irtysh basins]. Izd-vo SO RAN.
7. Baspakova, G. R., Alimkulov, S. K., Sarkynov, E. S., Tursunova, A. A., Zagidullina, A. R., Saparova, A. A., & Kulebayev, K. M. (2022). Impact of climate change and anthropogenic factors on the runoff of the Ertis River. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences, (5), 6–22. https://doi.org/10.32014/2518-170X_2022_5_455_6-22
8. Boldyrev, V. I. (1978). Reki vostochnogo Kazahstana [Rivers of Eastern Kazakhstan]. In Prirodnye usloviya i estestvennye resursy Vostochnogo Kazahstana (pp. 106–120). Nauka.
9. Torekhanova, N. S., Aldiyarova, A. E., & Zulpyharov, B. A. (2019). Osobennosti formirovaniya gidrologicheskogo rezhima reki Ertis na territorii Kazahstana v usloviyah antropogennoj deyatel'nosti [Features of the formation of the hydrological regime of the Ertis River in Kazakhstan under conditions of human activity]. Problemy Razvitiya Sel'skohozyajstvennyh Melioracij i Vodohozyajstvennogo Kompleksa na Baze Cifrovyh Tekhnologij, 2, 218.
10. Malkovskij, I. M. (2012). Territorial'noe pereraspredelenie vodnyh resursov Kazahstana: Vozmozhnost' i celesoobraznost' [Territorial redistribution of Kazakhstan’s water resources: Feasibility and expediency]. Institute of Geography.
11. Gosstroy SSSR. (1985). Opredelenie raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [Determination of design hydrological characteristics] (SNiP 2.01.14–83). Stroyizdat.
12. Dahmen, E. R., & Hall, M. J. (1990). Screening of hydrological data: Tests for stationarity and relative consistency (Publication No. 49). International Institute for Land Reclamation and Improvement.
13. Gosstroy Rossii. (2004). Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [Determination of the main design hydrological characteristics] (SP 33–101–2003).
14. Frolova, N. L., Magritsky, D. V., Kireeva, M. B., & Sazonov, A. A. (2017). Mnogoletnie kolebaniya stoka rek v bassejne Selengi [Long-term fluctuations of river runoff in the Selenga basin]. Vodnye Resursy, 44(3), 243–255.
15. Mengistu, T. D., Chung, I. M., Talpur, Z., & Alemayehu, E. (2024). Quantifying regional low flows under data-scarce conditions. Heliyon, 10(7), Article e28728. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28728
16. Tan Kesgin, R. İ. (2025). Revisiting trend stability using Mann–Kendall and Wilcoxon signed-rank tests through innovative method comparisons. Sustainability, 17(23), Article 10454.
17. Memarian, H., & Balasundram, S. K. (2016). Hydrological trend analysis integrated with landscape analysis at the watershed scale (case study: Langat basin, Malaysia). In Landscape Ecology - The Influences of Land Use and Anthropogenic Impacts of Landscape Creation. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/62209
18. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389.
19. Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 28(2), 126–135.
20. Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology, 58(1–2), 11–27.
21. Pavlenko, A. V., Mansurova, A. K., Kyzyrkanov, A., & Chernykh, D. V. (2024). Sistema monitoringa i obespechennost' dannymi prognoza navodnenij Vostochno-Kazahstanskoj oblasti [Monitoring system and data availability for flood forecasting in the East Kazakhstan region]. Vestnik Karagandinskogo Universiteta. Seriya «Biologiya. Medicina. Geografiya», 29(4), 183–196. https://doi.org/10.31489/2024BMG4/183-196
22. Plekhanov, P. A. (2017). Natural hydrological risks and their prevention in Kazakhstan. Central Asian Journal of Water Research, 3(1), 22–31. https://doi.org/10.29258/CAJWR/2017-RI.v3-1/22-31.eng
23. Gal'perin, R. I., & Avezova, A. (2012). Maksimal'nye rashody vody na kazahstanskom uchastke r. Esil [Maximum water discharge on the Kazakh section of the Esil River]. Geografiya i Vodnye Resursy, (1), 40–44.
24. Gartsman, B. I., Shamov, V. V., & Gubareva, T. S. (2025). Methodological approaches to calculating maximum river discharge in the Upper Irtysh basin. Geography, Environment, Sustainability, 18(1), 45–56.
25. Alagudzhaeva, M. A., Sadvakasova, S. R., & Elbasieva, B. B. (2023). Usloviya formirovaniya navodnenij na territorii Central'nogo Kazahstana [Conditions for the formation of floods in the territory of Central Kazakhstan]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, (4), 61–73. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2023-111-4-61-73
26. Alagudzhaeva, M. A., Sadvakasova, S. R., Elbasieva, B. B., & Aimbetov, A. A. (2023). Gidrologicheskoe cifrovoe prognoznoe modelirovanie zon zatopleniya territorii Severnogo Kazahstana na osnove vysokodetal'noj cifrovoj modeli rel'efa [Hydrological digital predictive modeling of flood zones in Northern Kazakhstan based on a high-detail digital elevation model]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, (4), 74–84. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2023-111-4-74-84
27. Sadvakasova, S. R., Shynybek, A. U., & Musina, T. S. (2022). Analiz zatopleniya territorii Vostochno-Kazahstanskoj oblasti [Analysis of flooding in the territory of the East Kazakhstan region]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, (4), 36–44.
28. Ospanova, M. S. (2023). Esil özeni alabynyñ su basu qaupin bağalau jäne basqaru [Assessment and management of flood risk in the Esil River basin] (Doctoral dissertation, Al-Farabi Kazakh National University).
29. Rozhdestvensky, A. V., & Chebotarev, A. I. (1974). Statisticheskie metody v gidrologii [Statistical methods in hydrology]. Gidrometeoizdat.
30. Pal'gov, N. N. (Ed.). (2012). Vodnye resursy Kazahstana: Ocenka, prognoz, upravlenie [Water resources of Kazakhstan: Assessment, forecast, management] (Vol. 1). Institut Geografii.
31. Gidrometeoizdat. (1969). Gidrologicheskij ezhegodnik. T. 6: Bassejn Karskogo morya (zapadnaya chast') [Hydrological yearbook. Vol. 6: Kara Sea basin (western part)]. Gidrometeoizdat.
32. RSE "Kazhydromet". (2001). Gosudarstvennyi vodnyi kadastr Respubliki Kazakhstan. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi za 2000 god. Vypusk 1. Bassein reki Ertis [State Water Cadastre of the Republic of Kazakhstan. Annual data on the regime and resources of land surface waters for 2000. Issue 1. Ertis River Basin]. Kazhydromet.
33. Semenov, V. A. (Ed.). (1969). Resursy poverhnostnyh vod SSSR. T. 15. Vyp. 1. Podbassejn Verhnij Irtysh [Surface water resources of the USSR, Vol. 15. Issue 1. Upper Irtysh sub-basin]. Gidrometeoizdat.
34. Kazhydromet. (1987). Mnogoletniye dannyye o rezhime i resursakh sushi. Tom 1. Vypusk 22. Basseyn r. Irtysh (v predelakh Kazakhskoy SSR) [Long-term data on the regime and resources of land. Vol. 1. Issue 22. The Irtysh River basin (within the Kazakh SSR)]. Kazhydromet.

35. Galperin, R. I., & Beisembayeva, M. A. (2008). Struktura i dinamika ekstremal'nogo stoka rek Kazakhstanskogo Altaya [Structure and dynamics of extreme river runoff of the Kazakh Altai]. Vodnyye Resursy i Vodopol'zovaniye, (4), 15–22.
36. Kazhydromet. (1995). Opasnyye gidrometeorologicheskiye yavleniya v Respublike Kazakhstan [Hazardous hydrometeorological phenomena in the Republic of Kazakhstan]. In Sbornik nauchno-prikladnykh rabot po gidrometeorologii i ekologii (Issue 2, pp. 45–58). RSE "Kazhydromet".
37. Plekhanov, P. A., & Starodubtsev, E. M. (2016). Klassifikatsiya i otsenka riskov gidrologicheskikh chrezvychaynykh situatsiy v Vostochno-Kazakhstanskoy oblasti [Classification and risk assessment of hydrological emergencies in East Kazakhstan Region]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, (2), 73–85.
38. Kazhydromet. (2016). Obzory opasnykh i stikhiynykh gidrometeorologicheskikh yavleniy na territorii Kazakhstana za 2014–2015 gg. [Reviews of hazardous and natural hydrometeorological phenomena in the territory of Kazakhstan for 2014–2015]. RSE "Kazhydromet".
39. RSE "Kazhydromet". (n.d.). Gidrometeorologiya i ekologiya [Hydrometeorology and Ecology]. Retrieved September 15, 2026, from https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro
40. Chigrinec, L. Y., & Bajsakova, M. K. (2014). Issledovanie i raschyot maksimal'nogo stoka vody rek Kazahstanskogo Altaya [Investigation and calculation of maximum water runoff of the rivers of the Kazakh Altai]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, (3), 45–52.

ЕРТІС ӨЗЕНІ АЛАБЫНДАҒЫ СУ ТАСҚЫНДАРЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

Айсулу А. Турсунова[1] – г.ғ.к., қауымдастырылған проф., Жанат Т.Салаватова[1,2]*, Нурила Ж. Турсын[1]

[1] География және су қауіпсіздігі институты, Алматы қ., Қазақстан; ais.tursun@bk.ru (ААТ), salavatova.07@gmail.com (ЖТС), Nurila_t@bk.ru (НЖТ)
[2] Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; salavatova.07@gmail.com (ЖТС)
*Корреспондент-автор: Жанат Т. Салаватова, salavatova.07@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Ертіс өзені, максималды ағын, максималды деңгейлер, су тасқыны, көктемгі су жайылуы

Мақала жайында:
Алынды: 24.12.2025
Қайта қаралды: 13.04.2026
Қабылданды: 16.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Жұмыста көпжылдық гидрологиялық бақылаулар негізінде, басты өзені Ертіс Қазақстанның негізгі су артерияларының бірі болып табылатын Ертіс су шаруашылығы бассейні өзендеріндегі су тасқынының гидрологиялық қауіптілік сипаттамалары мен экстремалды ағынды параметрлеріне кешенді талдау ұсынылған. Ол трансшекаралық өзендерге жатады және оны екі көршілес мемлекет – Қытай Халық Республикасы мен Ресей Федерациясы қарқынды түрде пайдаланады. Жұмыстың мақсаты – судың максималды шығындары (Qmax) мен ең жоғары деңгейлерінің (H_{max}) статистикалық сипаттамаларын кешенді бағалау, гидрологиялық қатарлардың біртектілігін тексеру, әртүрлі қамтамасыз етілудегі (1%, 3%, 5%) шығындар мен деңгейлердің есептік мәндерін анықтау, сондай-ақ аумақтарды су басу қаупін бағалау мақсатында су басу шекараларын негіздеу және әрі қарайғы гидродинамикалық модельдеу үшін оларды жайылманың тегістелу белгілерімен және аймақтағы тарихи су тасқындарымен салыстыру.

Бірінші кезеңде бастапқы деректерді өңдеу, бақылаулардың жоқ деректерін қалпына келтіру және судың максималды шығындары қатарларының біртектілігін талдау жүргізілді. Статистикалық біртектілікті тексеру үшін Фишер, Стьюдент және Вилкоксон критерийлері, сондай-ақ Манн–Кендалл, Петтитт және Буишанд критерийлері пайдаланылды, бұл бассейннің әртүрлі гидрологиялық бекеттеріндегі гидрологиялық бақылаулардың орнықтылығын, жүйелік ауытқулардың жоқтығын және салыстырмалылығын бағалауға мүмкіндік берді.

Тексерілген қатарлар негізінде судың максималды шығындарына статистикалық талдау жасалып, үлестірімнің негізгі параметрлері, соның ішінде вариация коэффициенті (Cv) мен асимметрия коэффициенті (Cs) анықталды, ал құбылмалылығы жоғары су жинау бөгеттері (аyarтегиялары) үшін Крицкий–Менкельдің қиылған үлестірім функциялары қолданылды. Алынған статистикалық сипаттамалар экстремалды гидрологиялық құбылыстардың орын алу ықтималдығын көрсететін әртүрлі қамтамасыз етілудегі (1 %, 3 %, 5 %) судың максималды шығындары мен деңгейлерін есептеу үшін пайдаланылды. Зерттелетін бассейннің әртүрлі гидрологиялық бекеттеріндегі судың максималды шығындарының көпжылдық динамикасына салыстырмалы талдау жүргізілді, бұл экстремалды ағынды қалыптасуының кеңістіктік ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік берді.Сондай-ақ, судың максималды деңгейлерінің жіберіп алған мәндерін қалпына келтіруді және олардың көпжылдық динамикасын талдауды қамтитын көпжылдық деректерге кешенді өңдеу жүргізілді. Нақты деңгейлерді судың жайылмаға шығу белгілерімен салыстыру негізінде жайылмалы аумақтардың су астында қалуының нақты жылдары белгіленді, сондай-ақ асып кету ықтималдығы әртүрлі (1 %, 3 % және 5 %) максималды деңгейлердің параметрлері есептелді.

HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF FLOODS IN THE ERTIS RIVER BASIN

Aisulu A. Tursunova[1] – Cand. Geogr. Sc., Assoc. Prof., Zhanat T. Salavatova[1,2]*, Nurila Zh. Tursyn[1].

[1] Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan; ais.tursun@bk.ru (AAT), salavatova.07@gmail.com (ZHTS), Nurila_t@bk.ru (NZHT)
[2] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; salavatova.07@gmail.com (ZHTS)
*Corresponding Author: Zhanat T. Salavatova, salavatova.07@gmail.com

KEY WORDS

Ertis River, maximum runoff, maximum levels, flood, spring flood

About article:
Received: 24.12.2025
Revised: 13.04.2026
Accepted: 16.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This study presents a comprehensive analysis of extreme flow parameters and hydrological flood hazard characteristics in the Irtysh Water Management Basin based on long-term hydrological observations. The main river, the Irtysh, is one of the primary waterways of Kazakhstan. It is a transboundary river heavily utilized by two neighboring nations—the People's Republic of China and the Russian Federation. The objective of this work is to provide a comprehensive assessment of the statistical characteristics of maximum water discharges (Qmax) and peak water levels (Hmax), test the homogeneity of hydrological series, and determine the calculated values of discharges and levels for various exceedance probabilities (1%, 3%, 5%). Furthermore, these values are compared with floodplain alignment elevations and historical floods in the region to substantiate inundation boundaries for subsequent hydrodynamic modeling aimed at assessing flood risk.

In the first stage, initial data processing was performed, including the restoration of missing observational data and the evaluation of series homogeneity for maximum water discharges. Fisher, Student, and Wilcoxon tests, along with Mann–Kendall, Pettitt, and Buishand tests, were applied to verify statistical homogeneity. This enabled the assessment of stability, absence of systemic shifts, and comparability of hydrological observations across various streamflow gaging stations in the basin.

Based on the verified series, a statistical analysis of maximum water discharges was conducted to determine the primary distribution parameters, including the coefficient of variation (Cv) and the coefficient of asymmetry (Cs). For catchments exhibiting high variability, truncated Kritsky–Menkel distribution functions were applied. The resulting statistical characteristics were used to calculate maximum water discharges and levels for specified exceedance probabilities (1%, 3%, 5%), reflecting the likelihood of extreme hydrological events. A comparative analysis of long-term maximum discharge dynamics across various gaging stations revealed the spatial patterns governing extreme runoff formation.

Additionally, comprehensive processing of long-term data was carried out, incorporating the restoration of missing peak water level values and the analysis of their multi-year dynamics. By comparing recorded water levels with floodplain inundation thresholds, specific years of floodplain flooding were identified, and parameters for maximum water levels of various exceedance probabilities (1%, 3%, and 5%) were calculated.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В КАЗАХСТАНЕ В ЗИМНИЙ СЕЗОН 2024-2025 гг. И ЕГО МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Бакыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Акмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жаксыбаева, Айдарбек М. Султанкулов

РГП «Казгидромет», г. Астана, Казахстан; zhezdibayeva_b@meteo.kz (ЖБТ), abilkadi_a@meteo.kz (ӘАӘ), smagulova_ak@meteo.kz (САБ), zhaksybayeva_a@meteo.kz (ЖАЕ), sultankulov_a@meteo.kz (САМ)
*Автор корреспондент: Аружан Ә. Әбілқади, abilkadi_a@meteo.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

снежный покров, мониторинг, запасы воды в снеге, водный баланс, метеорологические наблюдения, зимний сезон 2024...2025 гг.

АБСТРАКТ

В работе проанализированы пространственно-временные особенности снежного покрова на территории Казахстан в зимний сезон 2024...2025 гг., а также выполнена оценка многолетних трендов основных характеристик снежности (число дней со снежным покровом, максимальная высота и запас воды в снеге) за период 1970…2025 гг. на основе данных государственной наблюдательной сети РГП «Казгидромет». Показано, что в зимний сезон 2024…2025 гг. на фоне сокращения числа дней со снежным покровом в большинстве регионов в северных и центральных областях сформировались повышенные снегозапасы, тогда как на юге страны наблюдался их дефицит. Статистически значимое увеличение линейного тренда максимальной высоты снежного покрова и запасов воды в снеге выявлено на севере и востоке страны, а также в Ертисском, Есильском и Тобыл-Торгайском водохозяйственных бассейнах, тогда как снижение снегозапасов отмечено в Арало-Сырдарьинском бассейне. Статистически значимое сокращение числа дней со снежным покровом не выявлено. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки водных ресурсов, прогнозирования весеннего половодья и разработки мер адаптации к современным климатическим изменениям.

1. ВВЕДЕНИЕ

Снежный покров является одним из ключевых компонентов климатической системы суши и играет важную роль в формировании энергетического и водного баланса территорий. Его наличие и характеристики оказывают существенное влияние на теплообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой, альбедо земной поверхности, а также на процессы аккумуляции и перераспределения влаги [1…2].

В регионах с континентальным климатом снежный покров служит основным источником питания рек в весенний период, определяя величину и сроки половодья [3].

Для территории Казахстана, характеризующейся резко континентальным климатом, значительными сезонными колебаниями температуры воздуха и неравномерным распределением осадков, состояние и динамика снежного покрова имеют особое природно-хозяйственное значение. Пространственная неоднородность снежного покрова обусловлена разнообразием физико-географических условий страны — от равнинных степных и пустынных районов до горных систем Тянь-Шаня и Алтая [4…5]. Изменения мощности и продолжительности залегания снежного покрова напрямую отражаются на водообеспеченности сельского хозяйства, функционировании водохранилищ и риске возникновения паводков [6].

МРНТИ 37.21.31 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-45-54 УДК 551.55(574)

По статье:
Получено: 24.12.2025
Пересмотрено: 13.04.2026
Принято: 16.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Жездибаева Б., Әбілқади А., Смагулова А., Жаксыбаева А., Султанкулов А., Мониторинг состояния снежного покрова в Казахстане в зимний сезон 2024-2025 гг. и его многолетних изменений// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 45-54.

Современные климатические изменения, проявляющиеся в росте температуры воздуха и изменении режима осадков, оказывают заметное влияние на характеристики снежного покрова. Согласно оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата, повышение температуры воздуха приводит к изменениям характеристик снежного покрова, включая сокращение продолжительности его залегания и смещение сроков снеготаяния [7]. Эти изменения усиливают неопределённость в прогнозах водных ресурсов и требуют постоянного мониторинга снежных условий. Аналогичные тенденции отмечаются в странах Азии, где в последние годы наблюдаются существенные климатические аномалии, оказывающие влияние на гидрологический режим и состояние криосферы [8].

Традиционные методы наблюдений за снежным покровом, основанные на данных метеорологических станций и маршрутных снегомерных съёмок, не всегда обеспечивают достаточную пространственную репрезентативность, особенно для обширных и труднодоступных территорий Казахстана [9]. В связи с этим всё более широкое применение находят методы дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать оперативную и пространственно детализированную информацию о площади, продолжительности залегания и динамике снежного покрова [10…12]. Спутниковые данные MODIS и Sentinel активно используются для анализа сезонных и межгодовых изменений снежного покрова в различных природных зонах.

Современные исследования свидетельствуют о значительной межгодовой изменчивости снегопадов и характеристик снежного покрова в Центральной Азии, обусловленной влиянием крупномасштабных атмосферных процессов и изменением климатических условий [13]. Анализ спутниковых данных также указывает на существенные изменения продолжительности залегания снежного покрова и его пространственного распределения в регионе за последние десятилетия [14]. Для территории Казахстана установлены изменения пространственного распределения снегозапасов, наиболее выраженные в восточных районах страны [15].

В последние годы особое внимание уделяется исследованию изменений снежного покрова в горных районах Азии, являющихся важнейшими источниками водных ресурсов. Результаты спутникового мониторинга и климатического моделирования свидетельствуют о сокращении площади и продолжительности залегания снежного покрова, а также об изменении режима снеготаяния в условиях современного потепления климата [16…19]. Установлено, что данные изменения оказывают существенное влияние на формирование речного стока и водообеспеченность регионов, зависящих от снегового питания.

По данным климатических обзоров РГП «Казгидромет», характеристики снежного покрова на территории Казахстана отличаются значительной пространственной изменчивостью, обусловленной особенностями атмосферной циркуляции и физико-географическими условиями регионов [20...21]. В связи с этим анализ особенностей снежного покрова представляет научный и практический интерес с точки зрения оценки современных климатических тенденций и их влияния на водные ресурсы страны.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование изменений параметров снежного покрова выполнено на базе наблюдательных данных 211 метеорологических станций и 47 агрометеорологических и гидрологических постов государственной сети РГП «Казгидромет» [22]. Для анализа климатической изменчивости использованы материалы 182 длинорядных метеорологических станций, представленные в Республиканском гидрометеорологическом фонде. Пространственное обобщение временных рядов аномалий осуществлялось по территории Казахстана с разделением на 17 областей и 8 водохозяйственных бассейнов.

Оценка состояния снежного покрова для каждого зимнего сезона выполняется на основе данных за период с 1 июля предыдущего года по 30 июня текущего года. Аномальные значения определялись как отклонения фактических значений от среднемноголетних показателей, полученных для базового интервала 1991...2020 гг.

Для оценки изменений характеристик снежного покрова за период 1970…2025 гг. применяются коэффициенты линейных трендов, рассчитываемые методом наименьших квадратов. В качестве показателя статистической значимости тренда используется коэффициент детерминации, характеризующий долю вклада трендовой составляющей в общую дисперсию климатической переменной за рассматриваемый временной интервал (в %). Тренд считается статистически значимым при уровне значимости $a \leq 0,05$.

Сезон 2024…2025 гг. рассмотрен для характеристики современного состояния снежного покрова и выявления его аномалий, тогда как анализ рядов наблюдений за 1970…2025 гг. выполнен для оценки долгосрочных тенденций и определения, являются ли особенности рассматриваемого сезона проявлением устойчивых климатических изменений или результатом естественной межгодовой изменчивости.

Дополнительно оценивались межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова с использованием среднеквадратического отклонения и положение текущих значений в многолетнем ряду на основе ранговой оценки. Низкие значения среднеквадратического отклонения указывают на относительно устойчивый характер показателя и небольшую межгодовую изменчивость, тогда как высокие значения свидетельствуют о значительных колебаниях показателя от года к году. При ранжировании 1-й ранг соответствовал максимальному, а 55-й – минимальному значению. Ранговая оценка позволила определить положение характеристик снежного покрова зимы 2024…2025 гг. в многолетнем ряду и выявить территории с близкими к максимальным или минимальным значениями.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зимний период 2024…2025 гг. на территории Республики Казахстан характеризовался выраженной пространственной неоднородностью снежного покрова. На большей части страны отмечалось сокращение продолжительности снежного периода, тогда как запасы воды в снеге и максимальная высота снежного покрова распределялись крайне неравномерно.

Отрицательные аномалии числа дней со снегом наблюдались практически во всех регионах, наиболее выраженные – в северных и юго-восточных областях. Исключение составили Улытауская и Кызылординская области, где продолжительность снежного периода оказалась выше климатической нормы. Наибольшие положительные аномалии запасов воды в снеге зарегистрированы в северных и центральных регионах, прежде всего в Акмолинской, Костанайской и Павлодарской областях. Напротив, южные и западные области характеризовались устойчивым дефицитом снегозапасов. Максимальная высота снежного покрова изменялась менее контрастно, однако также демонстрировала выраженную широтную дифференциацию: положительные аномалии преобладали в северных и восточных регионах, отрицательные — на юге и западе страны (таб.1, рис. 1).

Анализ среднеквадратического отклонения показал, что наиболее высокая изменчивость числа дней со снегом отмечена в Алматинской, Акмолинской, Абайской и Туркестанской областях, тогда как наиболее устойчивые значения характерны для Павлодарской, Северо-Казахстанской и Западно-Казахстанской областей. По запасам воды в снеге наиболее высокие значения среднеквадратического отклонения отмечены в области Жетысу, области Абай и Восточно-Казахстанской области, а по максимальной высоте снежного покрова – в Акмолинской, Абайской, Восточно-Казахстанской областях и области Жетысу. В целом наиболее значительная межгодовая изменчивость характеристик снежного покрова отмечается преимущественно в восточных и юго-восточных регионах, а также в отдельных северных и южных областях Казахстана (таб.1).

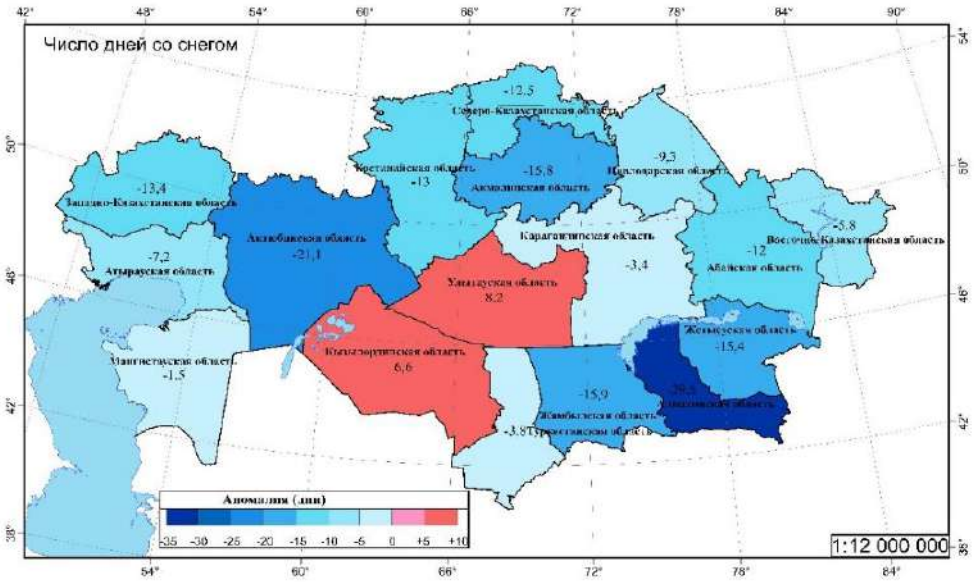
Ранговый анализ показал, что зима 2024…2025 гг. вошла в число наиболее малоснежных по продолжительности снежного периода для большинства областей Казахстана. Вместе с тем в северных и центральных регионах отмечены рекордно высокие или близкие к рекордным значениям запасов воды в снеге и максимальной высоты снежного покрова. Наиболее экстремальные условия наблюдались в Акмолинской области, где оба показателя достигли первого ранга за весь период наблюдений. В противоположность этому южные области (Туркестанская и Жамбылская) характеризовались минимальными снегозапасами и высотой снежного покрова, что свидетельствует о крайне малоснежном зимнем сезоне. Таким образом, ранговый анализ подтверждает усиление пространственной контрастности снежного режима в зимний период 2024…2025 гг. (таб.1).

Таблица 1.

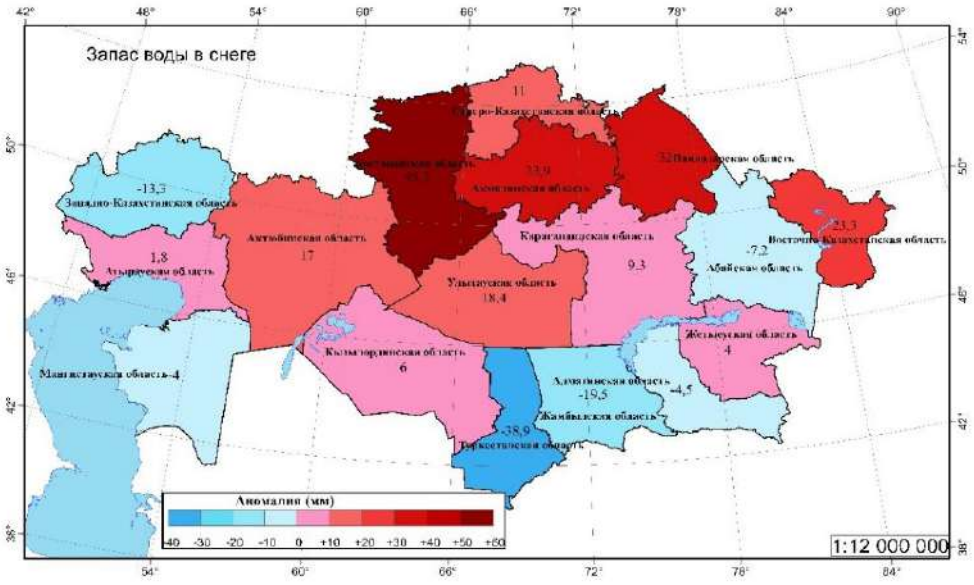
Аномалии характеристик снежного покрова за зимний период 2024…2025 гг., осреднённые по областям Республики Казахстан

№	Регионы	Число дней со снегом			Запас воды в снеге			Максимальная высота снега		
		Δ	σ	R	Δ	σ	R	Δ	σ	R
1	Северо-Казахстанская область	-12,5	7	49	11,0	27,3	15	3,2	20,9	15
2	Акмолинская область	-15,8	42,4	49	33,9	37,8	1	24,7	31,5	1
3	Костанайская область	-13	11	50	55,7	21,4	2	-4,7	8,7	37
4	Павлодарская область	-9,3	5,0	44	32,0	60,0	4	0,6	12,3	26
5	Восточно-Казахстанская область	-5,8	17,3	39	23,3	86,7	9	8,6	25,2	7
6	область Абай	-12,0	43,0	23	-7,2	95,8	27	2,9	28,3	13
7	Карагандинская область	-3,4	18,3	36	9,3	33,2	10	2,8	17,3	12
8	область Улытау	8,2	19,0	21	18,4	51,2	9	-0,3	9,0	33
9	Западно-Казахстанская область	-13,4	8,4	46	-13,3	26,5	37	-10,5	9,5	49
10	Атырауская область	-7,2	32,8	35	1,8	27,5	18	-4,7	8,6	37
11	Мангистауская область	-1,5	19,8	27	-4,0	10,9	18	2,1	5,2	10
12	Актюбинская область	-21,1	15,41	51	17,0	37,8	13	-1,9	13,8	21
13	Кызылординская область	6,6	28,1	24	6,0	8,5	16	-3,4	3,9	43
14	Туркестанская область	-3,8	40,2	34	-38,9	51,4	53	-7,9	15,8	51
15	Жамбылская область	-15,9	15,9	45	-19,5	21,4	53	-8,6	3,3	55
16	Алматинская область	-29,5	47,26	53	-4,5	45,6	30	-4,5	22,0	37
17	область Жетысу	-15,4	29,2	45	4,0	107,7	17	-2,5	25,2	22

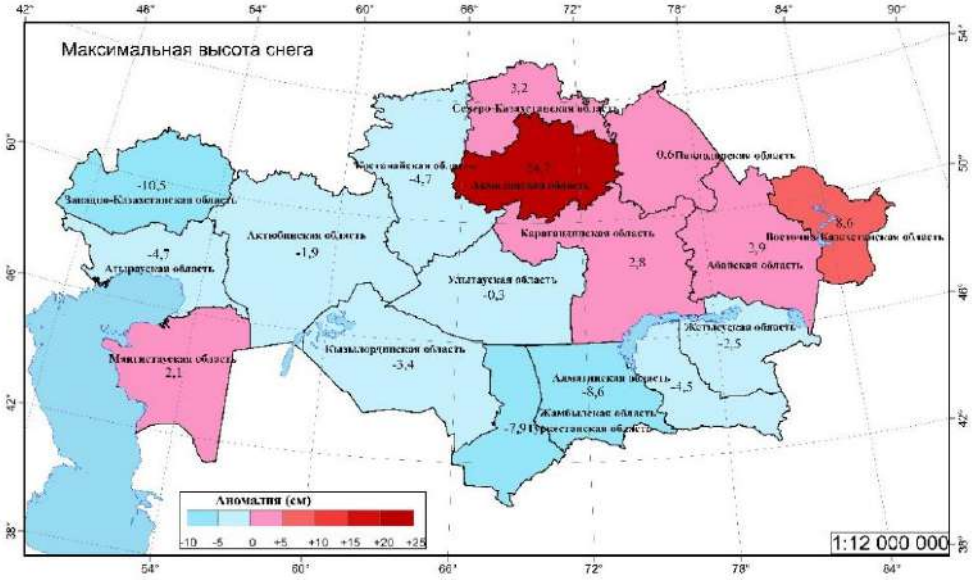
Примечание: Δ- отклонение от средних 1991...2020 гг., σ -среднеквадратическое отклонение, R- ранг текущих значений в ряду убывающих характеристик зимнего периода за 1970...2025 гг.



А



Б



В

Рисунок 1. *Карта аномалии характеристик снежного покрова за зимний период 2024…2025 гг., осреднённые по областям для: числа дней со снегом (А); запасов воды (Б); максимальной высоты снега (В)*

Анализ линейных трендов максимальной высоты снежного покрова (Hmax), числа дней со снегом (Nd) и запасов воды в снеге (SWEn) за период 1970…2025 гг. выявил выраженную пространственную неоднородность изменений снежного режима на территории Казахстана (таб. 2). Статистически значимые тренды ($p < 0,05$) свидетельствуют о трансформации термического и осадочного режимов зимнего сезона.

На севере Казахстана отмечается увеличение максимальной высоты снежного покрова и запасов воды в снеге при одновременном сокращении продолжительности снежного периода. Наиболее выраженный рост Hmax наблюдается в Акмолинской области (+4,09 см/10 лет), а SWEn — в Костанайской области (+6,1 мм/10 лет). Такая динамика указывает на формирование более мощного, но менее продолжительного снежного покрова вследствие усиления зимних осадков и ускоренного снеготаяния в условиях повышения температуры воздуха.

Наиболее интенсивные изменения выявлены на востоке страны. В Восточно-Казахстанской области зафиксирован максимальный рост запасов воды в снеге (+14,12 мм/10 лет) и значительное увеличение Hmax (+3,01 см/10 лет), положительные тенденции отмечаются также в Абайской области. Вероятной причиной является орографическое усиление осадков в сочетании с ростом влагоемкости атмосферы.

В центральном Казахстане тенденции неоднородны: в Карагандинской области наблюдается увеличение Hmax и SWEn, тогда как в Улытауской области отмечается снижение этих показателей при незначительном увеличении продолжительности снежного периода, что отражает высокую чувствительность региона к межгодовой изменчивости атмосферной циркуляции.

Для западного и южного Казахстана характерно сокращение продолжительности снежного покрова, сопровождающееся уменьшением его высоты и влагозапаса. Наиболее выраженное снижение Nd отмечено в Атырауской (-3,49 дня/10 лет), Западно-Казахстанской и Туркестанской областях, что связано с зимним потеплением, увеличением повторяемости оттепелей и ростом доли жидких осадков.

В юго-восточной части страны тенденции менее однородны: в Алматинской области наблюдается рост всех характеристик снежного покрова под влиянием горных систем Северного Тянь-Шаня, тогда как в области Жетысу изменения выражены слабо.

Таблица 2.

Оценка линейного тренда (красным цветом обозначены статистически значимые на 5%-уровне) осредненных характеристик снежного покрова для областей Казахстана за 1970...2025 гг;

№	Область	H max	Nd	SWEn
1	Северо-Казахстанская область	**1,91**	0,41	**3,4**
2	Акмолинская область	**4,09**	-1,77	**3,68**
3	Костанайская область	0,65	0,43	**6,1**
4	Павлодарская область	-0,06	-0,22	**3,1**
5	Восточно-Казахстанская область	**3,01**	0,98	**14,12**
6	область Абай	**1,49**	1,44	**5,4**
7	Карагандинская область	**1,93**	0,63	**3,7**
8	область Улытау	**-1,89**	0,54	-0,85
9	Западно-Казахстанская область	0,05	-2,98	0,33
10	Атырауская область	**-1,86**	-3,49	-0,17
11	Мангистауская область	0,04	-1,59	1,15
12	Актюбинская область	0,01	-1,02	2,86
13	Кызылординская область	**-0,74**	-2,5	**-2,39**
14	Туркестанская область	-0,65	-2,9	2,43
15	Жамбылская область	-0,06	-1,19	1,19
16	Алматинская область	**0,9**	1,28	1,32
17	область Жетысу	0,01	-0,15	1,06

Примечание: H max, см/10 лет - максимальная высота снежного покрова; Nd, дни/10 лет – число дней со снежным покровом; SWEn, мм/10 лет - запас воды в снеге (поле).

Региональный анализ по административным единицам отражает территориальную дифференциацию снежного режима, однако для оценки водохозяйственных последствий более репрезентативным является бассейновый подход, позволяющий выявить влияние изменений снегозапасов на формирование речного стока.

Оценка линейных трендов SWEn за 1970…2025 гг, по водно-хозяйственным бассейнам показала следующую пространственную структуру изменений (таб. 3).

Наиболее интенсивный рост снегозапасов выявлен в Ертисском бассейне (+7,45 мм/10 лет; вклад тренда в дисперсию D = 17,89 %), Положительные тенденции

также характерны для Есильского (+3,09 мм/10 лет), Тобыл-Торгайского бассейнов (+2,83 мм/10 лет). Рост снегозапасов в этих бассейнах согласуется с увеличением Hmax в соответствующих северных и восточных областях и может способствовать усилению весеннего половодья.

В Балкаш-Алакольском бассейне отмечается положительный тренд (+2,06 мм/10 лет), в Шу-Таласском бассейне тренд слабовыраженный (+0,68 мм/10 лет) и изменения статистически незначимые. Также В Нура-Сарысуйском бассейне тренд слабо положительный (+0,85 мм/10 лет) и статистически незначимый.

В Арало-Сырдариинском бассейне зафиксирован выраженный отрицательный тренд (-4,07 мм/10 лет; D = 9,38 %), Снижение запасов воды в снеге свидетельствует об уменьшении потенциала весеннего стока и усилении риска дефицита водных ресурсов.

В Жайык (Урало)-Каспийском бассейне изменения практически отсутствуют, вклад тренда в дисперсию минимален.

Таблица 3.

Оценка линейного тренда осредненных характеристик запаса воды для водно-хозяйственных бассейнов Казахстана за 1970...2025 гг. SWEn /10 лет – коэффициент линейного тренда, D – вклад тренда в дисперсию

№	Бассейны	SWEn	D
1	Арало-Сырдариинский бассейн	**-4,07**	9,38
2	Балкаш-Алакольский бассейн	2,06	2,25
3	Ертисский бассейн	**7,45**	17,89
4	Есильский бассейн	**3,09**	5,08
5	Жайык(Урало)-Каспийский бассейн	-0,43	0,05
6	Нура-Сарысуйский бассейн	0,85	0,83
7	Тобыл-Торгайский бассейн	**2,83**	5,83
8	Шу-Таласский бассейн	0,68	0,39

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ многолетних изменений характеристик снежного покрова на территории Казахстана позволил выявить пространственные особенности их трансформации и установить устойчивые региональные тенденции. Полученные результаты свидетельствуют о неоднородности изменений снежного режима: в северных и восточных регионах наблюдается увеличение максимальной высоты снежного покрова и запасов воды в снеге, тогда как в западных и южных районах отмечается сокращение продолжительности залегания снежного покрова. Наиболее выраженный рост снегозапасов характерен для горных районов востока и юго-востока страны.

Сопоставление результатов административного и бассейнового подходов показало их высокую согласованность. Пространственные закономерности, выявленные по административным регионам, подтверждаются изменениями характеристик снежного покрова в пределах основных речных бассейнов, что свидетельствует о достоверности полученных оценок и возможности их использования для комплексного анализа водных ресурсов.

Полученные результаты имеют практическое значение для оценки водных ресурсов, прогнозирования весеннего половодья, совершенствования гидрологических прогнозов, а также для разработки мероприятий по адаптации отраслей экономики к изменению климата. Выявленные тенденции могут быть использованы при планировании водохозяйственной деятельности, управлении рисками паводков и засух, а также при актуализации климатических и гидрологических характеристик территории Казахстана.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением временного ряда наблюдений, применением данных дистанционного зондирования Земли и климатического моделирования, а также с комплексной оценкой влияния изменений снежного покрова на формирование речного стока, состояние водных ресурсов и развитие опасных гидрометеорологических явлений.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из источников: РГП «Казгидромет» МЭПР РК.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация, управление данными – ЖБТ; Формальный анализ, методология – ӘАӘ; руководство – ЖБТ; Визуализация – ЖАЕ, САМ; Написание исходного текста – САБ; Написание и редактирование окончательного текста – ӘАӘ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев В. Н. Снежный покров и климат. – М. : Гидрометеоиздат, 2008. – 320 с.
2. Barry R. G. The Cryosphere: Past, Present and Future. – Cambridge : Cambridge University Press, 2011. – 472 p.
3. Armstrong R. L., Brun E. Snow and Climate. – Cambridge : Cambridge University Press, 2008. – 222 p.
4. Климат Казахстана / под ред. А. Р. Медеу. – Алматы : Дәуір, 2010. – 350 с.
5. Исаев А. А. Экология Казахстана. – Алматы, 2012. – 280 с.
6. National Atlas of the Republic of Kazakhstan. – Astana, 2010.
7. Climate Change 2021: The Physical Science Basis / IPCC. – Cambridge : Cambridge University Press, 2021. – URL: https://www.ipcc.ch (дата обращения: 15.10.2024).
8. World Meteorological Organization. State of the Climate in Asia 2024. – Geneva: WMO, 2025. – 56 p.
9. РД 52.04.186–89. Руководство по снегомерным наблюдениям. – Л., 1989.
10. Hall D. K., Riggs G. A. MODIS Snow Products User Guide. – NASA, 2016.
11. Dietz A. J., Kuenzer C. Global SnowPack monitoring using remote sensing // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 7.
12. ESA. Sentinel-2 User Guide [Электронный ресурс]. – URL: https://sentinel.esa.int (дата обращения: 15.10.2024).
13. Chen P., Yao J., Mao W. Interannual snowfall variations in Central Asia and their association with ENSO and stratospheric polar vortex during winter // Climate Dynamics. – 2023. – Vol. 61. – P. 1505–1517.
14. Liu J., Zhang W., Liu T. Monitoring recent changes in snow cover in Central Asia using improved MODIS snow-cover products // Journal of Arid Land. – 2017. – Vol. 9. – P. 763–777.
15. Абаев Н., Терехов А. Об изменениях в пространственном распределении запасов снега в Восточном Казахстане в период 2001–2022 годов // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 108(1). – С. 35–41.
16. Notarnicola C. Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018 // Remote Sensing of Environment. – 2020. – Vol. 243. – Article 111781. – DOI: 10.1016/j.rse.2020.111781.
17. Kraaijenbrink P. D. A., Stigter E. E., Yao T., Immerzeel W. W. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply // Nature Climate Change. – 2021. – Vol. 11. – P. 591–597.
18. Blau M. T., Kad P., Turton J. V. et al. Uneven global retreat of persistent mountain snow cover alongside mountain warming from ERA5-Land // npj Climate and Atmospheric Science. – 2024. – Vol. 7. – Article 278.
19. Li Q., Duan W., Yang T., Gulayozov M. S., Fan Y., Ju C., Aihaiti A., Li L. Evolution of spatiotemporal variations in snow in the Tianshan Mountains and Pamir, Central Asia: An investigation by historical and projected dynamic downscaling simulations // Journal of Hydrology. – 2025. – Vol. 656. – Article 132994.
20. Климатические обзоры за зимний период 2023–2024 гг. РГП «Казгидромет» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kazhydromet.kz (дата обращения: 15.10.2024).
21. РГП «Казгидромет». Ежегодный бюллетень мониторинга снежного покрова на территории республики Казахстан за 2023-2024 гг. [Электрондық ресурс]. – Астана. – 2025. – URL: https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-snezhnogo-pokrova-na-territorii-respubliki-kazahstan
22. Данные государственного климатического кадастра с платформы на сайте РГП «Казгидромет» [Электронный ресурс] https://meteo.kazhydromet.kz/climate_kadastr/ (дата обращения: 16.11.2024).

REFERENCES

1. Golubev, V. N. (2008). Snezhnyi pokrov i klimat [Snow Cover and Climate]. Moscow: Gidrometeoizdat, 320 p. [in Russian].
2. Barry, R. G. (2011). The Cryosphere: Past, Present and Future. Cambridge: Cambridge University Press, 472 p.
3. Armstrong, R. L., Brun, E. (2008). Snow and Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 222 p.
4. Medeu, A. R. (Ed.). (2010). Klimat Kazakhstana [Climate of Kazakhstan]. Almaty: Dauir, 350 p. [in Russian].
5. Isaev, A. A. (2012). Ekologiya Kazakhstana [Ecology of Kazakhstan]. Almaty, 280 p. [in Russian].
6. National Atlas of the Republic of Kazakhstan. (2010). Astana.
7. IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. Available at: https://www.ipcc.ch (accessed 15 October 2024).
8. World Meteorological Organization. (2025). State of the Climate in Asia 2024. Geneva: WMO, 56 p.
9. RD 52.04.186–89. (1989). Rukovodstvo po snegomernym nablyudeniyam [Guidelines for Snow Survey Observations]. Leningrad. [in Russian].
10. Hall, D. K., Riggs, G. A. (2016). MODIS Snow Products User Guide. NASA.
11. Dietz, A. J., Kuenzer, C. (2019). Global SnowPack monitoring using remote sensing. Remote Sensing, 11(7).
12. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 User Guide. Available at: https://sentinel.esa.int (accessed 15 October 2024).
13. Chen, P., Yao, J., Mao, W. (2023). Interannual snowfall variations in Central Asia and their association with ENSO and stratospheric polar vortex during winter. Climate Dynamics, 61, 1505–1517.
14. Liu, J., Zhang, W., Liu, T. (2017). Monitoring recent changes in snow cover in Central Asia using improved MODIS snow-cover products. Journal of Arid Land, 9, 763–777.

15. Abaev, N., Terekhov, A. (2023). Ob izmeneniyakh v prostranstvennom raspredelenii zapasov snega v Vostochnom Kazakhstane v period 2001–2022 godov [Changes in the Spatial Distribution of Snow Reserves in Eastern Kazakhstan during 2001–2022]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 108(1), 35–41. [in Russian].
16. Notarnicola, C. (2020). Hotspots of snow cover changes in global mountain regions over 2000–2018. Remote Sensing of Environment, 243, Article 111781. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111781
17. Kraaijenbrink, P. D. A., Stigter, E. E., Yao, T., Immerzeel, W. W. (2021). Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. Nature Climate Change, 11, 591–597.
18. Blau, M. T., Kad, P., Turton, J. V., et al. (2024). Uneven global retreat of persistent mountain snow cover alongside mountain warming from ERA5-Land. npj Climate and Atmospheric Science, 7, Article 278.
19. Li, Q., Duan, W., Yang, T., Gulayozov, M. S., Fan, Y., Ju, C., Aihaiti, A., Li, L. (2025). Evolution of spatiotemporal variations in snow in the Tianshan Mountains and Pamir, Central Asia: An investigation by historical and projected dynamic downscaling simulations. Journal of Hydrology, 656, Article 132994.
20. RSE "Kazhydromet". (2024). Klimaticheskie obzory za zimnii period 2023–2024 gg. [Climate Reviews for the Winter Season 2023–2024]. Available at: https://www.kazhydromet.kz [in Russian].
21. RSE "Kazhydromet". (2025). Ezhegodnyi byulleten' monitoringa snezhnogo pokrova na territorii Respubliki Kazakhstan za 2023–2024 gg. [Annual Bulletin of Snow Cover Monitoring on the Territory of the Republic of Kazakhstan for 2023–2024]. Astana. Available at: https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/ezhegodnyy-byulleten-monitoringa-snezhnogo-pokrova-na-territorii-respubliki-kazahstan [in Russian].
22. RSE "Kazhydromet". Dannye gosudarstvennogo klimaticheskogo kadastra [State Climate Cadastre Data]. Available at: https://meteo.kazhydromet.kz/climate_kadastr/ [in Russian].

2024-2025 жж. ҚЫСҚЫ МАУСЫМДАҒЫ ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ҚАР ЖАМЫЛҒЫСЫ ЖАЙ-КҮЙІ МЕН ӨЗГЕРІСТЕРІ МОНИТОРИНГІ

Бакыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Акмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жаксыбаева, Айдарбек М. Султанкулов

«Қазгидромет» РМК, Астана қ., Қазақстан; zhezdibayeva_b@meteo.kz (ЖБТ), abilkadi_a@meteo.kz (ӘАӘ), smagulova_ak@meteo.kz (САБ), zhaksybayeva_a@meteo.kz (ЖАЕ), sultankulov_a@meteo.kz (САМ)
*Автор корреспондент: Аружан Ә. Әбілқади, abilkadi_a@meteo.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

қар жамылғысы, мониторинг, қардағы су қоры, су балансы, метеорологиялық бақылаулар, 2023...2024 жж. қысқы кезең

Мақала жайында:
Алынды: 24.12.2025
Қайта қаралды: 13.04.2026
Қабылданды: 16.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Бұл мақалада 2024...2025 жж. қысқы маусымында Қазақстан аумағындағы қар жамылғысының кеңістіктік-уақыттық ерекшеліктері талданды, сондай-ақ 1970...2025 жж. кезеңі бойынша қар жамылғысының негізгі сипаттамаларының (қар жамылғысы бар күндер саны, қар жамылғысының максималды биіктігі және қардағы су қоры) көпжылдық трендтеріне бағалау жүргізілді. Зерттеу «Қазгидромет» РМК мемлекеттік бақылау желісінің деректері негізінде орындалды. 2024...2025 жж. қысқы маусымында көптеген өңірлерде қар жамылғысы бар күндер санының қысқаруы аясында елдің солтүстік және орталық облыстарында қар қорының жоғары мөлшері қалыптасқаны, ал елдің оңтүстігінде оның тапшылығы байқалғаны анықталды. Қар жамылғысының максималды биіктігі мен қардағы су қорының сызықтық трендінің статистикалық мәнді өсуі елдің солтүстігі мен шығысында, сондай-ақ Ертіс, Есіл және Тобыл-Торғай су шаруашылығы бассейндерінде анықталды, ал қар қорының төмендеуі Арал-Сырдария бассейнінде байқалды. Қар жамылғысы бар күндер санының статистикалық мәнді қысқаруы анықталған жоқ. Алынған нәтижелер су ресурстарын бағалау, көктемгі су тасқынын болжау және қазіргі климаттық өзгерістерге бейімделу шараларын әзірлеу үшін практикалық маңызға ие.

MONITORING OF SNOW COVER CONDITIONS IN KAZAKHSTAN AND THEIR CHANGES DURING THE WINTER SEASON 2024-2025

Bakhyt T. Zhezdibayeva, Aruzhan A. Abilkadi, Akmaral B. Smagulova, Aizat E. Zhaxybayeva, Aidarbek M. Sultankulov

«Kazhydromet» RSE, Astana, Kazakhstan; zhezdibayeva_b@meteo.kz (ZHBT), abilkadi_a@meteo.kz (AAA), smagulova_ak@meteo.kz (SAB), zhaksybayeva_a@meteo.kz (ZHAE), sultankulov_a@meteo.kz (SAM)
*Author correspondent: Aruzhan A. Abilkadi, abilkadi_a@meteo.kz

KEY WORDS

snow cover, monitoring, water reserves in snow, water balance, meteorological observations, winter season 2024…2025

About article:
Received: 24.12.2025
Revised: 13.04.2026
Accepted: 16.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

The study analyzes the spatiotemporal characteristics of snow cover across the territory of Kazakhstan during the winter season of 2024...2025, and also evaluates long-term trends in the main snow cover characteristics (number of days with snow cover, maximum snow depth, and snow water equivalent) for the period 1970...2025 based on data from the state observation network of RSE “Kazhydromet”. The results show that during the winter season of 2024...2025, against the background of a decrease in the number of days with snow cover in most regions, increased snow reserves formed in the northern and central regions, whereas a deficit was observed in the southern part of the country. A statistically significant increase in the linear trend of maximum snow depth and snow water equivalent was identified in the northern and eastern parts of the country, as well as in the Irtysh, Ishim, and Tobol–Torgai water management basins, while a decrease in snow reserves was observed in the Aral-Syrdarya basin. No statistically significant decrease in the number of days with snow cover was detected. The obtained results are of practical importance for water resource assessment, forecasting spring floods, and developing adaptation measures to ongoing climate change.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОСАДКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Талшын Р. Оразбаева[1], Азамат С. Мадибеков[1] ассоцированный профессор, PhD, Лаура Т. Исмуханова[2] PhD, Айша А. Мадибекова[1], Ботакоз М. Султанбекова[1]

[1] Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; orazbayeva.talshyn@gmail.com (ТРО), madibekov@mail.ru (АСМ), aisha.madibekova@mail.ru (ААМ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС)
[2] АО «Институт географии и водной безопасности», г. Алматы, Казахстан; l--aura@bk.ru (ЛТИ)
*Автор корреспондент: Талшын Р. Оразбаева, orazbayeva.talshyn@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

атмосферные осадки, химический состав, сезонность, антропогенное воздействие, мониторинг, пространственная изменчивость

АБСТРАКТ

Проведен многолетний анализ химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за 2005...2024 гг. по данным метеостанций Алматы, Аул-4, Есик, Капшагай, Мынжылкы и Текели. Исследование охватывает урбанизированные, долинно-индустриальные и высокогорные пункты наблюдений, что позволило оценить пространственные различия минерализации и ионного состава осадков. Рассчитаны среднегодовые концентрации основных катионов и анионов, суммарная минерализация, вклад отдельных ионов в общую ионную массу, коэффициенты вариации и корреляционные связи между компонентами.

Суммарная минерализация осадков в большинстве лет составляет 1,06...7,13 мг/дм³ на высокогорной станции Мынжылкы и 8,37...25,9 мг/дм³ в урбанизированных и долинно-индустриальных районах. В структуре главных ионов преобладают Na^+ (44,0…53,0 %), HCO_3^- (18,0…28,0 %) и Ca^{2+} (10,0…18,0 %). Более высокая межгодовая изменчивость минерализации на Аул-4 и в Текели отражает влияние карбонатно-пылевого переноса, локальной антропогенной нагрузки и условий накопления аэрозольных примесей в долинных районах. Корреляционная структура указывает на участие трех факторов формирования состава осадков: карбонатно-пылевого (Ca^{2+}–HCO_3^-; r ≈ 0,87), солевого аэрозольного и техногенно-вторичного (SO_4^{2-}–Cl^-; r = 0,94). Связь минерализации с HCO_3^- (r = 0,95) подтверждает значительный вклад карбонатного материала в суммарную ионную нагрузку осадков.

По статье:
Получено: 28.02.2026
Пересмотрено: 04.03.2026
Принято: 06.05.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Оразбаева Т., Мадибеков А., Исмуханова Л., Мадибекова А., Султанбекова Б., Сезонная динамика химического состава осадков юго-восточного Казахстана// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 55-66

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные осадки являются не только ключевым компонентом гидрологического цикла, но и интегральным индикатором химического состояния приземной атмосферы. В процессе формирования облачных систем и выпадения осадки аккумулируют газообразные и аэрозольные примеси, включая соединения серы и азота, минеральную пыль, морские соли, продукты биогенных процессов и техногенных выбросов. Их химический состав отражает совокупное воздействие локальных источников загрязнения, регионального и трансграничного переноса аэрозолей, а также природных геохимических факторов. В этом контексте атмосферные осадки рассматриваются как чувствительный инструмент мониторинга изменений качества атмосферы и региональной экологической динамики.

В международной практике химический состав атмосферных осадков широко используется для оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ и анализа процессов кислотных выпадений. Долгосрочные программы наблюдений в Европе и Северной Америке (EMEP и NADP) продемонстрировали устойчивую зависимость между концентрациями SO_4^{2-} и NO_3^- в осадках и динамикой выбросов энергетического

сектора, а также постепенное снижение кислотной нагрузки вследствие природоохранной политики [1, 2]. В последние десятилетия отмечается трансформация химического профиля осадков: уменьшение доли сульфатов и относительное увеличение вклада нитратов и аммония, что связано с изменением структуры источников выбросов.

Исследования в Восточной Азии подтверждают высокую чувствительность состава осадков к изменению промышленной и транспортной нагрузки. В Китае снижение выбросов SO_2 сопровождалось перестройкой сульфатно-нитратного баланса и изменением ионных соотношений в осадках [3, 4]. В регионах с интенсивным пылевым переносом (Южная Европа, Ближний Восток), установлено значительное влияние карбонатной минеральной пыли на нейтрализацию кислотных соединений и формирование щелочной реакции осадков [5...7]. В горных и предгорных районах дополнительно проявляется роль орографических процессов, определяющих вертикальное распределение аэрозолей и интенсивность их вымывания из атмосферы [8]. Следовательно, химический состав осадков формируется в результате сложного взаимодействия эмиссионных и циркуляционных факторов.

Для Центральной Азии характерно сочетание аридного климата, высокой пылевой активности, выраженной сезонной контрастности атмосферных процессов и растущей антропогенной нагрузки. Регион относится к числу территорий, чувствительных к климатической изменчивости и усилению экстремальных атмосферных явлений, включая пылевые бури и температурные инверсии. Исследования последних лет указывают на значительный вклад минеральной пыли и карбонатных частиц в формирование ионного состава атмосферных осадков, а также на возрастающую роль урбанизированных и индустриальных источников [9...11]. Однако большинство работ в регионе сосредоточено либо на анализе снежного покрова, либо на краткосрочных сериях наблюдений, тогда как комплексный многолетний анализ дождевых и снеговых осадков в сопоставлении различных ландшафтных условий остается ограниченным.

Юго-восточная часть Казахстана представляет собой уникальную модельную территорию, где в пределах одного региона сочетаются крупная урбанизированная агломерация (Алматы), индустриально-долинные зоны (Текели, Капшагай), предгорные территории и высокогорные участки Тянь-Шаня (Мынжылкы). Такое разнообразие природных и техногенных условий формирует выраженный пространственный градиент химического состава атмосферных выпадений. Регион характеризуется значительной сезонной контрастностью: в холодный период доминируют антициклональные условия и температурные инверсии, способствующие накоплению загрязняющих веществ, тогда как в теплый сезон активизируются процессы турбулентного перемешивания и пылевого переноса, что делает территорию показательной для изучения сезонной трансформации ионного состава атмосферных осадков.

Несмотря на наличие отдельных исследований атмосферных выпадений в Казахстане, комплексные оценки пространственно-временной динамики химического состава дождевых и снеговых осадков в сопоставлении урбанизированных, индустриальных и высокогорных территорий за длительный период (2005...2024 гг.) представлены ограниченно. В ряде работ анализ сосредоточен преимущественно на снежном покрове либо на краткосрочных сериях наблюдений, что усложняет выявление устойчивых сезонных закономерностей, межгодовой динамики и структуры ионных взаимосвязей в многолетнем аспекте.

Научная новизна исследования определяется проведением системной многолетней оценки химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана с комплексным рассмотрением пространственного градиента «урбанизированная зона – индустриально-долинная территория – высокогорная зона», сезонной асимметрии и межгодовой вариабельности в пределах двадцатилетнего ряда наблюдений. В работе выполнена количественная оценка вклада отдельных ионов в формирование суммарной минерализации, рассчитаны коэффициенты вариации для различных ландшафтных

условий и предложена обобщенная корреляционная модель формирования ионного состава осадков, отражающая совокупное влияние природных и антропогенных факторов.

Полученные результаты дополняют представления о механизмах формирования атмосферных выпадений в условиях сочетания аридного климата, активного пылевого переноса и урбанизированной нагрузки. Практическая значимость исследования связана с возможностью использования химического состава атмосферных осадков в качестве индикатора трансформации аэрозольного состава приземной атмосферы и инструмента долгосрочного экологического мониторинга в условиях климатической изменчивости и усиления техногенного воздействия.

Целью настоящей работы является выявление пространственно-временных закономерностей формирования ионного состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за период 2005...2024 гг. Особое внимание уделено количественной оценке сезонной динамики основных катионов и анионов, анализу межгодовой изменчивости, определению вклада отдельных ионов в суммарную минерализацию и выявлению устойчивых корреляционных связей, характеризующих роль природных и антропогенных факторов в формировании атмосферных выпадений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве источника данных использованы результаты химического анализа атмосферных осадков (снега и дождя), выполненного по многолетним данным наблюдений РГП «Казгидромет» за период 2005...2024 гг.

В анализ включались только фактически представленные значения; периоды отсутствия наблюдений не учитывались и в расчетах пропускались.

В работе использованы показатели кислотности (pH) и концентрации основных катионов (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}), анионов (SO_4^{2-}, Cl^{-}, HCO_3^{-}), биогенных ионов (NO_3^{-}, NH_4^{+}), а также суммарная минерализация, рассчитанная как сумма растворенных ионов.

Для выявления пространственно-временных закономерностей выполнены следующие этапы обработки данных:

– расчет среднегодовых значений. Для каждой станции вычислены средние годовые концентрации ионов за период 2005...2024 гг. на основе имеющихся месячных наблюдений. Если данные по отдельным месяцам отсутствовали, расчет производился по фактически представленным значениям без искусственного заполнения.

– анализ межгодовой динамики. Построены многолетние линейные графики изменения концентраций каждого иона и показателя минерализации за 2005...2024 гг. Для оценки общей направленности изменений применена линейная аппроксимация методом наименьших квадратов с построением трендовых линий по фактически имеющимся данным.

– сравнительный пространственный анализ. Проведено сопоставление среднегодовых значений между урбанизированными (Алматы, Аул-4), долинно-индустриальными (Текели, Капшагай, Есик) и высокогорной (Мынжылкы) станциями с целью выявления устойчивых пространственных градиентов.

– корреляционный анализ. Для оценки взаимосвязей между ионными компонентами рассчитана корреляционная матрица по средним годовым значениям за весь период наблюдений (2005...2024 гг.). Коэффициенты корреляции Пирсона использовались для выявления групп ионов, формирующихся под влиянием общих природных или антропогенных факторов.

– графическая визуализация. Построены линейные графики динамики концентраций и корреляционная матрица, обеспечивающие наглядную интерпретацию пространственно-временных закономерностей формирования химического состава атмосферных осадков.

Таким образом, методический подход ориентирован на выявление устойчивых трендов, межгодовой изменчивости и структурных взаимосвязей ионного состава без

применения интегральных индексов загрязнения, что позволяет объективно оценить многолетнюю динамику химического состава атмосферных осадков региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ среднегодовых концентраций основных ионов атмосферных осадков за 2005...2024 гг. по метеостанциям Алматы, Аул-4, Есик, Капшагай, Мынжылкы Текели выявил устойчивую пространственную дифференциацию и межгодовую изменчивость химического состава. Суммарная минерализация на протяжении исследуемого периода в большинстве лет варьировала в пределах 3,74…12,1 мг/дм³ для Алматы, 8,42…26,0 мг/дм³ для Аул-4, 2,31…8,53 мг/дм³ для Есика и Капшагая, 2,50…10,21 мг/дм³ для Текели и 1,06…7,13 мг/дм³ для высокогорной станции Мынжылкы. Исключением является 2005 г., характеризующийся аномально повышенными значениями (до 120...125 мг/дм³ на Аул-4), после чего показатели стабилизируются на существенно более низком уровне. В целом превышение урбанизированных пунктов над высокогорным фоном составляет в среднем 2...4 раза, достигая 5-кратных различий в отдельные годы.

Межгодовая вариабельность минерализации наиболее выражена на Аул-4 и в Текели (коэффициент вариации порядка 40,0...50,0 %), несколько ниже в Алматы (30,0…40,0 %) и минимальна на Мынжылкы (до 25 %), указывает на относительно стабильные фоновые условия и меньшую роль локальных источников загрязнения. Линейные тренды не демонстрируют статистически значимого устойчивого роста или снижения, однако фиксируются синхронные эпизоды повышения на нескольких станциях (2012, 2018, 2022 гг.), могут свидетельствовать о сочетанном влиянии регионального переноса аэрозолей и общего антропогенного воздействия, поскольку в эти годы осадки на разных станциях имели сходный уровень минерализации. Структура ионного состава определяется доминированием натрия, доля которого согласно таблице 1, составляет 44,0...53,0 % суммарной массы главных ионов.

Таблица 1

Средний процентный вклад основных ионов в суммарную массу главных ионов

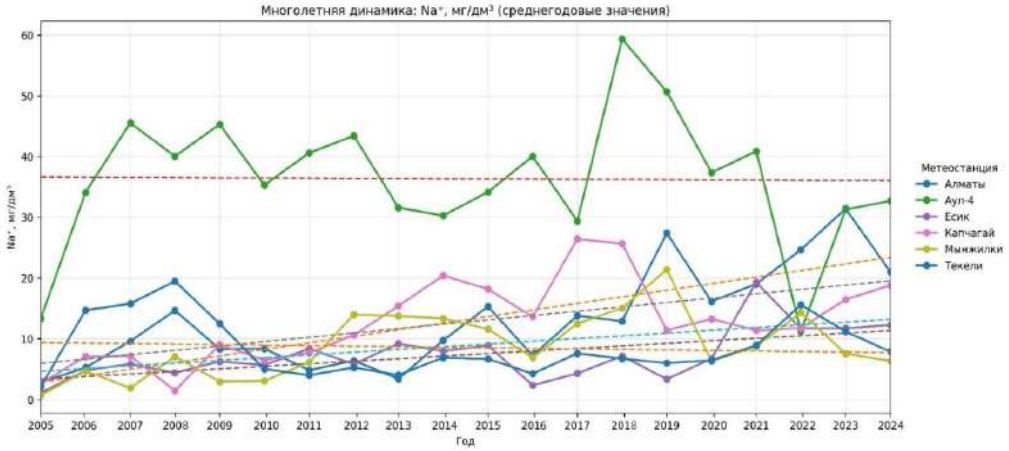
Метеостанция	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	HCO_3^{-}
	%						
Алматы	13...18	2...4	44...50	<1	7...11	3...6	18...25
Аул-4	10...15	2...4	48...53	<1	6...10	4...7	18...24
Есик	12...17	2...4	46...51	<1	6...10	3...6	20...26
Капчагай	11...16	2...4	47...52	<1	6...10	3...6	19...26
Мынжылкы	12...18	2...4	45...50	<1	6...10	2...5	22...28
Текели	12...18	2...4	44...50	<1	7...11	3...6	20...27

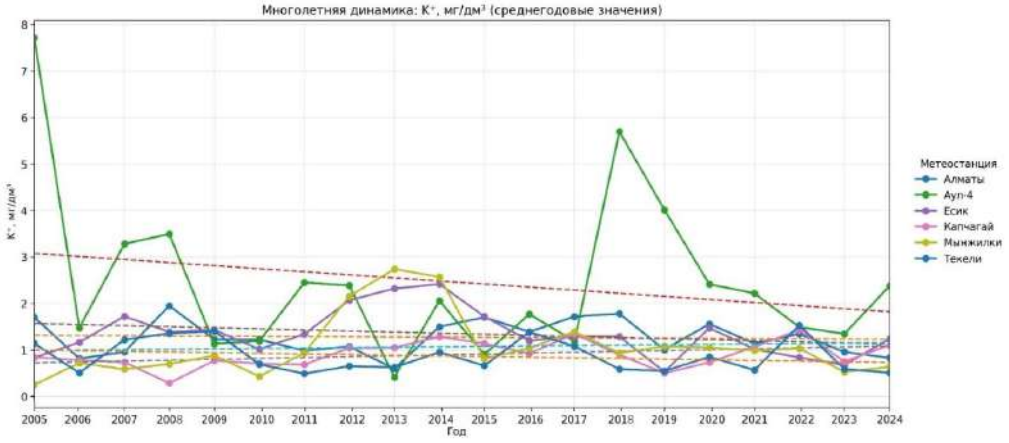
Среднегодовые концентрации Na^{+} на Аул-4 варьируют преимущественно в диапазоне 37,8…45,3 мг/дм³ с пиковыми значениями до 55,6…59,9 мг/дм³ (2018 г.), тогда как в Алматы и Текели чаще фиксируются значения 4,95…32,2 мг/дм³, в Есике и Капшагае – 4,96…28,2 мг/дм³, а на Мынжылкы – 0,65…21,2 мг/дм³ (рис. 1). Коэффициент вариации Na^{+} достигает 45…55 % в урбанизированных районах и не превышает 25…30 % в высокогорной зоне, что отражает зависимость от локальных и региональных источников солевых аэрозолей.

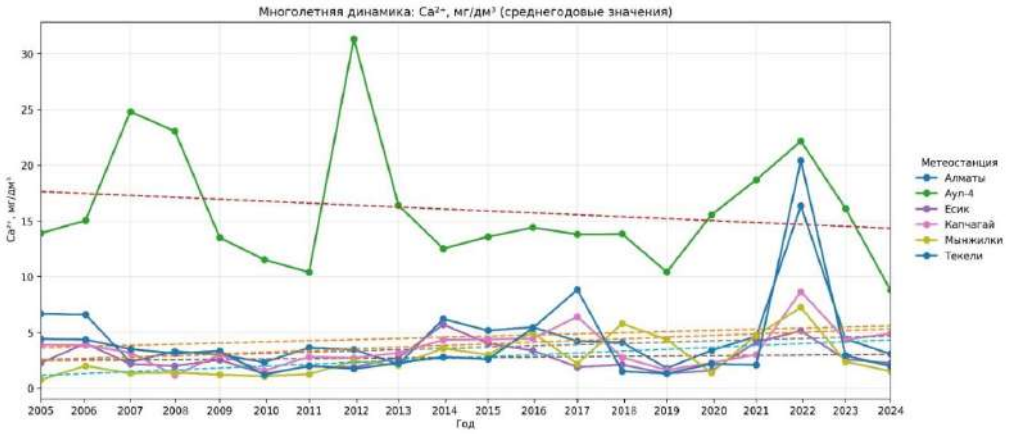
Кальций занимает второе место по вкладу (10,0...18,0 %). На Аул-4 концентрации Ca^{2+} достигают 25,2…32,1 мг/дм³ (2012 г.), в Алматы и Текели пиковые значения составляют 16,2…20,3 мг/дм³ (2022 г.), тогда как на Мынжылкы в большинстве лет находятся в пределах 1,01…6,54 мг/дм³. Межгодовая изменчивость Ca^{2+} выражена сильнее в долинных районах (CV 35,0…45,0 %), что может быть связано с изменчивостью

карбонатно-пылевого переноса, ресуспензией почвенного материала и особенностями долинной циркуляции, что существенно ниже в высокогорной зоне (около 20,0…25,0 %). Устойчивая положительная корреляция Ca^{2+}–HCO_3^- (r = 0,87 в зависимости от парного анализа; для совокупности годовых данных r ≈ 0,44) подтверждает участие карбонатно-пылевого механизма.

Магний и калий играют вспомогательную роль. Концентрации Mg^{2+} на Аул-4 достигают 3,52…4,51 мг/дм³, что может быть связано с локальными особенностями поступления минеральных аэрозолей, карбонатно-магниевых частиц и условиями накопления примесей в долинной зоне, на остальных станциях преимущественно 0,72…2,53 мг/дм³. Калий стабильно остается на уровне <1,09…2,61 мг/дм³, формируя менее 1 % суммарной минерализации.







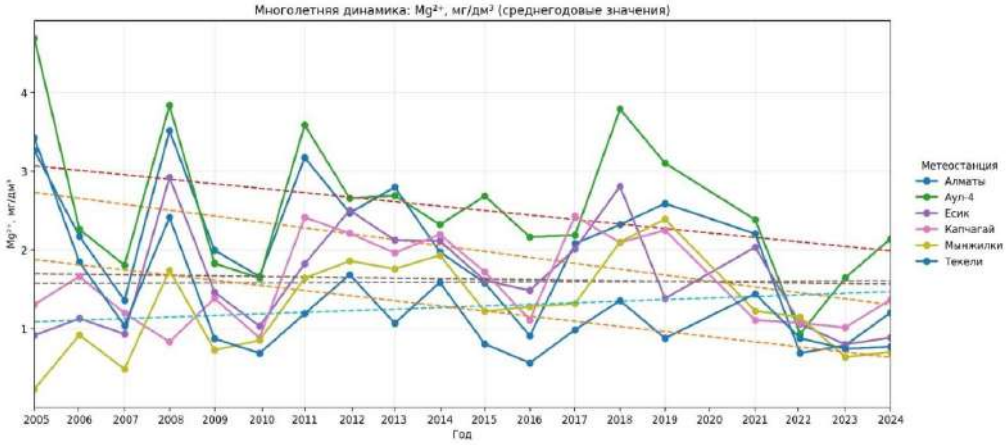
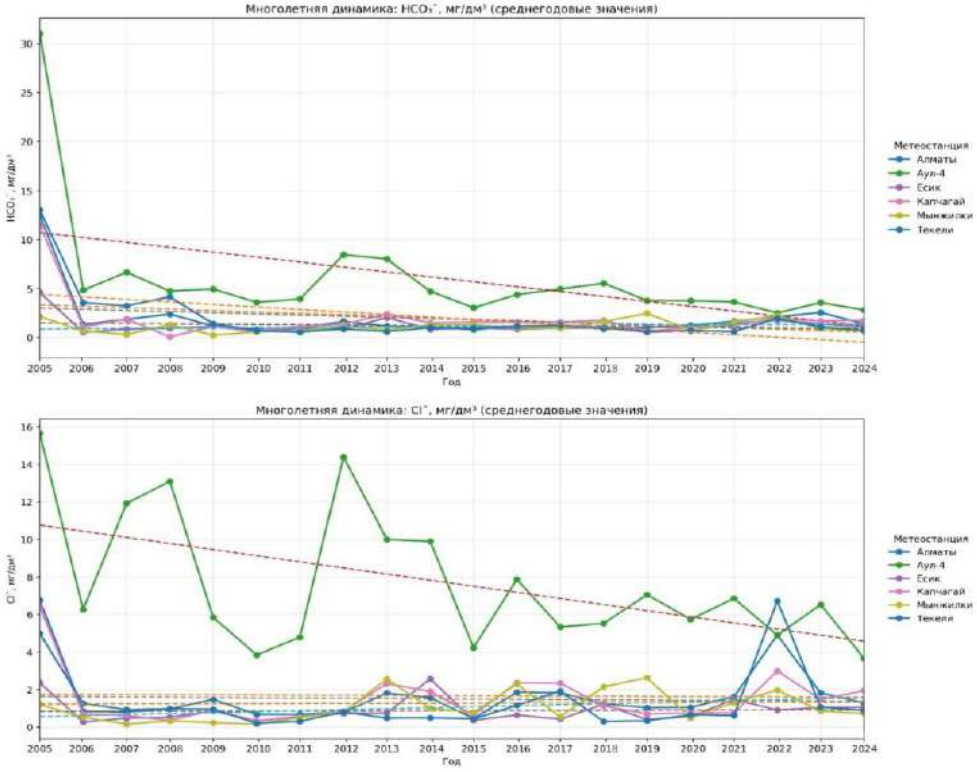


Рисунок 1. *Многолетняя среднегодовая динамика катионов по метеостанциям*

Анионный состав характеризуется более выраженной межгодовой асимметрией (рис. 2). Сульфаты на Аул-4 достигают 21,5…36,3 мг/дм³ (2005, 2012 гг.), тогда как на остальных станциях их концентрации чаще находятся в пределах 0,51…5,45 мг/дм³. Хлориды демонстрируют схожую динамику: до 14,2…15,9 мг/дм³ на Аул-4 и преимущественно 0,3…3,23 мг/дм³ на Мынжылкы. В холодный период содержание SO_4^{2-} и Cl^- возрастает на 40...70 % по сравнению с теплым сезоном, что связано с отопительной нагрузкой и инверсионными условиями.

Гидрокарбонаты составляют 18,0…28,0 % суммарной массы и играют ключевую роль в формировании минерализации. На Аул-4 их концентрации достигают до 32,0 мг/дм³ (2005 г.), в остальные годы – 3,32…9,10 мг/дм³; на Мынжылкы – 0,52…2,98 мг/дм³. Наиболее тесная связь установлена между минерализацией и HCO_3^- (r = 0,95), что указывает на доминирующую роль карбонатного блока в формировании общей ионной нагрузки.



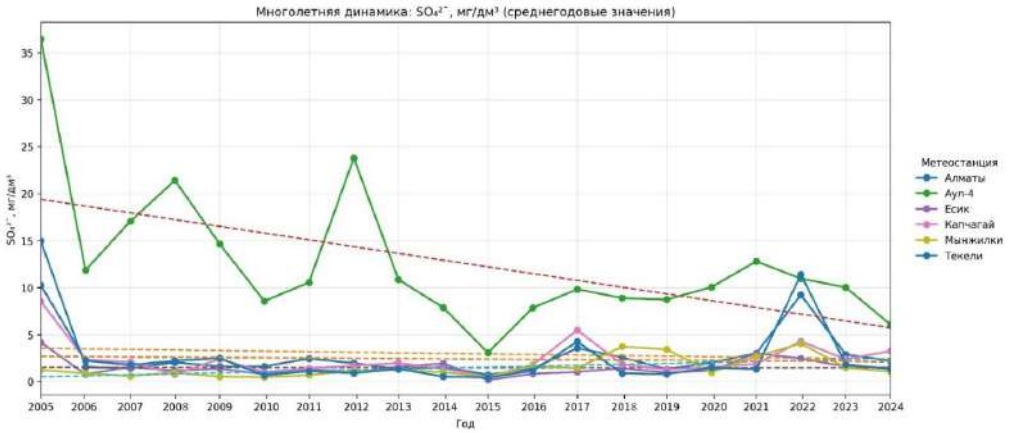


Рисунок 2. *Многолетняя среднегодовая динамика анионов по метеостанциям*

Анионы типа NH_4 демонстрируют максимальную межгодовую изменчивость (рис. 3). Нитраты на Аул-4 достигают экстремальных значений 180,0…220,0 мг/дм³ (2008, 2012 гг.), тогда как на остальных станциях варьируют преимущественно в пределах 15,1…80,3 мг/дм³. Экстремальные значения нитратов в отдельные годы требуют дополнительной проверки и, вероятно, отражают эпизоды интенсивного аэрозольного переноса либо особенности отбора проб. Аммоний на большинстве станций в диапазоне 5,64…7,30 мг/дм³ с умеренным ростом к 2020-м годам. Корреляция NO_3^-–Na^+ (r = 0,91) и SO_4^{2-}–Cl^- (r = 0,94) свидетельствует о синхронности аэрозольных процессов, тогда как отрицательная связь NH_4^+–HCO_3^- (r = −0,55) отражает разнонаправленность карбонатных и кислотно-вторичных процессов.

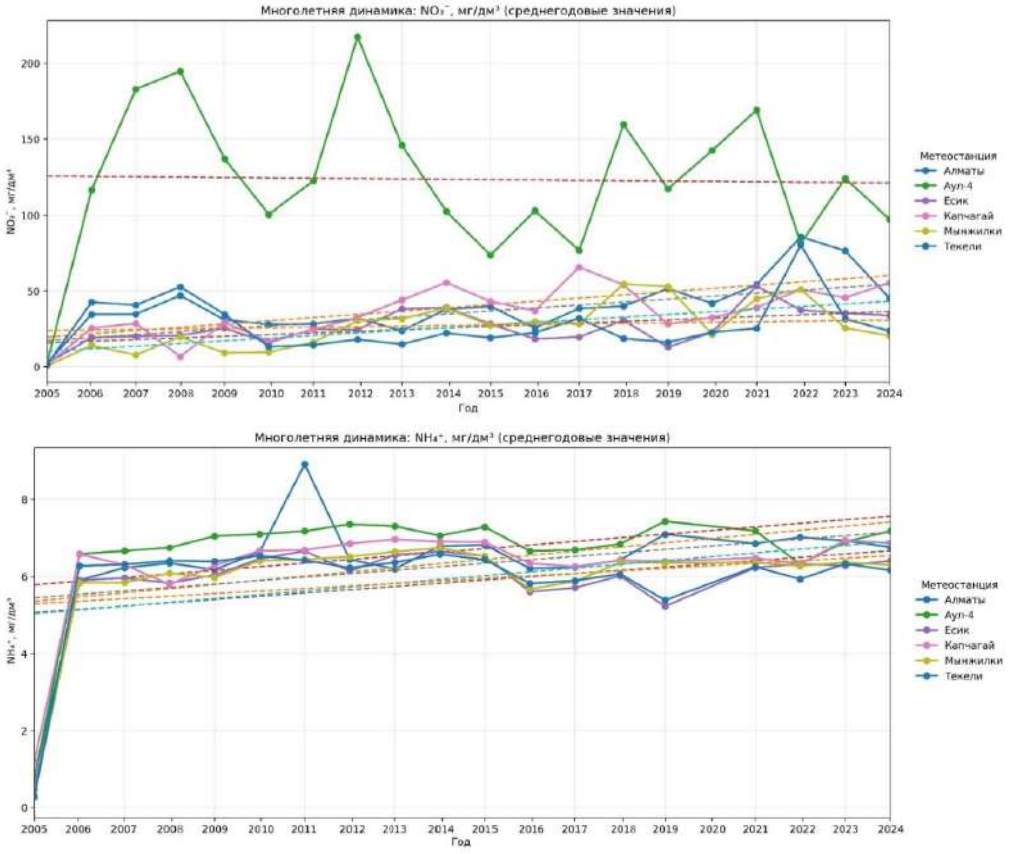


Рисунок 3. *Многолетняя среднегодовая динамика анионов по метеостанциям*

Анализ реакции среды показал, что pH варьирует преимущественно от 5,3 до 7,6 (рис. 4). Средние значения составляют 6,2…6,8 в урбанизированных районах и 5,6...6,3 в

высокогорной зоне. В холодный период наблюдается снижение на 0,2…0,4 единицы, что соответствует росту SO_4^{2-} и NO_3^-. Положительная корреляция pH–NO_3^- (r = 0,96 по совокупным данным) указывает на сложный характер взаимосвязей, обусловленный совместной динамикой ионных блоков.

Корреляционная матрица демонстрирует трехблочную структуру: солевой натриевый (Na^+, NO_3^-), карбонатный (HCO_3^-, Ca^{2+}, минерализация) и техногенно-вторичный (SO_4^{2-}, Cl^-, NH_4^+). Связь минерализации с HCO_3^- (r = 0,95) существенно выше, чем с Na^+ (r = 0,25), что подтверждает ключевую роль карбонатного компонента в формировании суммарной ионной нагрузки.

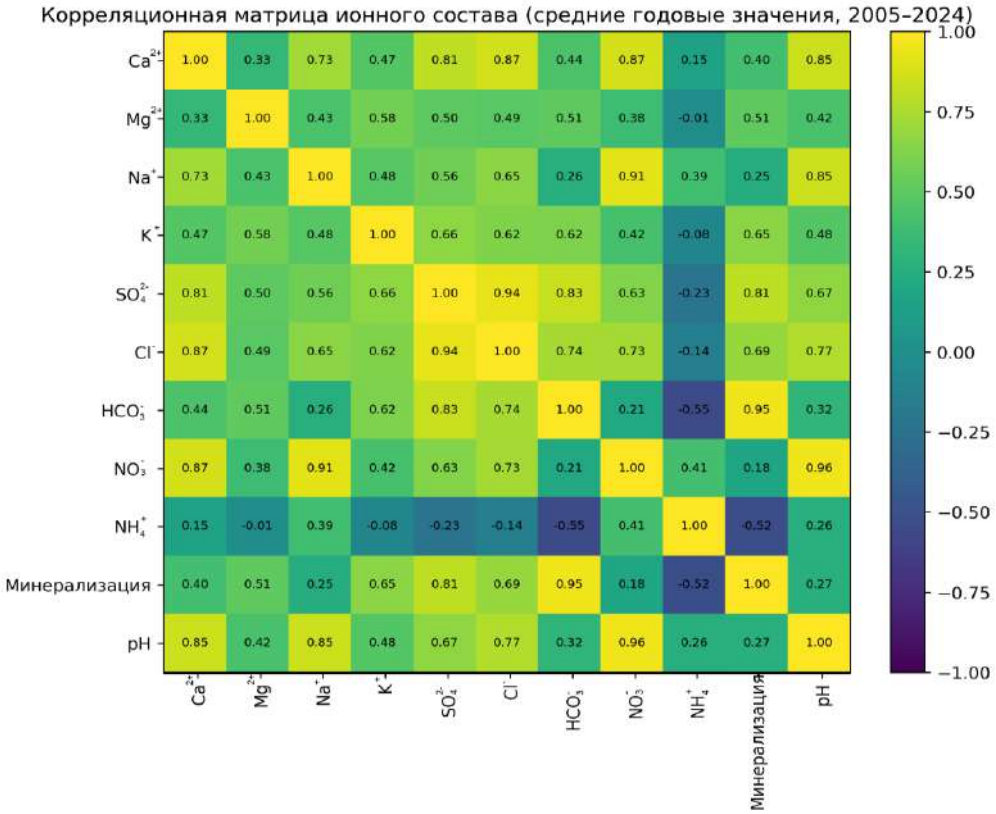


Рисунок 4. *Корреляционная матрица химического состава (среднегодовые значения за 2005…2024 гг.)*

В совокупности данные свидетельствуют, что химический состав атмосферных осадков юго-востока Казахстана определяется взаимодействием трех устойчивых факторов: солевого натриевого (около 45,0…50,0 % структуры), карбонатно-кальциевого (до 25,0...28,0 %) и вторично-аэрозольного сульфатно-нитратного блока (до 15,0…20,0 %). Пространственный контраст между урбанизированными и высокогорными зонами достигает 3...5-кратных различий, а сезонная амплитуда техногенных анионов составляет 40,0…80,0 %, что подтверждает высокую чувствительность атмосферных осадков к изменению антропогенной нагрузки и региональной циркуляции воздушных масс.

После представления основных результатов необходимо рассмотреть факторы, определяющие выявленные пространственные и межгодовые различия химического состава атмосферных осадков. Межгодовая изменчивость химического состава атмосферных осадков обусловлена сочетанием природных и антропогенных факторов [12, 13]. Для Ca^{2+} и HCO_3^- основное значение имеет переменная интенсивность поступления карбонатно-пылевого материала, связанная с пылевым переносом, ресуспензией почвенных частиц и сезонным состоянием подстилающей поверхности [7, 14]. В долинных районах эти процессы проявляются сильнее вследствие ограниченного

воздухообмена, накопления аэрозольных примесей и влияния локальных источников пыли, тогда как в высокогорной зоне условия формирования осадков ближе к фоновым. Изменчивость Mg^{2+} также может быть связана с поступлением минеральных аэрозолей, включая карбонатно-магниевые частицы [7].

Антропогенное влияние проявляется прежде всего через увеличение содержания SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+ и Cl^-, связанных с выбросами отопительного сектора, транспорта, промышленных объектов и процессами вторичного аэрозолеобразования [13, 15]. В предгорных и долинных условиях эти компоненты могут накапливаться в приземном слое атмосферы, особенно в холодный период при температурных инверсиях и слабом вертикальном перемешивании воздуха [16]. Поэтому межгодовые изменения минерализации и отдельных ионов отражают не один фактор, а совместное влияние пылевого переноса, локальной антропогенной нагрузки и региональных метеорологических условий [11, 13, 15].

Вместе с тем выявленная структура факторов не может быть интерпретирована исключительно через призму локальных эмиссий. Межгодовая вариабельность и синхронные изменения концентраций на нескольких станциях (например, одновременные пики 2012, 2018 и 2022 гг.) свидетельствуют о существенном влиянии региональных процессов атмосферной циркуляции. В холодный период доминирование антициклональных условий и температурных инверсий в предгорных и долинных районах способствует накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, что приводит к увеличению содержания SO_4^{2-}, NO_3^- и NH_4^+ в осадках на 40,0…80,0 % по сравнению с теплым сезоном.

В теплый сезон возрастает вклад карбонатно-пылевого компонента вследствие усиления турбулентного перемешивания и подъема минеральной пыли с подстилающей поверхности, что сопровождается ростом концентраций Ca^{2+} и HCO_3^- и увеличением их доли в структуре минерализации. Орографические особенности Иле Алатау формируют устойчивый градиент «долина – предгорье – высокогорье»: станция Мынжылкы фиксирует фоновые параметры (1,06...7,13 мг/дм³ суммарной минерализации), тогда как Алматы и Аул-4 аккумулируют локальные и региональные аэрозольные примеси (до 20,4…26,0 мг/дм³ в отдельные годы).

Периодические синхронные повышения минерализации и концентраций отдельных ионов на нескольких станциях указывают на эпизоды дальнего переноса воздушных масс, вероятно, с индустриально развитых территорий и аридных зон, являющихся источниками минеральной пыли. Таким образом, формирование химического состава атмосферных осадков юго-востока Казахстана определяется сочетанием локальной антропогенной нагрузки и макромасштабных циркуляционных процессов, что подтверждает высокую чувствительность осадков к региональным климатическим и экологическим изменениям.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многолетний анализ химического состава атмосферных осадков юго-восточной части Казахстана за 2005...2024 гг. выявил устойчивую пространственную дифференциацию и межгодовую изменчивость ионного состава. После аномального 2005 г. суммарная минерализация в большинстве лет варьировала в пределах 3,74...12,1 мг/дм³ в Алматы, 8,42...26,0 мг/дм³ на Аул-4 и 1,06...7,13 мг/дм³ на высокогорной станции Мынжылкы, что отражает 2...4-кратный пространственный контраст между урбанизированными и фоновыми условиями.

В структуре ионного состава доминирует натрий (44,0…53,0 % суммарной массы главных ионов), за которым следуют гидрокарбонаты (18,0…28,0 %) и кальций (10,0…18,0 %). Максимальные концентрации Ca^{2+} в отдельные годы достигали 23,9...32,9 мг/дм³ на Аул-4, SO_4^{2-} до 21,5...33,8 мг/дм³, тогда как на высокогорной станции их значения, как правило, не превышали 5,38 мг/дм³ (Ca^{2+}) 5,00 мг/дм³ (SO_4^{2-}).

Коэффициенты вариации для техногенных анионов составляли 40,0…60,0 %, что указывает на высокую чувствительность системы к изменению эмиссионной нагрузки и метеорологических условий.

Корреляционная структура подтверждает существование трех устойчивых факторов формирования состава осадков: карбонатно-пылевого (Ca^{2+}–HCO_3^-; r = 0,87), натрий-доминирующего солевого (Na^+–NO_3^-; r = 0,91) и техногенно-вторичного (SO_4^{2-}–Cl^-; r = 0,94). Связь минерализации с гидрокарбонатами (r = 0,95) указывает на доминирующую роль карбонатного блока в формировании суммарной ионной нагрузки. Это свидетельствует о значительном вкладе карбонатно-пылевого материала, поступающего в осадки при переносе и вымывании минеральных частиц с карбонатных почв и открытых аридных поверхностей.

Таким образом, атмосферные осадки юго-востока Казахстана отражают взаимодействие природного карбонатного фона, солевого аэрозольного переноса и техногенной нагрузки. Пространственные различия проявляются в повышенной минерализации осадков в урбанизированных и долинно-индустриальных районах относительно высокогорной зоны, тогда как межгодовая изменчивость ионного состава указывает на влияние карбонатно-пылевого переноса, региональных аэрозольных процессов и антропогенных источников. Это подтверждает информативность химического состава атмосферных осадков как индикатора региональных климатических и антропогенных изменений.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из открытых и платных источников.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АСМ, ЛТИ; Управление данными – АСМ, ЛТИ, ТРО; Формальный анализ – ТРО, ААМ, БМС; Методология – АСМ, ТРО, ЛТИ; Руководство – АСМ; Визуализация – ТРО, БМС, ААМ; Написание исходного текста – АСМ, ТРО, ЛТИ; Написание и редактирование окончательного текста – АСМ, ЛТИ, ТРО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vet R., Artz R.S., Carou S., et al. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus // Atmospheric Environment. – 2014. 93. 3-100. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060
2. Torseth K., Aas W., Breivik K., et al. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009 // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2012. – Vol. 12, issue 12, 5447-5481. https://doi.org/10.5194/acp-12-5447-2012
3. Qi L., Zheng H., Ding D., Wang S. Responses of sulfate and nitrate to anthropogenic emission changes in eastern China - in perspective of long-term variations // Science of The Total Environment. – 2023. – Vol. 855, 158875. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158875
4. Liu Y, Wang W, Zhang J, Li Z. Characteristics and sources of chemical composition in precipitation on the Loess Plateau of China // Sci Total Environ. – 2024. 935. 173401. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173401
5. Usher C.R., Michel A.E., Grassian V.H. Reactions on mineral dust // Chemical Reviews. – 2003. – Vol. 103 (12). – P. 4883–4940. – DOI: 10.1021/cr020657y.
6. Heydarizad M., Gimeno L., Amiri S., Minaei M., Mohammadabadi H.G. A Comprehensive Overview of the Hydrochemical Characteristics of Precipitation across the Middle East // Water. – 2022. – Vol. 14, 2657. – DOI: 10.3390/w14172657.
7. Al-Khashman O.A. Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan // Atmospheric Environment. – 2005. – Vol. 39, Issue 33, 6175-6183. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.056
8. Rogora M., Colombo L., Lepori F., et al. Thirty Years of Chemical Changes in Alpine Acid-Sensitive Lakes in the Alps // Water Air Soil Pollut – 2013. – 224, 1746. https://doi.org/10.1007/s11270-013-1746-3
9. Madibekov A.S., Amirgaliyev N.A., Ismukhanova L.T., et al. Spatial distribution of heavy metals in the snow cover for Almaty agglomeration. // SGEM Conference Proceedings. – 2019. – 19(5.1). – P. 679-685. https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.084
10. Faurat A., Yessimova D., Satybaldiyeva G., et al. Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan // PLoS One. – 2025. – 20(5), e0322300. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300
11. Султанбекова Б.М., Жади А.О., Мадибекова А.А., Жуматаев С.М. Сравнительный анализ снежного покрова в Жетысуской области по основным гидрохимическим показателям // Материалы VII Байкальской международной научной конференции – Стратегическая сессия (16-20 июня 2025 г.). – Нижний Новгород: Радонежская типография, 2025. – С. 93–103.
12. Keresztesi, Á., Birsan, M.V., Nita, I.A., et al. Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000-2017. // Environmental Sciences Europe. – 2019. – 31, 50. https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9

13. Gülsoy G., Tayanç M., Ertürk F. Chemical analyses of the major ions in the precipitation of · Istanbul, Turkey // Environmental Pollution. – 1999. – 105(2). – P 273-280. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00186-9
14. Özsoy T., Saydam A.C. Acidic and alkaline precipitation in the Cilician Basin, north-eastern Mediterranean Sea // Science of the Total Environment. – 2000. – 253(1-3). – P. 93-109. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00380-6
15. Liu Y., Feng Z., Zheng F., et al. Ammonium nitrate promotes sulfate formation through uptake kinetic regime // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2021. – 21. 13269-13286. https://doi.org/10.5194/acp-21-13269-2021
16. Cerling T.E., Alexander A.J. Chemical composition of hoarfrost, rime and snow during a winter inversion in Utah, U.S.A. // Water Air Soil Pollut. – 1987. – 35. – P. 373-379. https://doi.org/10.1007/BF00290943

REFERENCES

1. Vet, R., Artz, R. S., Carou, S., et al. (2014). A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. Atmospheric Environment, 93, 3-100. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.060
2. Tørseth, K., Aas, W., Breivik, K., et al. (2012). Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 12, issue 12, 5447–5481. https://doi.org/10.5194/acp-12-5447-2012
3. Qi, L., Zheng, H., Ding, D., & Wang, S. (2023). Responses of sulfate and nitrate to anthropogenic emission changes in eastern China - in perspective of long-term variations. Science of The Total Environment, vol. 855, 158875, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158875
4. Liu, Y., Wang, W., Zhang, J., & Li, Z. (2024). Characteristics and sources of chemical composition in precipitation on the Loess Plateau of China. Science of The Total Environment, 935. 173401. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173401
5. Usher, C. R., Michel, A. E., & Grassian, V. H. (2003). Reactions on mineral dust. Chemical Reviews, 103(12), 4883-940. doi: 10.1021/cr020657y
6. Heydarizad, M., Gimeno, L., Amiri, S., Minaei, M., & Mohammadabadi, H. G. (2022). A Comprehensive Overview of the Hydrochemical Characteristics of Precipitation across the Middle East. Water, 14, 2657. https://doi.org/10.3390/w14172657
7. Al-Khashman, O. A. (2005). Study of chemical composition in wet atmospheric precipitation in Eshidiya area, Jordan. Atmospheric Environment, vol. 39, issue 33, 6175-6183. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.056
8. Rogora, M., Colombo, L., Lepori, F. et al. (2013). Thirty Years of Chemical Changes in Alpine Acid-Sensitive Lakes in the Alps. Water, Air, & Soil Pollution, 224, 1746. https://doi.org/10.1007/s11270-013-1746-3
9. Madibekov, A.S., Amirgaliyev, N.A., Ismukhanova, L.T., et al. (2019). Spatial distribution of heavy metals in the snow cover for Almaty agglomeration. SGEM Conference Proceedings, 19(5.1), 679-685. https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.084
10. Faurat, A., Yessimova, D., Satybaldiyeva, G., et al. (2025). Assessing the spatial distribution and sources of heavy metal pollution in the snow cover: A case study from Pavlodar, Northeastern Kazakhstan. PLoS One, 20(5), e0322300. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322300
11. Sultanbekova, B. M., Zhadi, A. O., Madibekova, A. A., & Zhumataev, S. M. (2025). Sravnitelnyi analiz snezhnogo pokrova v Zhetysuskoi oblasti po osnovnym gidrokhimicheskim pokazatelyam [Comparative analysis of snow cover in the Zhetysu region by main hydrochemical parameters]. Materialy VII Baikalskoi mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii – Strategicheskaya sessiya (16–20 iyunya 2025 g.), pp. 93–103. Nizhnii Novgorod: Radonezhskaya tipografiya [in Russian].
12. Keresztesi, A., Birsan, M. V., Nita, I. A., et al. (2019). Assessing the neutralisation, wet deposition and source contributions of the precipitation chemistry over Europe during 2000-2017. Environmental Sciences Europe, 31, 50. https://doi.org/10.1186/s12302-019-0234-9
13. Gülsoy, G., Tayanç, M., & Ertürk, F. (1999). Chemical analyses of the major ions in the precipitation of · Istanbul, Turkey. Environmental Pollution, 105(2), 273-280. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00186-9
14. Özsoy, T., & Saydam, A. C. (2000). Acidic and alkaline precipitation in the Cilician Basin, north-eastern Mediterranean Sea. Science of the Total Environment, 253(1-3), 93-109. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00380-6
15. Liu, Y., Feng, Z., Zheng, F., et al. (2021). Ammonium nitrate promotes sulfate formation through uptake kinetic regime. Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 13269-13286. https://doi.org/10.5194/acp-21-13269-2021
16. Cerling, T.E., Alexander, A.J. (1987). Chemical composition of hoarfrost, rime and snow during a winter inversion in Utah, U.S.A.. Water, Air, & Soil Pollution, 35, 373-379. https://doi.org/10.1007/BF00290943

ОҢТҮСТІК-ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ХИМИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫНЫҢ МАУСЫМДЫҚ ДИНАМИКАСЫ

Талшын Р. Оразбаева[1], Азамат С. Мадибеков[1] қауымдастырылған профессор, PhD, Лаура Т. Исмуханова[2] PhD, Айша А. Мадибекова[1], Ботакоз М. Султанбекова[1]

[1] әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; orazbayeva.talshyn@gmail.com (ТРО), madibekov@mail.ru (АСМ), aisha.madibekova@mail.ru (ААМ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС)
[2] «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы қ., Қазақстан; l--aura@bk.ru (ЛТИ)
*Автор корреспондент: Талшын Р. Оразбаева, orazbayeva.talshyn@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

атмосфералық жауын-шашын, химиялық құрам, маусымдылық, антропогендік әсер, мониторинг, кеңістіктік өзгергіштік

Мақала жайында:
Алынды: 28.02.2026
Қайта қаралды: 04.03.2026
Қабылданды: 06.05.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Мақалада 2005…2024 жылдар аралығында Алматы, Ауыл-4, Есік, Қапшағай, Мыңжылқы және Текелі метеостанцияларының деректері негізінде Қазақстанның оңтүстік-шығыс бөлігіндегі атмосфералық жауын-шашынның химиялық құрамына жүргізілген көпжылдық талдау нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің мақсаты – урбандалған, индустриялық және биіктаулы ландшафттардың үйлесуі жағдайында жауын-шашынның иондық құрамының қалыптасуындағы кеңістіктік-уақыттық заңдылықтарды айқындау. Негізгі катиондар мен аниондардың орташа жылдық және маусымдық концентрациялары есептеліп, жылдар аралық динамикасы мен жиынтық минералдану көрсеткіштері талданды, сондай-ақ иондық байланыстар құрылымына корреляциялық талдау жүргізілді.

Зерттеу нәтижелері бойынша, көпшілік жылдары жауын-шашынның жиынтық минералдануы биіктаулы Мыңжылқы станциясында 1,06...7,13 мг/дм³ аралығында, ал урбандалған және индустриялық аймақтарда 8,37...25,9 мг/дм³ шегінде өзгеріп, 2...4 еселік кеңістіктік контраст қалыптастыратыны анықталды. Иондық құрам құрылымында Na^+ (негізгі иондардың жиынтық массасының 44,0...53,0 %), HCO_3^- (18,0...28,0 %) және Ca^{2+} (10,0...18,0 %) басым үлеске ие. Суық кезеңде SO_4^{2-}, NO_3^- және NH_4^+ концентрациялары жылы маусыммен салыстырғанда 40,0...80,0 %-ға жоғары болып, бұл жылыту маусымының және екінші реттік аэрозоль түзілу үдерістерінің ықпалын көрсетеді. Корреляциялық талдау SO_4^{2-}–Cl^- ($r = 0,94$), Ca^{2+}–HCO_3^- ($r \approx 0,87$) және SO_4^{2-}–NH_4^+ ($r \approx 0,75$) арасындағы тұрақты байланыстарды анықтап, жауын-шашын құрамының қалыптасуы көпфакторлы сипатқа ие екенін және табиғи мен антропогендік факторлардың өзара ықпалын растайды.

SEASONAL DYNAMICS OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN SOUTH-EASTERN KAZAKHSTAN

Talshyn R. Orazbayeva[1], Azamat S. Madibekov[1] Associate Professor, PhD, Laura T. Ismukhanova[2] PhD, Aisha A. Madibekova[1], Botakoz M. Sultanbekova[1]

[1] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; orazbayeva.talshyn@gmail.com (T.R.O.), madibekov@mail.ru (A.S.M.), aisha.madibekova@mail.ru (A.A.M.), sultanbekova_botakoz@mail.ru (B.M.S.).
[2] JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; l--aura@bk.ru (L.T.I.)
*Author correspondent: Talshyn R. Orazbayeva, orazbayeva.talshyn@gmail.com

KEY WORDS

atmospheric precipitation, chemical composition, seasonality, anthropogenic impact, monitoring, spatial variability

About article:
Received: 28.02.2026
Revised: 04.03.2026
Accepted: 06.05.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

The article presents the results of a long-term analysis of the chemical composition of atmospheric precipitation in the southeastern region of Kazakhstan for the period 2005…2024, based on data from the meteorological stations of Almaty, Aul-4, Yesik, Kapchagai, Mynzhilki, and Tekeli. The study aims to identify the spatiotemporal patterns of the ion composition of precipitation under a combination of urbanized, industrial, and high-mountain landscapes. Annual and seasonal mean concentrations of major cations and anions were calculated, interannual dynamics and total mineralization were analyzed, and a correlation analysis of the ionic structure was performed.

It was found that, in most years, the total mineralization of precipitation ranges from 1.06 to 7.13 mg/dm³ at the high-mountain station of Mynzhilki and from 8.37 to 25.9 mg/dm³ in urbanized and industrial areas, forming a 2...4-fold spatial contrast. The ion composition is dominated by Na^+ (44.0…53.0 % of the total major ion mass), HCO_3^- (18.0…28.0 %), and Ca^{2+} (10.0–18.0 %). During the cold season, the concentrations of SO_4^{2-}, NO_3^-, and NH_4^+ exceed those in the warm season by 40.0…80.0 %, reflecting the influence of the heating period and secondary aerosol formation. Correlation analysis revealed stable relationships of SO_4^{2-}–Cl^- ($r = 0.94$), Ca^{2+}–HCO_3^- ($r \approx 0.87$), and SO_4^{2-}–NH_4^+ ($r \approx 0.75$), confirming the multifactorial nature of precipitation composition formation and the interaction of natural and anthropogenic factors.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Scientific article

TYPOLOGY OF CALENDAR YEARS AND THERMAL REGIME DYNAMICS UNDER GLOBAL WARMING: RISK ASSESSMENT FOR ALMATY

Vitaly K. Khlyustov[1] Doctor of Agricultural Sciences professor, Yuriy P. Demakov[2] Doctor of Biological Sciences, professor, Yuriy G. Bezborodov[1]* Doctor of Technical Sciences, Associate professor

[1] Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation; vkhlyustov@rgau-msha.ru (V.K.K.), ubezborodov@rgau-msha.ru (Yu.G.B.)

[2] Volga Region State Technological University, Yoshkar-Ola, Russian Federation; DemakovYP@volgatech.net (Yu.P.D.)

*Author correspondent: Yuri G. Bezborodov, ubezborodov@rgau-msha.ru

KEY WORDS

Almaty climate, multivariate statistical analysis, factorization, clustering, year typology, recurrence dynamics, change point, Pettitt test, Mann–Kendall test, climate risks, adaptation.

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a statistically substantiated typology of thermal conditions of calendar years for Almaty and a quantitative analysis of its transformation against the background of ongoing climate change. A two-stage approach was used for the study. The first stage: dimensionality reduction using principal component analysis (PCA) followed by k-means clustering to identify integral year types. The second stage: analysis of the recurrence dynamics of the obtained types using nonparametric statistics (Pettitt test, Mann–Kendall test, Theil–Sen estimator). The PCA results (KMO=0.764) revealed four latent factors (61.6% of variance) characterizing the main seasonal regimes. Cluster analysis based on these factors allowed the identification of 5 statistically stable types (classes) of calendar years with a classification accuracy of 95.8% as confirmed by discriminant analysis (LDA). Dynamic analysis recorded a statistically significant change point in the climate regime in 1993 (Pettitt test, $p<0.001$). Exceptionally high rates of transformation were established: the frequency of the warmest type (mild winter, very warm summer) increases by +8.4% per decade, while the frequency of the coldest type decreases by –7.1% per decade. In the modern period (2001...2025), a new climatic norm has formed, with the warmest type accounting for 68% of years. The resulting typology and quantitative estimates of its dynamics serve as a practical tool for detailed climate diagnostics, assessment of complex risks (heat waves, air quality deterioration, infrastructure load), and the development of targeted adaptation strategies for a metropolis in a global warming hotspot region.

1. INTRODUCTION

Large urban agglomerations such as Almaty (population over 2 million people) represent a critical focus of synergistic interaction between global climate trends and local anthropogenic factors [1…3]. The Central Asian region is officially recognized by the international expert community as one of the key modern 'hotspots', where the growth rates of surface air temperature significantly outpace global average values [4…6]. The local Urban Heat Island (UHI) effect, superimposed on the geomorphological features of the Ili intermontane basin, further exacerbates challenges related to urban ecosystem survival, municipal energy infrastructure resilience, and the development of adverse environmental conditions [2, 3].

Analysis of long-period climate changes requires strict consideration of the complex structure of time series, which, according to fundamental theory, includes trend, cyclical (wave oscillation), and random components [7…9]. As demonstrated in classical hydrometeorological literature, excluding the wave (cyclical) component from climatological analysis is categorically impermissible, since quasi-periodic natural rhythms of varying duration reflect the fundamental thermodynamics of the atmosphere–ocean system [10, 11]. At the same time, traditional analysis focused on fixed sliding 30-year 'climate normals' encounters a profound methodological

bottleneck: secular warming causes an upward 'baseline drift', artificially underestimating the magnitude of real thermal anomalies and depriving instruments of physical contrast (the phenomenon of 'thermal blindness' in models) [10, 12, 13]. Resolving this problem requires neutralizing the background trend and transitioning to the concept of digital twins of natural systems and relative dynamic baselines [14…18].

To objectively identify discrete, physically determined thermal regimes without introducing human subjectivity, non-linear machine learning and multidimensional statistical methods are most effective [19...23]. Preliminary dimensionality reduction of initial monthly hydrometeorological matrices using Principal Component Analysis (PCA) with adequacy control via the Kaiser–Meyer–Olkin (KMO) criterion and Bartlett's test of sphericity ensures the minimization of multicollinearity and the extraction of latent seasonal factors [24]. Subsequent clustering using the k-means algorithm automatically groups multi-year calendar years into stable classes [19…22], while Linear Discriminant Analysis (LDA) guarantees statistical verification of the separability of the obtained phase states [25].

To quantitatively evaluate the transformation of the climate regime, identify structural break points (bifurcations), and calculate the rate of change in sliding frequencies of year types, a transition to robust non-parametric statistics invariant to data distribution and extreme outliers is required [26...29]. The homogeneous non-parametric Pettitt test provides precise localization of the calendar year of regime shift [27], the Mann–Kendall sign test proves the directional statistical significance of trends [26, 29], and Sen's slope estimator determines the actual rate of restructuring of the year type structure [% / decade] [28].

The objective of this study is to develop a multidimensional statistical typology of thermal regimes of calendar years for Almaty over a 95-year period (1931...2025), mathematically localize the structural climate shift point, and quantitatively evaluate the non-linear dynamics of year type occurrence to form a scientific basis for adaptation strategies of Almaty's municipal economy in a global warming 'hotspot' region [5, 6, 23].

About article:
Received: 13.04.2026
Revised: 06.05.2026
Accepted: 16.09.2026
Published: 30.09.2026

For citation:
Khlyustov V., Demakov Yu., Bezborodov Yu., Typology of Calendar Years and Thermal Regime Dynamics under Global Warming: Risk Assessment for Almaty// Hydrometeorology and Ecology №3 (123), 2026, 67-78.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Input Data

A continuous series of monthly mean air temperatures (°C) from the Almaty meteorological station (WMO 36870) for complete calendar years from 1931 to 2025 inclusive (n = 95 years) was used. Data from the Kazhydromet archive underwent standard quality control and homogeneity procedures (Figure 1).

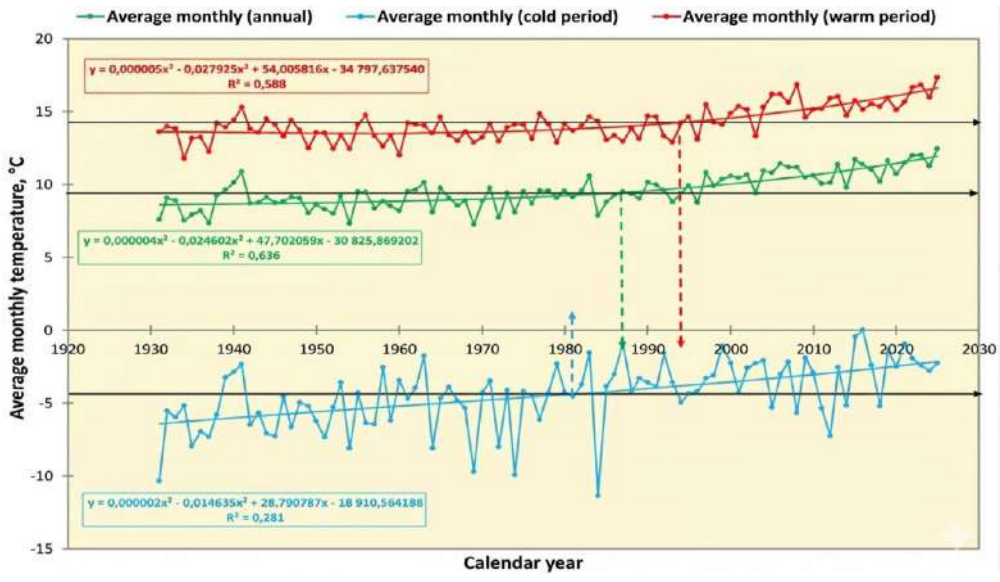


Figure 1. *Linear trends of monthly mean temperature for the year, cold and warm periods, indicating the year of deviation onset from the mean value*

Two-Stage Methodological Approach

The study was based on a sequential two-stage methodological approach integrating multivariate statistics methods for classification and time series analysis. Practical implementation was carried out using specialized software: IBM SPSS Statistics (version 26) for the typology construction stage and R (version 4.3.2) with necessary packages for the dynamics analysis stage. The overall logic of the approach is presented in the flowchart (Figure 2).

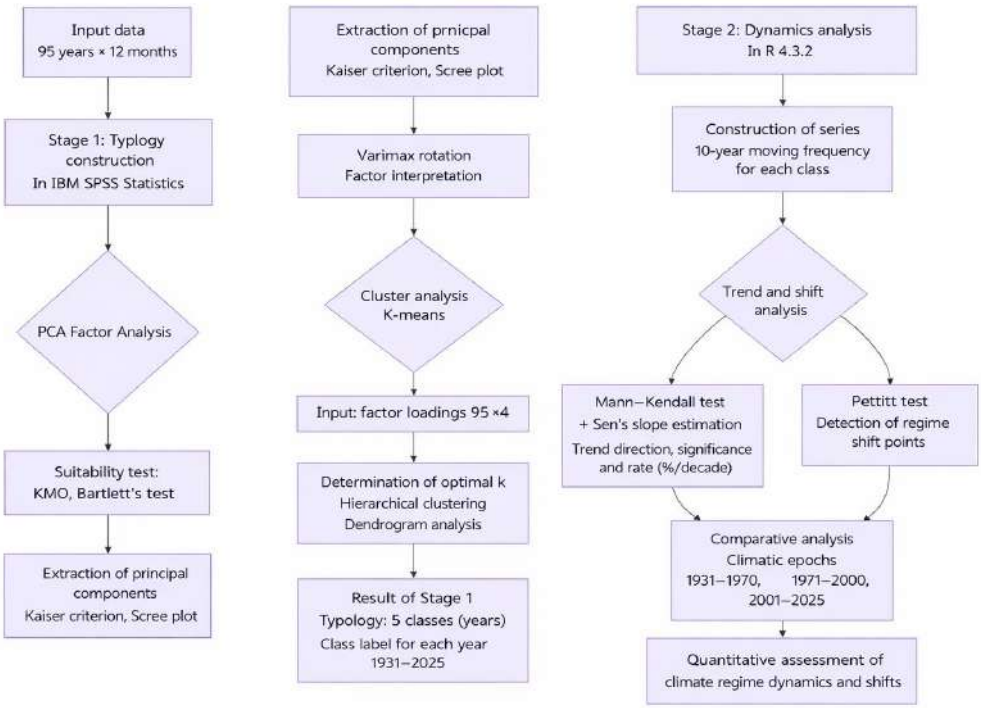


Figure 2. *Flowchart of the two-stage methodological approach of the study*

Stage 1. Typology Construction

Factor analysis. Principal component analysis with Varimax rotation was applied to the initial 95×12 matrix (years × months) to reduce dimensionality and identify latent seasonal factors. Data adequacy was confirmed by a high Kaiser-Meyer-Olkin measure (KMO=0,764) and the significance of Bartlett's sphericity test ($p<0,001$). The Kaiser criterion and Cattell's scree plot analysis justified the extraction of 4 factors.

Cluster analysis (k-means). The resulting factor loadings (95×4 matrix) were used as input for the iterative k-means algorithm. This eliminates the influence of multicollinearity of the original monthly temperature values. The optimal number of clusters (k=5) was determined based on dendrogram analysis of hierarchical agglomerative clustering and qualitative interpretability.

Classification validation. The stability and accuracy of the clustering were verified using linear discriminant analysis (LDA). The proportion of correctly classified cases and Wilks' lambda were calculated.

Stage 2. Dynamics and Trend Analysis

Time series construction. Based on class labels for each year, moving 10-year frequencies (in %) were calculated for each of the 5 calendar year types.

Change point detection. For the frequency series of the warmest type, a nonparametric Pettitt test was applied to detect a statistically significant breakpoint.

Trend assessment. For each moving frequency series, direction, statistical significance (Mann–Kendall test), and rate of change (robust Theil–Sen slope estimator) were calculated. Results are expressed in % per decade (%/decade).

Comparative analysis of epochs. The distribution of year types was compared across baseline (1931...1970), transitional (1971...2000), and modern (2001...2025) periods to visualize the scale of changes.

Detailed Description of Stages

Stage 1: Construction of Statistical Typology (implemented in IBM SPSS Statistics)

Factor analysis. Data preparation and verification of their suitability for factor analysis were as follows. The initial 95 × 12 data matrix (years × monthly mean temperatures) was standardized, and the suitability of the data for factor analysis was assessed. The Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy (KMO = 0,764) indicated "good" suitability of the data for factorization. Bartlett's sphericity test showed statistical significance (χ^2=259,5; $p < 0,001$), rejecting the hypothesis of an identity correlation matrix and confirming significant relationships between variables. Four factors were extracted using principal component analysis, determined by the Kaiser criterion (eigenvalue > 1). Visual analysis of Cattell's scree plot showed a break after the fourth principal component. To improve interpretability, orthogonal Varimax rotation was performed. Rotation minimizes the number of variables with high loadings on a single factor, contributing to a clearer semantic separation of seasonal regimes. The result was a matrix of factor loadings of dimension 95 × 4, where each row (year) is described not by 12 original temperatures but by 4 new, uncorrelated variables (factor scores) explaining 61,6% of the total variance.

Cluster analysis. The factor loading matrix was used as input for clustering, which eliminates multicollinearity of monthly temperatures and increases solution stability. To determine the optimal number of clusters (k), hierarchical agglomerative clustering (Ward's method) was preliminarily used. Analysis of the dendrogram and a sharp increase in linkage distance showed the substantive feasibility of partitioning into 5 clusters. Iterative k-means clustering (k=5) was then performed, assigning a final class label (1 to 5) to each year.

Discriminant analysis. To verify the stability and accuracy of the clustering, linear discriminant analysis (LDA) was applied. The result yielded discriminant functions that maximally separate the a priori defined 5 groups (the k-means result). The self-consistency criterion showed that 95.8% of years were correctly reclassified by these functions into their original cluster. Wilks' lambda value ($\Lambda = 0,052$) and its statistical significance ($p < 0,001$) confirmed the high separability of classes and the reliability of the resulting typology.

The result of Stage 1 was a verified typology of 5 thermally homogeneous classes. Analysis of the temporal distribution of calendar years by classes shows a clear climatic shift, clearly expressed in the form of a color spectrum: from blue and light blue (cold period) in the 1930s and 1940s to the 2000s and 2020s (warm period), indicated by light brown and brown (Figure 2).

Stage 2. The aim of this stage is to present a quantitative assessment of temporal changes in the recurrence of the identified year types. Trend dynamics analysis was implemented in the Python and R (version 4.3.2) software environments.

Distribution of 10-year moving frequencies of identified classes by calendar year. Preparation of material for time series recurrence analysis was carried out based on the sequence of class labels for each year from 1931 to 2025. For each of the 5 classes, a series of moving 10-year frequencies was calculated. For each central year "t", the proportion (percentage) of years belonging to a given class in the window [t-4; t+5] was calculated. This made it possible to obtain smoothed curves reflecting the change in the probability of occurrence of a given year type over time, thereby minimizing the influence of interannual variability.

Detection of climate regime change point. To objectively determine the moment of sharp change in the behavior of the series (shift in mean level), the homogeneous nonparametric Pettitt test was applied. The test, based on rank statistics, was applied to the moving frequency series for Class 3 (the warmest). It identified the year after which the statistical properties of the series changed significantly, indicating a moment of qualitative shift in the climate regime.

Detection and assessment of trend significance were carried out using the nonparametric Mann–Kendall test applied to each moving frequency series to test the null hypothesis of no monotonic trend. Its advantage is robustness to outliers and no requirement for data normality. To assess the rate of detected significant trends, the robust Theil–Sen slope estimator was used. It calculates the median of all possible slopes between pairs of points in the series, making the estimate resistant to anomalies. The result is presented in intuitively understandable units: the percentage change in class recurrence per decade (%/decade).

Comparative analysis of climate epochs. To clearly demonstrate the scale of changes, the distribution of classes was calculated and visualized for three periods:

- Baseline period (1931...1970) – the background "pre-warming" climatic norm.
- Transitional period (1971...2000) – the period of global warming acceleration.
- Modern period (2001...2025) – reflecting the current state of the climate system.

The result of Stage 2 is the quantitative assessment of the rate, direction, and statistical significance of trends in the recurrence of year types, identification of the point of cardinal restructuring of the thermal regime (1993), which clearly demonstrated the scale of the newly formed climatic norm.

Thus, the presented two-stage approach provides a rigorous statistical basis for transitioning from initial climate data to a comprehensive assessment of structural changes in the climate regime, combining classification and time series analysis methods.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Factor analysis revealed 4 factors explaining 61,6% of variance: F1 – "Warm season" (late spring–summer, 24,9%), F2 – "Severe winter" (13,6%), F3 – "Autumn–early winter regime" (12,4%), F4 – "Early autumn" (10,8%). Clustering of factor loadings identified 5 climatically homogeneous types (table 1). Discriminant analysis confirmed high classification accuracy (95,8%, Wilks' $\Lambda = 0{,}052$, $p<0{,}001$).

Table 1

Climatic characteristics of five types (classes) of thermal years for Almaty (1931...2025)

Class	Mean annual temperature, °C	Key feature of seasonal regime
1	8,6	Very cold winter, warm summer
2	9,5	Cold winter, warm summer, cold autumn
3	11,3	Mild winter, very warm summer
4	8,6	Moderate winter, coolest summer
5	9,8	Cold winter, warm summer, extremely cold autumn/early winter

Analysis of the temporal distribution of years by classes shows a clear climatic shift, expressed in the form of a color spectrum: from blue and light blue (cold period) in the 1930s...1940s to the 2000s…2020s (warm period), characteristic of global warming (**F**igure 3).

Calendar year class	Class characteristics	Average annual temperature by class	Distribution of calendar years by class for 95 years between 1931 and 2025.					
I	**Very cold winter, warm summer**	**8,6**	1931	1936	1942	1945	1951	1956
			1957	1969	1971	1972	1980	1988
II	Cold winters, warm summers, and cold autumns	9,5	1932	1938	1944	1950	1952	1953
			1961	1962	1963	1966	1975	1976
			1981	1982	1983	1987	2000	**2016**
			2020	-	-	-	-	-
III	**Mild winters, very warm summers**	**11,3**	1997	2001	2004	2005	2006	2007
			2008	**2012**	**2013**	**2015**	**2017**	**2019**
			2021	2022	2023	2024	2025	-
IV	Mild winters, coolest summers	8,6	1934	1935	1937	1943	1946	1947
			1948	1949	1954	1958	1959	1960
			1964	1967	1968	1970	1979	1985
			1986	1989	1992	1993	1996	2003
V	Cold winters, warm summers, and extremely cold autumns/early winters	9,8	1933	1939	1940	1941	1955	1965
			1973	1974	1977	1978	1984	1990
			1991	1994	1995	1998	1999	2002
			2009	2010	**2011**	**2014**	**2018**	-

	1931-1940		1951-1960		1971-1980		1991-2000		2011-2020
	1941-1950		1961-1970		1981-1990		2001-2010		2021-2025

Figure 3. *Typology of calendar years reflecting the dynamics of the thermal regime of Almaty*

Recurrence dynamics and trends. The Pettitt test revealed a statistically significant ($p<0,001$) regime change point in 1993 for the distribution of 10-year moving frequencies of Class 3. The mean recurrence frequency of the class increased from 14.2% (before 1993) to 52.8% (after 1993) (Table 2). The change in thermal regime is clearly shown in Figure 4.

Table 2

Results of the Pettitt test for the recurrence series of Class 3

Parameter	Value
Change point year (K)	1993
Test statistic (U) Kmax=724 > K_{01} = 530	724
Significance (p)	< 0,001
Mean frequency before 1993	14,2%
Mean frequency after 1993	52,8%

This breakpoint chronologically coincides with the phase of most intense manifestation of global warming in the region. The change point is visually represented in Figure 4.

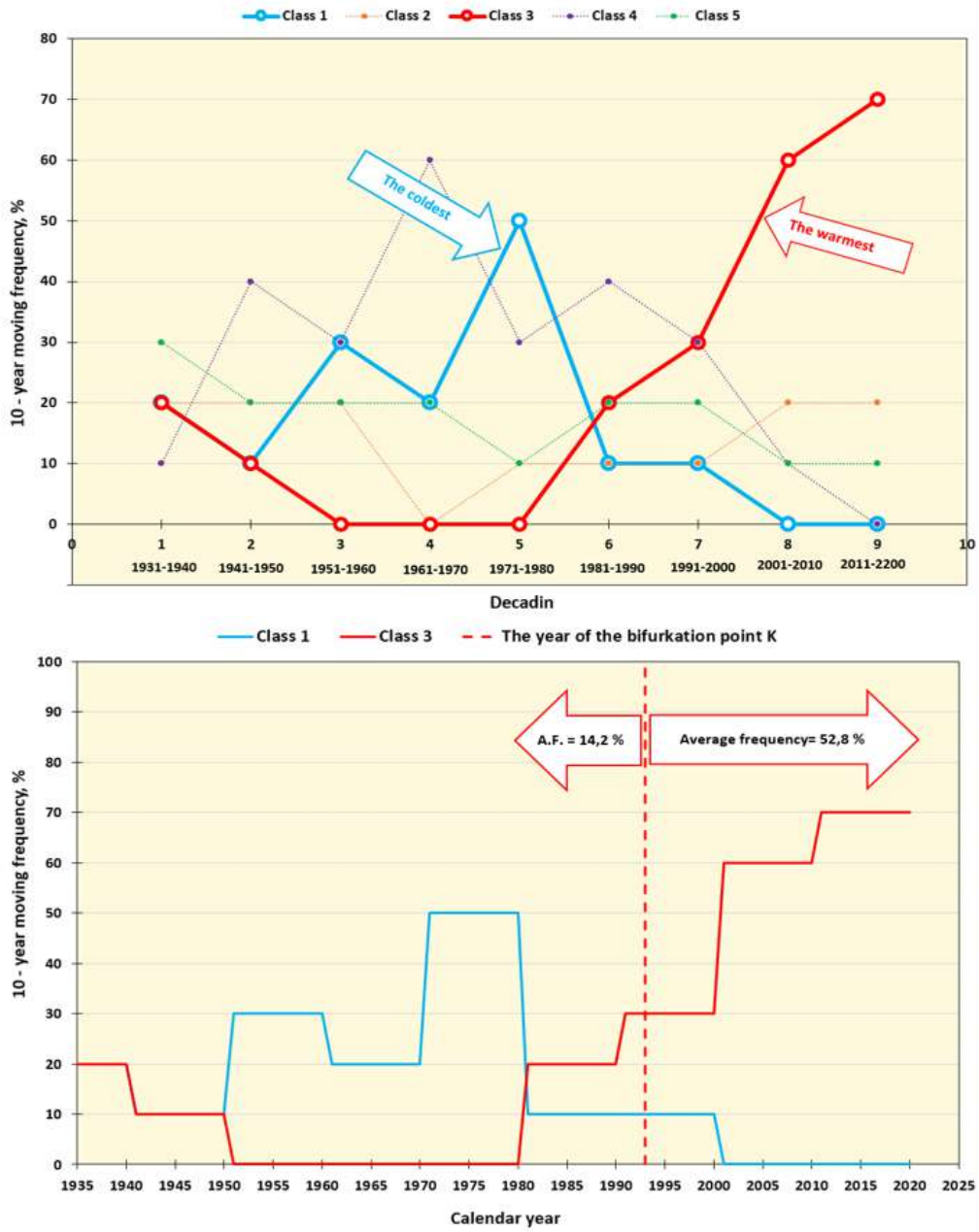


Figure 4. *Dynamics of the moving 10-year frequency of Class 1 (coldest) and Class 3 (warmest)*

The vertical line marks the regime change point identified by the Pettitt test (1993).
Trend analysis showed (Table 3):

- Class 3 (warm) – significant intense growth (+8,4%/decade, p<0,001).
- Class 1 (cold) – significant sharp decline (-7,1%/decade, p<0,001).
- Class 4 – significant moderate decline (-3,2%/decade, p=0,002).
- Trends for Classes 2 and 5 are statistically insignificant.

Table 3
Assessment of trends in the recurrence of year types (1935...2020)

Class	Trend direction	Mann–Kendall Z	p-value	Theil–Sen slope (%/decade)
1	Decreasing	-6,87	<0,001	-7,1
2	Not significant	-0,33	0,74	-0,3
3	Increasing	8,34	<0,001	+8,4
4	Decreasing	-3,07	0,002	-3,2
5	Not significant	-0,72	0,472	-0,7

Formation of a new climatic norm. Comparison of periods (Figure 5) shows a radical restructuring:

• 1931...1970: balanced structure, dominance of cold types 1 and 4 (total ≈62,5%). Class 3 is rare (7,5%).

• 1971...2000: transitional period, increase in Class 3 share to 20%.

• 2001...2025: new norm – absolute dominance of Class 3 (68% of years). Complete disappearance of Class 1 after 1994, sharp reduction in Class 4 share.

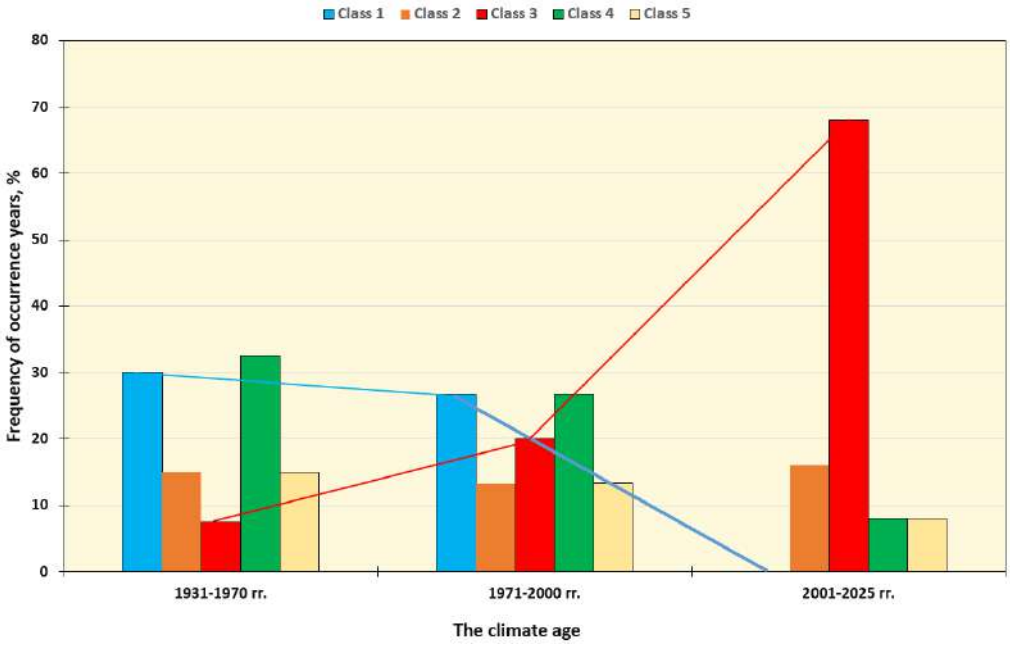


Figure 5. *Distribution of thermal year type frequencies by climatic epochs (Almaty)*

Discussion and Practical Significance of Results

The developed methodology (factorization + clustering + dynamics analysis) allowed not only to state warming but to identify a qualitative shift in the climate structure – a transition to the dominance of a specific, anomalously warm year type (Class 3). The breakpoint (1993) chronologically coincides with the acceleration phase of global warming. The high rates of change (+8,4% and -7,1% per decade) confirm the region's status as a climate "hotspot" and indicate the nonlinear, accelerating nature of the transformation.

The practical significance of the results lies in the transition from stating facts to developing specific, scientifically based adaptation measures. The typology translates global trends into localized and interpretable scenarios for urban management. Based on the identified dynamics, specific adaptation measures for Almaty can be proposed.

Urban planning and infrastructure modernization indicate the need to adjust construction standards (SNiP, SP). Stricter requirements for building thermal insulation should focus not on average indicators but on the thermal characteristics of Class 3 (mild winter) and Class 5 (extremely cold autumn). Particular attention should be paid to the summer overheating regime: mandatory design of passive cooling (sun shading structures, forced night ventilation, use of high-albedo materials for roofs and facades).

Planning of "cooling corridors" is necessary. Using data on prevailing winds during periods related to Class 3, it is necessary to legally consolidate and restore natural ventilation corridors (e.g., small river valleys), preventing their point development. This is a key measure to mitigate the urban heat island effect.

Adaptation of road and transport infrastructure is required. When designing and repairing roads, it is necessary to use asphalt concrete mixtures resistant to higher summer temperatures (characteristic of Class 3) to avoid wave formation and increased wear.

In the field of healthcare and social protection, it is necessary to implement a Heat-Health Warning System (HHWS). Based on the identification of Class 3 and the forecast of its onset, a multi-level warning system should be created. Threshold values for declaring "yellow," "orange," and "red" danger levels should be calculated specifically for Almaty, taking into account local physiological adaptation of the population and morbidity data.

Creation of vulnerability maps is important. It is necessary to identify urban areas with maximum concentration of vulnerable groups (elderly people, children, persons with chronic diseases) and the least favorable microclimate (dense development, minimal greenery). In these areas, during periods corresponding to Class 3, mobile cooling points should be quickly deployed and patronage services strengthened.

Climate control of social facilities should be ensured. Schools, hospitals, and nursing homes should be prioritized for equipping with air conditioning systems or, at a minimum, powerful forced-air ventilation systems with cooling.

Environmental management and air quality deserve special attention.

A regime of special emission control must be strictly observed. During forecast periods of Class 3 conditions (anticyclonic weather, weak wind), a restriction regime for major stationary pollution sources (CHP plants, industrial enterprises) should be automatically introduced, following the example of systems operating in Beijing or Paris.

A next-generation greening strategy should be developed. Tree planting should be carried out not only for decorative purposes but also for maximum ecosystem effect. Priority should be given to tree species with high transpiration activity and large leaf surface area (e.g., oak, poplar, elm, ash), providing natural cooling and pollutant sequestration. It is necessary to develop green roofs and vertical gardening, especially in the densely built city center.

Creation of a unified digital platform is required, where meteorological data (Class 3 risk), atmospheric air monitoring data, and the epidemiological situation are compared in real time for operational decision-making.

Particular attention should be paid to energy and water use, forecasting peak loads. Energy companies should use scenarios of increasing Class 3 frequency to modernize networks and plan reserve capacities for the summer maximum period associated with the massive use of air conditioners. Co-financing programs for installing solar panels and heat recovery systems in the residential sector should be developed to reduce the load on the network during peak periods.

A special role is assigned to the adaptation of the water management complex. Thus, the increase in warm winters (Class 3) requires adjustment of reservoir filling forecast models dependent on snow supply. It is necessary to develop scenarios for water resource management under conditions of earlier and more intense snowmelt.

Limitations and prospects. The main limitation of the work is the consideration of only the temperature parameter. Promising directions are: 1) creation of a comprehensive typology including data on precipitation, humidity, and atmospheric circulation indices for direct synoptic interpretation of types and forecasting of droughts or floods; 2) expansion of the methodology to other major cities of Central Asia (Bishkek, Tashkent) for comparative analysis of regional climate risks; 3) use of the obtained typology for calibration and verification of regional climate models (RCMs) to develop probabilistic scenarios for the recurrence of identified year types over the next 30...50 years.

Thus, the proposed typology serves not only as a diagnostic but also as a design tool. It allows assessing the effectiveness of existing measures and designing a new, climate-oriented urban development policy, transforming climate risk data into specific action plans for all key sectors of the urbanized environment.

4. CONCLUSION

1. The comprehensive two-stage methodological approach (multivariate statistics + time series analysis) made it possible to create a statistically substantiated typology of 5 thermal year types for Almaty and quantitatively assess its transformation.

2. A cardinal qualitative shift in the climate regime was revealed, expressed in the transition to absolute dominance of the warmest year type (Class 3) after 1993. In the modern period (2001...2025), this type constitutes a new climatic norm (68% of years).

3. Exceptionally high rates of change were established: an increase in the recurrence of Class 3 by +8.4% and a decrease in Class 1 by –7.1% per decade, confirming the high vulnerability of the region.

4. The results obtained are not only diagnostic but also a practical tool. The developed typology and quantitative estimates of its dynamics represent a scientific basis for assessing complex climate risks and developing specific adaptation measures for key sectors of Almaty's urban economy.

DATA AVAILABILITY

The data used is publicly available.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Scientific hypothesis and research methodology – V.K.K.; Numerical solutions and calculations – Yu.G.B.; Writing of the article – Yu.P.D.

REFERENCES

1. Semenov, S. M. (2015). Greenhouse effect: development of the concept, role in global climate formation and its anthropogenic changes. Fundamental and Applied Climatology, 2, 103–126. [in Russian]
2. Shalimov, S. A. (2015). Urban heat island in Almaty: intensity and spatial structure. News of NAS RK. Series of Geography and Geoecology, (4), 15–25. [in Russian]
3. Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment, 43(1), 51–63.
4. Gulakhmadov, A. A. (2021). Assessment of trends and magnitude changes of hydrometeorological parameters over recent decades in Central Asia. TSPBO Bulletin, (1), 8–18. [in Russian]
5. Huang, D., Qian, Y., & Zhu, J. (2020). Trends in regional blockings and their relationship with temperature extremes in Central Asia. International Journal of Climatology, 40(2), 1158–1172.
6. IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2391 p.
7. Zadonsky, I. D. (2025). AI in time series forecasting: new approaches to non-linear data analysis. Bulletin of Science, 3(6), 1740–1747. [in Russian]
8. Kumratova, A. M. (2015). Mathematical methods and software tools for studying trends in evolutionary development of natural processes. Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agricultural University, (111), 489–503. [in Russian]
9. Shugurova, M. A. (2026). Forecasting seasonal time series using hybrid regression models. Vestnik of Samara University. Natural Science Series, 32(1), 192–203. [in Russian]
10. Gulev, S. K., & Soloviev, D. A. (2025). Energetics and climate tipping points of the ocean-atmosphere system: risks and uncertainties for the XXI century. Environment and Energy Science, (4), 39–66. [in Russian]
11. Soldatenko, S. A., & Yusupov, R. M. (2019). Assessment of the impact of thermal inertia and feedbacks in the atmosphere-ocean system on global surface temperature variability. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 55(6), 114–126. [in Russian]
12. Wills, R. C., Dong, Y., Proistosecu, C., et al. (2022). Systematic climate model biases in the large-scale patterns of recent sea-surface temperature and climate change. Geophysical Research Letters, 49(17), 1–12.
13. Webb, E. J., & Magi, B. I. (2022). The ensemble oceanic Niño index and regional climate impacts. International Journal of Climatology, 42(10), 5321–5341.
14. Khlustov, V. K., & Kokorin, S. G. (2026). Typology of calendar years as a tool for substantiating economic adaptation to climate change. Environmental Engineering, (3), 120–128. [in Russian]
15. Gordov, E. P. (2023). Digital twins of systems and processes as a tool for modern climatology. Fundamental and Applied Climatology, 9(3), 269–298. [in Russian]
16. Bauer, P., Stevens, B., & Hazeleger, W. (2021). A digital twin of Earth for the green transition. Nature Climate Change, 11(2), 80–83.
17. Li, X., Feng, M., Ran, Y., et al. (2023). Big Data in Earth system science and progress towards a digital twin. Nature Reviews Earth & Environment, 4(5), 319–332.
18. Chen, G., Yang, J., Huang, B., et al. (2023). Toward digital twin of the ocean: Integrated 3D OHC monitoring and data-driven climate analysis. Intelligent Marine Technology and Systems, 1(1), 3.
19. Botygin, I. A., Kataev, S. G., Sherstnev, V. S., & Sherstneva, A. I. (2015). Methods for classification and analysis of climate fields. Journal of Eurasian Science, 7(6), 98. [in Russian]
20. Gusev, V. M., & Osipov, G. S. (2026). Comparative analysis of methods for assessing clustering quality on the example of k-means algorithm. Flagship of Science, (4), 39. [in Russian]
21. Dunskaia, L. K., & Popova, E. V. (2025). Adaptation of k-means as a tool for automating the forecasting process of weakly structured time series. π-Economy, 18(1), 160–177. [in Russian]

22. Kömüşcü, A. Ü., Turgu, E., & DeLiberty, T. (2022). Dynamics of precipitation regions of Turkey: A clustering approach by K-means methodology in respect of climate variability. Journal of Water and Climate Change, 13(10), 3578–3606.
23. Khlustov, V., Demakov, Y., & Bezborodov, Y. (2026). Long-term typology of Almaty thermal regime (1931–2025) based on multidimensional statistical analysis. E3S Web of Conferences, 719, 05001, 1–7.
24. Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity. Psychometrika, 39(1), 31–36.
25. Kharchenko, S. V., & Shvarev, S. V. (2020). Forecasting dangerous natural processes based on linear discriminant analysis. Moscow University Bulletin. Series 5. Geography, (3), 22–33. [in Russian]
26. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, 245–259.
27. Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 28(2), 126–135.
28. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 68(324), 1379–1389.
29. Wang, F., Shao, W., Yu, H., et al. (2020). Re-evaluation of the power of the Mann-Kendall test for detecting monotonic trends in hydrometeorological time series. Frontiers in Earth Science, 8, 14.

КҮНТІЗБЕЛІК ЖЫЛДАРДЫҢ ТИПОЛОГИЯСЫ ЖӘНЕ ЖАҺАНДЫҚ ЖЫЛЫНУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ЖЫЛУ РЕЖИМІНІҢ ДИНАМИКАСЫ: АЛМАТЫ ҚАЛАСЫ ҮШІН ҚАТЕРЛЕРДІ БАҒАЛАУ

Виталий К. Хлюстов[1] ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, Юрий П. Демаков[2] биология ғылымдарының докторы, профессор, Юрий Г. Безбородов[1]* техника ғылымдарының докторы, қауымдастырылған профессор

[1] Ресей мемлекеттік аграрлық университеті – К.А. Тимирязев атындағы Мәскеу ауыл шаруашылығы академиясы, Мәскеу қ., Ресей Федерациясы; vkhlyustov@rgau-msha.ru (В.К.Х.), ubezborodov@rgau-msha.ru (Ю.Г.Б.)

[2] Еділ өңірінің мемлекеттік технологиялық университеті, Йошкар-Ола, Ресей Федерациясы; DemakovYP@volgatech.net (Ю.П.Д.)

*Автор корреспондент: Юрий Г. Безбородов , ubezborodov@rgau-msha.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Алматы климаты, көпөлшемді статистикалық талдау, факторлық талдау, кластерлеу, жылдар типологиясы, қайталаным динамикасы, өзгеріс нүктесі, Петтит критерийі, Манн-Кендалл критерийі, климаттық тәуекелдер мен бейімделу

Мақала жайында:
Алынды: 13.04.2026
Қайта қаралды: 06.05.2026
Қабылданды:16.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Осы зерттеудің мақсаты – Алматы қаласындағы күнтізбелік жылдар бойынша жылулық жағдайлардың статистикалық тұрғыдан негізделген типологиясын әзірлеу және қазіргі климаттың өзгеруі жағдайында осы жағдайлардың өзгерісін сандық тұрғыдан талдау болды. Зерттеу барысында екі сатылы тәсіл қолданылды. Бірінші кезеңде негізгі компоненттер талдауы (PCA) арқылы деректердің өлшемділігі қысқартылып, одан кейін k-means әдісімен кластерлеу негізінде күнтізбелік жылдардың типтері анықталды. Екінші кезеңде анықталған типтердің қайталану динамикасы параметрлік емес статистикалық әдістер (Петтит критерийі, Манн–Кендалл критерийі және Тейлор-Сен бағалауы) көмегімен талданды. PCA нәтижелері (KMO = 0.764) жалпы дисперсияның 61,6 %-ын түсіндіретін және негізгі маусымдық заңдылықтарды сипаттайтын төрт жасырын факторды айқындады. Осы факторларға негізделген кластерлік талдау күнтізбелік жылдардың 95,8 % дәлдікпен бес статистикалық тұрғыдан сенімді типін (сыныбын) бар екенін көрсетті, бұл нәтиже сызықтық дискриминанттық талдау (LDA) арқылы расталды. Динамикалық талдау климаттық режимде 1993 жылы статистикалық маңызды бұрылыс нүктесінің бар екенін анықтады (Petit критерийі, $p < 0,001$). Өте жоғары трансформация қарқыны байқалды: ең жылы типтің (жұмсақ қыс, өте жылы жаз) жиілігі әр онжылдықта +8,4 %-ға артып отырса, ең суық типтің жиілігі –7,1 %-ға төмендеген. Қазіргі кезеңде (2001...2025 жж.) жаңа климаттық норма қалыптасқан, мұнда жылы тип жылдардың 68 %-ын құрайды. Алынған типология және оның динамикасының сандық бағалаулары егжей-тегжейлі климаттық диагностика үшін практикалық құрал ретінде қызмет етеді, күрделі тәуекелдерді (жылу толқындары, ауа сапасының нашарлауы, инфрақұрылымға түсетін жүктеме) бағалауға және жаһандық жылынудың «ыстық нүктесі» саналатын аймақта орналасқан мегаполис үшін мақсатты бейімделу стратегияларын әзірлеуге мүмкіндік береді.

ТИПОЛОГИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ЛЕТ И ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ: ОЦЕНКА РИСКОВ ДЛЯ АЛМАТЫ

Виталий К. Хлюстов[1] доктор сельскохозяйственных наук профессор, Юрий П. Демаков[2] доктор биологических наук, профессор, Юрий Г. Безбородов[1]* доктор технических наук, ассоциированный профессор

[1] Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация; vkhlyustov@rgau-msha.ru (В.К.Х.), ubezborodov@rgau-msha.ru (Ю.Г.Б.)

[2] Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Российская Федерация; DemakovYP@volgatech.net (Ю.П.Д.)

*Автор корреспондент: Юрий Г. Безбородов , ubezborodov@rgau-msha.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Климат Алматы, многомерный статистический анализ, факторизация, кластеризация, типология по годам, динамика повторяемости, точка перелома, критерий Петтита, критерий Манна–Кендалла, климатические риски и адаптация

По статье:
Получено: 13.04.2026
Пересмотрено: 06.05.2026
Принято: 16.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Целью данной работы являлась разработка статистически обоснованной типологии тепловых условий календарных лет для г. Алматы, а также количественный анализ их изменений на фоне современных климатических трансформаций. В исследовании применён двухэтапный подход. На первом этапе выполнено снижение размерности данных с использованием метода главных компонент (PCA), после чего проведена кластеризация методом k-средних для выделения типов календарных лет. На втором этапе осуществлён анализ динамики повторяемости выделенных типов с применением непараметрических статистических методов (критерий Петтита, критерий Манна–Кендалла, оценка Тейла-Сена). Результаты PCA (KMO = 0,764) позволили выявить четыре латентных фактора, объясняющих 61,6 % общей дисперсии и отражающих ключевые сезонные режимы. Кластерный анализ, основанный на данных факторах, позволил выделить 5 статистически устойчивых типов (классов) календарных лет с точностью классификации 95,8 %, что было подтверждено дискриминантным анализом (LDA). Динамический анализ выявил статистически значимую точку перелома климатического режима в 1993 г. (критерий Петтита, $p < 0,001$). Установлены исключительно высокие темпы трансформации: частота наиболее тёплого типа (мягкая зима, очень тёплое лето) увеличивается на +8,4 % за десятилетие, тогда как частота наиболее холодного типа снижается на –7,1 % за десятилетие. В современный период (2001...2025 гг.) сформировалась новая климатическая норма, при которой на самый тёплый тип приходится 68 % лет. Полученная типология и количественные оценки её динамики представляют собой практический инструмент для детальной климатической диагностики, оценки комплексных рисков (тепловые волны, ухудшение качества воздуха, нагрузка на инфраструктуру) и разработки целевых стратегий адаптации для мегаполиса, расположенного в регионе, рассматриваемом как «горячая точка» глобального потепления.

Publisher's Note: Statements, opinions, and data in all publications are those of the author(s) alone and not those of the Journal of Hydrometeorology and Ecology and/or the editor(s).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА НА ОСНОВЕ ИНДЕКСОВ FWI И FFDI

Гульсезим К. Жусупова[1,2*], Даникер В. Чепашев[1], Диас Б. Мерекеев[1], Эльмира С. Жилкибаева[3] к.с.н., Дастан Аманкешулы[1] PhD

[1]ТОО «Институт ионосферы», г. Алматы, Казахстан; zhussupova@ionos.kz (Г.К.Ж.), d.chepashev@ionos.kz (Д.В.Ч.), merekeyev.d@ionos.kz (Д.Б.М.), doktor.2020@internet.ru (Д.А.)
[2] Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (Г.К.Ж.)
[3]НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет», г. Алматы, Казахстан; elmira.zhilkibayeva@kaznaru.edu.kz (Э.С.Ж.)
*Автор корреспондент: Гульсезим К. Жусупова, zhussupova@ionos.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

природные пожары, индекс пожароопасности, метеорологические данные, Казахстан, изменение климата

АБСТРАКТ

В статье представлены результаты расчета индексов пожароопасности на территории Казахстан за период 20…31 июля 2025 года на основе использования метеорологических данных и спутниковых наблюдений активных пожаров. Также произведен анализ прогнозных метеорологических данных модели Global Forecast System за период апрель-сентябрь 2025 года; в расчетах учитывались ключевые метеорологические параметры: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра и количество осадков. Для валидации полученных результатов использовались данные о термоточках, регистрируемых спутниковыми сенсорами MODIS и VIIRS, сравнительный анализ проводился для двух широко применяемых индексов пожарной опасности: австралийского индекса Forest Fire Danger Index (FFDI) и канадской системы Fire Weather Index (FWI).

Результаты исследования показали, что максимальные значения пожарной опасности наблюдаются в июле, что обусловлено сочетанием высоких температур (до 31…36 °C), низкой относительной влажности (до 13…15 %) и дефицита осадков. Пространственный анализ выявил повышенную пожарную опасность в южных, юго-восточных и центральных регионах страны, тогда как северные территории характеризуются преимущественно низкими и умеренными уровнями риска.

Сравнение индексов показало, что система FWI обладает большей чувствительностью к комплексному воздействию метеорологических факторов, включая накопление сухого топлива и длительную засушливость, в то время как индекс FFDI более чувствителен к кратковременным экстремальным изменениям погодных условий, особенно скорости ветра. Анализ по семи климатическим зонам Кеппена-Гейгера подтвердил статистически значимую ($p<0,001$) согласованность индексов FWI и FFDI ($r = 0,86…0,98$) независимо от типа климата. Полученные результаты подтверждают обоснованность совместного использования данных индексов для повышения точности прогноза пожарной опасности и их интеграции в системы раннего предупреждения природных пожаров с учетом региональных климатических особенностей Казахстана.

1. ВВЕДЕНИЕ

Казахстан, страна, известная своими обширными и разнообразными лесными ресурсами, в последние годы все чаще сталкивается с проблемой природных пожаров. Прогнозирование природных (лесных и степных) пожаров требует учета множества факторов, среди которых ключевую роль играют погодные условия [1]. В последние десятилетия прогнозные индексы пожарной опасности активно развиваются, особенно благодаря доступности спутниковых и метеорологических данных. Пожароопасные индексы позволяют заблаговременно выявлять периоды повышенного риска

МРНТИ 37.23.29 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-79-96 УДК 551.583, 528.88

По статье:
Получено: 03.07.2026
Пересмотрено: 06.08.2026
Принято: 11.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Жусупова Г., Чепашев Д., Мерекеев Д., Жилкибаева Э., Аманкешулы Д., Оценка пожарной опасности на территории Казахстана на основе индексов FWI и FFDI// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 79-96.

возникновения пожаров и тем самым принимать превентивные меры (введение запретов на огонь, готовность пожарных служб и т.д.) [2, 3]. Существующие мировые системы оценки пожароопасности в США, Австралии, Канаде, России и других странах используют различные индексы, среди которых можно выделить The McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI), Fire Weather Index (FWI), индекс Нестерова и другие.

Основной задачей индексов пожарной опасности является оценка и информирование о потенциальных рисках и поведении лесных и степных пожаров, что помогает пожарным службам, землевладельцам и общественности принимать обоснованные решения относительно профилактики пожаров, готовности к ним и стратегий реагирования. Система оценки пожароопасности МакАртура созданный в Австралии применяется в различных областях, таких как управление пожарами, где она помогает пожарным службам оценить уровень опасности, прогнозировать поведение огня и правильно распределять ресурсы для тушения. Канадская система позволяет эффективно распределять ресурсы для борьбы с пожарами, выделяя территории с высоким риском возникновения пожаров и прогнозируемым поведением огня [4, 5]. Несмотря на то, что FWI был разработан в Канаде, он применяется по всему миру, поскольку может быть адаптирован к особенностям различных регионов, таких как северные части Соединенных Штатов, некоторые области Юго-Восточной Азии и Европы [6].

В Казахстане ранее были проведены исследования, направленные на математический и статистический анализ архивных данных о пожарах [7, 8], картирование выгоревших территорий [9, 10], а также оценку уровня пожарной опасности на основе различных индексов и климатических параметров [11]. Известно что оценка пожарной опасности в Казахстане официально осуществлялся на основе комплексного показателя пожарной опасности (КПО), рассчитываемого по метеорологическим данным (температура воздуха, точка росы, число дней без осадков), но данная методика не учитывает скорость ветра и многослойную динамику влагосодержания горючих материалов. На данный момент пожарную опасность определяет РГП «Казгидромет» [12] в течение пожароопасного сезона (с момента схода снежного покрова до установления устойчивой дождливой погоды), относя территорию каждой области к одному из пяти классов – от отсутствия до чрезвычайной пожарной опасности. Наряду с этим применяются системы раннего обнаружения уже возникших очагов возгорания – автоматизированные комплексы с ИК/УФ-детекцией пламени, наземное и авиационное патрулирование [13]. Индексы FWI и FFDI, учитывающие ветровой режим и многослойную динамику влагосодержания горючих материалов, могут дополнять действующую систему, повышая точность прогнозирования пожароопасных условий.

Целью данного исследования является прогнозирование пожарной опасности на территории Казахстана на основе применения и сравнительного анализа индексов пожароопасности FWI и FFDI с использованием метеорологических данных и спутниковых наблюдений, а также оценка их эффективности для задач оперативного мониторинга и раннего предупреждения природных пожаров.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Территория исследования

Территорией исследования является Республика Казахстан, расположенный в центральной части Евразии и характеризующийся значительным разнообразием природно-климатических условий, что обуславливает высокую пространственную неоднородность пожарной опасности. Площадь страны составляет около 2,7 млн км² и включает степные, лесостепные, полупустынные и пустынные зоны, а также горные системы Тянь-Шань и Алтай. Климат преимущественно резко континентальный, с жарким засушливым летом (до +25…+29 °C летом на юге (с максимумами до +40…+45

°C), низкой относительной влажностью и выраженной межсезонной амплитудой температур.

С 2018 года в Казахстане отмечается значительное увеличение числа и площади пожаров: если в 2018 году было зафиксировано 358 лесных пожаров, то к 2023 году их число выросло более чем вдвое – до 810 случаев [14]. В 2023 году огнём уничтожено свыше 116 тыс. га лесного фонда, а материальный ущерб превысил 160 миллиардов тенге [15]. Также стоит отметить пожар, произошедший в июне 2023 года в Абайской области на территории ГЛПР «Семей орманы», который охватил площадь 63,3 тыс. га, что привело к трагическим последствиям, включая гибель 14 человек и объявление общенационального траура [16]. Общая площадь крупного пожара, начавшегося 6 октября 2024 года в Карагандинской области, составила свыше 35 тыс. га [17]. В 2025 году зарегистрировано 572 лесных пожара на площади 61,8 тыс. га и 44 степных пожара на 77 тыс. га. Несмотря на рост количества возгораний, крупные катастрофические пожары удалось предотвратить [18]. Тем не менее, с учетом влияния климатических изменений и учащения засушливых периодов, риск природных пожаров остается высоким, что требует совершенствования систем спутникового мониторинга и оценки их последствий.

2.2 Климатические данные и термоточки MODIS/VIIRS

Данные GFS. В данном исследовании для расчета индексов пожарной опасности использовались прогнозные данные Глобальной системы прогноза (Global Forecast System, GFS), разработанной Национальным центром по прогнозированию окружающей среды (NCEP, NOAA, США) [19]. Модель GFS представляет собой глобальную численную систему прогнозирования погоды, основанную на решении уравнений динамики атмосферы с учетом процессов радиации, конвекции и турбулентного обмена.

В настоящей работе использовались прогнозы, инициализированные на 06:00 UTC, начиная с шага прогноза f003 и далее с шагом 24 часа (f003, f027, f051 и т.д.), что соответствует суточному временному разрешению. Пространственное разрешение данных составляет 0,25° по широте и долготе. Для расчетов использовались основные метеорологические параметры, влияющие на пожарную опасность: температура воздуха на уровне 2 м, относительная влажность, скорость ветра на уровне 10 м и количество осадков. Данные были получены из открытых архивов NOAA и предварительно приведены к единой проекции и пространственному разрешению.

Данные Кеппена-Гейгера. Для выделения климатических зон на территории Казахстана использовалась карта климатической классификации Кеппена-Гейгера (рис. 1) пространственным разрешением 1 км (0.0083°), охватывающая период 1991…2020 гг. [20].

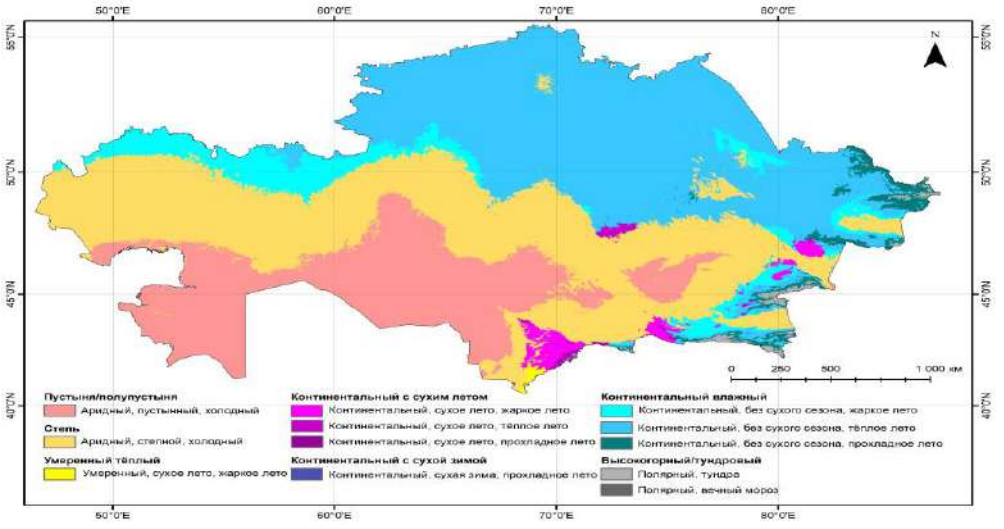


Рисунок 1. *Климатические зоны Казахстана по классификации Кеппена–Гейгера.*

Растр приводился к пространственной сетке индексов FWI и FFDI методом ближайшего соседа (nearest neighbor), поскольку данные являются категориальными, после чего обрезался по границе территории Казахстана. На исследуемой территории было выявлено 12 климатических классов Коппена-Гейгера, которые для последующего анализа были объединены в 7 климатических зон.

Выделенные климатические зоны Кеппена-Гейгера были использованы в качестве пространственной основы для выявления сходимости и сравнительного анализа индексов пожарной опасности FWI и FFDI в пределах каждой зоны отдельно. Для этого применялись методы: зональная статистика (расчёт среднесуточных значений индексов по пикселям в границах каждой зоны), корреляционный анализ Пирсона (оценка силы линейной связи между индексами) и линейная регрессия методом наименьших квадратов (линия тренда, p-value).

Данные MODIS и VIIRS. В исследовании для валидации результатов индексов применялись термоточки, регистрируемые спутниковыми сенсорами MODIS и VIIRS, являются одним из ключевых источников оперативной информации о природных пожарах на региональном и глобальном уровнях. Алгоритмы обнаружения основаны на анализе яркостной температуры в средне- и дальнем инфракрасных диапазонах, что позволяет выявлять пиксели с аномально высоким тепловым излучением по сравнению с фоновыми значениями. Данные MODIS характеризуются пространственным разрешением порядка 1 км и высокой временной повторяемостью (до 4 наблюдений в сутки), тогда как VIIRS обеспечивает более детализированное наблюдение (до 375 м для активных пожаров), что повышает точность локализации очагов возгорания [21].

Термоточки (рис. 2) были отфильтрованы по слою техногенных территорий, полученному из OSM (OpenStreetMap): в результате фильтрации было удалено 31 точка, попадающая в границы техногенных объектов, и в итоге для дальнейшего анализа осталось 450 термоточек за рассматриваемый период. При этом для повышения достоверности данных отбор термоточек производился по уровню доверия (confidence): для спутниковых данных MODIS использовались точки с классом «high», а для VIIRS – точки со значением confidence более 60%, что обеспечивает более высокую достоверность выявленных термоточек.

FID	Shape	LATITUDE	LONGITUDE	BRIGHTNESS	SCAN	TRACK	ACQ_DATE	ACQ_TIME	SATELLITE	INSTRUMENT	CONFIDENCE
0	Point	51.44014	72.86828	316.51	1.54	1.22	2025-07-20	0440	Terra	MODIS	63
1	Point	51.43857	72.89797	309.01	4.82	2	2025-07-20	0616	Terra	MODIS	62
2	Point	51.43872	72.90271	308.32	4.82	2	2025-07-20	0616	Terra	MODIS	60
3	Point	50.05833	59.81018	363.84	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	100
4	Point	48.23094	57.35816	326.43	1.16	1.07	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	66
5	Point	50.06341	59.8373	329.67	1.33	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	60
6	Point	51.08444	67.38596	325.93	2.78	1.59	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	66
7	Point	50.32032	53.50716	355.17	1.01	1.01	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	97
8	Point	49.89651	58.82686	334.68	1.22	1.1	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	81
9	Point	50.04864	59.8056	341.73	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	88
10	Point	50.06165	59.79271	390.18	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	100
11	Point	50.32217	53.49338	347.08	1.01	1.01	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	92
12	Point	51.43935	72.8979	367	0.5	0.66	2025-07-20	0633	N21	VIIRS	h
13	Point	47.46288	80.5616	367	0.34	0.56	2025-07-20	0813	N21	VIIRS	h
14	Point	50.32465	53.4807	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
15	Point	50.33279	53.4898	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
16	Point	50.3362	53.48248	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
17	Point	50.33265	53.47017	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
18	Point	50.33961	53.47517	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
19	Point	50.33842	53.47107	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
20	Point	50.34302	53.46788	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h

Рисунок 2. *Фрагмент атрибутивной таблицы термоточек (MODIS/VIIRS) за период 20…31 июля 2025 года*

2.3 Расчет индексов пожароопасности

В работе сравнены два индекса пожарной опасности: Австралийский Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) и Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI).

В основе системы оценки лесной пожарной опасности в Австралии широко используются Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) для количественной оценки уровня пожароопасности, которая основывается на погодных условиях и

влажности горючих материалов. Разработанная доктором Ричардом МакАртуром в 1960-х годах [22], система с тех пор претерпела несколько обновлений.

Индекс опасности лесных пожаров (FFDI) ориентирован на оценку пожароопасности в лесных массивах. Этот индекс учитывает погодные условия, а также влажность лесного топлива. Для вычислений учитываются погодные параметры, включая температуру, влажность, скорость ветра и осадки, а также данные о влажности горючего материала. Интерпретация полученных значений следующая:

Значения FFDI ниже 12 указывают на низкий уровень пожароопасности.

Значения в диапазоне от 12 до 25 свидетельствуют о средней пожароопасности.

Значения выше 25 говорят о высокой пожароопасности.

Повышение значений в пределах каждого диапазона означает увеличение риска возникновения пожаров [23].

Вычисление индекса пожарной опасности лесного типа (FFDI) в работе выполнено по формуле (1):

$$FFDI = 2exp\,(-0.45 + 0.987\,In(DF) + 0.0338T - 0.0345\,RH + 0.0234U) \quad (1)$$

где T – температура воздуха в °C, RH – относительная влажность в %, U – скорость ветра в км/ч, DF – «фактор засухи» [24]. Значение DF получен из индекса засушливости Китча-Байрама по операционной аппроксимации D. Griffiths [25] с ограничением в диапазоне 0,1...10.

Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI) является неотъемлемой частью CFFDRS и представляет собой систему, используемую в Канаде для оценки вероятности возникновения и поведения лесных пожаров. Он предоставляет числовое значение, которое отражает относительную вероятность возгорания и возможную интенсивность распространения огня в лесных экосистемах. Система FWI основывается на различных метеорологических данных и влажности горючих материалов, которые вместе определяют уровень пожарной опасности. На основе системы предоставляются различные индексы [26, 27]:

– Точный код влажности топлива (Fine Fuel Moisture Code, FFMC): FFMC представляет собой показатель, отражающий содержание влаги в поверхностных органических материалах, таких как трава, хвоя и мелкие веточки. Он помогает определить легкость воспламенения и горючесть этих материалов.

– Код влажности Даффа (Duff Moisture Code, DMC): DMC измеряет содержание влаги в разложившемся органическом материале под поверхностным слоем. Этот индекс показывает наличие топлива, которое может поддерживать тлеющие пожары.

– Код засухи (Drought Code, DC): DC оценивает уровень влажности в глубоких, плотных слоях органического материала. Он отражает степень засушливости таких материалов и их способность поддерживать интенсивные пожары.

– Индекс начального распространения (Initial Spread Index, ISI): ISI оценивает скорость распространения огня сразу после возгорания, учитывая такие факторы, как скорость ветра и FFMC.

– Индекс накопления (Buildup Index, BUI): BUI представляет собой общий показатель количества топлива, доступного для горения, и учитывает такие индексы, как DMC и DC.

– Индекс пожароопасной погоды (Fire Weather Index, FWI): FWI является комплексным индексом, который объединяет значения FFMC, DMC и DC для предоставления общей оценки уровня пожарной опасности.

– Также имеется Ежедневный показатель интенсивности (Daily Severity Rating, DSR) представляющий собой дополнительный компонент системы FWI, предназначенный для количественной оценки сложности тушения пожаров. Показатель

основан на значениях индекса пожарной опасности FWI, однако более точно отражает предполагаемые усилия, необходимые для локализации и подавления огня.

Значения Канадского индекса пожароопасной погоды вычисляются с использованием сложных математических уравнений, которые основываются на данных о текущих погодных условиях и показателях влажности топлива. Все коэффициенты отображенные в уравнениях являются эмпирическими константами Van Wagner [27].

Точный код влажности топлива был рассчитан на основе следующей формулы (2):

$$FFMC = 59.5(250 - m)/(147.2 + m) \quad (2)$$

Здесь m – эффективное влагосодержание подстилки после учёта осадков и суточного высушивания/увлажнения.

Код влажности Даффа с учётом осадков и суточного высушивания вычислялся по уравнению (3) где задаётся суточный прирост K, а в уравнении (4) вычисляется итоговое значение DMC после дождя:

$$K = 1.894 \cdot (T + 1.1) \cdot (100 - H) \cdot EL_m \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

$$DMC = P_r + K, \quad DMC \geq 0 \quad (4)$$

K – показатель суточного снижения влажности топлива, увеличивающийся с ростом температуры, уменьшающийся при повышении относительной влажности воздуха и масштабируемый сезонным коэффициентом EL_m. P_r – значение после-дождевого увлажнения: при отсутствии осадков оно сохраняется на уровне предыдущего значения, а при наличии осадков снижается в зависимости от их количества, что отражает эффект резкого уменьшения DMC при значительных дождях.

Код засухи определялся по формулам (5, 6), где (5) описывает суточный потенциал испарения V, а (6) – итоговый DC с учётом дождя:

$$V = 0.36(T + 2.8) + FL_m \quad (5)$$

$$DC = D_r + V, \quad DC \geq 0 \quad (6)$$

V – показатель суточного иссушения глубинных горючих материалов (potential ET term), зависящий от температуры и сезонного коэффициента FL_m. D_r – значение после-дождевого состояния DC, определяемое через промежуточные параметры, характеризующие влагозапасы в глубоком слое. При выпадении осадков – показатель DC снижается тем сильнее, чем больше количество осадков.

Индекс начального распространения рассчитывался по формуле (7, 8), связывающей влияние влажности подстилки и скорости ветра:

$$f_F = 91.9 \cdot exp(-0.1386 \cdot m) \cdot (1 + m^{5.31} / 4.93 \cdot 10^7), \quad (7)$$

$$ISI = 0.208 \cdot exp(0.05039 \cdot W) \cdot f_F \quad (8)$$

f_F – «топливный» множитель, описывающий, как влажность тонких горючих m подавляет пламя; экспонента по W– «ветровой» множитель, резко увеличивающий скорость распространения при усилении ветра.

Индекс накопления определялся по формуле (9), объединяющей DMC и DC:

$$BUI = \begin{cases} \frac{0.8DC\ DMC}{DMC+0.4DC}, & DMC \leq 0.4DC \\ DMC - \left(1 - 0.8\frac{DC}{DMC+0.4DC}\right)(0.92 + (0.0114DMC)^{1.7}), & DMC > 0.4DC \end{cases} \quad (9)$$

Индекс BUI интегрирует характеристики двух классов горючих материалов – средних (DMC) и крупных (DC) фракций. При низких значениях DMC вклад обеих компонент учитывается напрямую, тогда как при высоких значениях вводится корректирующий коэффициент, отражающий нелинейное снижение доступности топлива по мере увеличения его влажности и плотности.

Итоговый индекс пожарной опасности вычислялся по формуле (10) – промежуточная интенсивность B как функция ISI и BUI и нелинейное преобразование B в FWI:

$$FWI = \begin{cases} B, & B \leq 1 \\ \exp(2.72(0.434\ln B)^{0.647}), & B > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Показатель B характеризует промежуточную интенсивность горения и определяется как функция, линейно зависящая от индекса распространения пламени (ISI) и слабо нелинейно – от индекса накопленного запаса горючего (BUI). Вторая часть формулы представляет собой нелинейное преобразование шкалы при высоких значениях B, что обеспечивает более адекватное отображение различий в потенциальной интенсивности пожаров при экстремальных погодных условиях.

Суточный показатель тяжести пожароопасной обстановки вычислялся на основе FWI по формуле (11):

$$DSR = 0.0272FWI^{1.77} \quad (11)$$

Данная формула отражает нелинейную связь между значением FWI и энергетическим потенциалом горения: при росте FWI показатель DSR увеличивается более чем пропорционально, что позволяет использовать его для интегральной оценки суточной пожарной опасности и расчета индекса сезонной тяжести пожаров (Seasonal Severity Rating, SSR).

Значения FWI не имеют размерности, но они экспоненциально связаны с потенциальной скоростью распространения и горения пожара. Интерпретация полученных числовых значений выглядит следующим образом: При значениях 0…5 пожарная опасность оценивается как низкая, 5…10 – умеренная, 10…20 – высокая, 20…30 – очень высокая, а свыше 30 – экстремальная, когда пожары распространяются быстро и трудно поддаются. Однако стоит отметить, что интерпретация этих значений может варьироваться в зависимости от региональных стандартов и специфики местных условий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе приведены результаты исследования динамики метеорологических параметров за период апрель-сентябрь 2025 года на основе данных GFS и сравнение результатов двух индексов пожарной опасности за период 20…31 июля 2025 года: Австралийский Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) и Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI).

На рисунке 3 указаны графики максимальных и средних значений температуры воздуха, скорости ветра, осадков и влажности за период апрель-сентябрь 2025 года.

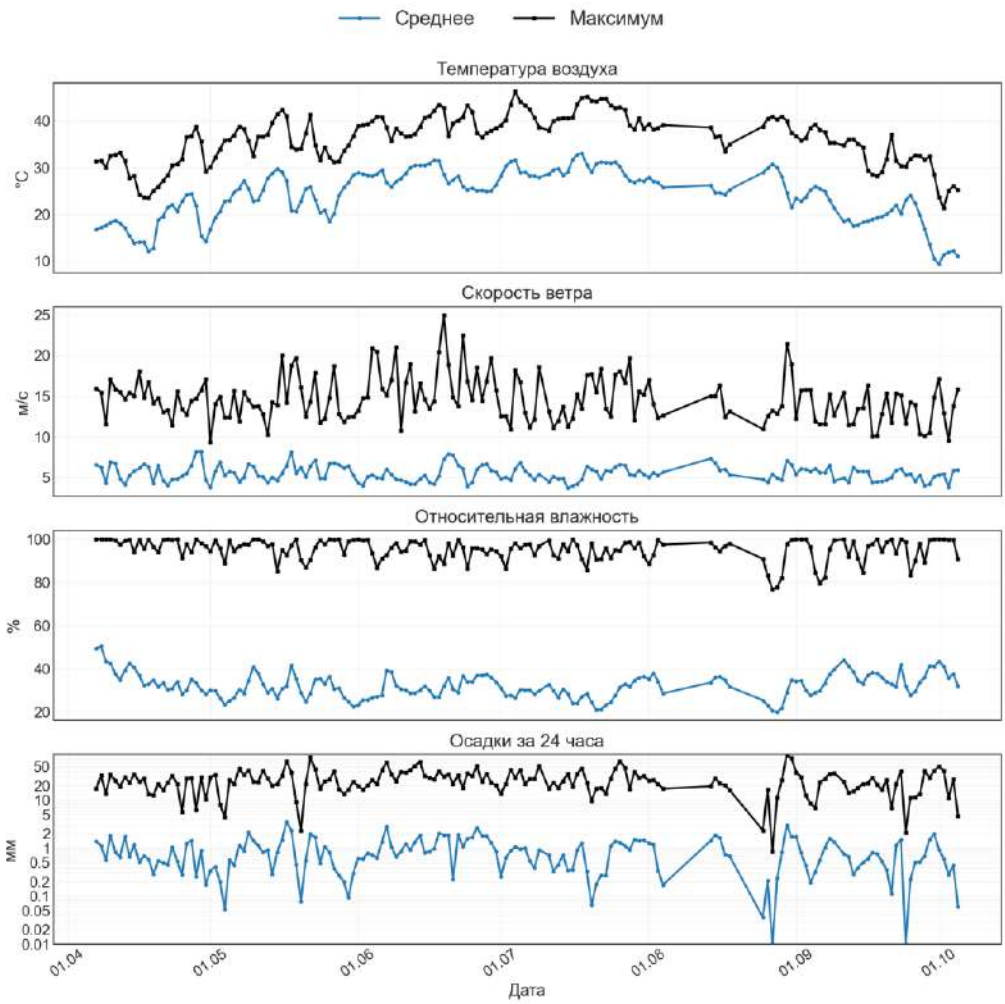


Рисунок 3. *Максимальные и средние значения метеорологических данных за период апрель-сентябрь 2025 года*

Температура воздуха. Средние месячные значения варьировали от 17,9 °C в апреле до 29,6 °C в июле; среднее за период (по средним значениям месяцев) составило 24,4 °C. Максимальная суточная температура пришлась на июль – 46,2 °C, что подтверждает, что самый жаркий месяц сезона – июль. С августа начинается устойчивое понижение температуры до 20,5 °C в сентябре.

Скорость ветра. Средний фоновый ветер стабилен в узком диапазоне 5,3 (сентябрь) …5,7 м/с (май), среднее за период составляет 5,5 м/с. Наиболее сильные суточные значения наблюдались в июне (до 24,9 м/с), что указывает на эпизодические дни с усиленным ветром при общем умеренном фоне.

Осадки. Средние месячные значения невелики – 0,7 мм/сутки в сентябре до 1,3 мм/сутки в июне (среднее за период 0,9 мм/сутки), что указывает на преобладание сухой погоды. При этом отмечаются редкие, но интенсивные эпизоды ливней: максимальная суточная сумма за сезон – 85,9 мм в августе (в мае и июле – 77,8 и 65,2 мм соответственно).

Относительная влажность. Средние значения менялись от 28,7 % в июле (наименьшая влажность) до 36…35.16 % в апреле–сентябре, среднее за период – 32,04 %. Максимальные суточные значения достигают 100 % практически каждый месяц, что отражает отдельные влажные/фронтальные дни, но они не меняют общего сухого фона.

Комбинация наивысших температур и минимальной влажности в июле при стабильном умеренном ветре формирует наиболее неблагоприятное «окно» сезона для возникновения и распространения пожаров. Небольшие средние суммы осадков

поддерживают сухость, а редкие сильные ливни (особенно в августе) дают кратковременные «сбросы» сухости без долговременного эффекта.

На рисунке 4 карты с суточным FFDI показывают устойчивый меридиональный контраст: на протяжении рассматриваемого периода максимальные значения индекса (классы 25…40 и 40+) преимущественно формируются в южной, юго-восточной, центральной частях Казахстана и в Мангистауской области в западном регионе. Также, к высокому риску возникновения пожаров подвержена территория близ озера Балхаш, вокруг которого часто наблюдаются высокие показатели индекса FFDI. В северных районах преобладают умеренные и низкие классы (5…12 и 12…25), что согласуется с более прохладными или влажными условиями. К концу рассматриваемого периода умеренные показатели смещаются к центральной и юго-западной части Казахстана.

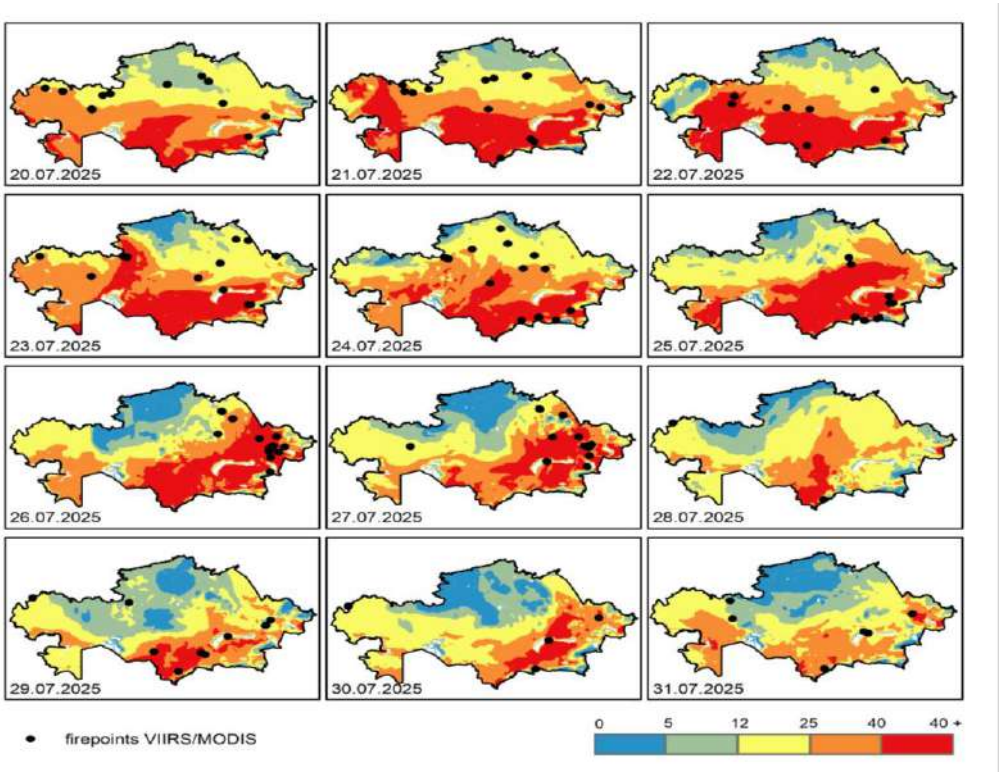


Рисунок 4. *Показатели расчета индекса FFDI на территорию Казахстана за 20…31 июля 2025 г.*

Линейная диаграмма распределения количества термоточек по категориям FFDI, представленная на рисунке 5, подтверждает пространственную картину пожарной активности. Наблюдается четкая взаимосвязь между числом термоточек и значениями индекса: в категории 0...5 точки отсутствуют, что свидетельствует о малой вероятности фиксации пожаров при низких значениях индекса. В диапазоне 5…12 зарегистрировано 29 точки, что отражает отдельные случаи возгораний при умеренной пожарной опасности. Наибольшая концентрация термоточек наблюдается в интервале 12…25 (136 точек) и особенно в диапазоне 25…40 (166 точек), указывающее на значительную роль этих уровней индекса в формировании пожарных ситуаций.

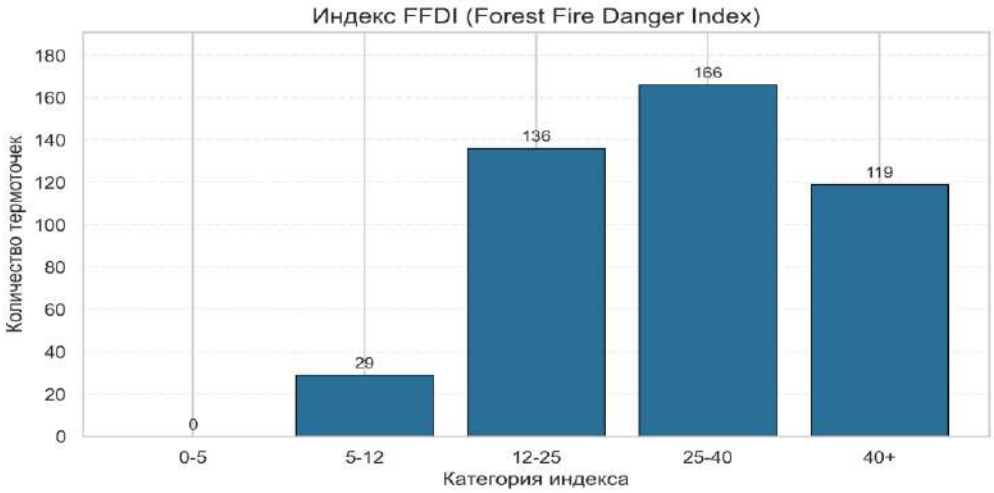


Рисунок 5. *Распределение термоточек по категории индекса FFDI на территорию Казахстана за 20…31 июля 2025 г.*

На рисунке 6 представлены boxplot-диаграммы распределения основных метеорологических параметров – температуры воздуха, осадков и относительной влажности – по категориям индекса FFDI.

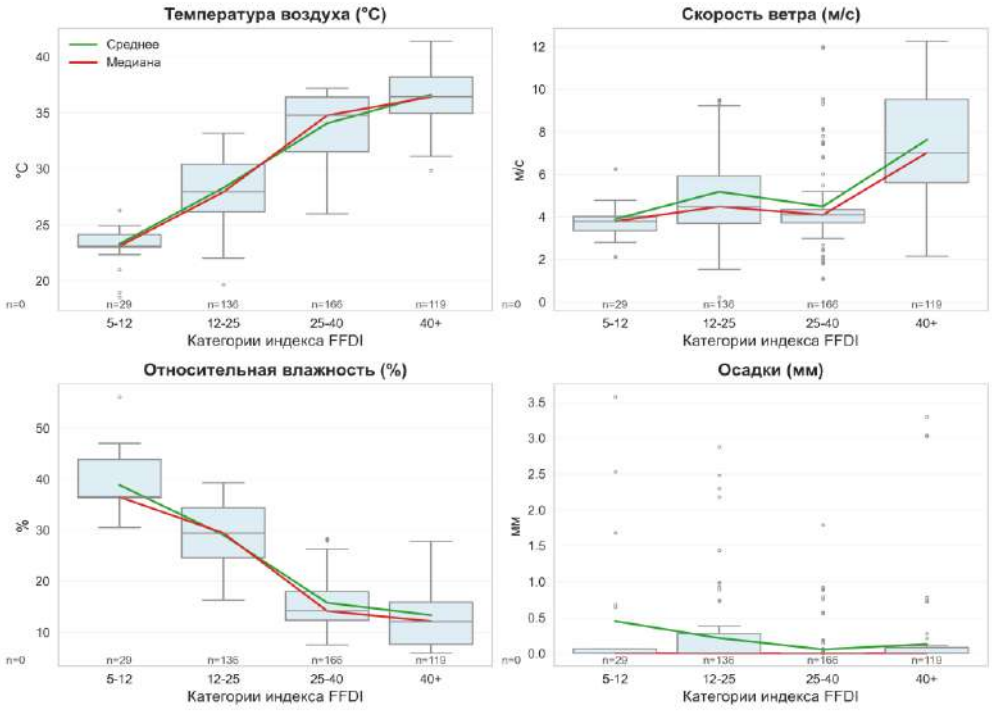


Рисунок 6. *Динамика метеорологических параметров по категориям индекса FFDI за 20…31 июля 2025 г.*

С увеличением значений индекса FFDI средняя температура воздуха возрастает от 23 до 36 °C (медиана – с 23 до 36 °C), тогда как средняя относительная влажность снижается с 38 до 13 % (медиана – с 36 до 12 %). Количество осадков уменьшается с 0,4 мм в категории 5…12 до 0,1 мм в категории 40+. Эти закономерности подтверждают положительную связь индекса FFDI с температурой воздуха и отрицательную – с относительной влажностью и осадками. Поведение ветра по категориям индекса выражено неоднозначно: при FFDI = 12…25 средняя скорость ветра составляет 5,2 м/с,

при этом в категориях 25…40 равна 4,5 м/с, что не демонстрирует существенных различий. Однако в наивысшей категории 40+ среднее значение достигает 7,6 м/с, что указывает на усиливающее влияние ветра на рост индекса FFDI.

В категории свыше 40 зафиксировано 119 точек, обозначающее экстремальные условия, при которых вероятность возникновения и распространения пожаров становится максимально высокой. Как видно на графике, высокая категория индекса определяется экстремальными значениями метеорологических факторов, включая очень высокие температуры воздуха (выше +30 °С), низкую относительную влажность (менее 28 %), продолжительные безосадочные периоды и сильный ветер (до 12 м/с). Именно сочетание этих условий приводит к формированию максимально высоких значений FFDI, при которых любая термоточка может соответствовать активному очагу возгорания.

На рисунке 7 прослеживается тенденция распространения индекса, что и на картах индекса FFDI: в период 20…31 июля 2025 г. максимальные классы опасности устойчиво формируются на юге и юго-востоке Казахстана (Жамбылская, Туркестанская, Алматинская области, Прибалхашье), тогда как север и северо-запад чаще остаются в пониженных классах. Во времени оба индекса синхронно фиксируют «пик» эпизода когда зоны высоких/очень высоких значений занимают большую часть юга и востока, и именно там концентрируются термоточки VIIRS/MODIS. К концу месяца в обеих метриках заметно снижение опасности и расширение областей со средними и низкими классами.

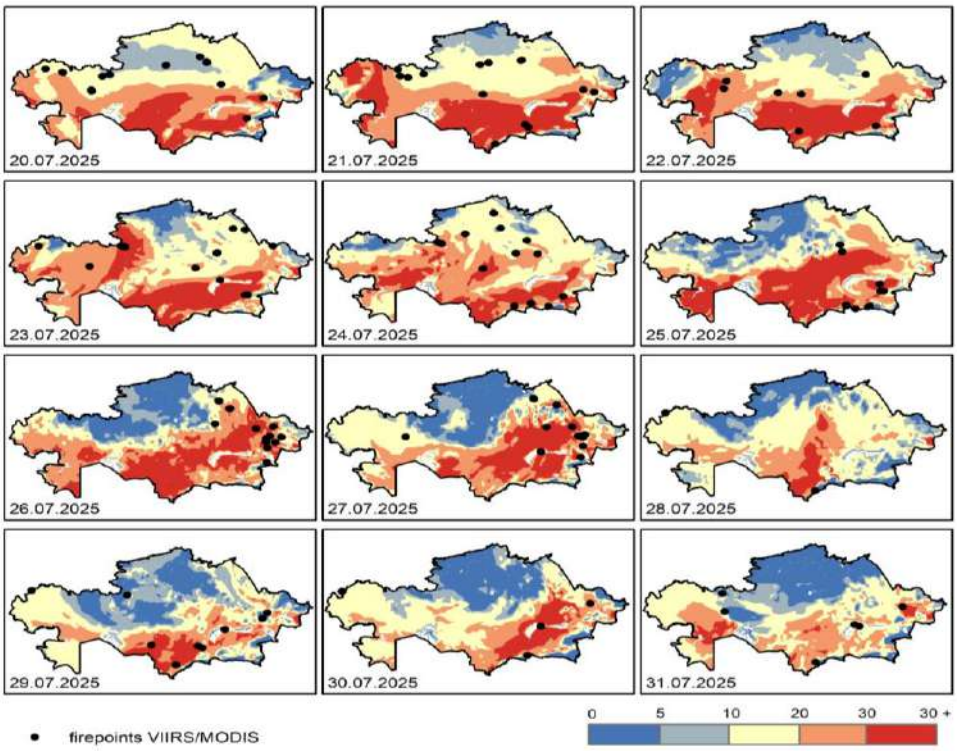


Рисунок 7. *Показатели расчета индекса FWI на территорию Казахстана за 20…31 июля 2025 г.*

На графике (рис. 8) также как у других индексов пожароопасности прослеживается отчетливая зависимость между количеством зарегистрированных термоточек и значениями индекса пожарной опасности FWI. В категории низких значений (0…5) количество термоточек минимально и составляет 4 случая, что соответствует пониженной пожарной активности. В диапазоне 5…10 зафиксировано 36 точек, что указывает на отдельные эпизоды горения при умеренных условиях пожарной опасности. Наибольшая концентрация термоточек отмечена при значениях FWI 10…20 до 164 точек, а также в диапазоне 20…30 зафиксировано 144 точек. Эти интервалы соответствуют повышенным

и высоким классам пожарной опасности, когда сочетание метеорологических факторов (высокая температура воздуха, низкая влажность, усиленный ветер) создает благоприятные условия для распространения огня. При крайне высоких значениях индекса (свыше 30) также сохраняется значительное количество зарегистрированных термоточек – 102 случая.

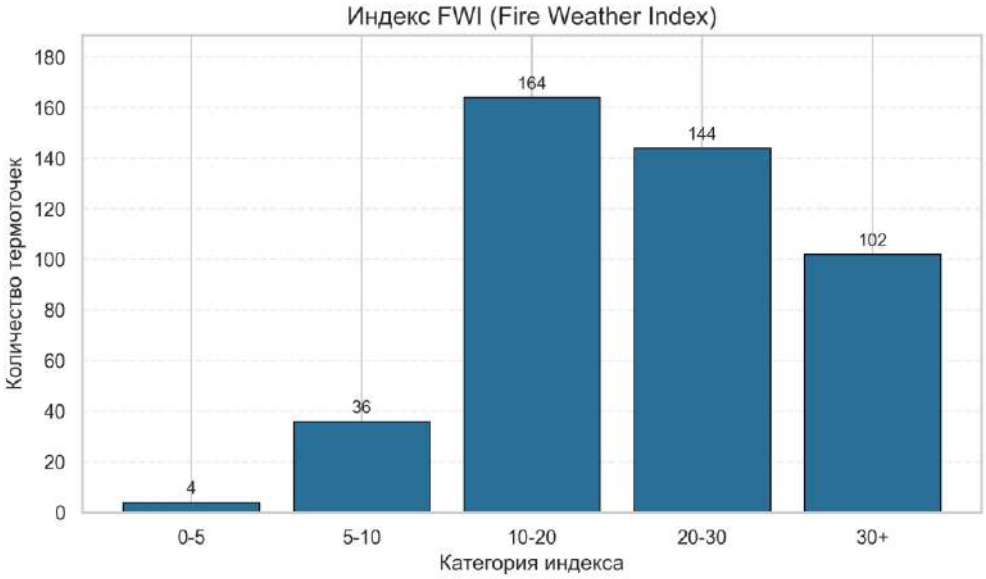


Рисунок 8. *Распределение термоточек по категории индекса FWI на территорию Казахстана за 20…31 июля 2025 г.*

На рисунке 9 представлены boxplot-диаграммы распределения основных метеорологических параметров – температуры воздуха, осадков, относительной влажности и скорости ветра за 20…31 июля 2025г. – по категориям индекса FWI.

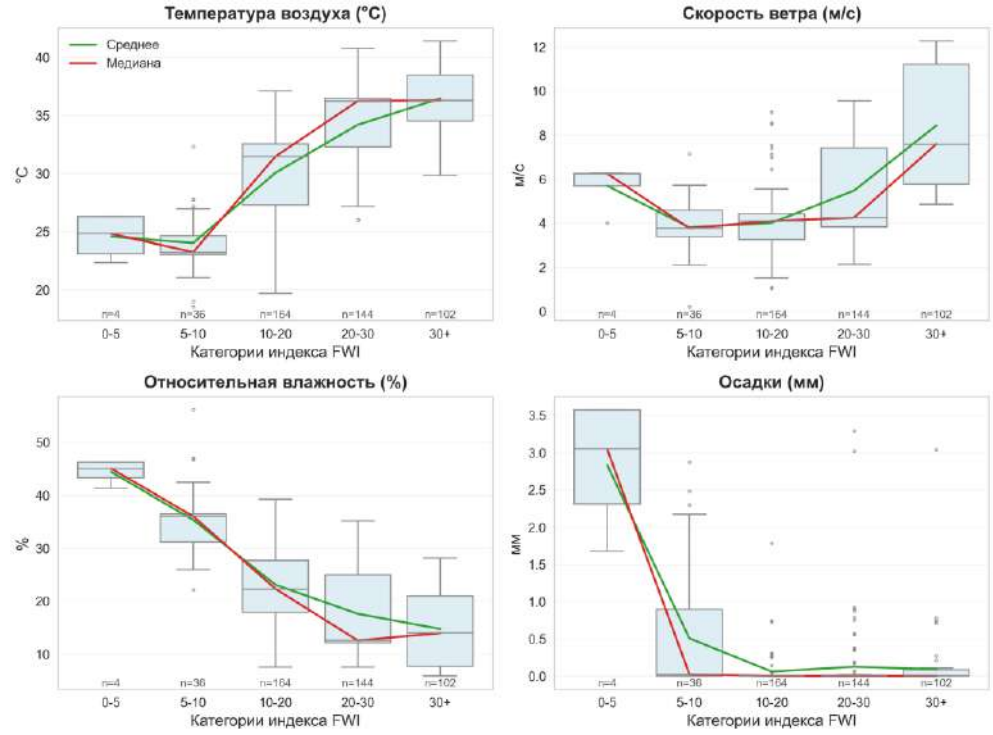


Рисунок 9. *Динамика метеорологических параметров в категориях индекса FWI за 20…31 июля 2025 г.*

Согласно графику, с увеличением значений индекса FWI наблюдается отчетливая тенденция к росту температуры воздуха: средние значения изменяются от 25 до 36 °C (медиана – от 25 до 36 °C). В то же время относительная влажность демонстрирует выраженное снижение – с 44 % до 15 % (медиана – с 45 % до 14 %), что отражает усиление засушливых условий при повышении уровня пожарной опасности. Количество осадков также сокращается с 2,8 мм в категории 0…5 до 0,08 мм в категории 30+, указывающее на дефицит влаги в атмосфере в периоды повышенного значения индекса. Скорость ветра возрастает до 8,4 м/с в категории 30+, что указывает на его существенное влияние в усилении условий, способствующих повышению значений индекса FWI. В целом выявленные зависимости подтверждают положительную корреляцию FWI с температурой воздуха и скоростью ветра, а также отрицательную – с относительной влажностью и количеством осадков.

Анализ парных корреляций между индексами FWI и FFDI по семи климатическим зонам Кеппена-Гейгера показал устойчивую положительную взаимосвязь во всех зонах (рис. 10). Коэффициенты корреляции Пирсона варьировали от r = 0,86 до r = 0,98, при этом во всех случаях связь была статистически значимой (p<0,001). Наиболее тесная связь установлена для высокогорной/тундровой зоны (ET/EF, r = 0,98) и степной зоны (BSk, r = 0,97), наименьшая – для умеренной тёплой зоны (Csa, r = 0,86).

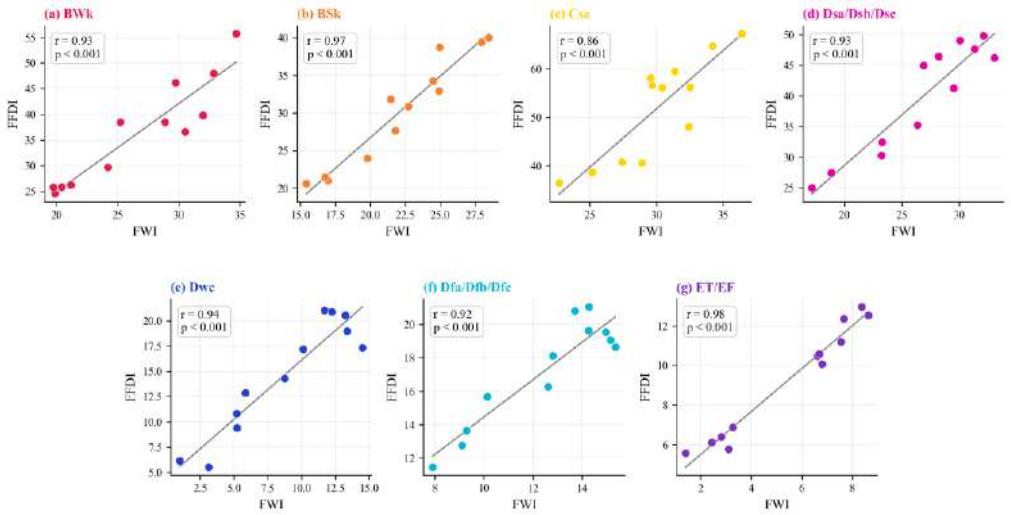


Рисунок 10. *Графики рассеяния значений FWI и FFDI (среднесуточные значения по зоне, n = 12) для семи климатических зон Кеппена-Гейгера территории Казахстана за период 20…31 июля 2025 г.: (a) пустыня/полупустыня (BWk); (b) степь (BSk); (c) умеренный тёплый (Csa); (d) континентальный с сухим летом (Dsa/Dsb/Dsc); (e) континентальный с сухой зимой (Dwc); (f) континентальный влажный (Dfa/Dfb/Dfc); (g) высокогорный/тундровый (ET/EF). r - коэффициент корреляции Пирсона; p – уровень статистической значимости.*

Сравнительный анализ индексов FFDI и FWI показывает их высокую согласованность как в пространственно-временной динамике, так и в зависимости от метеорологических факторов: оба индекса фиксируют пик пожарной опасности в июле при сочетании экстремально высоких температур (до 46 °C), минимальной влажности и дефицита осадков, а также демонстрируют концентрацию высоких классов в южных и юго-восточных регионах Казахстана с одновременным ростом числа термоточек. При этом FFDI в большей степени отражает влияние экстремальных ветровых эпизодов (рост значений в категории 40+ при увеличении скорости ветра), тогда как FWI демонстрирует более выраженную градиентную зависимость от комплексного сочетания температуры,

влажности, осадков и ветра. Распределение термоточек по категориям обоих индексов подтверждает их прогностическую информативность: минимальное количество возгораний соответствует низким классам, а максимальная концентрация – диапазонам повышенной и высокой опасности.

Несмотря на высокую информативность и распространённость рассмотренных индексов, остаются ограничения, связанные с зависимостью от точности метеорологических данных, пространственным разрешением спутниковых наблюдений и отсутствием учёта таких факторов, как рельеф, структура растительности и антропогенная нагрузка, что требует дальнейшего изучения в будущих исследованиях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании для территории Казахстана были применены индексы пожароопасности, рассчитанные на основе спутниковых и метеорологических данных за период 20…31 июля 2025 года. Рассмотренные в работе индексы – Канадский индекс пожароопасной погоды (FWI) и Австралийский индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) – демонстрируют разнообразие подходов к оценке угрозы пожаров и позволяют всесторонне характеризовать динамику метеорологических и топливных факторов. Согласно прогнозным данным модели Global Forecast System за апрель–сентябрь 2025 года, наиболее пожароопасные условия сформировались в июле за счёт сочетания максимальной среднемесячной температуры воздуха (29,63 °C, пиковые значения до 46,24 °C), минимальной относительной влажности (28,67 %) и устойчивого умеренного ветра (в среднем 5,54 м/с) на фоне низкого количества осадков (в среднем 0,92 мм/сутки).

Установлено, что оба индекса адекватно отражают сезонную динамику метеорологических условий и демонстрируют высокую согласованность с распределением термоточек, фиксируя пик пожарной опасности в июле при сочетании экстремально высоких температур, низкой относительной влажности и дефицита осадков. Так, средние температуры воздуха при FFDI в категориях 25…40 составляли 31…36 °C, а при FWI в диапазоне 20…30 между значениями 32…36 °C; средняя относительная влажность снижалась с 38 % до 13 % для FFDI и с 44 % до 15 % для FWI. Пространственный анализ выявил устойчивую концентрацию высоких и экстремальных классов в южных, юго-восточных и центральных регионах страны, тогда как северные территории преимущественно характеризовались умеренными и низкими уровнями опасности.

Сравнительная оценка показала, что FWI более чувствителен к совокупному влиянию ветра и осадков, тогда как FFDI сильнее реагирует на кратковременные экстремальные ветровые эпизоды. Согласованность индексов подтверждается на уровне климатических зон Кеппена-Гейгера: во всех семи рассмотренных зонах установлена статистически значимая ($p<0,001$) положительная корреляция между FWI и FFDI ($r = 0,86…0,98$), что свидетельствует об устойчивости их взаимосвязи независимо от типа климата. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования обоих индексов для оперативного мониторинга и прогноза пожарной опасности, а также обосновывают их интеграцию в системы раннего предупреждения природных пожаров с учетом региональных климатических особенностей.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из открытых источников: спутниковые данные MODIS и VIIRS – NASA Fire Information for Resource Management System (FIRMS), метеорологические данные Global Forecast System (GFS) – National Centers for Environmental Information (NCEI), а также данные климатической классификации Кеппена–Гейгера – Köppen-Geiger Climate Classification. Источники данных доступны по следующим ссылкам: NASA FIRMS: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/; Köppen-Geiger: https://koppen.earth/; Global Forecast System (GFS): https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Г.К.Ж, Д.В.Ч; Методология – Г.К.Ж; Программное обеспечение – Д.Б.М; Валидация – Э.С.Ж, Д.Б.М; Формальный анализ – Э.С.Ж, Д.А; Ресурсы – Д.В.Ч; Подготовка первоначального текста – Г.К.Ж; Редактирование и доработка текста – Г.К.Ж, Д.В.Ч; Визуализация – Д.Б.М; Научное руководство – Д.В.Ч; Администрирование проекта – Д.В.Ч.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26102069 «Разработка комплексной модели распространения лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amakeshuly D., Baimaganbetov R.S., Khudaibergenova B.M., Makishev Zh.K., Zakharov I.A. Environmental-economic damage from forest fires of the Republic of Kazakhstan // Theoretical & Applied Science. – 2020. – Т. 84, № 4. – С. 15–20. – DOI: 10.15863/TAS.2020.04.84.4
2. He Y., Zhou Z., Im E.S., Kwon H.H. Wildfire risk in a changing climate: Evaluating fire weather indices and their global patterns with CMIP6 multi-model projections // Weather and Climate Extremes. – 2025. – Т. 48. – Article 100751. – DOI: 10.1016/j.wace.2025.100751.
3. Zacharakis I., Tsihrintzis V.A. Environmental Forest Fire Danger Rating Systems and Indices around the Globe: A Review // Land. – 2023. – Т. 12, № 1. – Article 194. – DOI: 10.3390/land12010194
4. De Jong M.C., Wooster M.J., Kitchen K., Manley C., Gazzard R., McCall F.F. Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2016. – Т. 16, № 5. – С. 1217–1237. – DOI: 10.5194/nhess-16-1217-2016
5. Mortelmans J., Felsberg A., De Lannoy G.J.M., Veraverbeke S., Field R.D., Andela N., Bechtold M. Improving the fire weather index system for peatlands using peat-specific hydrological input data // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 445–464. – DOI: 10.5194/nhess-24-445-2024
6. Bohlmann S., Laine M. Statistical calibration of probabilistic medium-range Fire Weather Index forecasts in Europe // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2024. – Т. 24, № 12. – С. 4225–4235. – DOI: 10.5194/nhess-24-4225-2024.
7. Архипов Е.В., Залесов С.В. Динамика лесных пожаров в Республике Казахстан и их экологические последствия // Аграрный вестник Урала. – 2017. – № 4 (158). – С. 10–15.
8. Раимбеков К., Кусаинов А. Анализ пожаров в Республике Казахстан методами математической статистики // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 2–3. – С. 75–81. – DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.75-81
9. Suresh Babu K.V., Singh S., Kabdulova G., Gulnara K., Baktybekov G. Geospatial assessment of forest fire impacts utilizing high-resolution KazEOSat-1 satellite data // Frontiers in Forests and Global Change. – 2024. – Т. 7. – Article 1296100. – DOI: 10.3389/ffgc.2024.1296100
10. Шогелова Н., Сартин С. Оценка ущерба и восстановление экосистемы резервата «Семей-Орманы» после катастрофического пожара 2023 года на основе дистанционного зондирования // Гидрометеорология и экология. – 2025. – Т. 118, № 3. – С. 141–151. – DOI: 10.54668/2789-6323-2025-118-3-141-151
11. Chepashev D., Nurakynov S., Sharma D., Sydyk N., Kabdulova G. Mapping fire hazard potential in Kazakhstan: a machine learning and remote sensing perspective // International Journal of Wildland Fire. – 2025. – Т. 34, № 9. – Article WF24232. – DOI: 10.1071/WF24232.
12. Прогноз пожарной опасности [Электрон. ресурс] // Казгидромет. – URL: https://www.kazhydromet.kz/ru/fire (дата обращения: 09.09.2026).
13. Министерство экологии: на усиление защиты лесов от пожаров направлено 16,9 млрд тенге [Электрон. ресурс] // Ortcom.kz. – 2026. – URL: https://ortcom.kz/ru/novosti/1783573997 (дата обращения: 01.09.2026).
14. Бюро национальной статистики. Экология и статистика [Электрон. ресурс] // stat.gov.kz. – 2024. – URL: https://stat.gov.kz/ru/news/ekolog%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1iya-i-statistika/?sphrase_id=21966 (дата обращения: 09.04.2025)
15. Лесные пожары в Казахстане: лишь 2% территорий имеют системы раннего обнаружения [Электрон. ресурс] // Sputnik Казахстан. – 2024. – URL: https://ru.sputnik.kz/20240514/lesnye-pozhary-v-kazakhstane-lish-2-territoriy-imeyut-sistemy-rannego-obnaruzheniya-44255636.html (дата обращения: 09.12.2025).
16. Бауыржан М. Почему и как погибли 14 человек при тушении лесного пожара в Абайской области: итоги расследования [Электрон. ресурс] // Zakon.kz. – 2025. – URL: https://www.zakon.kz/stati/6464482-pochemu-i-kak-pogibli-14-chelovek-pri-tushenii-lesnogo-pozhara-v-abayskoy-oblasti-itogi-rassledovaniya.html (дата обращения: 09.09.2026)
17. Московчук А. Крупный лесной пожар ликвидирован в Казахстане: МЧС показало кадры облета пепелища [Электрон. ресурс] // Zakon.kz. – 2024. – URL: https://www.zakon.kz/sobytiia/6451711-krupnyy-lesnoy-pozhar-likvidirovan-v-kazakhstane-mchs-pokazalo-kadry-obleta-pepelishcha.html (дата обращения: 09.12.2025).
18. Макулбеков М. Число пожаров в Казахстане возросло, но крупных не допущено – МЧС [Электрон. ресурс] // Inform.kz. – 2025. – URL: https://www.inform.kz/ru/chislo-pozharov-v-kazahstane-vozroslo-nokrupnih-nedopusheno-mchs-3a234f (дата обращения: 09.12.2025).
19. NOAA. Global Forecast System (GFS) [Электрон. ресурс] // National Centers for Environmental Information. – 2025. – URL: https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast (дата обращения: 01.03.2025).
20. Beck H., McVicar T., Vergopolan N., Berg A., Lutsko N.J., Dufour A., Zeng Z., Jiang X., van Dijk A.I.J.M., Miralles D.G. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections // Scientific Data. – 2023. – Т. 10. – Article 724. – DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6.
21. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Hall J.V., Zubkova M., Humber M., Huang H., Oles V. The NASA VIIRS burned area product, global validation, and intercomparison with the NASA MODIS burned area product // Remote Sensing of Environment. – 2025. – Т. 331. – Article 115006. – DOI: 10.1016/j.rse.2025.115006
22. McArthur A.G. Fire behaviour in eucalypt forests. – Canberra: Forestry and Timber Bureau, 1967. – 36 p.

23. Bureau of Meteorology. Fire Danger Rating and the McArthur Forest Fire Danger Index [Электрон. ресурс]. – 2025. – URL: http://www.bom.gov.au/climate/maps/averages/ffdi/ (дата обращения: 10.04.2025).
24. Noble I.R., Gill A.M., Bary G.A.V. McArthur's fire-danger meters expressed as equations // Australian Journal of Ecology. – 1980. – Т. 5, № 2. – С. 201–203.
25. Griffiths D. Improved formulae for the McArthur Forest Fire Danger Meter. – Meteorological Note 214. – Melbourne: Bureau of Meteorology, 1998. – 11 p.
26. Lawson B.D., Armitage O.B. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. – Edmonton: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2008. – 87 p. – ISBN 978-1-100-11565-8
27. Van Wagner C.E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. – Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987. – 37 p. – Forestry Technical Report No. 35.

REFERENCES

1. Amakeshuly, D., Baimaganbetov, R. S., Khudaibergenova, B. M., Makishev, Zh. K., & Zakharov, I. A. (2020). Environmental-economic damage from forest fires of the Republic of Kazakhstan. Theoretical & Applied Science, vol. 84, no. 4, pp. 15-20. DOI: 10.15863/TAS.2020.04.84.4.
2. He, Y., Zhou, Z., Im, E. S., & Kwon, H. H. (2025). Wildfire risk in a changing climate: Evaluating fire weather indices and their global patterns with CMIP6 multi-model projections. Weather and Climate Extremes, vol. 48, Article 100751. DOI: 10.1016/j.wace.2025.100751.
3. Zacharakis, I., & Tsihrintzis, V. A. (2023). Environmental Forest Fire Danger Rating Systems and Indices around the Globe: A Review. Land, vol. 12, no. 1. – Article 194. DOI: 10.3390/land12010194.
4. De Jong, M. C., Wooster, M. J., Kitchen, K., Manley, C., Gazzard, R., & McCall, F. F. (2016). Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 16, no. 5, pp. 1217–1237. DOI: 10.5194/nhess-16-1217-2016.
5. Mortelmans, J., Felsberg, A., De Lannoy, G. J. M., Veraverbeke, S., Field, R. D., Andela, N., & Bechtold, M. (2024). Improving the fire weather index system for peatlands using peat-specific hydrological input data. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 24, no. 2, pp. 445-464. DOI: 10.5194/nhess-24-445-2024.
6. Bohlmann, S., & Laine, M. (2024). Statistical calibration of probabilistic medium-range Fire Weather Index forecasts in Europe. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 24, no. 12, pp. 4225–4235. – DOI: 10.5194/nhess-24-4225-2024.
7. Arkhipov, E. V., & Zalesov, S. V. (2017). Dinamika lesnykh pozharov v Respublike Kazakhstan i ikh ekologicheskie posledstviya [Dynamics of forest fires in the Republic of Kazakhstan and their environmental consequences]. Agrarnyi vestnik Urala, no. 4 (158), pp. 10–15. [in Russian].
8. Raimbekov, K., & Kusainov, A. (2018). Analiz pozharov v Respublike Kazakhstan metodami matematicheskoi statistiki [Analysis of fires in the Republic of Kazakhstan using mathematical statistics methods]. Pozharovzryvobezopasnost, vol. 27, no. 2–3, pp. 75–81. – DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.75-81. [in Russian].
9. Suresh Babu, K. V., Singh, S., Kabdulova, G., Gulnara, K., & Baktybekov, G. (2024). Geospatial assessment of forest fire impacts utilizing high-resolution KazEOSat-1 satellite data. Frontiers in Forests and Global Change, vol. 7, Article 1296100. – DOI: 10.3389/ffgc.2024.1296100.
10. Shogelova, N., & Sartin, S. (2025). Otsenka ushcherba i vosstanovlenie ekosistemy rezervata «Semei-Ormany» posle katastroficheskogo pozhara 2023 goda na osnove distantsionnogo zondirovaniya [Assessment of damage and ecosystem restoration of the «Semey-Ormany» Reserve after the catastrophic 2023 fire based on remote sensing]. Gidrometeorologiya i ekologiya, vol. 118, no. 3, pp. 141–151. – DOI: 10.54668/2789-6323-2025-118-3-141-151. [in Russian].
11. Chepashev, D., Nurakynov, S., Sharma, D., Sydyk, N., & Kabdulova, G. (2025). Mapping fire hazard potential in Kazakhstan: a machine learning and remote sensing perspective. International Journal of Wildland Fire, vol. 34, no. 9, Article WF24232. – DOI: 10.1071/WF24232.
12. Kazgidromet. (2026). Prognoz pozharnoi opasnosti [Fire danger forecast] URL: https://www.kazhydromet.kz/ru/fire [in Russian].
13. Ortcom.kz. (2026). Ministerstvo ekologii: na usilenie zashchity lesov ot pozharov napravleno 16,9 mlrd tenge [Ministry of Ecology: 16.9 billion tenge allocated to strengthen forest fire protection] URL: https://ortcom.kz/ru/novosti/1783573997 [in Russian].
14. Byuro natsionalnoi statistiki. (2024). Ekologiya i statistika [Bureau of National Statistics. Ecology and statistics] URL: https://stat.gov.kz/ru/news/ekolog%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1iya-i-statistika/?sphrase_id=21966 [in Russian].
15. Sputnik Kazakhstan. (2024). Lesnye pozhary v Kazakhstane: lish 2% territorii imeyut sistemy rannego obnaruzheniya [Forest fires in Kazakhstan: only 2% of territories have early detection systems] URL: https://ru.sputnik.kz/20240514/lesnye-pozhary-v-kazakhstane-lish-2-territoriy-imeyut-sistemy-rannego-obnaruzheniya-44255636.html [in Russian].
16. Bauyrzhan, M. (2025). Pochemu i kak pogibli 14 chelovek pri tushenii lesnogo pozhara v Abaiskoi oblasti: itogi rassledovaniya [Why and how 14 people died while fighting a forest fire in Abai Region: investigation results]. Zakon.kz. URL: https://www.zakon.kz/stati/6464482-pochemu-i-kak-pogibli-14-chelovek-pri-tushenii-lesnogo-pozhara-v-abayskoy-oblasti-itogi-rassledovaniya.html [in Russian].
17. Moskovchuk, A. (2024). Krupnyi lesnoi pozhar likvidirovan v Kazakhstane: MChS pokazalo kadry obleta pepelishcha [A major forest fire has been extinguished in Kazakhstan: the Ministry of Emergency Situations showed aerial footage of the burned area] Zakon.kz. URL: https://www.zakon.kz/sobytiia/6451711-krupnyy-lesnoy-pozhar-likvidirovan-v-kazakhstane-mchs-pokazalo-kadry-obleta-pepelishcha.html [in Russian].
18. Makulbekov, M. (2025). Chislo pozharov v Kazakhstane vozroslo, no krupnykh ne dopushcheno – MChS [The number of fires in Kazakhstan has increased, but no major fires were allowed – Ministry of Emergency Situations]. Inform.kz. URL: https://www.inform.kz/ru/chislo-pozharov-v-kazahstane-vozroslo-nokrupnih-nedopusheno-mchs-3a234f [in Russian].
19. NOAA. (2025). Global Forecast System (GFS). National Centers for Environmental Information. URL: https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast
20. Beck, H., McVicar, T., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A. I. J. M., & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. Scientific Data, vol. 10, Article 724. – DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6.
21. Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Hall, J. V., Zubkova, M., Humber, M., Huang, H., & Oles, V. (2025). The NASA VIIRS burned area product, global validation, and intercomparison with the NASA MODIS burned area product. Remote Sensing of Environment, vol. 331, Article 115006. – DOI: 10.1016/j.rse.2025.115006.

22. McArthur, A. G. (1967). Fire behaviour in eucalypt forests. Canberra: Forestry and Timber Bureau, 36 p.
23. Bureau of Meteorology. (2025). Fire Danger Rating and the McArthur Forest Fire Danger Index. URL: http://www.bom.gov.au/climate/maps/averages/ffdi/
24. Noble, I. R., Gill, A. M., & Bary, G. A. V. (1980). McArthur's fire-danger meters expressed as equations. Australian Journal of Ecology, vol. 5, no. 2, pp. 201–203.
25. Griffiths, D. (1998). Improved formulae for the McArthur Forest Fire Danger Meter. Meteorological Note 214. Melbourne: Bureau of Meteorology, 11 p.
26. Lawson, B. D., & Armitage, O. B. (2008). Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Edmonton: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 87 p. ISBN 978-1-100-11565-8.
27. Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa: Canadian Forestry Service, 37 p. Forestry Technical Report No. 35.

ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ӨРТ ҚАУПІН FWI ЖӘНЕ FFDI ИНДЕКСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БАҒАЛАУ

Гульсезим К. Жусупова[1,2*], Даникер В. Чепашев[1], Диас Б. Мерекеев[1], Эльмира С. Жилкибаева[3] а.ш.ғ.к., Дастан Аманкешулы[1] PhD

[1] «Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан; zhussupova@ionos.kz (Г.К.Ж.), d.chepashev@ionos.kz (Д.В.Ч.), merekeyev.d@ionos.kz (Д.Б.М.), doktor.2020@internet.ru (Д.А.)
[2] Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (Г.К.Ж.)
[3] «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан; elmira.zhilkibayeva@kaznaru.edu.kz (Э.С.Ж.)
*Автор корреспондент: Гульсезим К. Жусупова, zhussupova@ionos.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

табиғи өрттер, өрт қаупі индексі, метеорологиялық деректер, Қазақстан, климаттың өзгеруі

Мақала жайында:
Алынды: 03.07.2026
Қайта қаралды: 06.08.2026
Қабылданды: 11.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Мақалада 2025 жылдың 20…31 шілде аралығында Қазақстан аумағы бойынша өрт қаупі индекстерін есептеу нәтижелері метеорологиялық деректер мен белсенді өрттерді серіктік бақылау негізінде ұсынылған. Сондай-ақ 2025 жылғы сәуір-қыркүйек аралығындағы кезеңге арналған Global Forecast System моделінің болжамды метеорологиялық деректеріне талдау жасалды; есептеулерде негізгі метеорологиялық параметрлер – ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық, жел жылдамдығы және жауын-шашын мөлшері ескерілді. Алынған нәтижелерді валидациялау үшін MODIS және VIIRS спутниктік сенсорлары тіркеген термонүктелер деректері пайдаланылды, салыстырмалы талдау кеңінен қолданылатын екі өрт қаупі индекстері – австралиялық Forest Fire Danger Index (FFDI) және канадалық Fire Weather Index (FWI) жүйесі бойынша жүргізілді. Зерттеу нәтижелері өрт қауіптілігінің ең жоғары мәндері шілде айында байқалатынын көрсетті, бұл жоғары температуралардың (31...36 °C дейін), төмен салыстырмалы ылғалдылықтың (13...15 % дейін) және жауын-шашын тапшылығының үйлесуімен түсіндіріледі. Кеңістіктік талдау елдің оңтүстік, оңтүстік-шығыс және орталық аймақтарында өрт қауіптілігінің жоғары екенін анықтады, ал солтүстік аумақтар негізінен төмен және орташа тәуекел деңгейлерімен сипатталады. Индекстерді салыстыру нәтижесінде FWI жүйесі метеорологиялық факторлардың кешенді әсеріне, соның ішінде құрғақ жанғыш материалдың жиналуы мен ұзаққа созылған құрғақшылыққа жоғары сезімталдық танытатыны анықталды, ал FFDI индексі қысқа мерзімді экстремалды ауа райы өзгерістеріне, әсіресе жел жылдамдығына анағұрлым сезімтал. Кеппен-Гейгердің жеті климаттық аймағына жасалған талдау бойынша FWI және FFDI индекстерінің статистикалық маңызды ($p<0,001$) сәйкестігі ($r = 0,86…0,98$) расталды. Алынған нәтижелер өрт қауіптілігін болжау дәлдігін арттыру үшін осы индекстерді бірлесіп пайдаланудың негізділігін және оларды Қазақстанның өңірлік климаттық ерекшеліктерін ескере отырып табиғи өрттерді ерте ескерту жүйелеріне интеграциялаудың маңыздылығын растайды.

ASSESSMENT OF WILDFIRE DANGER IN KAZAKHSTAN USING THE FWI AND FFDI INDICES

Gulsezim K. Zhussupova[1,2*], Daniker V. Chepashev[1], Dias B. Merekeyev[1], Elmira S. Zhilkibayeva[3] Cand. Agr. Sci., Dastan Amankeshuly[1] PhD

[1]LLP «Ionosphere Institute», Almaty, Kazakhstan; zhussupova@ionos.kz (G.K.Zh.), d.chepashev@ionos.kz (D.V.Ch.), merekeyev.d@ionos.kz (D.B.M.), doktor.2020@internet.ru (D.A.)
[2]Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (G.K.Zh.)
[3]The Non-Profit Joint Stock Company «Kazakh National Agrarian Research University», Almaty, Kazakhstan; elmira.zhilkibayeva@kaznaru.edu.kz (E.S.Zh.)
*Corresponding author: Gulsezim K. Zhussupova, zhussupova@ionos.kz

KEY WORDS

wildfires, fire danger index, meteorological data, Kazakhstan, climate change

ABSTRACT

The article presents the results of calculating fire danger indices for the territory of Kazakhstan for the period of July 20…31, 2025, based on meteorological data and satellite observations of active fires. It also presents an analysis of forecast meteorological data from the Global Forecast System model for the period April-September 2025; the calculations took into account key meteorological parameters: air temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation amount. Validation of the obtained results was carried out using thermal anomaly (hotspot) data recorded by MODIS and VIIRS satellite sensors. A comparative analysis was conducted for two widely used fire danger indices: the Australian Forest Fire Danger Index (FFDI) and the Canadian Fire Weather Index system (FWI). The results indicate that maximum fire danger levels were observed in July, driven by a combination of high temperatures (up to 30...36 °C), low relative humidity (down to 13...15%), and precipitation deficit. Spatial analysis revealed elevated fire danger in the southern, southeastern, and central regions, whereas northern territories were characterized predominantly by low to moderate risk levels. The comparison of indices showed that the FWI system demonstrates greater sensitivity to the combined effects of meteorological factors, including fuel dryness accumulation and prolonged drought conditions, while the FFDI is more responsive to short-term extreme weather variations, particularly wind speed. Analysis across seven Koppen–Geiger climate zones confirmed a statistically significant ($p < 0.001$) agreement between the FWI and FFDI indices ($r = 0.86…0.98$) regardless of climate type. The results confirm the validity of the combined use of these indices to improve the accuracy of fire danger forecasting and support their integration into early warning systems for wildfires, taking into account regional climatic characteristics of Kazakhstan.

About article:
Received: 03.07.2026
Revised: 06.08.2026
Accepted: 11.09.2026
Published: 30.09.2026

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

КОНСЕРВАЦИЯЛАНҒАН «ШАҢТӨБЕ» УРАН КЕН ОРНЫНЫҢ КУТУНГУЗ ӨЗЕНІНЕ РАДИОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Айқын А. Нұрахмет[1], Аманбек Зандыбай[1] б.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Гульнур С. Нурахметова[2]

[1] Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; aikyn1117@gmail.com; amanbek_z@mail.ru
[2] «Қазгидромет» РМК, Астана, Қазақстан; nurakhmetova_g@meteo.kz
* Автор корреспондент: aikyn1117@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

рекультивация,уран өндіру,ионданушы сәулелену көздері,радиациялық әсер

АБСТРАКТ

Рекультивацияланған және консервацияланған уран кен орындары қызметі тоқтағаннан кейін де қоршаған ортаға, әсіресе жер үсті су объектілеріне айтарлықтай әсер етеді. Бұл зерттеуде Ақмола облысы аумағында орналасқан «Шаңтөбе» консервацияланған уран кен орнының Кутунгуз өзенінің табиғи радионуклидтермен ластануына әсері көрсетілген. Кутунгуз өзені су сынамаларының көпшілігінде жиынтық альфа белсенділік ауыз суға арналған ұлттық санитарлық нормативтерден де, дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ) ұсынымдарынан да артық. Барлық су сынамаларындағы жалпы бета белсенділік нормативтік (скринингтік) шектерден төмен. Өзен суындағы радионуклидтер шоғыры әсіресе, өзеннің №3 нүктесінде фондық нүктемен салыстырғанда уран изоптары (^{234}U – 9 есе, ^{238}U – 19 есе) жоғары. Түптік шөгінділер мен судағы таралу коэффициенті уран изотоптары су бетімен миграциялануы жақсы екенін көрсетіп отыр және радий изотоптары көбінесе түптік шөгінділерде жинақталуға бейім және судағы шоғырмен байланысы әлсіздігін көрсетті. Зерттеу нәтижелері өзендегі ұзақ мерзімді бақылау (маусымдық, тізбектік) қажеттілігін көрсетеді және аймақтың "уран мұрасы" су экожүйелерінің радиоэкологиялық әсерін растайды.

1. КІРІСПЕ

Әлемдегі уран кен орындарының шамамен 96 %-ы 11 елдің аумағында шоғырланған, оның ішінде қорлардың 90 %-ға жуығы 9 елге тиесілі. Уран – атом энергетикасының негізгі шикізаты, алайда ол жер қыртысында әдетте төмен концентрацияда таралған [1]. Экономикалық тұрғыдан тиімді кен орындары біркелкі орналаспаған, олардың басым бөлігі құмтас типіне жатады [2]. Уран қоры бойынша жетекші елдер қатарына Австралия (28 %), Қазақстан (13 %), Канада (10%), Ресей (8 %) және Намибия (8 %) кіреді [3]. Ал өндіру көлемі бойынша көшбасшылар қатарында Қазақстан (41,1 %), Австралия (13,1 %), Намибия (11,4 %), Канада (8,2 %) және Өзбекстан (7,4 %) бар [4]. Қазіргі уақытта Қазақстанда уран өндіруді бүкіл әлемде көшбасшы компания болып табылатын «Қазатомөнеркәсіп» ҰАК АҚ жүзеге асырады. Холдингтің әдеттегі тобына 20 шахтаны игерумен айналысатын толық және ішінара меншік құқығы бар 16 кәсіпорын кіреді. Республикадағы уран кен орындары Оңтүстік Қазақстан, Қызылорда және Ақмола облыстарының аумағында орналасқан.

Радионуклидтер көптеген дамыған елдерде маңызды мониторинг көрсеткіші ретінде саналады [5] және радиоактивті сәулеленудің 85 % табиғи радионуклидтер әсерінен болады [6]. Адамдар ауа, топырақ, тау жыныстары, су және т.б. қоса алғанда, әртүрлі көздерден келетін радиацияға үнемі ұшырайды. Адам әсерінен болатын техногендік өзгерістер қоршаған ортадағы радионуклидтер мен ауыр металдар көлемін

Мақала жайында:
Жіберілді: 18.12.2025
Қайта қаралды: 27.07.2026
Қабылданды: 09.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Дәйексөз үшін:
Нұрахмет А., Зандыбай А., Нурахметова Г., Консервацияланған «Шаңтөбе» уран кен орнының Кутунгуз өзеніне радиоэкологиялық әсерін бағалау// Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 97-111.

арттырады [7]. Өнеркәсіп нәтижесінде қалыптасатын бос тау жыныстарының үйінділері, радиоактивті қалдықтар, шахталық су төгінділері қоршаған ортаға елеулі әсерін тигізеді [8]. Ластанған өзендердегі ықтимал улы металл қалдықтары жауын-шашын, микроорганизмдер, су өсімдіктері мен жануарларда жиналуы мүмкін. Сонымен қатар, бұл металдар шөгінді ортаның өзгеруіне байланысты "қайталама ластануды" оңай тудыруы мүмкін және коректік тізбек немесе басқа көші-қон жолдары арқылы биологиялық және адам денсаулығына үлкен ықтимал зиян келтіруі мүмкін [9]. Тиісті басқару болмаса немесе қайта қалпына келтіру жұмыстары жүйелі түрде жүргізілмеген жағдайда қоршаған ортаға үлкен әсер етуі мүмкін.

Әлемде радионуклидтердің қоршаған ортаға әсерін бағалау бойынша көптеген зерттеулер жүргізілген [10...14]. Зерттеулердегі табиғи сулардағы ураннның және оның ыдырау элементтерінің концентрациясы (ДСҰ) нормативтерінен жоғары екенін көрсетті және кен игеру процестерінің қоршаған ортаға негативті әсері кен орындарын пайдалану аяқталғаннан кейін де жалғасатыны көрсетті.

Қазақстан Республикасында зерттеу тақырыбына сәйкес жүргізілген зерттеулер нәтижелері [15...19] жұмыс істеп тұрған уран кен орындарына жақын орналасқан елді мекендердің тұрғындары арасында аурулардың жоғары таралуын көрсеткен, кен үйінділер учаскелерінде ауытқулардың болуын көрсетеді. Сонымен қатар кен орындарына жақын орналасқан өзен, көлдердердегі радионуклидтердің жиынтық альфа белсенділігі жоғары екендігін көрсетті.

Елімізде, басқа орталық Азия елдерімен салыстырғанда «уран мұраларын» консервациялау және рекультивациялау бағдарламасы ертерек қолға алынып, халықтың және қоршаған ортаның қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін 2001...2010 жылдары «Уран кеніштерін консервациялау және кен орындарын игергеннен кейін аумақтарды рекультивациялау» бағдарламасы іске асырылды және жұмыстарды жүзеге асыру үшін республикалық бюджеттен 4,2 млрд. теңге сомасында қаражат бөлінді [20]. Алайда, 2010 жылы кәсіпорын тоқтатылғаннан кейін радиациялық жағдайды бақылау және объектілерді техникалық бақылау тоқтатылды. Бүгінгі таңда Солтүстік Қазақстанның уран шахталарының көпшілігі ашық күйінде қалып, ескерту белгілерімен қоршалмаған. Аталған жайттар қоршаған ортаның ластану қаупін, оның ішінде жер асты және беткей сулардың ластану қаупін тудырады.

Бұл зерттеудің негізгі мақсаты консервацияланған «Шаңтөбе» уран кен орнының Кутунгуз өзеніне ықтимал радиоэкологиялық әсерін анықтау. Осы мақсатты орындауда келесі міндеттер қойылды:

Кутунгуз өзені сулары мен түптік шөгінділердегі табиғи радионуклидтердің белсенділігін сандық бағалау;

Олардың кеңістіктік таралуын бағалау;

Радионуклидтердің қозғалғыштығын анықтайтын геохимиялық факторларды (корреляция, Kd, U-қатар теңгерімсіздігі) талдау;

Алынған нәтижелерді фондық нүктемен салыстыру.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу ауданы

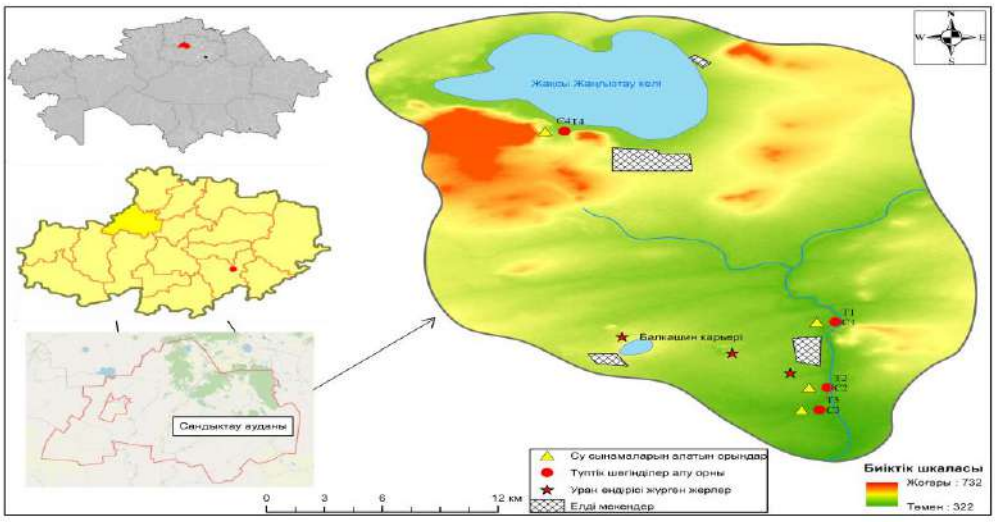
Зерттеу аймағы Ақмола облысы Сандықтау ауданында, Солтүстік Қазақстан уран провинциясы шегінде орналасқан. Әкімшілік бағыныштылығы жағынан Степногорск қаласының әкімшілігіне қарайды. Елді мекен Астана қаласынан 420 км, Көкшетау қаласынан 170 км және Степногорск қаласынан солтүстік-батысқа қарай 450 км жерде орналасқан. Кеніштің өнеркәсіп алаңына іргелес, шығысқа қарай 4 км жерде Шаңтөбе елді мекені және батысқа қарай 2 км жерде Новокронштадка елді мекені орналасқан.

Ауданның климаты күрт континенталды, қысы қарлы және жазы құрғақ, ыстық. Ауаның орташа жылдық температурасы +18 °С, қаңтардағы айлық орташа температура -16,8 °С, шілдедегі айлық орташа температура +20,4 °С. Желдің орташа жылдық жылдамдығы - 5,3 м/сек. Жауын-шашынның орташа мөлшері 326 мм [21].

Шаңтөбе кен орны 2014 жылы консервацияланған. Оған әртүрлі көлемдегі кен орындарының тобы кіреді (Восток, Звездное). Кен өндіру жер асты өндіру әдістерімен жүзеге асырылды, шахта аумағында сілтілеу учаскелері, тау жыныстарының қалдықтары үйінділері және бірнеше булану тоғандары бар. Кен орындарында уран өндірудің негізгі технологиясы күкірт қышқылымен үйінділі шаймалау болды.

Аудан аумағы Есіл өзені бассейнінің құрамына кіретін қалың гидрографиялық желімен қамтылған. Есіл өзеніне оның кең бөлігінде ағатын ең ірі су ағындары – Жыланды өзені, негізгі салалары – Ащылы, Жекебұяқ, Кутунгуз, Жабай өзендері. Жоғарыда аталған өзендерден бөлек атаусыз арналар жүйелерін құрайтын шағын су айдындарынан құралған. Ауданның солтүстік-батыс бөлігінде Жақсы-Жалғызтау көліне құятын Қарасу өзені және Есіл өзенінің саласы Аққанбұрлық өзені қысқа мерзімде ағып өтеді. Ауданның негізгі өзендері: Жабай, Жыланды, Аққанбұрлық, Қоңыр, Аршалы, Бақсық тұрақты су ағыны бар, қалғандары жаз кезінде кеуіп кетеді.

Зерттеу аумағында негізгі өзен саласы – Кутунгуз өзені, өзенге Кіші Кутунгуз, Балапан, Түнкөз өзендері құяды. Зерттеу нысаны – консервацияланған «Шаңтөбе» уран кен орны теңіз деңгейінен 365 метр биіктікте орналасқан, негізгі еңкіштігі – оңтүстік шығысқа қарай көбейеді. Кутунгуз өзені теңіз деңгейінен 340 метрде орналасқан. Сәйкесінше, консервацияланған уран кеніштерінің беткей су нысандарына әсер етуі – Кутунгуз өзені деңгейінде. Жақсы-Жалғызтау көлі – зерттеу аумағынан алшақтау орналасқандықтан, сонымен қатар Шаңтөбе кентінің ауыз су қоры ретінде саналатындықтан – фондық, таза аумақ ретінде алынды (Сурет 1).



Сурет 1. *Зерттелетін аумақта сынама алу нүктелерінің таралуы. Т – түптік шөгінділер үлгілерін, ал С – су сынамалары үлгілерін білдіреді*

Зерттеу аумағынан түптік шөгінділер мен су сынамаларының 8 үлгі-сынамасы алынды, оның ішінде 4 түптік шөгінді үлгісі, 4 беткей су нысандарының үлгісі. Түптік шөгінділер үлгілері 5...10 см сынама алу тереңдігінде Ван-Винн құрылғысы арқылы алынды және 1000 г диапазондағы сынамалар алынды. Барлық үлгілер герметикалық полиэтилен пакеттерге мұқият орналастырылды және одан әрі талдау үшін зертханаға жеткізілді. Су бөтелкелері су сынамаларын алмас бұрын үш рет жуылды. Бұл су сынамаларының ластануын болдырмау үшін жасалады. Түптік шөгінділердің үлгілері 1 кг қапшықта, ал су үлгілері сынама алу үшін пайдаланылатын 5000 мл бөтелкеде сақталды. Іріктеуден кейінгі барлық үлгілер зертханаға жеткізілді. Зертханаға дейінгі арақашықтықтың ұзақтығына байланысты су үлгілері HNO_3 (азот қышқылы) көмегімен су сынамаларын pH<1 консервациялау-100 мл-5 литрге мөлшерінде жүргізілді [22].

Аумақтағы гамма-сәулелену дозасының қуатын өлшеу су және түптік шөгінділер алынған аумақтарды қамтыды. Өлшеу жұмыстар «РКС-01-СОЛО» (ТОО «Соло-ЛТД», Алматы, Қазақстан) радиометр-дозиметрі көмегімен жүргізілді. Өлшеу жұмыстары мемлекеттік санитариялық-эпидемиологиялық қадағалау комитеті төрағасының 2011 жылғы 8 қыркүйектегі №194 «Радиациялық гигиена бойынша ұсыныстар» әдістемелік құралдарды бекіту туралы бұйрығына №4 қосымшаға сәйкес жүргізілді [23]. Ашық гамма-сәулелену дозасының қуаты қоршаған ауаның эквивалентті дозасының қуат бірліктерімен өлшенді. Өлшеу жерден 1 м биіктікте жүргізілді.

Су сынамаларын іріктеу «Радиациялық бақылау. Жер үсті және ағынды сулардың сынамаларын алу» ҚР СТ 1545-2006» сәйкес жүргізілді [24]. Түптік шөгінділердің сынамаларын алу «Гидросфера. Ластануға талдау жасау үшін су объектілерінің түптік шөгінділерін іріктеуге қойылатын жалпы талаптарға» МемСТ 17.1.5.01-80 сәйкес таңдалды [25].

Далалық зерттеулер 2025 жылы консервацияланған «Шаңтөбе» уран кен орны аумағында жүргізілді. Сынамаларды іріктеу бір маусымда (жазда) жүргізілді. Алынған сынамалардың шектеулігін және маусымдық бақылауды ескере отырып, алынған мәліметтер радионуклидтердің көші-қон механизмдерін нақтылауға бағытталған әрі қарайғы зерттеулердің қажеттілігін көрсетеді және кеңейтілген бақылаулар мен сандық салыстырмалы талдау негізінде қосымша растауды қажет етеді.

Зертханалық талдаулар

Зертханада үлгілер талдау алдында алдын ала өңдеуден өткізілді. Органикалық материалдар, тамырлар, өсімдіктер мен қиыршық тастар алынып тасталды. Үлгілер алдымен кептіріліп, оларды паллеттерге жайып, содан кейін муфельдік пеште 110 °C температурада 24 сағат бойы тұрақты құрғақ салмаққа жеткенше кептірілді. Топырақ сынамаларындағы 226Ra, 232Th және 40K радионуклидтердің концентрациясы NaI(Tl) - 6,3 см×6,3 см детектормен жабдықталған "МКС-АТ1315" бета-гамма-спектрометрінің көмегімен анықталды (УП «Атомтех», г.Минск, Беларусь). Рұқсат етілген негізгі салыстырмалы қателік шектері ±15 %-ды құрайды. Гамма-сәуле шығаратын радионуклидтердің деректерін жинау және талдау көп арналы анализатор (МКА) және РСА бағдарламалық жасақтамасы арқылы жүргізілді. Зерттеу әдісіне нормативтік құжаттар - №KZ.07.00.03310-2016 «МКС-АТ 1315» гамма-бета-спектрометрлерде радий-226, торий-232, калий-40 табиғи радионуклидтерінің меншікті үлестік белсенділігін өлшеуді орындау әдістемесі».

Түптік шөгінділердің сынамаларында уран изотоптарын - ^{234}U және ^{238}U өлшеу «Мультирад» МКС-01А құралын («Амплитуда» ЖШҚ, Зеленоград, Ресей) қолдана отырып жүргізілді. Зерттеу әдісіне нормативтік құжаттар - №KZ.07.00.03550-2017 «Уран изотоптарының (238U, 234U, 235U) топырақ, түптік шөгінділер, тау жыныстары мен құрылыс материалдарының сынамаларында олардың негізінде радиохимиялық дайындығы бар альфа-спектрометриялық әдіспен үлестік белсенділігін өлшеу әдістемесі».

Табиғи судағы альфа және бета сәуле шығаратын радионуклидтердің жиынтық белсенділігін және ^{226}Ra, ^{228}Ra, ^{210}Po, ^{210}Pb изотоптарының көлемдік белсенділігін өлшеу «УМФ-2000» («Доза» ғылыми-өндірістік кәсіпорны, Мәскеу, Ресей) альфа-бета радиометрінің көмегімен жүргізілді. Сынақты жүргізу «Радиациялық гигиена бойынша әдістемелік ұсыныстар» ҚР Бас санитарлық дәрігерінің 08.09.2011 жылғы №194 бұйрығына сай жүргізілді. Полоний (210Po)және қорғасынның (210Pb) көлемдік белсенділігін анықтау әдістемесі - №KZ.07.00.03146-2015 «Табиғи және сарқынды технологиялық сулардағы полоний-210 (210Po) және қорғасын-210 (210Pb) радионуклидтерінің көлемдік белсенділігін (КБ) сынамаларды алдын ала радиохимиялық дайындаумен альфа-бета радиологиялық әдіспен анықтау әдістемесі». Аталған зерттеу әдістемелері Қазақстан Республикасының өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесіне енгізілген.

Үлгілердің зертханалық радиохимиялық және радиоспектрометриялық талдаулары Астана медициналық университеті Радиобиология және радиациялық қорғау институты сынақ зертханасы (аккредиттеу аттестаты 20.08.2024ж.KZ.T.01.1431) жүргізілді. Зертхана сынақ және калибрлеу зертханаларының құзыреттілігіне қойылатын жалпы талаптар "МЕМСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [26] талаптары сәйкестігі Қазақстан Республикасының аккредиттеу жүйесінде аккредиттелген.

Нәтижелерді статистикалық өңдеу Microsoft Excel және Statistica 6.0, ArcGIS 10.8 бағдарламаларын қолдана отырып, жалпы қабылданған әдістермен жүргізілді.

Түптік шөгінділер мен мен судағы радионуклидтердің таралу коэффициенті

Түптік шөгінділер мен мен судағы радионуклидтердің таралуы келесі (1) теңдеу арқылы есептелді.

$$K_d\ (L/kg) = A_{sediment}\ (Bq/kg)/A_{water}\ (Bq/L) \quad (1)$$

бұл жерде, $A_{sediment}$ – түптік шөгінділердегі концентрация, Бк/кг, A_{water} – судағы концентрация, Бк/л [27].

Жоғары Kd мәндері түптік шөгінділер радионуклидтің күшті сорбциясын көрсетеді, ал төмен мәндер су фазасындағы көбірек қозғалғыштықты көрсетеді. Талдау радий (^{226}Ra) және уран изотоптары (^{234}U, ^{234}U) арасында есептелді.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Зерттелген аумақтағы топырақ профилінің беткі қабаттарындағы гамма сәулелену дозалары.

Жұмыстың бірінші кезеңінде бос тау жыныстары үйінділеріндегі және зерттеу нысандары - беткей су нысандары аумақтарында гамма-сәулелену дозасыны жер бетінен 1 метр жоғары деңгейі радиометр – дозиметр РКС-01-СОЛО («СОЛО ЛТД» ЖШС, Алматы, Қазақстан) қолдана отырып жүргізілді. Құрал метрологиялық тексеруден өткен. Өлшеудің бір нүктесінде төрт өлшеу жүргізілді, содан кейін орташа мән есептелді. Сәулелену дозасының қуатын өлшеу нәтижелері зерттелетін аумақтағы гамма сәулелену дозалары қалыпты екенін көрсетті. Дозаның амбиенттік эквивалентінің қуаты 1 м қашықтықта осы объектілер ауданындағы жер тиісінше жоғарғы мәні – 0,19...0,20 мк3в/сағатты құрады (Кесте 1). Зерттеу барысында барлығы 20 сынама алынды.

Кесте 1

Беткей су нысандары аумағындағы гамма-түсірілім нәтижесі

Сынама алу орыны	МЭД гамма сәулелену(мк3в/сағат)		
	min	max	орташа
ҚР бойынша рұқсат етілген деңгей			0,3
Жергілікті жердің табиғи фоны			0,10-0,12
Құтынгөз өзені, №1 нүкте	0,09	0,32	0,20
Құтынгөз өзені, №2 нүкте	0,14	0,40	0,27
Құтынгөз өзені, №3 нүкте	0,08	0,25	0,16
Жақсы-Жалғызтау өзені	0,18	0,20	0,19

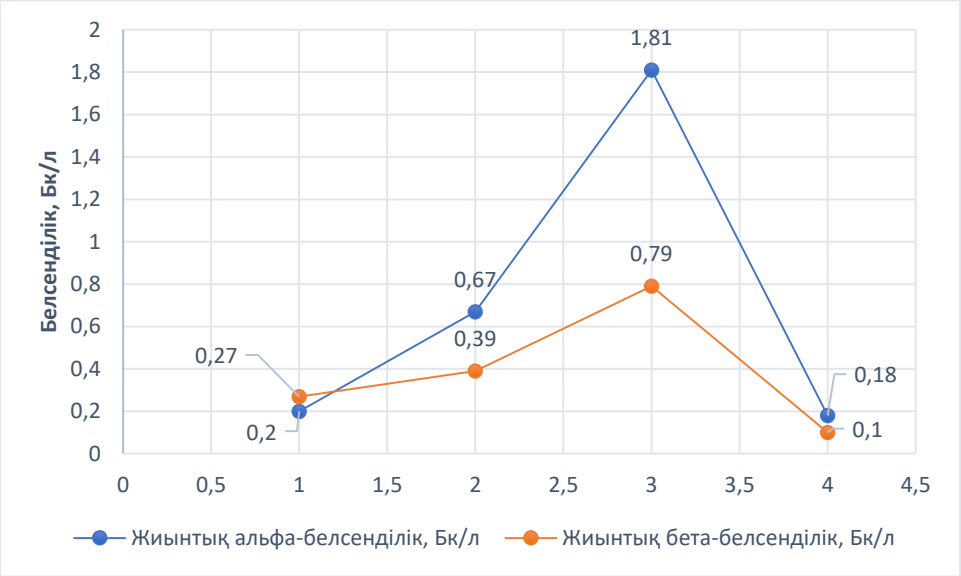
Зерттелген аумақтағы жиынтық альфа және бета белсенділік мөлшері.

Табиғатта радионуклидтердің бета белсенділігінің 1 Бк/л артуы өте сирек кездеседі, одан артқан жағдайда су құрамында қолдан пайда болған радионуклидтердің бар екендігін білдіреді. Табиғи сулардағы альфа белсенділік әлемдегі орташа мәні – 0,4...0,8 Бк/л аралығында, әлемдік зерттеулердің көрсеткен нәтижесі бойынша нақты радиациялық мәселе сулардағы альфа белсенділік 0,4...0,5 Бк/л аралығында болғанда туындауы мүмкін [28]. Аймақтың геологиялық құрылымы, минералды компоненттің шоғырлануы және осы аумақтағы адам қызметінің сипаты жалпы альфа және бета белсенділігінің маңыздылығын анықтайтын үш негізгі фактор болып табылады [29].

Экологиялық геохимиялық сипаттамаларды зерттеуде дұрыс фондық мәндер маңызды рөл атқарады [30]. Зерттелетін аймақтағы табиғи сулардың және түптік

шөгінділер мен фондық концентрация деректерінің болмауына байланысты, фондық мәндері зерттелетін аумақтан шамамен 16 шақырымда орналасқан және Шаңтөбе кентінің тұрғындары үшін ауыз суға пайдалатын Жақсы-Жалғызтау көлі таңдалып алынды.

Кутунгуз өзені мен фондық нүктедегі альфа және бета белсенділігінің көрсеткіші сурет 2-де көрсетілген.



Сурет 2. *Кутунгуз өзенінің №1,2,3 (1,2,3) нүктелері және фондық нүктедегі (4) альфа және бета белсенділіктің мәндері*

Жиналған деректерді талдау альфа-радиоактивтіліктің жиындық белсенділігі жалпы бета-радиоактивтілікпен салыстырғанда айтарлықтай жоғары екенін көрсетеді. Кутунгуз өзенінен алынған су сынамалар бойынша жиынтық альфа белсенділіктің мәндері 0,2...1,8 Бк/л және бета белсенділік 0,27...0,79 Бк/л аралығында өзгерді. Фондық (Жақсы-Жалғызтау көлі) мәндермен салыстырғанда Кутунгуз өзенінің жер үсті суының жиынтық альфа-белсенділігінің айтарлықтай өсуі байқалады.

Кутунгуз өзенінің бойында жиынтық альфа және бета белсенділік көрсеткіштері өзеннің төменгі ағысына қарай біртіндеп артады. Ең жоғары белсенділік өзендегі № 3 нүктеде (болжалды шахта суларының төгілу нүктесінен кейін 3 км) 1,81 Бк/л-ге дейін жоғарылаған, фондық нүктемен салыстырғанда 10 есе жоғары, бета белсенділікте Кутунгуз өзеніндегі № 3 нүктесінде ең жоғары мәнге ие – 0,79 Бк/л, бұл фондық нүктедегі мәннен 8 есе жоғары. Мұндай динамика өзеннің төменгі бөлігіне қарай радионуклидтердің жинақталу үрдісін немесе кеніштер орналасқан аймақтардан келетін ықпалды ластануын көрсетеді.

Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы [31] судың сапасын алдын ала бағалауға арналған скрининг деңгейін 0,55 Бк/л және 1,0 Бк/л ұсынады, Қазақстан Республикасының ауыз судағы жиынтық альфа-белсенділіктің скринингтік деңгейі 0,2 Бк/л, ал жиынтық бета-белсенділіктің шекті деңгейі 1,0 Бк/л болып табылады [32]. Осы скринингтік деңгейлермен салыстырғанда , зерттелген аймақтағы Кутунгуз өзенінің №1 нүктесі мен фондық нүкте ғана сәйкес келеді, қалған сынама нәтижелері альфа-белсенділік көрсеткіштері шекті мәннен асып түскен, ал бета-белсенділік нормативтерге сәйкес келеді.

Жалпы алғанда, зерттеу нәтижелері бойынша жиынтық альфа және бета белсенділіктің артуы уран өндіріс аймағындағы табиғи радионуклидтердің су экожүйесіне көшуін сипаттайды. Мұндай радиациялық фонның ұзақ мерзімді сақталуы

экожүйе компоненттерінде (шөгінділер, биота, өсімдік жамылғысы) радионуклидтердің жиналуына және трофикалық тізбек арқылы таралуына әкелуі мүмкін.

Судағы уран изотоптарының (^{234}U, ^{238}U) және оның ыдарау элементтері радий (^{226}Ra), полоний(^{210}Po) қорғасынның (^{210}Pb) мөлшері.

БҰҰ-ның атом радиациясының әрекеті жөніндегі Ғылыми комитеті мәліметтері бойынша, ауыз судың сәулеленудің жалпы дозасына қосқан үлесі халық басым емес (жекелеген өңірлерді қоспағанда) және негізінен суда болатын уранның және торийдің табиғи қатарларының радионуклидтеріне байланысты [33]. Суды тұтыну есебінен сәулелену дозасын қалыптастыруға ең үлкен үлесті уран изотоптары (234U и и 234U), радий (226Ra и 228Ra), радон (222Rn), полоний (210Po), аз мөлшерде - қорғасын (210РЬ) және торий изотоптары (228 Th,230 Th, 232Th) береді. Әдетте, ауыз суға қатысатын калийдің үлесі (40К), тритий (3Н) және көміртегі - (14С), сондай-ақ жасанды радионуклидтер 137Cs және 90Sr үлесі өте аз.

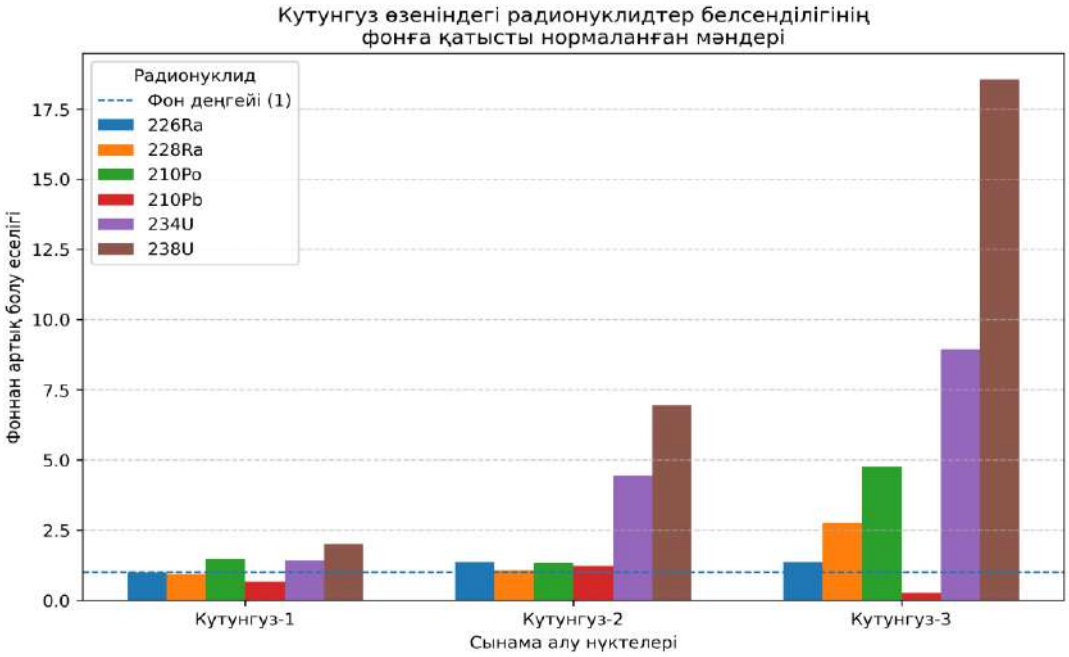
Зерттеу барысында Кутунгуз өзенінің үш нүктесінен және фондық нүкте ретінде алынған Жақсы-Жалғызтау көлінен су сынамалары радиоспектрометриялық әдістермен талданды. Радиоактивті элементтердің құрамын анықтау үшін уран (234U, 238U), радий (226Ra, 228Ra), полоний (210Po) және қорғасын (210Pb) изотоптарының көлемдік белсенділігі өлшенді. Өлшеулер «УМФ-2000», МКС-01Ф «Мультирад» радиометрі және радиохимиялық бөлу әдістері арқылы жүргізілді. Табиғи сулардағы табиғи радионуклидтердің белсенділігі кесте 2-де көрсетілген.

Кесте 2

Кутунгуз өзені және фондық нүктедегі су сынамаларын зерттеу нәтижелері

Сынама алу орны	**Радий изотоптарының көлемдік белсенділігі, Бк/л**	**Полоний(^{210}Po)және қорғасынның (^{210}Pb) көлемдік белсенділігі, Бк/л**	**Уран изотоптарының көлемдік белсенділігі, Бк/л**
Кутунгуз өзені, №1 нүкте	^{226}Ra-0.11±0.03 ^{228}Ra-0.12±0.05	(^{210}Po) 0,041± 0,018 (^{210}Pb) 0,035±0,027	^{234}U – 0,071±0,018 ^{238}U-0,04±0,011
Кутунгуз өзені, №2 нүкте	^{226}Ra-0.15±0.06 ^{228}Ra-0.14±0.07	(^{210}Po) 0,037± 0,012 (^{210}Pb) 0,065±0,033	^{234}U – 0,222±0,042 ^{238}U-0,139±0,027
Кутунгуз өзені, №3 нүкте	^{226}Ra-0.15±0.06 ^{228}Ra-0.36±0.17	(^{210}Po) 0,133± 0,045 (^{210}Pb) 0,014±0,005	^{234}U – 0,448±0,073 ^{238}U-0,371±0,059
Жақсы-Жалғызтау көлі (фон)	^{226}Ra-0.11±0.03 ^{228}Ra-0.13±0.05	(^{210}Po) 0,028± 0,009 (^{210}Pb) 0,053±0,03	^{234}U – 0,05±0,012 ^{238}U-0,02±0,009

Кутунгуз өзеніндегі 226Ra концентрациясы 0.11±0.03-0.15±0.06 Бк/л, 228Ra 0.12±0.05-0.36±0.17 Бк/л аралығында өзгереді. Полоний (210Po) 0,037± 0,012-0,133± 0,045 Бк/л, қорғасын (210Pb) 0,014±0,005-0,065±0,033 Бк/л, уран изотоптары - 234U-0,071±0,018-0,448±0,073 Бк/л, 238U-0,04±0,011-0,371±0,059 Бк/л аралығында өзгереді. Уран изотоптарынан (234U, 238U) басқа радионуклидтер фондық нүкте концентрациясымен шектес. Уран изотоптары Кутунгуз өзенінің төменгі ағысына қарай жоғарылайды, яғни №3 нүктесінде фондық нүктемен салыстырғанда 234U – 9 есе, 238U – 19 есе жоғары. Кутунгуз өзенінің №3 нүктесінде уран изотоптары (^{234}U және ^{238}U) бойынша фондық нүктеден едәуір артық болу байқалатынын көрсетті. ^{238}U үшін фоннан артық болу еселігі ең жоғары мәнге ие. Радионуклидтердің қалған бөлігі бойынша ауытқулар салыстырмалы түрде төмен және табиғи фон шегінде (Сурет 2).



Сурет 3. *Кутунгуз өзеніндегі радионуклидтердің фонға қатысты еселік мөлшері*

Ең жоғары полоний (^{210}Po) концентрациясы Кутунгуз өзенінің №3 нүктесінде (0,133±0,045 Бк/л) байқалды, бұл судағы органикалық коллоидтардың немесе тұнбада жиналған полонийдің қайта еруімен байланысты болуы мүмкін. Фондық үлгіде полоний (^{210}Po) және қорғасын (^{210}Pb) деңгейлері айтарлықтай төмен (0,028 және 0,053 Бк/л), бұл табиғи фонмен шектес мән. 210Po ядросы тұрақты 206Pb нуклидіне айналу үшін 5,3 МэВ энергиясы бар альфа бөлшектерін шығарады. Радионуклидтің құрамында 210Po мөлшері 0,12 Бк/л болған кезде (араласу деңгейі) осы радионуклидтен суды тазарту үшін арнайы шаралар қабылдануы керек [34].

Жүргізілген өлшеулер көрсеткендей, зерттелген су көздеріндегі радионуклидтердің үлестік белсенділіктері айтарлықтай өзгереді. Кутунгуз өзенінің төменгі ағымында (№3 нүкте) уран изотоптарының концентрациясы жоғары, бұл тау-кен жұмыстары жүргізілген аймақтан радионуклидтердің шайылуын көрсетеді. Фондық көл нәтижелері табиғи фонды сипаттайды және радиоактивті ластану белгілері байқалмайды. Сонымен қатар, изотоптық қатынастардың теңгерімсіздігі (^{234}U/^{238}U > 1) геохимиялық процестердің (еріту, қайта шөгу) жүріп жатқанын дәлелдейді.

Осылайша, жүргізілген талдау жер үсті суларының радиоэкологиялық ластануының негізгі ластаушысы уран изотоптары (^{234}U және ^{238}U), олар Кутунгуз ағынының бойында өсуін көрсетті. ^{210}Po и ^{210}Pb үлесі аз дәрежеде, дегенмен олардың жергілікті жоғарылауы радионуклидтердің түптік шөгінділерде қайта бөлінуінің белсенді процестерін көрсетеді.

Түптік шөгінділердегі радионуклидтердің және альфа, бета белсенділік мөлшері.

Солтүстік Қазақстан ағынсыз көлдері көп өңір ретінде сулары жоғары минералдануы бар, радиоактивті элементтердің елеулі қорларын жинақтауға қабілетті түптік шөгінділер нысандары ретінде қоршаған ортаның ластану деңгейін анықтау маңызды саналады. Оқшауланған су қоймаларының түбіндегі шөгінділерді зерттеу қазіргі геоэкологияның перспективалық бағыттарының бірі болып табылады [35].

Кестеде түптік шөгінділердегі радионуклидтер мен жиынтық альфа-, бета-белсенділік құрамы көрсетілген (кесте 4). Талдау радионуклидтердің орташа концентрациясы 40K >226 Ra >232 Th > 234U > 238U қатарында төмендейтінін көрсетті. Кутунгуз өзеніндегі өлшенген көрсеткіштер жалпы әлемдегі ұқсас жағдайларда алынған деректерге сәйкес келеді. Мәселен, Солтүстік Американдағы Риди, Қытайдағы Вэй,

Пәкістандағы Гилгит, Инд өзендері және Египеттегі Нассер көлінің түптік шөгінділеріндегі көрсеткіштермен шамалас [36...39].

Кутунгуз өзені және Жақсы-Жалғызтау фондық таза су айдынының су сынамалары мен түбіндегі шөгінділерін кешенді зерттеу табиғи радионуклидтердің құрамындағы елеулі кеңістіктік айырмашылықтарды анықтады. Барлық нүктелерде басым уран (23^4U, 23^8U) және радий (22^6Ra) изотоптары болып табылады. Алынған нәтижелер зерттелетін объектілердің ғаламдық және жергілікті геохимиялық нормалардан ауытқу дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді. Мәселен Еуропадағы зерттеулерде 226Ra,232Tr,40K үшін мәндер 10...44,4; 10,7...48,6; 440...1450 Бк/кг аралығында өзгеретінін көрсетті [40...41]. Барлық түптік шөгінділер сынамалары радионуклид концентрацияларын өлшеу алдында құрғатылды, сондықтан 3-кестедегі табиғи радионуклидтер мәндері құрғақ массаға сәйкес келеді.

Кесте 3

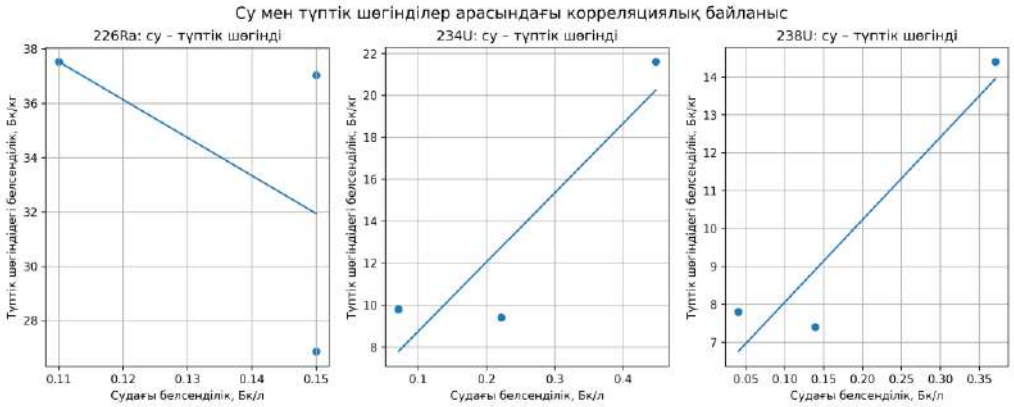
Түптік шөгінділердегі радионуклидтер мен жиынтық альфа-, бета-белсенділік құрамы (қабат 0-15 см) құрғақ масса, Бк/кг

Сынама алу орны	^{226}Ra	^{232}Tr	^{40}K	^{234}U	^{238}U	Аэфф
Кутунгуз өзені, №1нүкте	37,53±5,88	38,68±5,39	454,3±100,5	9,8±2,8	7,8±2,2	128±12,83
Кутунгуз өзені, №2 нүкте	37,03±6,01	73,57±8,61	763±126,67	9,4±2,6	7,4±2,2	201±17,07
Кутунгуз өзені, №3 нүкте	26,85±4,8	41±5,39	474±95,65	21,6±4,8	14,4±3,2	123±12,05
Жақсы–Жалғызтау (фон)	38,57±6,35	83,1±9,61	829,67±136	14±3,8	12±2,8	221±18,6
Әлемдік орташа деңгей	8–160	4–130	100–700	4–140	4–140	

Кутунгуз өзенінде түптік шөгінділердегі 232Th және 40 К меншікті белсенділігі табиғи мәндер шегінде (тиісінше 38...73 және 454,3...763 Бк/кг). Фондық нүкте Жақсы-Жалғызтау көліндегі мән - 83,1...829,67 Бк/кг көлемінде. Ең жоғары ^{40}K белсенділігі (829,67 ± 136 Бк/кг) фондық нүктеде тіркелді. Фондық нүктедегі ^{40}K концентрациясының жоғары болуы уран немесе радий минерализациясымен байланысты емес, ол негізінен литогендік сипатта болып, жергілікті геологиялық ерекшеліктерді көрсетеді. ^{40}K уран және радий изотоптарынан айырмашылығы, уран минерализациясына генетикалық байланысты емес, сондықтан оның фондық деңгейінің жоғары болуы техногендік ластанудан емес, табиғи геохимиялық құрылысына байланысты. Бұл мәндер осы кен орындарына ұқсас Солтүстік Қазақстан аумағында рекультивацияланған уран кен орындарынан алынған сынамалармен ұқсас. Мәселен, Қазақстанның солтүстік бөлігінде орналасқан Грачевское уран кеніші мен Саумалкөл кентінің жанында жүргізілген радиометриялық өлшеулердің нәтижелері 587 Бк/кг және 689 Бк/кг аралығында [42]. Табиғи радионуклидтердің тиімді меншікті белсенділігі құрылыс материалдарына арналған - 370 Бк/кг көрсеткіштен төмен (Кесте 3).

Сонымен қатар, су мен түптік шөгінділердегі радионуклидтердің таралу заңдылықтарын және олардың миграциялық ерекшеліктерін анықтау үшін Пирсон корреляция коэффициенті (r) қолданылды. Зерттеу нәтижелері бойынша уран изотоптары (^{234}U және ^{238}U) үшін су мен түптік шөгінділер арасында өте күшті оң корреляция анықталды (r = 0,91...0,94). Мұндай байланыс уран изотоптарының геохимиялық мінез-құлқының ұқсастығын және олардың таралуы бірдей физика-химиялық факторлармен (ерітіндідегі комплекс түзу, тотығу-тотықсыздану жағдайлары, сорбция-десорбция процестері) реттелетінін көрсетеді. Оң корреляция түптік шөгінділердің уран изотоптары үшін аккумуляциялық орта рөлін атқаратынын және ураннның су мен қатты фаза арасында динамикалық тепе-теңдік жағдайында миграцияланатынын дәлелдейді. Ал 2^{26}Ra үшін орташа теріс корреляция анықталды (r≈-0,54). Бұл радийдің ураңға қарағанда геохимиялық тұрғыдан басқа мінез-құлыққа ие екенін көрсетеді. Радийдің су фазасында салыстырмалы түрде тәуелсіз миграцияланатынын және түптік шөгінділерде оның

жиналуы әрдайым судағы концентрациямен тікелей байланысты болмайтынын көрсетеді (Сурет 4).



Сурет 4. *Кутунгуз өзеніндегі су мен түптік шөгінділер арассындағы корреляциялық байланыс*

Түптік шөгінділер мен судағы радионуклидтердің таралу коэффициенттері (Kd).

Есептеу нәтижелері бойынша ^{226}Ra үшін Kd мәндері 179...341 л/кг аралығында өзгеретіні анықталды. Бұл радий изотопының түптік шөгінділерге жоғары сорбциялық бейімділігін және оның су фазасында салыстырмалы түрде төмен миграциялануын көрсетеді. Kd мәндерінің жоғары болуы радийдің карбонаттармен, сульфаттармен және балшықты минералдармен байланысу қабілетінің жоғары екендігін көрсетеді.

Нүктелер арасында Kd мәндерінің төмендеу үрдісі байқалады, бұл түптік шөгінділердің минералдық құрамы мен геохимиялық жағдайларының (pH, Eh, иондық құрам) өзгеруімен байланысты болуы мүмкін.

Уран изотоптары үшін таралу коэффициенттері 42...195 л/кг диапазонында анықталды, бұл радиймен салыстырғанда төмен мәндермен сипатталады (Кесте 4). Мұндай айырмашылық уранның геохимиялық мінез-құлқының ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Уран, әсіресе тотығу жағдайларында, еріген уранил-карбонат кешендері түрінде суда тұрақты болып, су фазасында белсенді миграцияланады. ^{234}U және ^{238}U үшін Kd мәндерінің салыстырмалы түрде төмен болуы олардың түптік шөгінділерде толық бекітілмей, су-шөгінді жүйесінде динамикалық тепе-теңдік жағдайында таралатынын көрсетеді. Бұл уран изотоптары үшін бұрын анықталған су мен түптік шөгінді арасындағы күшті оң корреляциямен жақсы сәйкес келеді. Сонымен қатар, радий изотоптарына қарағанда, уран изотоптары су бетімен миграциялануы жақсы екенін көрсетіп отыр.

Кесте 4

Кутунгуз өзеніндегі есептелген Kd мәндері, Бк/л

Сынама алу орны	**^{226}Ra**	**^{234}U**	**^{238}U**
Кутунгуз өзені, 1 нүкте	341,2	138,0	195,0
Кутунгуз өзені, 2 нүкте	246,9	42,3	53,2
Кутунгуз өзені, 3 нүкте	179,0	48,2	38,8

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеу консервацияланған Шаңтөбе уран кеніші әсер ету аймағында орналасқан Кутунгуз өзенінің радиоэкологиялық жай-күйін кешенді сипаттауға мүмкіндік берді. Су сынамаларының көпшілігінде жиынтық альфа белсенділік ұлттық санитарлық нормативтерден де, дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымы (ДДҰ) ұсынымдарынан да асып түседі, бұл өңірдің су экожүйелеріне тұрақты радиациялық жүктеменің болуын көрсетеді. Жиынтық бета белсенділік нормативтерден төмен, бұл судағы радонуклидтердің табиғи радонуклидтермен басымдылығын растайды және техногендік ластанудың жоқтығын көрсетеді.

Элементтік зерттеу Кутунгуз өзенінде негізінен уран изотоптарының (^{234}U және ^{238}U) басымдығын көрсетті және ағыстан төмен қарай концентрацияның жоғарылағанын көрсетті. Өзеннің №3 нүктесінде фондық нүктемен салыстырғанда 234U – 9 есе, 238U – 19 есе жоғары. Уран изотоптары үшін су мен түптік шөгінділер арасында өте күшті оң корреляция анықталды (r=0,91...0,94). Оң корреляция түптік шөгінділердің уран изотоптары үшін аккумуляциялық орта рөлін атқаратынын және ураннның су мен қатты фаза арасында динамикалық тепе-теңдік жағдайында миграцияланатынын дәлелдейді. Ал ^{226}Ra үшін орташа теріс корреляция анықталды ($r \approx -0,54$). Бұл радийдің су фазасында салыстырмалы түрде тәуелсіз миграцияланатынын және түптік шөгінділерде оның жиналуы әрдайым судағы концентрациямен тікелей байланысты болмайтынын көрсетті. Түптік шөгінділер мен судағы таралу коэффициенті радий изотоптарына қарағанда, уран изотоптары су бетімен миграциялануы жақсы екенін көрсетіп отыр. Радий изотоптары көбінесе түптік шөгінділерде жинақталуын жақсы көрсетсе, керісінше уран изотоптары өзеннің беткі қабатында миграцияға бейім екенін көрсетті. Табиғи радионуклидтердің көбінесе су бойымен тасымалданатынын және түптік шөгінділерде жинақталуы төмен екенін ескере отырып, келесі зерттеулерде Кутунгуз өзенінің төменгі ағысында орналасқан Жыланды, Жабай өзендері суындағы және түптік шөгінділеріндегі табиғи радионуклидтер құрамын анықтауға бағытталған зерттеулерді жалғастыру қажет.

Осылайша, зерттеу нәтижелері 2014 жылдан бері консервацияда тұрған «Шаңтөбе» кеніші аймақтың қоршаған су экожүйелеріне айтарлықтай әсер етуді жалғастыратынын растайды, бұл радиоэкологиялық тәуекелдерді бақылау мен басқарудың ұзақ мерзімді стратегиясын енгізуді және Кутунгуз өзенімен байланысты басқа су нысандарын да радиоэкологиялық бақылауды талап етеді.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректер ашық дереккөздерден алынды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау - ААН, АЗ; деректерді басқару - ААН; Ресми талдау - ААН, АЗ, ГСН; Әдістеме - ААН, АЗ, ГСН; Қадағалау - АЗ; Визуализация - ГСН; Бастапқы жобаны жазу -ААН; Шолу жазу және редакциялау - ААН, АЗ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q., Xiao, E., Xia, F., Zheng, G., & Xiao, T. (2024). Geochemical distribution and environmental risks of radionuclides in soils and sediments runoff of a uranium mining area in South China. Toxics, 12, 95. https://doi.org/10.3390/toxics12010095
2. Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., Zhang, F. (2021). Review of basin uranium resources in China. Earth Science, 46(8), 2675-2696. https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.304
3. World Nuclear Association. World uranium mining production. [Электрондық ресурс]. URL:-https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx. (жүгіну күні: 10.11.2025)
4. OECD Nuclear Energy Agency. (2022). Uranium 2022: Resources, production and demand. OECD Publishing. [Электрондық ресурс]. URL:- https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2022_2c4e111b-en (жүгіну күні: 10.11.2025)
5. Dołhańczuk-Śródka, A. (2012). Estimation of external gamma radiation dose in the area of Bory Stobrawskie forests (PL). Environmental Monitoring and Assessment, 184, 5773–5779. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2380-4
6. Long, Z., Zhu, H., Bing, H., Tian, X., Wang, Z., Wang, X., & Wu, Y. (2021). Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, Southwest China. Journal of Hazardous Materials, 420, 126638. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126638

7. Ji, K., Kim, J., Lee, M., Park, S., Kwon, H. J., Cheong, H. K., Jang, J. Y., Kim, D. S., Yu, S., & Kim, Y. W. (2008). Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. Environmental Pollution, 178. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.031
8. Alexander, A. C., Ndambuki, J. M. (2023). Impact of mine closure on groundwater resource: Experience from Westrand Basin-South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, 103432. https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103432
9. Yi, L., Gao, B., Liu, H., Zhang, Y., Du, C., Li, Y. (2020).Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area. Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 548. https://doi.org/10.3390/ijerph17020548
10. Landa, E. R. (2004). Uranium mill tailings: nuclear waste and natural laboratory for geochemical and radioecological investigations. Journal of Environmental Radioactivity, 77(1), 1-27. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.01.030
11. Wu, Y., Wang, Y., Xie, X. (2014). Occurrence, behavior and distribution of high levels of uranium in shallow groundwater at Datong basin, northern China. Science of the Total Environment, 472, 809-817. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.109
12. Gao, L., Kano, N., Sato, Y., Li, C., Zhang, S., Imaizumi, H. (2012). Behavior and distribution of heavy metals including rare earth elements, thorium, and uranium in sludge from industry water treatment plant and recovery method of metals by biosurfactants application. Bioinorganic chemistry and applications, 2012(1), 173819. https://doi.org/10.1155/2012/173819
13. Galhardi, J. A., García-Tenorio, R., Bonotto, D. M., Francés, I. D., Motta, J. G. (2017). Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil. Journal of environmental radioactivity, 177, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001
14. Камнев Е.Н., Карамушка В.П., Кузин Р.З. Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд. Издательство Горная книга, 2014, С. 183.
15. Saifulina, E., Janabayev, D., Kashkinbayev, Y., Shokabaeva, A., Ibrayeva, D., Aumalikova, M. (2023). Epidemiology of somatic diseases near uranium mining enterprises in Kazakhstan. Healthcare, 11, 804. https://doi.org/10.3390/healthcare11060804
16. Brzhanov, R. T.; Sofronova, L. I. (2021). Tailings as a source of environmental problems. University Proceedings,1(82), 57–72. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_57
17. Bersimbaev, R. I., Bulgakova, O. (2015). The health effects of radon and uranium in Kazakhstan. Genes and Environment, , 37(1),18. [Электрондық ресурс].URL:-https://genesenvironment.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s41021-015-0019-3.pdf (жүгіну күні: 10.11.2025)
18. Zhumadilov, K., Ivannikov, A., Kassymzhanov, M. (2025). Radiation doses of population near uranium mines (EPR spectroscopy). SSRN Preprint,. https://ssrn.com/abstract=4928278
19. Bugubaeva, A., Kuprijanov, A., Chashkov, V., Kuanyshbaev, S., Valiev, K., Mamikhin, S., Shcheglov, A.; Nugmanov, A., Bulaev, A., Sultangazina, G., Kunanbayev, K., Chernyavskaya, O., Baubekova, G., Ruchkina, G., Safronova, O., Uxikbayeva, M., Sokharev, Y. (2023). Productivity assessment of various plant communities at uranium mine sites in Central Kazakhstan. SABRAO Journal of Breeding and Genetics, 55(3), 864–876. https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.3.21
20. Постановление Правительства Республики Казахстан от 25 июля 2001 года N 1006. Об утверждении Программы консервации уранодобывающих предприятий и ликвидации последствий разработки урановых месторождений на 2001-2010 годы.[Электрондық ресурс]. URL:- https://adilet.zan.kz/rus/docs/P010001006_ (жүгіну күні: 10.11.2025)
21. Ақмола облысы туралы ақпарат. [Электрондық ресурс] // Erulik.kz. — URL: https://oq.gov.kz/erulik/regions/1 (жүгіну күні: 10.11.2025).
22. СТ РК ГОСТ Р 51592–2003. Вода. Общие требования к отбору проб. [Электрондық ресурс]. URL:-https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739370.pdf (жүгіну күні: 10.11.2025).
23. Приказ Председателя Комитета государственного санитарно-эпидемиологического надзора от 8 сентября 2011 года № 194 «Об утверждении «Методических рекомендаций по радиационной гигиене». [Электрондық ресурс]. URL:-https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31249142 (жүгіну күні: 10.11.2025).
24. СТ РК 1545-2006 .Радиационный контроль.Отбор проб поверхностных и сточных вод. Общие требования. [Электрондық ресурс]. URL:-https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30527431 (жүгіну күні: 10.11.2025).
25. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. [Электрондық ресурс]. URL:- https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=37927607 (жүгіну күні: 10.11.2025).
26. ISO/IEC 17025:2019—General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories.2019. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. [Электрондық ресурс]. URL:-https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:en (жүгіну күні: 10.11.2025).
27. Kırıs, E., Baltas, H. (2019). Sediment distribution coefficients (Kd) and bioaccumulation factors (BAF) in biota for natural radionuclides in eastern Black Sea coast of Turkey. Microchemical Journal, 149, 104044. https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104044
28. Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q. (2024). Radionuclides in soils and sediments near uranium mines. Toxics, , 12, 95. https://doi.org/10.3390/toxics12010095
29. Ogundare, F. O., Adekoya, O. I. (2015). Gross alpha and beta radioactivity in soils and water around a steel facility. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, , 8(3), 411–417. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.02.009
30. Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. Ecological Indicators, 48, 282–291. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016
31. World Health Organization. (2004).Guidelines for drinking-water quality. WHO. [Электрондық ресурс]. URL:-https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/b437749a-43f7-472f-a6d9-42596e8ac0ae/content (жүгіну күні: 10.11.2025).
32. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71. Об утверждении гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности. (2022). [Электрондық ресурс]. URL:-https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029012 (жүгіну күні: 10.11.2025).
33. UNSCEAR, 2000. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations, New York, USA. [Электрондық ресурс]. URL:-https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html (жүгіну күні: 10.11.2025).
34. Klementyeva, E. A. (2015). Evaluation of 210Pb and 210Po in natural waters. Problems of Health and Ecology, 3(45), 84–88. [Электрондық ресурс]. URL:-https://sn-biolchem.cfuv.ru/wp-content/uploads/2016/11/007klementyeva.pdf (жүгіну күні: 10.11.2025).
35. Bersimbaev, R. I., Bulgakova, O. (2015). The health effects of radon and uranium on the population of Kazakhstan. Genes and Environment, 37(1), 18. https://doi.org/10.1186/s41021-015-0019-3

36. El-Shlemy, E.S., Gad, A., El Feky, M.G., Mahmoud, A.-M.A., El-Sayed, O., Abed, N.S. (2025). Potentially toxic elements and natural radioactivity in Nasser Lake sediments: Environmental risks in a key Egyptian freshwater lake. Toxics, 13(9), 745. https://doi.org/10.3390/toxics13090745
37. Lu, X., Zhang, X. and Wang, F. (2007). Natural radioactivity in sediment of Wei River, China. Environmental Earth Sciences, 53(7), pp. 1475–1481. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0756-0
38. Qureshi, A.A., Tariq, S., Din, K.U. and Manzoor, S. (2014). Evaluation of excessive lifetime cancer risk due to natural radioactivity in the river sediments of Northern Pakistan. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 7(4), pp. 438–447. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.008
39. Powell, B.A., Hughes, L.D., Soreefan, A.M., Falta, D., Wall, M. and DeVol, T.A. (2007). Elevated concentrations of primordial radionuclides in sediments from the Reedy River and surrounding creeks in Simpsonville, South Carolina. Journal of Environmental Radioactivity, 94(3), pp. 121–128. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.12.013
40. Caridi, F., Di Bella, M., Sabatino, G., Belmusto, G., Fede, M. R., Romano, D., Italiano, F., Mottese, A. F. (2021). Assessment of natural radioactivity and radiological risks in river sediments from Calabria (Southern Italy). Applied Sciences, 11(4), 1729. https://doi.org/10.3390/app11041729
41. Pelić, M., Mihaljev, Ž., Živkov Baloš, M., Popov, N., Gavrilović, A., Jug-Dujaković, J., Ljubojević Pelić, D. (2023). The activity of natural radionuclides Th-232, Ra-226, K-40, and Na-22, and anthropogenic Cs-137, in the water, sediment, and common carp produced in purified wastewater from a slaughterhouse. Sustainability, 15(16), 12352. https://doi.org/10.3390/su151612352
42. Subbotin, S., Krivitskiy, P., Larionova, N. (2025). Radiological situation near a mothballed uranium mine. Scientific Reports, 15, 16426. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01697-6

REFERENCES

1. Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q., Xiao, E., Xia, F., Zheng, G., & Xiao, T. (2024). Geochemical distribution and environmental risks of radionuclides in soils and sediments runoff of a uranium mining area in South China. Toxics, 12, 95. https://doi.org/10.3390/toxics12010095
2. Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Rong, H., Zhang, F. (2021). Review of basin uranium resources in China. Earth Science, 46(8), 2675-2696. https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.304
3. World Nuclear Association. World uranium mining production. Electronic resource. URL: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx. (date of access: 10.11.2025)
4. OECD Nuclear Energy Agency. (2022). Uranium 2022: Resources, production and demand. OECD Publishing. Electronic resource. URL: https://read.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2022_2c4e111b-en (date of access: 10.11.2025)
5. Dołhańczuk-Śródka, A. (2012). Estimation of external gamma radiation dose in the area of Bory Stobrawskie forests (PL). Environmental Monitoring and Assessment, 184, 5773–5779. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2380-4
6. Long, Z., Zhu, H., Bing, H., Tian, X., Wang, Z., Wang, X., & Wu, Y. (2021). Contamination, sources and health risk of heavy metals in soil and dust from different functional areas in an industrial city of Panzhihua City, Southwest China. Journal of Hazardous Materials, 420, 126638. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126638
7. Ji, K., Kim, J., Lee, M., Park, S., Kwon, H. J., Cheong, H. K., Jang, J. Y., Kim, D. S., Yu, S., & Kim, Y. W. (2008). Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea. Environmental Pollution, 178. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.031
8. Alexander, A. C., Ndambuki, J. M. (2023). Impact of mine closure on groundwater resource: Experience from Westrand Basin-South Africa. Physics and Chemistry of the Earth, 103432. https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103432
9. Yi, L.. Gao, B., Liu, H., Zhang, Y., Du, C., Li, Y. (2020).Characteristics and Assessment of Toxic Metal Contamination in Surface Water and Sediments Near a Uranium Mining Area. Int. J. Environ. Res. Public Health, 17, 548. https://doi.org/10.3390/ijerph17020548
10. Landa, E. R. (2004). Uranium mill tailings: nuclear waste and natural laboratory for geochemical and radioecological investigations. Journal of Environmental Radioactivity, 77(1), 1-27. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.01.030
11. Wu, Y., Wang, Y., Xie, X. (2014). Occurrence, behavior and distribution of high levels of uranium in shallow groundwater at Datong basin, northern China. Science of the Total Environment, 472, 809-817. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.109
12. Gao, L., Kano, N., Sato, Y., Li, C., Zhang, S., Imaizumi, H. (2012). Behavior and distribution of heavy metals including rare earth elements, thorium, and uranium in sludge from industry water treatment plant and recovery method of metals by biosurfactants application. Bioinorganic chemistry and applications, 2012(1), 173819. https://doi.org/10.1155/2012/173819
13. Galhardi, J. A., García-Tenorio, R., Bonotto, D. M., Francés, I. D., Motta, J. G. (2017). Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil. Journal of environmental radioactivity, 177, 37-47. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001
14. Kamnev, E. N., Karamushka, V. P., & Kuzin, R. Z. (2014). Rekultivatsiya ob"ektov dobychi i pererabotki uranovykh rud [Reclamation of uranium mining and processing facilities]. Moscow: Gornaya kniga. 183 p. [In Russian]
15. Saifulina, E., Janabayev, D., Kashkinbayev, Y., Shokabaeva, A., Ibrayeva, D., Aumalikova, M. (2023). Epidemiology of somatic diseases near uranium mining enterprises in Kazakhstan. Healthcare, 11, 804. https://doi.org/10.3390/healthcare11060804
16. Brzhanov, R. T.; Sofronova, L. I. (2021). Tailings as a source of environmental problems. University Proceedings,1(82), 57–72. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2021_1_57
17. Bersimbaev, R. I.; Bulgakova, O. (2015). The health effects of radon and uranium in Kazakhstan. Genes and Environment, , 37(1),18. [Электрондық ресурс].URL:-https://genesenvironment.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s41021-015-0019-3.pdf (жүгіну күні: 10.11.2025)
18. Zhumadilov, K.; Ivannikov, A.; Kassymzhanov, M. (2025). Radiation doses of population near uranium mines (EPR spectroscopy). SSRN Preprint,. https://ssrn.com/abstract=4928278
19. Bugubaeva, A., Kuprijanov, A., Chashkov, V., Kuanyshbaev, S., Valiev, K., Mamikhin, S., Shcheglov, A.; Nugmanov, A., Bulaev, A., Sultangazina, G., Kunanbayev, K., Chernyavskaya, O., Baubekova, G., Ruchkina, G., Safronova, O., Uxikbayeva, M., Sokharev, Y. (2023). Productivity assessment of various plant communities at uranium mine sites in Central Kazakhstan. SABRAO Journal of Breeding and Genetics, 55(3), 864–876. https://doi.org/10.54910/sabrao2023.55.3.21
20. Postanovlenie Pravitel′stva Respubliki Kazakhstan ot 25 iyulya 2001 goda No. 1006. Ob utverzhdenii Programmy konservatsii uranodobyvayushchikh predpriyatii i likvidatsii posledstvii razrabotki uranovykh mestorozhdenii na 2001–2010 gody. Electronic resource. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P010001006_ (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
21. Erulik.kz.Aqmola oblysy turaly aqparat. Electronic resource. URL: https://oq.gov.kz/erulik/regions/1. (date of access: 10.11.2025). (date of access: 10.11.2025). [In Kazakh]

22. ST RK GOST R 51592–2003. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. Electronic resource. URL:-https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739370.pdf (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
23. Prikaz Predsedatelya Komiteta gosudarstvennogo sanitarno-epidemiologicheskogo nadzora ot 8 sentyabrya 2011 goda No. 194 «Ob utverzhdenii “Metodicheskikh rekomendatsii po radiatsionnoi gigiene”. Electronic resource. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31249142 (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
24. ST RK 1545-2006. Radiatsionnyi kontrol′. Otbor prob poverkhnostnykh i stochnykh vod. Obshchie trebovaniya. Electronic resource. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30527431 (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
25. GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody (SSOP). Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozhenii vodnykh ob″ektov dlya analiza na zagryaznennost′. Electronic resource. URL: https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=37927607 (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
26. ISO/IEC 17025:2019—General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories.2019. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland. Electronic resource. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:17025:ed-3:v1:en (date of access: 10.11.2025).
27. Kırıs, E., Baltas, H. (2019). Sediment distribution coefficients (Kd) and bioaccumulation factors (BAF) in biota for natural radionuclides in eastern Black Sea coast of Turkey. Microchemical Journal, 149, 104044. https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104044
28. Li, H., Wang, Q., Zhang, C., Su, W., Ma, Y., Zhong, Q. (2024). Radionuclides in soils and sediments near uranium mines. Toxics, , 12, 95. https://doi.org/10.3390/toxics12010095
29. Ogundare, F. O., Adekoya, O. I. (2015). Gross alpha and beta radioactivity in soils and water around a steel facility. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, , 8(3), 411–417. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.02.009
30. Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah-Al-Mamun, M., Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. Ecological Indicators, 48, 282–291. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016
31. World Health Organization. (2004).Guidelines for drinking-water quality. WHO. Electronic resource. URL: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/b437749a-43f7-472f-a6d9-42596e8ac0ae/content (date of access: 10.11.2025).
32. Prikaz Ministra zdravoohraneniya Respubliki Kazahstan ot 2 avgusta 2022 goda № KR DSM-71. Ob utverzhdenii gigienicheskih normativov k obespecheniyu radiacionnoj bezopasnosti. (2022). Electronic resource. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029012 (date of access: 10.11.2025). [In Russian]
33. UNSCEAR, 2000. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations, New York, USA. Electronic resource. URL: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html (date of access: 10.11.2025).
34. Klementyeva, E. A. (2015). Evaluation of 210Pb and 210Po in natural waters. Problems of Health and Ecology, 3(45), 84–88. Electronic resource. URL:https://sn-biolchem.cfuv.ru/wp-content/uploads/2016/11/007klementyeva.pdf (date of access: 10.11.2025).
35. Bersimbaev, R. I., Bulgakova, O. (2015). The health effects of radon and uranium on the population of Kazakhstan. Genes and Environment, 37(1), 18. https://doi.org/10.1186/s41021-015-0019-3
36. El-Shlemy, E.S., Gad, A., El Feky, M.G., Mahmoud, A.-M.A., El-Sayed, O., Abed, N.S. (2025). Potentially toxic elements and natural radioactivity in Nasser Lake sediments: Environmental risks in a key Egyptian freshwater lake. Toxics, 13(9), 745. https://doi.org/10.3390/toxics13090745
37. Lu, X., Zhang, X. and Wang, F. (2007). Natural radioactivity in sediment of Wei River, China. Environmental Earth Sciences, 53(7), pp. 1475–1481. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0756-0
38. Qureshi, A.A., Tariq, S., Din, K.U. and Manzoor, S. (2014). Evaluation of excessive lifetime cancer risk due to natural radioactivity in the river sediments of Northern Pakistan. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 7(4), pp. 438–447. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.008
39. Powell, B.A., Hughes, L.D., Soreefan, A.M., Falta, D., Wall, M. and DeVol, T.A. (2007). Elevated concentrations of primordial radionuclides in sediments from the Reedy River and surrounding creeks in Simpsonville, South Carolina. Journal of Environmental Radioactivity, 94(3), pp. 121–128. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.12.013
40. Caridi, F., Di Bella, M., Sabatino, G., Belmusto, G., Fede, M. R., Romano, D., Italiano, F., Mottese, A. F. (2021). Assessment of natural radioactivity and radiological risks in river sediments from Calabria (Southern Italy). Applied Sciences, 11(4), 1729. https://doi.org/10.3390/app11041729
41. Pelić, M., Mihaljev, Ž., Živkov Baloš, M., Popov, N., Gavrilović, A., Jug-Dujaković, J., Ljubojević Pelić, D. (2023). The activity of natural radionuclides Th-232, Ra-226, K-40, and Na-22, and anthropogenic Cs-137, in the water, sediment, and common carp produced in purified wastewater from a slaughterhouse. Sustainability, 15(16), 12352. https://doi.org/10.3390/su151612352
42. Subbotin, S., Krivitskiy, P., Larionova, N.(2025). Radiological situation near a mothballed uranium mine. Scientific Reports, 15, 16426. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01697-6

ОЦЕНКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНСЕРВИРОВАННОГО УРАНОВОГО РУДНИКА «ШАНТОБЕ» НА РЕКУ КУТУНГУЗ

Айқын А. Нұрахмет[1]*, Аманбек Зандыбай[1] к.б.н., ассоциированный профессор, Гульнур С. Нурахметова[2]

[1] Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан; aikyn1117@gmail.com; amanbek_z@mail.ru
[2] РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан; nurakhmetova_g@meteo.kz
* Автор корреспондент: aikyn1117@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

рекультивация, добыча урана, источники ионизирующего излучения, радиационное воздействие

По статье:
Получено: 18.12.2025
Пересмотрено: 27.07.2026
Принято: 09.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Рекультивированные и законсервированные урановые месторождения продолжают оказывать существенное воздействие на окружающую среду даже после прекращения их эксплуатации, особенно на поверхностные водные объекты. В данном исследовании показано влияние законсервированного уранового месторождения «Шаңтөбе», расположенного на территории Акмолинской области, на загрязнение реки Кутунгуз природными радионуклидами. В большинстве проб воды реки Кутунгуз суммарная альфа активность превышает как национальные санитарные нормативы для питьевой воды, так и рекомендации Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). Суммарная бета активность во всех пробах ниже нормативных (скрининговых) значений. Анализ концентраций радионуклидов в речной воде показал, что особенно в точке № 3 содержание изотопов урана существенно выше по сравнению с фоновой точкой: по 234U — в 9 раз, по 238U — в 19 раз. Коэффициенты распределения радионуклидов между водой и донными отложениями свидетельствуют о высокой миграционной способности изотопов урана в водной среде, тогда как изотопы радия преимущественно аккумулируются в донных отложениях и демонстрируют слабую связь с их концентрациями в воде. Полученные результаты указывают на необходимость проведения долгосрочного мониторинга состояния реки (сезонного и динамического) и подтверждают радиоэкологическое воздействие так называемого «уранового наследия» региона на водные экосистемы.

ASSESSMENT OF THE RADIOECOLOGICAL IMPACT OF THE CONSERVED SHANTOBE URANIUM MINE ON THE KUTUNGUZ RIVER

Aikyn A. Nurakhmet[1]*, Amanbek Zandybay[1] Candidate of Biological Sciences, associate professor, Gulnur S. Nurakhmetova[2]

[1]L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; aikyn1117@gmail.com; amanbek_z@mail.ru
[2] RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; nurakhmetova_g@meteo.kz
*Corresponding author: aikyn1117@gmail.com

KEY WORDS

reclamation, uranium mining, sources of ionizing radiation, radiological impact

About article:
Received: 18.12.2025
Revised: 27.07.2026
Accepted: 09.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

Reclaimed and conserved uranium mining sites continue to exert a significant impact on the environment even after the cessation of mining activities, particularly on surface water bodies. This study evaluates the influence of the conserved Shantobe uranium mine, located in the Akmola Region, on the contamination of the Kutunguz River with natural radionuclides. In most water samples from the Kutunguz River, gross alpha activity exceeds both national drinking water sanitary standards and the guideline values recommended by the World Health Organization (WHO). Gross beta activity in all water samples remained below the regulatory (screening) limits. Analysis of radionuclide concentrations in river water revealed that, in particular at sampling point No. 3, uranium isotope levels are significantly elevated compared to the background site, with ^{234}U concentrations higher by a factor of 9 and ^{238}U by a factor of 19. The distribution coefficients between bottom sediments and water indicate high mobility of uranium isotopes in the aqueous phase, whereas radium isotopes tend to accumulate predominantly in bottom sediments and show a weak correlation with their concentrations in water.The results of this study highlight the necessity for long-term monitoring of the river (seasonal and sequential) and confirm the radioecological impact of the region’s “uranium legacy” on aquatic ecosystems

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ОБЛАСТИ ЖЕТЫСУ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫМИ БИФЕНИЛАМИ

Нариман А. Амиргалиев[1] д.г.н., профессор, Азамат С. Мадибеков[1,2] PhD, ассоциированный профессор, Лаура Т. Исмуханова[1,2] PhD, Айнұр Мұсақұлқызы[1] к.т.н., Ботакоз М. Султанбекова[1,2], Асхат Ө. Жәди[1], Арай Ә. Сұлтанаева*[1,2]

[1] АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; namirgaliev@mail.ru (НАА), madibekov@mail.ru (АСМ), l--aura@bk.ru (ЛТИ), mus_ain@mail.ru (АМ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС), askhat.zhadi@mail.ru (АӨЖ), arai1104@mail.ru (АӘС)
[2] Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; madibekov@mail.ru (АСМ), l--aura@bk.ru (ЛТИ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС), arai1104@mail.ru (АӘС)
*Автор корреспондент: Арай Ә. Сұлтанаева, arai1104@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

стойкие органические загрязнители, полихлорированные бифенилы, конгенеры, почвенный покров

АБСТРАКТ

В статье представлены результаты исследования загрязнения почвенного покрова области Жетысу Республики Казахстан полихлорированными бифенилами (ПХБ). Отбор почвенных образцов проводился в 2024...2025 гг. на 52 точках наблюдений, расположенных в различных природно-ландшафтных зонах региона. Анализ содержания ПХБ выполнен методом газовой хроматографии с электронно-захватным детектором в соответствии с требованиями нормативных документов.

Установлено присутствие полихлорированных бифенилов во всех исследованных образцах почв. Суммарные концентрации ПХБ варьировали в пределах от 0,010 до 1,631 мкг/кг. Выявлено значительное разнообразие индивидуальных конгенеров, включая индикаторные («маркерные») и диоксиноподобные соединения. Наиболее высокие концентрации загрязнителя зарегистрированы в почвах урбанизированных территорий.

Сравнительный анализ результатов исследований 2024 и 2025 гг. показал заметное снижение содержания ПХБ в 2025 г., что может быть связано с сезонными особенностями отбора проб, перераспределением загрязнителей в почвенном профиле и пространственной неоднородностью их распределения.

Полученные результаты свидетельствуют о сравнительно невысоком уровне загрязнения почвенного покрова региона полихлорированными бифенилами и могут быть использованы при организации экологического мониторинга стойких органических загрязнителей в рамках выполнения Республикой Казахстан международных обязательств по Стокгольмской конвенции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Стойкие органические загрязнители (СОЗ) относятся к числу наиболее опасных химических веществ, оказывающих долговременное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Данные соединения характеризуются высокой устойчивостью в природных условиях, способностью к биоаккумуляции и дальнему атмосферному переносу, что обусловливает их широкое распространение в различных природных средах [1].

В связи с высокой токсичностью и глобальным характером распространения СОЗ в 2001 г. была принята Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях, направленная на сокращение и последующую ликвидацию производства и использования данных веществ. Конвенция вступила в силу в 2004 г., а Республика Казахстан ратифицировала ее в 2007 г., взяв на себя обязательства по контролю и сокращению выбросов данных соединений [2].

МРНТИ 87.15.09 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-112-124 УДК 631.453

По статье:
Получено: 18.03.2026
Пересмотрено: 08.06.2026
Принято: 28.07.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Амиргалиев Н., Мадибеков А., Исмуханова Л., Мұсақұлқызы А., Султанбекова Б., Жәди А., Сұлтанаева А., Оценка загрязнения почвенного покрова области Жетысу полихлорированными бифенилами// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 112-124.

Одной из наиболее распространенных групп стойких органических загрязнителей являются полихлорированные бифенилы (ПХБ). Эти соединения широко применялись в промышленности в качестве диэлектрических жидкостей, теплоносителей, пластификаторов и компонентов технических масел. Несмотря на прекращение их производства в большинстве стран мира, они продолжают сохраняться в окружающей среде вследствие высокой химической стабильности и устойчивости к биологическому разложению [3].

Почвенный покров играет важную роль в миграции и накоплении стойких органических загрязнителей. Благодаря высокой гидрофобности и способности к сорбции органическим веществом почв ПХБ могут сохраняться в поверхностных горизонтах на протяжении десятилетий и участвовать в биогеохимических процессах природных экосистем [4...6].

На территории Казахстана выявлен ряд зон повышенного загрязнения ПХБ, связанных с деятельностью промышленных предприятий, энергетических объектов и бывших военных полигонов. В частности, значительные уровни загрязнения были зарегистрированы в районе Усть-Каменогорского конденсаторного завода, являвшегося одним из крупнейших производителей ПХБ-содержащего оборудования в регионе [7].

Вместе с тем данные о распространении ПХБ на обширных сельскохозяйственных территориях Казахстана остаются ограниченными. Особенно недостаточно изучено загрязнение почв регионального масштаба, что затрудняет оценку экологических рисков и разработку эффективных программ экологического мониторинга.

Область Жетысу расположена в юго-восточной части Республики Казахстан и характеризуется значительным разнообразием природных условий. Территория региона включает горные системы Северного Тянь-Шаня, предгорные равнины и пустынно-полупустынные ландшафты Прибалхашья. Крупнейшими водными объектами региона являются озеро Алаколь, а также реки Каратал, Лепсы, Аксу и Тентек.

Экономика области основана преимущественно на сельском хозяйстве, животноводстве, транспортной инфраструктуре и деятельности региональных промышленных центров. Наличие урбанизированных территорий, транспортных узлов и объектов энергетической инфраструктуры может способствовать поступлению различных загрязняющих веществ в окружающую среду, включая стойкие органические соединения.

Ранее авторами были выполнены исследования распространения ПХБ в различных природных средах юго-востока Казахстана, включая снежный покров, водные экосистемы и почвы урбанизированных территорий. Результаты исследования показывают о присутствии ПХБ в природных средах Иле-Балкашского бассейна и подтверждают необходимость проведения региональных исследований их пространственного распределения [8...10].

Целью настоящего исследования является оценка уровня загрязнения почвенного покрова области Жетысу ПХБ, а также анализ пространственного распределения и конгенерного состава данных соединений.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор почвенных проб

Отбор образцов проводился после завершения периода снеготаяния, что позволяет минимизировать влияние сезонного перераспределения загрязняющих веществ и получить репрезентативные характеристики поверхностного слоя почв. На каждой точке наблюдений закладывалась пробная площадка, на которой отбор проб осуществлялся методом «конверта» по диагонали. Данный метод предполагает отбор точечных проб по диагонали исследуемой площадки с последующим их объединением и позволяет получить интегральную пробу, характеризующую средний химический состав почвы на данном участке (рис. 1). Для формирования объединенной пробы отбирали пять точечных проб, равномерно распределенных в пределах площадки. Отбор проб был проведен в 52

репрезентативных точках с учетом степени техногенной нагрузки на экосистему Жетысуской области. Выбор точек пробоотбора осуществлялся с целью обеспечения пространственной репрезентативности исследуемой территории и охвата участков с различным уровнем антропогенного воздействия. Количество точечных проб соответствовало требованиям ГОСТ 17.4.3.01-83 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб»; СТ РК 14507-2010 «Охрана природы. Качество почвы. Подготовка образцов к определению содержания органических загрязняющих веществ» [11, 12].

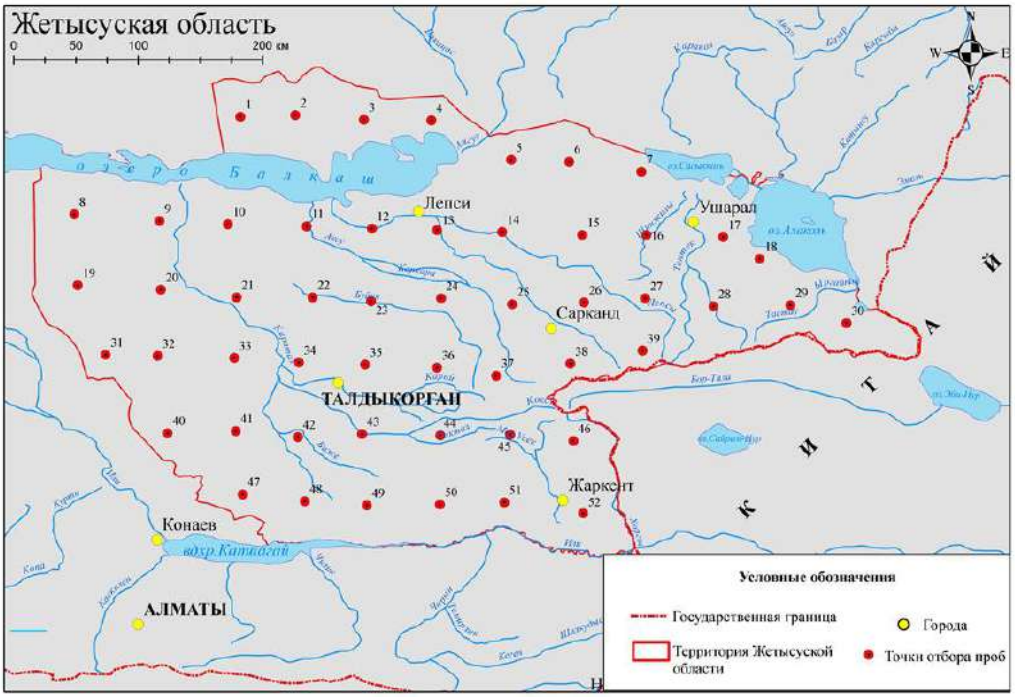


Рисунок 1. *Карта-схема с точками отбора проб почвенного покрова Жетысуской области на территории РК*

С учетом особенностей распределения стойких органических загрязнителей, к которым относятся ПХБ, отбор точечных проб проводился из поверхностного слоя почвы с глубины 0...5 см, наиболее подверженного воздействию атмосферных загрязнений и антропогенных факторов. Масса каждой точечной пробы составляла до 200 г. Объединенная проба формировалась путем тщательного смешивания точечных проб, отобранных на одной площадке. Масса объединенной пробы составляла не менее 1 кг. При проведении пробоотбора особое внимание уделялось предотвращению вторичного загрязнения образцов на всех этапах отбора, транспортировки и хранения.

Подготовка почвенных образцов

Подготовка почвенных образцов проводилась в лабораторных условиях в соответствии со стандартными методиками подготовки проб для химического анализа. Образцы высушивали при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния, после чего очищали от посторонних включений (камней, растительных остатков и других инородных частиц). Крупные почвенные агрегаты разрушали механическим способом. Для получения аналитической пробы применяли метод квартования. Почву тщательно перемешивали, измельчали в фарфоровой ступке и просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм. Из подготовленной воздушно-сухой почвы отбирали навеску массой около 5 г для дальнейшего токсикологического анализа. Подготовленные образцы хранили в стеклянной таре в сухом помещении до проведения анализа.

Экстракция полихлорированных бифенилов

Выделение ПХБ из почвенных образцов проводили методом экстракции органическим растворителем. В качестве экстрагента использовали n-гексан, обладающий высокой растворяющей способностью по отношению к хлорорганическим соединениям. Навеску почвы подвергали экстракции органическим растворителем с последующим отделением жидкой фазы и концентрированием экстракта. Полученный экстракт подвергали очистке для удаления сопутствующих органических соединений и матричных компонентов.

Анализ образцов проводился в аккредитованной испытательной лаборатории ТОО «Нутритест» Казахской академии питания (аттестат аккредитации № KZ.T.02.E0177 от 06.05.2021 г.).

Газохроматографическое определение полихлорированных бифенилов

Определение содержания ПХБ проводили методом газовой хроматографии с электронно-захватным детектором (ГХ-ЭЗД). Газохроматографический анализ выполнялся в соответствии с требованиями стандарта СТБ ИСО 6468-2003 «Качество воды» [13]. Определение некоторых хлорорганических инсектицидов, ПХБ и хлорбензолов методом газовой хроматографии после экстракции жидкость–жидкость». Анализ проводился на газовом хроматографе «Хромос ГХ-1000» (Россия) с использованием специализированного программного обеспечения. Для разделения соединений применяли капиллярные хроматографические колонки длиной 30 м с внутренним диаметром 0,25 мм и толщиной неподвижной фазы 0,25 мкм (DB-1, DB-5 или DB-1701).

Основные параметры хроматографического анализа включали:

- температура инжектора – 280 °С;
- газ-носитель – гелий или азот со скоростью около 25 см/с;
- вспомогательный газ (аргон/метан 95/5 или азот) с постоянным потоком 40 $см^3$/мин;
- режим ввода пробы – split 10:1;
- температурная программа: 80 °С (изотерма 8 мин), далее повышение температуры со скоростью 6 °С/мин до 250 °С с последующей изотермой 20 мин;
- объем вводимой пробы – 1 мкл.

Для оценки точности определения полихлорированных бифенилов (ПХБ) в водных пробах в работе были использованы метрологические характеристики, регламентированные нормативным документом ПНД Ф 14.1:2:3:4.204-04 «Методика измерений массовых концентраций хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах питьевых, природных и сточных вод методом газовой хроматографии». Согласно указанной методике, применяемый газохроматографический метод обеспечивает получение результатов измерений с показателями точности, воспроизводимости и повторяемости, не превышающими значений, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон измерений, значения показателей точности, воспроизводимости и повторяемости при определении полихлорированных бифенилов

Диапазоны измерений, мг/кг	**Показатель повторяемости (относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости) σ_r, %**	**Показатель воспроизводимости (относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости) δ_R, %**	**Показатель точности (границы относительной погрешности при доверительной вероятности 0,95), ±δ, %**
от 0,00001 до 0,0001 включ.	21	30	60
св. 0,0001 до 0,001 включ.	18	25	50
св. 0,001 до 0,05 включ.	12	17,5	35

Таким образом, представленные метрологические характеристики подтверждают возможность получения достоверных результатов при определении массовых

концентраций ПХБ в пробах природных вод. Учет показателей точности, повторяемости и воспроизводимости позволяет оценить надежность аналитических данных и снизить влияние возможных инструментальных и методических погрешностей.

Калибровка и идентификация соединений

Для калибровки и идентификации соединений использовали государственный стандартный образец состава раствора Совола в гексане, содержащий смесь характерных конгенеров: ПХБ-52, ПХБ-101, ПХБ-138, ПХБ-153, а также сумму тетра-, пента- и гексахлорбифенилов. В ходе анализа определяли массовые концентрации индикаторных конгенеров: ПХБ-28, ПХБ-52, ПХБ-101, ПХБ-118, ПХБ-138, ПХБ-153, ПХБ-180 и ПХБ-194.

Идентификацию соединений проводили по времени удерживания, а количественное определение выполняли по площади хроматографических пиков методом абсолютной градуировки. Суммарное содержание ПХБ рассчитывали, как сумму концентраций отдельных определяемых конгенеров

Контроль качества анализа

Контроль качества аналитических измерений обеспечивался проведением холостых проб, использованием стандартных образцов и повторным анализом части исследуемых проб. Для количественного анализа применяли калибровочные растворы стандартных смесей конгенеров ПХБ. Аналитическое определение содержания ПХБ в почвенных пробах проводилось в трехкратной повторности для каждой исследуемой пробы. Полученные параллельные результаты использовались для оценки воспроизводимости аналитических измерений и снижения влияния случайной погрешности. При обработке данных учитывались сопоставимость параллельных измерений, стабильность аналитического сигнала и соответствие результатов требованиям лабораторного контроля качества.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что ПХБ присутствуют во всех исследованных образцах, отобранных на территории области. Данный анализ полученных данных выявил о широком распространении ПХБ в пределах региона и указывает на то, что даже при отсутствии крупных очевидных очагов загрязнения почвенный покров области испытывает фоновое или диффузное воздействие стойких органических загрязнителей.

В 2024 г. суммарное содержание ПХБ варьировало в широких пределах – от 0,010 до 1,631 мкг/кг, что отражает выраженную пространственную неоднородность загрязнения. Общая характеристика концентрации и конгенерного состава ПХБ в почвах различных природных зон представлена в таблице 2.

Таблица 2

Общая характеристика концентрации и конгенерного состава ПХБ почвенного покрова изученной территории в 2024 г.

Природные зоны	№ точек отбора проб	Конгенеры ПХБ	Сумма ПХБ, мкг/кг	
			пределы	среднее
Горные районы (восток и юг, предгорья и горы)	29, 30, 36…38, 46, 50…52	40; 41,64,71; 42; 44; 48; 49; 52; 66,95; 70,76; 74; 82; 85; 86; 87,115; 97; 101; 105; 110; 114; 118; 119; 121; 128; 129; 137; 138; 141; 146; 151; 153; 155; 171	0,016…1,042	0,259
Равнинные зоны (центральная и северо-восточная часть, ближе к озеру Алаколь и рекам)	11…18, 21…28, 35, 39		0,017…0,308	0,050
Пустынные и полупустынные зоны (западная часть, более удаленная от водоемов	1…8, 19, 20, 31…33, 40, 41, 47…49		0,010…0,524	0,085
Урбанизированные территории (вокруг городов)	34, 42…45, 52		0,031…1,631	0,531

Как видно из данных таблицы 2, содержание ПХБ в почвах различных природных зон области существенно различается. Минимальные концентрации ПХБ характерны для территорий с низкой антропогенной нагрузкой, удаленных от крупных населенных пунктов и промышленных объектов. К таким территориям относятся прежде всего пустынные и полупустынные районы западной части области, где суммарная концентрация ПХБ изменялась в пределах 0,010...0,524 мкг/кг при среднем значении 0,085 мкг/кг.

Сравнительно невысоким содержанием токсиканта характеризуется почвенный покров равнинной зоны, расположенной в центральной и северо-восточной части исследуемой территории вблизи озера Алаколь и речных долин.

Суммарные значения концентрации ПХБ здесь преимущественно находились в интервале 0,017...0,037 мкг/кг, а среднее значение составило 0,050 мкг/кг. В отдельных точках данной зоны отмечены повышенные значения, достигающие 0,308 и 0,149 мкг/кг, что указывает на локальные участки накопления загрязнителя.

Более высокие концентрации зарегистрированы в почвах предгорной зоны. В этих районах содержание ПХБ достигало 1,042 мкг/кг при среднем значении 0,259 мкг/кг. Наиболее высокие суммарные концентрации токсиканта выявлены в почвах урбанизированных территорий, расположенных вблизи крупных населенных пунктов. Так, в районе г. Талдыкоргана содержание ПХБ в почвах достигало 1,130 и 1,631 мкг/кг, в районе г. Конаева – 0,454 мкг/кг, а в районе Жаркента – 0,637 мкг/кг. Средняя концентрация ПХБ в почвах урбанизированной зоны составила 0,531 мкг/кг.

Полученные результаты подтверждают, что уровень загрязнения поллютантами существенно зависит от степени антропогенной нагрузки. Подобная закономерность распределения ПХБ отмечается во многих регионах мира и объясняется сочетанием локальных источников загрязнения и процессов атмосферного переноса данных соединений.

Пространственное распределение суммарных концентраций ПХБ в почвенном покрове территории области наглядно представлено на рисунке 2.

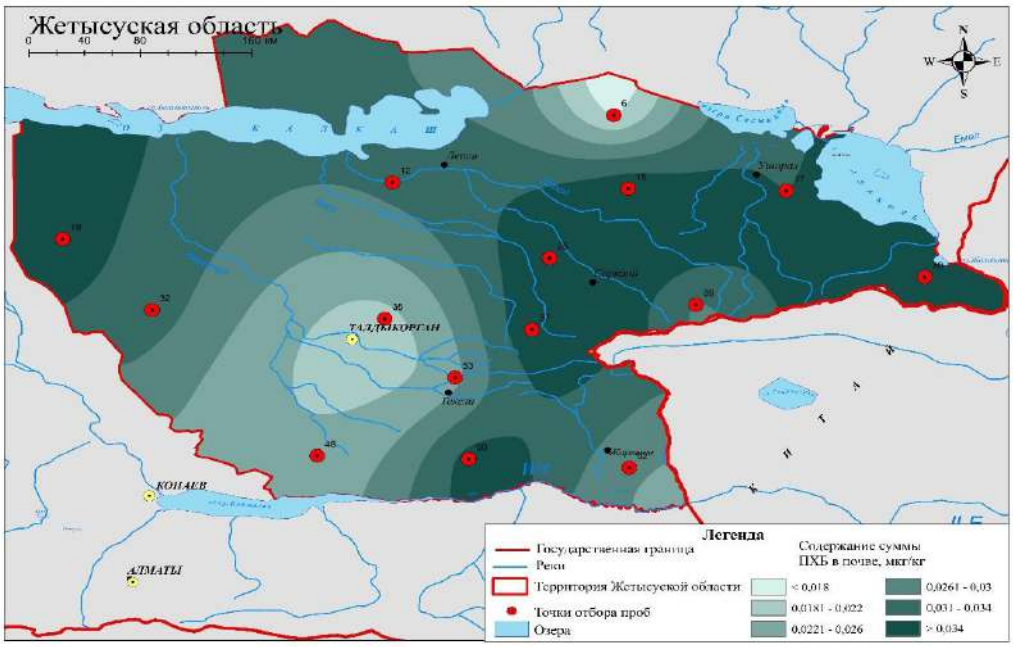


Рисунок 2. *Точки отбора проб ПХБ в области Жетысу на территории РК*

Как видно из рисунка 2, наиболее высокие значения содержания ПХБ приурочены к урбанизированным и предгорным территориям, тогда как в пустынных, полупустынных и значительной части равнинных районов фиксируются более низкие концентрации.

Карта наглядно подтверждает выраженную пространственную неоднородность распределения загрязнителя и позволяет выделить участки с повышенной антропогенной нагрузкой. В то же время отсутствие сплошных зон экстремально высоких значений указывает на преимущественно рассеянный характер загрязнения почвенной среды региона.

Почвенная среда является одним из основных депонирующих компонентов природных экосистем для стойких органических загрязнителей. Благодаря высокой гидрофобности и устойчивости к биологическому разложению ПХБ способны сорбироваться органическим веществом почв и сохраняться в поверхностных горизонтах на протяжении длительного времени [14]. При этом даже удаленные территории могут подвергаться загрязнению вследствие дальнего атмосферного переноса данных соединений, что неоднократно отмечалось в исследованиях различных регионов мира [3].

В образцах почв, подвергнутых хроматографическому анализу, идентифицировано в общей сложности 32 индивидуальных конгенера ПХБ, относящихся к гомологическим группам от тетрахлорбифенилов до гептахлорбифенилов. Встречаемость отдельных конгенеров в анализируемых пробах существенно различалась. Наиболее высокая встречаемость (69 %) принадлежала конгенеру ПХБ 97, относящемуся к гомологической группе пентахлорбифенилов. Повышение суммарной концентрации ПХБ в отдельных почвенных пробах выше 0,454 мкг/кг было связано преимущественно с увеличением содержания данного конгенера.

Относительная доля конгенеров ПХБ 52 и ПХБ 146, относящихся к гомологическим группам тетра- и гексахлорбифенилов, в отдельных образцах достигала соответственно 56 и 63 %. Широкое распространение конгенера ПХБ 97 в составе почвенного покрова предгорной и равнинной части Северного склона Иле Алатау также отмечалось в наших предыдущих исследованиях территории Алматинской агломерации [15]. В почвах г. Алматы и ряда прилегающих населенных пунктов данный конгенер также регистрировался в повышенных концентрациях.

Особый интерес представляет анализ присутствия среди конгенеров ПХБ соединений, обладающих повышенной токсичностью, к которым относятся так называемые «маркерные» и диоксиноподобные изомеры. Их абсолютное и относительное содержание в почвенном покрове изученной территории приведено в таблице 3.

Таблица 3

Абсолютное и относительное содержание "маркерных" и диоксиноподобных конгенеров в почвенном покрове

Показатели	"маркерные"				диоксиноподобные		
	ПХБ 52	ПХБ 101	ПХБ 138	ПХБ 153	ПХБ 105	ПХБ 114	ПХБ 118/
Концентрация, мкг/кг	0,002…0,099	0,002…0,003	0,002…0,040	0,002…0,005	0,002…0,004	0,002…0,004	0,002…0,168
%	4…66	1…19	0,3…18	0,3…16	0,1…16	1…17	2…46

Как следует из данных таблицы 3, концентрации «маркерных» и диоксиноподобных конгенеров имеют близкий порядок величин. Абсолютное содержание «маркерных» конгенеров изменялось в интервале 0,002…0,099 мкг/кг, тогда как диоксиноподобных — от 0,002 до 0,168 мкг/кг. Относительная доля «маркерных» конгенеров ПХБ 52, 101, 138 и 153 варьировала преимущественно в пределах от 0,3 до 66 %, тогда как для диоксиноподобных конгенеров ПХБ 105, 114 и 118 соответствующие значения составляли от 0,1 до 46 %.

Результаты исследования показывают, что даже при относительно невысоком суммарном содержании ПХБ в почвах региона присутствуют токсикологически значимые конгенеры, которые могут оказывать влияние на экологическое состояние природных экосистем.

С учетом результатов, полученных в 2024 г., в 2025 г. отбор почвенных проб проводился на наиболее репрезентативных точках, расположенных в различных природных зонах территории области. Анализ показал, что, как и в предыдущем году, ПХБ зарегистрированы во всех исследованных образцах почв. Однако диапазон концентраций в 2025 г. оказался значительно более узким и составил от 0,018 до 0,045 мкг/кг. Результаты анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4

Общая характеристика уровня загрязненности ПХБ почв

Место отбора проб	Конгенеры	Сумма ПХБ, мкг/кг
6 точка		0,018
12 точка		0,031
15 точка		0,037
17 точка		0,034
19 точка		0,035
25 точка		0,037
30 точка	40; 41,64,71; 42; 44; 48; 49; 52; 66,95; 70,76; 74; 82; 85; 86; 87,115;	0,045
32 точка	97; 101; 105; 110; 114; 118; 119; 121; 128; 129; 137; 138; 141; 146;	0,032
35 точка	151; 153; 155; 171	0,021
37 точка		0,037
39 точка		0,030
48 точка		0,023
50 точка		0,035
52 точка		0,027
53 точка		0,025

Результаты исследования показывают о том, что в 2025 г. концентрации ПХБ в почвах исследуемой территории характеризуются значительно меньшей вариабельностью по сравнению с предыдущим годом. Пустынные и полупустынные территории, где расположены точки №6, 19, 32 и 48, характеризуются сравнительно низким содержанием токсиканта в пределах 0,018...0,035 мкг/кг. В почвах горной зоны концентрации ПХБ изменялись в интервале 0,027...0,045 мкг/кг, тогда как в равнинной зоне значения находились в диапазоне 0,021...0,037 мкг/кг. Близкие уровни содержания токсиканта зарегистрированы и в почвах урбанизированных территорий.

В образцах почв 2025 г. также идентифицировано 32 индивидуальных конгенера. Встречаемость отдельных конгенеров варьировала от 2 до 41 %. Наиболее высокая встречаемость (41 %) принадлежала легкому конгенеру ПХБ 44, относящемуся к гомологической группе тетрахлорбифенилов. Среди «маркерных» соединений наиболее часто обнаруживался конгенер ПХБ 153, встречаемость которого достигала 26 %. Концентрации «маркерных» и диоксиноподобных конгенеров в почвенной среде исследуемой территории представлены в таблице 5.

Таблица 5

Концентрация «маркерных» и диоксиноподобных конгенеров в почвенном покрове

Точки отбора проб	Сумма ПХБ, мкг/кг	маркерные								диоксиноподобные					
		ПХБ 52		ПХБ 101		ПХБ 138		ПХБ 153		ПХБ 105		ПХБ 114		ПХБ 118	
		мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%	мкг/кг	%
6 точка	0,018					0,003	18	0,002	10						
12 точка	0,031					0,003	11								
15 точка	0,037							0,009	26						
17 точка	0,034			0,004	12									0,003	9
19 точка	0,035			0,002	6	0,005	13	0,003	7					0,002	6
25 точка	0,037					0,006	15	0,002	5	0,002	6				

30 точка	0,045			0,007	16	0,002	4					0,002	4			
32 точка	0,032	0,004	11					0,006	19							
35 точка	0,021															
37 точка	0,037	0,003	8			0,003	7	0,004	11					0,002	5	
39 точка	0,030									0,005	17			0,003	9	
48 точка	0,023	0,002	8	0,004	16			0,002	8							
50 точка	0,035					0,002	5	0,003	8	0,002	5	0,003	9	0,003	8	
52 точка	0,027	0,003	12			0,002	7	0,002	6							
53 точка	0,025					0,003	14									

Как следует из данных таблицы 5, абсолютное содержание «маркерных» конгенеров в 2025 г. изменялось в интервале от 0,002 до 0,009 мкг/кг, тогда как концентрации диоксиноподобных соединений составляли 0,002...0,005 мкг/кг. Относительная доля «маркерных» конгенеров ПХБ 52, 101, 138 и 153 варьировала в пределах 4...26 %, а для диоксиноподобных конгенеров ПХБ 105, 114 и 118 соответствующие значения составляли 4...17 %.

Следует отметить, что в ряде проб «маркерные» и диоксиноподобные конгенеры либо отсутствовали, либо определялись в очень низких концентрациях. В частности, «маркерные» конгенеры не обнаружены в пробах, отобранных на точках № 35 и № 39, а диоксиноподобные конгенеры отсутствовали в нескольких образцах из равнинных и пустынных зон. Это свидетельствует о сравнительно низкой токсикологической нагрузке почвенного слоя исследуемой территории.

Сопоставление результатов 2024 и 2025 гг. показало, что во второй год наблюдений отмечено значительное снижение суммарных концентраций ПХБ и уменьшение доли высокотоксичных конгенеров. Подобные изменения могут быть обусловлены совокупным влиянием природных и антропогенных факторов, включая особенности атмосферного переноса загрязняющих веществ, процессы их миграции в почвенном профиле, а также пространственную неоднородность распределения загрязнителей.

При сравнении полученных результатов с литературными данными следует отметить, что уровни загрязнения почв области в целом значительно ниже, чем в известных зонах сильного техногенного воздействия. Согласно данным зарубежных исследований, концентрации ПХБ в почвах ряда европейских стран могут достигать 2...40 мкг/кг [4,16,17], тогда как в почвах Санкт-Петербурга средний уровень загрязнения составляет около 40 мкг/кг [18]. В почвах отдельных районов Башкирии содержание загрязнителей изменялось в пределах 0,01...0,07 мкг/кг [19]. Также исследования показывают, что ПХБ способны длительно сохраняться в почвенной среде и накапливаться преимущественно в районах с высокой антропогенной нагрузкой. Так, в исследованиях почв индустриальных территорий Колумбии и Испании содержание диоксиноподобных ПХБ варьировало от 0,00003 до 1,61 мкг/кг и от 0,00006 до 0,19 мкг/кг соответственно, при этом наиболее высокие концентрации были характерны для урбанизированных и промышленных зон [20].

По результатам наших предыдущих исследований территории Алматинской агломерации [15] максимальные значения суммарной концентрации ПХБ в почвах городских территорий достигали 18,4...18,9 мкг/кг, тогда как в почвенном покрове отдельных населенных пунктов этот показатель составлял до 13,7 мкг/кг. В почвах дельты р. Иле суммарное содержание ПХБ в ряде случаев достигало 18,4...35 и 25...80 мкг/кг. На этом фоне почвы области характеризуются в целом более низким уровнем загрязнения.

В целом установленные результаты подтверждают присутствие ПХБ в почвенном покрове всей исследованной территории при сравнительно невысоком уровне загрязнения. Выявлена существенная пространственная изменчивость содержания ПХБ,

обусловленная сочетанием природных условий и антропогенного воздействия. Одной из характерных особенностей является относительно низкая концентрация токсиканта в 2025 г. (0,018...0,045 мкг/кг) по сравнению с 2024 г., когда максимальные значения достигали 1,631 мкг/кг. Дополнительной особенностью является снижение доли высокотоксичных диоксиноподобных и «маркерных» конгенеров.

Совокупность этих факторов позволяет сделать вывод о том, что в изученный период почвенный покров области характеризуется относительно невысокой токсичностью по отношению к ПХБ, хотя присутствие данных соединений во всех исследованных образцах указывает на необходимость дальнейшего мониторинга их содержания в природных средах региона.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило получить обобщенную характеристику загрязнения почв области Жетысу полихлорированными бифенилами (ПХБ) и выявить особенности их пространственного распределения в различных природно-ландшафтных зонах региона. Установлено присутствие ПХБ во всех исследованных образцах почв, что то позволяет сделать вывод о региональном распространении данных стойких органических загрязнителей.

Наиболее высокие концентрации ПХБ выявлены в почвах урбанизированных и предгорных территорий, тогда как в пустынных и равнинных районах их содержание значительно ниже. Полученные результаты указывают на существенное влияние антропогенных факторов на формирование пространственной структуры загрязнения почвенной среды.

В ходе хроматографического анализа в почвенных образцах идентифицировано 32 индивидуальных конгенера ПХБ, относящихся к гомологическим группам от тетрахлор- до гептахлорбифенилов, включая индикаторные и диоксиноподобные соединения. Сравнение результатов исследований 2024 и 2025 гг. показало снижение суммарных концентраций ПХБ и уменьшение доли токсикологически значимых конгенеров во второй год наблюдений.

В целом уровни загрязнения почв области Жетысу ПХБ остаются ниже по сравнению с индустриальными регионами Казахстана и рядом зарубежных территорий. Вместе с тем повсеместное присутствие ПХБ подтверждает необходимость дальнейшего экологического мониторинга стойких органических загрязнителей в природных средах региона.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

В данном исследовании использованы опубликованные научные данные отечественных и зарубежных ученых, посвященные вопросам загрязнения почвенного покрова стойкими органическими загрязнителями. При анализе состояния почвенного покрова области Жетысу использованы материалы научных публикаций, фондовые и справочные источники, соответствующие тематике исследования. Статья подготовлена на основе анализа научной литературы, а также результатов собственных исследований авторов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – НАА; создание программного обеспечения – НАА; подготовка и редактирование текста – НАА; проведение исследования – ЛТИ; разработка методологии – АСМ; проведение статистического анализа – АМ; Проведение исследований, визуализация – БМС, АӨЖ; ресурсы – АӘС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерство науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488902 «Экосистемная устойчивость Жетысуской области: геоэкологический анализ депонирующих сред и рекомендации для устойчивого развития»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jones K.C., de Voogt P. Persistent organic pollutants (POPs): state of the science // Environmental Pollution. – 1999. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00098-6
2. Стокгольмская конвенция о стойких органических загрязнителях. – Стокгольм, 2001. – 53 с.
3. Breivik K., Sweetman A., Pacyna J., Jones K. Towards a global historical emission inventory for selected ПХБ congeners // Science of the Total Environment. – 2007. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.026
4. Meijer, S. N., Ockenden, W. A., Sweetman, A., Breivik, K., Grimalt, J. O., & Jones, K. C. Global distribution and budget of ПХБs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes // Environmental science & technology. – 2003. – 37(4), 667–672. https://doi.org/10.1021/es025809l
5. Kumari S., Agrawal M., Tiwari S. Impact of elevated CO_2 and elevated O_3 on Beta vulgaris L.: Pigments, metabolites, antioxidants, growth and yield // Environmental Pollution. – 2013. – Vol. 174. – P. 279–288. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.021. (in English).
6. Measures, C. I., Vink S. On the use of dissolved aluminum in surface waters to estimate dust deposition to the ocean. // Global Biogeochem. Cycles. – 2000. 14(1), 317–327, doi:10.1029/1999GB001188.
7. Ishankulov M.Sh. ПХБ-contaminated areas in Kazakhstan and analysis of ПХБ impact on human health experience // The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment. – Springer: AK/NATO Publishing Unit, 2008. – P. 387–403.
8. Амиргалиев Н. А. Полихлорированные бифенилы в водной экосистеме Иле-Балкашского бассейна. - Алматы: ТОО Нурай Принт Сервис, 2016. - 192 с.
9. Amirgaliev N., Medeu A., Opp C., Madibekov A., Ismukhanova L., Zhadi A. Monitoring of Polychlorinated Biphenyls in the Transboundary Ile River and Characteristics of Its Transformations Along the River's Discharge // Applied Sciences. – 2025. – Vol.15., 10872. https://doi.org/10.3390/app 152010872
10. Amirgaliev N., Ismukhanova L., Madibekov A., Sultanbekova B., Sultanayeva A. Monitoring the level of polychlorinated biphenyls pollution in the Ile River falls // News of the national academy of sciences of the RK. Series of Geology and technical science. – 2025. – Vol. 6, N 474. – P. 32-46. https://doi.org/10.32014/2025.2518-170X.569
11. ГОСТ 17.4.3.01–83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – Москва: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.
12. СТ РК ИСО 14507-2010. Охрана природы. Качество почвы. Подготовка образцов к определению содержания органических загрязняющих веществ. – Введ. 2012–01–01. – Астана : Комитет технического регулирования и метрологии Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, 2010. – 42 с.
13. СТБ ИСО 6468-2003. Качество воды. Определение некоторых хлорорганических инсектицидов, полихлорированных бифенилов и хлорбензолов методом газовой хроматографии после экстракции жидкость–жидкость (ISO 6468:1996, IDT). – Минск : Госстандарт Республики Беларусь, 2003. – 31 с.
14. Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network // Journal of Environmental and Public Health. – 2013. – Article ID 158764. – 11 p. https://doi.org/10.1155/2013/158764
15. Амиргалиев Н.А., Мадибеков А.С., Исмуханова Л.Т., Мусақұлқызы А., Кулбекова Р.А., Жади А.О. Токсичные соединения в снежном покрове и их влияние на природные объекты урбанизированных территорий (на примере Алматинской агломерации) – Алматы: Қазақ университеті, 2021. 12,56 п.л., (200 с.)
16. Кухаркин Т.И., Какарека С.В., Хомич В.С., Курман П.В., Воропай Е.Н. Полихлорированные бифенилы в почвах Белоруссии: Источники, уровни загрязнения, проблемы изучения. Почвоведение. – 2007. – № 5. – С. 532–540.
17. Dioxins & PSBs: environmental levels and human exposure in candidate countries. ENV.C.2/SER/2002/0085. Final report. – Brussels, 2004. – 333 p.
18. Андреев В. Г., Баев А. С. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 1998 году. – СПб., 1999. – 542 с.
19. Амирова З.К., Белан Л.Н., Валиуллина А.У., Шамсутдинова Л.Р., Саитова Л.Р., Хакимова А.А. Мониторинг стойких органических соединений и полиароматических углеводородов в почвах индустриального, рекреационного и селитебного назначения города Уфы // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 5-1. – С. 9-15.
20. Lacomba I., Palomares-Bolaños J., Juan-García A., et al. Levels and risk assessment of dl-ПХБs and dioxins in soils surrounded by cement plants from industrial areas of Colombia and Spain // Emerging Contaminants. – 2025. – Vol. 11, Issue 1. – Art. 100427. – ISSN 2405-6650. – https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100427

REFERENCES

1. Jones, K.C., de Voogt, P. (1999). Persistent organic pollutants (POPs): state of the science. Environmental Pollution. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00098-6
2. Stokgol'mskaya konventsiya o stoikikh organicheskikh zagryaznitelyakh (2001) [Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants]. 53 p. [in Russian].
3. Breivik, K., Sweetman, A., Pacyna, J., Jones, K. (2007). Towards a global historical emission inventory for selected ПХБ congeners. Science of the Total Environment. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.026
4. Meijer, S.N., Ockenden, W.A., Sweetman, A., Breivik, K., Grimalt, J.O., Jones, K.C. (2003). Global distribution and budget of ПХБs and HCB in background surface soils: implications for sources and environmental processes. Environmental Science & Technology, vol. 37, no. 4, pp. 667–672. https://doi.org/10.1021/es025809l
5. Kumari, S., Agrawal, M., Tiwari, S. (2013). Impact of elevated CO_2 and elevated O_3 on Beta vulgaris L.: pigments, metabolites, antioxidants, growth and yield. Environmental Pollution, vol. 174, pp. 279–288. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.11.021
6. Measures, C.I., Vink, S. (2000). On the use of dissolved aluminum in surface waters to estimate dust deposition to the ocean. Global Biogeochemical Cycles, vol. 14, no. 1, pp. 317–327. https://doi.org/10.1029/1999GB001188
7. Ishankulov, M.Sh. (2008). PKhB-contaminated areas in Kazakhstan and analysis of PKhB impact on human health experience. In: The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment. Springer: AK/NATO Publishing Unit, pp. 387–403.
8. Amirgaliev, N.A. (2016). Polikhlorirovannye bifenily v vodnoi ekosisteme Ile-Balkashskogo basseina [Polychlorinated biphenyls in the aquatic ecosystem of the Ile-Balkhash basin]. Almaty: TOO "Nuray Print Servis", 192 p. [in Russian].
9. Amirgaliev, N., Medeu, A., Opp, C., Madibekov, A., Ismukhanova, L., Zhadi, A. (2025). Monitoring of polychlorinated biphenyls in the transboundary Ile River and characteristics of its transformations along the river's discharge. Applied Sciences, vol. 15, 10872. https://doi.org/10.3390/app152010872

10. Amirgaliev, N., Ismukhanova, L., Madibekov, A., Sultanbekova, B., Sultanayeva, A. (2025). Monitoring the level of polychlorinated biphenyls pollution in the Ile River falls. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences, vol. 6, no. 474, pp. 32–46. https://doi.org/10.32014/2025.2518-170X.569 . [in Russian].
11. GOST 17.4.3.01–83. (2004). Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Environmental protection. Soils. General requirements for sampling]. Izdatel'stvo standartov. [in Russian].
12. ST RK ISO 14507-2010. (2010). Okhrana prirody. Kachestvo pochvy. Podgotovka obraztsov k opredeleniyu soderzhaniya organicheskikh zagryaznyayushchikh veshchestv [Environmental protection. Soil quality. Pretreatment of soil samples for determination of organic contaminants]. Komitet tekhnicheskogo regulirovaniya i metrologii Ministerstva industrii i novykh tekhnologiy Respubliki Kazakhstan. [in Russian].
13. STB ISO 6468-2003. (2003). Kachestvo vody. Opredelenie nekotorykh khlororganicheskikh insektitsidov, polikhlorirovannykh bifenilov i khlorbenzolov metodom gazovoy khromatografii posle ekstraktsii zhidkost–zhidkost (ISO 6468:1996, IDT) [Water quality. Determination of certain organochlorine insecticides, polychlorinated biphenyls and chlorobenzenes by gas chromatography after liquid–liquid extraction]. Gosstandart Respubliki Belarus. [in Russian].
14. Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. Journal of Environmental and Public Health, Article ID 158764, 11 p. https://doi.org/10.1155/2013/158764
15. Amirgaliev, N.A., Madibekov, A.S., Ismukhanova, L.T., Musakulkyzy, A., Kulbekova, R.A., Zhadi, A.O. (2021). Toksichnye soedineniya v snezhnom pokrove i ikh vliyanie na prirodnye ob'ekty urbanizirovannykh territorii (na primere Almatinskoi aglomeratsii) [Toxic compounds in snow cover and their impact on natural objects of urbanized territories (on the example of the Almaty agglomeration)]. Almaty: Kazakh University, 200 p. [in Russian].
16. Kukharkin, T.I., Kakareka, S.V., Khomich, V.S., Kurman, P.V., Voropai, E.N. (2007). Polikhlorirovannye bifenily v pochvakh Belorussii: istochniki, urovni zagryazneniya, problemy izucheniya [Polychlorinated biphenyls in soils of Belarus: sources, contamination levels, and research problems]. Pochvovedenie, no. 5, pp. 532–540 [in Russian].
17. Dioxins & PKhBs: environmental levels and human exposure in candidate countries (2004). ENV.C.2/SER/2002/0085. Final report. Brussels, 333 p.
18. Andreev, V.G., Baev, A.S. (1999). Okhrana okruzhayushchei sredy, prirodopol'zovanie i obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti v Sankt-Peterburge v 1998 godu [Environmental protection, natural resource management and ensuring environmental safety in Saint Petersburg in 1998]. Saint Petersburg, 542 p. [in Russian].
19. Amirova, Z.K., Belan, L.N., Valiullina, A.U., Shamsutdinova, L.R., Saitova, L.R., Khakimova, A.A. (2015). Monitoring stoikikh organicheskikh soedinenii i poliaromaticheskikh uglevodorodov v pochvakh industrial'nogo, rekreatsionnogo i selitebnogo naznacheniya goroda Ufy [Monitoring of persistent organic compounds and polyaromatic hydrocarbons in soils of industrial, recreational and residential areas of the city of Ufa]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk, vol. 17, no. 5-1, pp. 9–15 [in Russian].
20. Lacomba, I., Palomares-Bolaños, J., Juan-García, A., et al. (2025). Levels and risk assessment of dl-PKhBs and dioxins in soils surrounded by cement plants from industrial areas of Colombia and Spain. Emerging Contaminants, 11(1), Article 100427. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100427

ЖЕТІСУ ОБЛЫСЫНЫҢ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ПОЛИХЛОРЛАНҒАН БИФЕНИЛДЕРМЕН ЛАСТАНУЫН БАҒАЛАУ

Нариман А. Әмірғалиев[1] г.ғ.д., профессор, Азамат С. Мадибеков [1,2] PhD, қауымдастырылған профессор, Лаура Т. Исмуханова[1,2] PhD, Айнұр Мұсақұлқызы[1] т.ғ.к., Ботакоз М. Султанбекова[1,2], Асхат Ө. Жәди[1], Арай Ә. Сұлтанаева*[1,2]

[1] «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; namirgaliev@mail.ru, madibekov@mail.ru, l--aura@bk.ru, mus_ain@mail.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, askhat.zhadi@mail.ru, arai1104@mail.ru
[2] Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; madibekov@mail.ru, l--aura@bk.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, arai1104@mail.ru
*Автор корреспондент: Арай Ә. Сұлтанаева, arai1104@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

тұрақты органикалық ластаушылар, полихлорланған бифенилдер, конгенерлер, топырақ жамылғысы

АБСТРАКТ

Мақалада Қазақстан Республикасының Жетісу облысының топырақ жамылғысының полихлорланған бифенилдермен (ПХБ) ластануын зерттеу нәтижелері ұсынылған. Топырақ үлгілерін іріктеу 2024...2025 жж. өңірдің әртүрлі табиғи-ландшафттық аймақтарында орналасқан 52 бақылау нүктесінде жүргізілді. ПХБ мөлшерін талдау нормативтік құжаттардың талаптарына сәйкес электронды-қармау детекторы бар газдық хроматография әдісімен орындалды.
Зерттелген топырақ үлгілерінің барлығында полихлорланған бифенилдердің болуы анықталды. ПХБ-ның жиынтық концентрациялары 0,010-нан 1,631 мкг/кг аралығында өзгерді. Жеке конгенерлердің айтарлықтай алуан түрлілігі, соның ішінде индикаторлық («маркерлік») және диоксинге ұқсас қосылыстар анықталды. Ластаушының ең жоғары концентрациялары урбандалған аумақтардың топырақтарында тіркелді.
2024 және 2025 жылдардағы зерттеу нәтижелерін салыстырмалы талдау 2025 жылы ПХБ мөлшерінің айтарлықтай төмендегенін көрсетті. Бұл құбылыс

Мақала жайында:
Алынды: 18.03.2026
Қайта қаралды: 08.06.2026
Қабылданды: 28.07.2026
Жарияланды: 30.09.2026

сынама алу маусымының ерекшеліктерімен, ластаушы заттардың топырақ профилі бойынша қайта таралуымен және олардың кеңістіктік таралуының әркелкілігімен байланысты болуы мүмкін.
Алынған нәтижелер өңір топырақ жамылғысының полихлорланған бифенилдермен ластану деңгейі салыстырмалы түрде төмен екенін көрсетеді және оларды Қазақстан Республикасының Стокгольм конвенциясы бойынша халықаралық міндеттемелерін орындау шеңберінде тұрақты органикалық ластаушылардың экологиялық мониторингін ұйымдастыру кезінде пайдалануға болады.

ASSESSMENT OF SOIL COVER CONTAMINATION BY POLYCHLORINATED BIPHENYLS IN THE ZHETYSU REGION

Nariman Amirgaliyev[1] Doctor of Geographical Sciences, Professor, Azamat Madibekov[1,2] PhD, Associate Professor , Laura Ismukhanova [1,2] PhD, Ainur Mussakulkyzy[1] Candidate of Technical Sciences, Botakoz Sultanbekova[1,2], Askhat Zhadi[1], Aray Sultanayeva*[1,2]

[1] JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan namirgaliev@mail.ru, madibekov@mail.ru, l--aura@bk.ru, mus_ain@mail.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, askhat.zhadi@mail.ru, arai1104@mail.ru
[2] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; madibekov@mail.ru , l--aura@bk.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, arai1104@mail.ru
* Corresponding author: Aray Sultanayeva, arai1104@mail.ru

KEY WORDS

persistent organic pollutants, polychlorinated biphenyls, congeners, soil cover

ABSTRACT

The article presents the results of a study on the contamination of the soil cover of the Zhetysu Region of the Republic of Kazakhstan by polychlorinated biphenyls (ПХБs). Soil samples were collected in 2024...2025 at 52 monitoring sites located in different natural and landscape zones of the region. The ПХБ content was analyzed using gas chromatography with an electron capture detector in accordance with the requirements of regulatory documents.
The presence of polychlorinated biphenyls was detected in all studied soil samples. The total ПХБ concentrations ranged from 0.010 to 1.631 μg/kg. A significant diversity of individual congeners was identified, including indicator (“marker”) and dioxin-like compounds. The highest concentrations of the pollutant were recorded in soils of urbanized areas.
A comparative analysis of the research results for 2024 and 2025 showed a noticeable decrease in ПХБ concentrations in 2025. This may be associated with seasonal features of sampling, redistribution of pollutants within the soil profile, and spatial heterogeneity of their distribution.
The obtained results indicate a relatively low level of soil contamination in the region by polychlorinated biphenyls and can be used in organizing environmental monitoring of persistent organic pollutants within the framework of the Republic of Kazakhstan’s implementation of its international obligations under the Stockholm Convention.

About article:
Received: 18.03.2026
Revised: 08.06.2026
Accepted: 28.07.2026
Published: 30.09.2026

Примечание издателя: заявления. мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам). а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

ӨНЕРКӘСІПТІК ӘСЕР ЕТУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ҮЛБІ ӨЗЕНІНІҢ ЖЕР ҮСТІ СУЛАРЫНЫҢ ГИДРОХИМИЯЛЫҚ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ ЛАЙЛЫЛЫҒЫ

Наталья В. Серая х.ғ.к., профессор, Гульжан К. Даумова* т.ғ.к., профессор, Ольга А. Петрова т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Жанат К. Идришева т.ғ.к., профессор, Арина А. Полякова, Игорь А. Денисов, аға оқытушы

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; NSeraya@edu.ektu.kz (НВС), GDaumova@edu.ektu.kz (ГКД), OPetrova@edu.ektu.kz (ОАП), Zhidrisheva@edu.ektu.kz (ЖКИ), APolyakova@edu.ektu.kz (ААП), IDenisov@edu.ektu.kz (ИВД)
* Автор корреспондент: Гульжан К. Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz (ГКД)

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Үлбі өзені, Ертіс өзені, гидрохимия, лайлылық, жер беті сулары, техногенді әсер, ауыр металдар, экологиялық мониторинг

АБСТРАКТ

Өскемен қаласының қалалық және өнеркәсіптік аймағының әсерінен Үлбі өзенінің беткі суларының гидрохимиялық құрамы мен лайлылығына зерттеу жүргізілді. Сынамалар төрт бақылау телімдерінен алынды: қаланың үстіндегі жоғарғы ағыс, қала шегіндегі орта ағыс, өнеркәсіптік аймақтан төмен және Ертіске құйылғанға дейінгі төменгі телім. Химиялық элементтердің кең спектрінің, сонымен бірге Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb концентрациялары анықталынып, судың лайлылығы өлшенді. Элементтердің көпшілігінің концентрациясы шекті рұқсат етілген шектерде болатындығы анықталды, ал концентрацияның жергілікті асып кетуі Al, Fe, Sr және Ag үшін орта және төменгі ағысында тіркелді, бұл өнеркәсіптік кәсіпорындар мен қалалық ағындардың антропогендік әсерімен байланысты. Лайлылық 2,23-тен 4,23 NTU-ға дейін ауытқиды, бұл қалқыма бөлшектер мен металдардың жоғарылауымен тікелей байланысты екенін көрсетті. Зерттеу нәтижелері гидрохимиялық көрсеткіштер мен лайланудың кешенді мониторингінің ақпараттылығын техногендік жүктеменің индикаторы ретінде растайды, бұл өндірістік әсер ету аймағындағы өзендердің экологиялық жағдайын бағалауға және одан әрі экологиялық мониторингтің негізін қалауға мүмкіндік береді.

1. КІРІСПЕ

Өнеркәсібі дамыған аймақтардағы өзендердің жер үсті сулары олардың гидрохимиялық режимі мен су сапасын анықтайтын табиғи және антропогендік факторлардың кешенді әсеріне ұшырайды. Аумақтардың қарқынды өнеркәсіптік игеру жағдайында судың химиялық құрамының кеңістіктік өзгергіштігін және арналық жүйелердегі ластаушы заттардың түсуі мен тасымалдануын көрсететін көрсеткіштерді зерттеу ерекше өзектілікке ие болады. Су экожүйелерінің жай-күйінің ақпараттық көрсеткіштерінің бірі минералды және органикалық текті қалқыма бөлшектердің құрамын көрсететін судың лайлылығы болып табылады. Суспензия химиялық элементтердің, соның ішінде бөлшектердің бетінде сорбцияланууға және айтарлықтай қашықтыққа тасымалдануға қабілетті ауыр металдардың миграциясында маңызды рөл атқарады. Осыған байланысты судың элементтік құрамын талдаумен бірге лайлануды бағалау ластаушы заттардың тасымалдану ерекшеліктерін және олардың көздерін анықтауға мүмкіндік береді.

Заманауи гидрохимиялық зерттеулер судың лайлануын бейорганикалық және органикалық текті қалқыма бөлшектердің құрамын көрсететін интегралды көрсеткіш ретінде қарастырады. Лайланудың жоғарылауы, көбінесе техногендік әсерлерге, жер үсті

Мақала жайында:
Жіберілді: 20.03.2026
Қайта қаралды: 02.06.2026
Қабылданды: 25.08.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Дәйексөз үшін:
Серая Н., Даумова Г., Петрова О., Идришева Ж., Полякова А., Денисов И., Өнеркәсіптік әсер ету жағдайындағы Үлбі өзенінің жер үсті суларының гидрохимиялық сипаттамасы және лайлылығы// Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 125-141

суларының ағынына және ластанған аумақтардың эрозиясына байланысты. Жеке химиялық параметрлерден лайланудың айырмашылығы, ол су жинау жағдайының өзгеруіне жылдам әсер етеді және су объектілерінің антропогендік өзгеру дәрежесін бағалау үшін кеңінен қолданылады. Авторлар [1] қалқыма қатты бөлшектердің су объектілерінің гидрохимиялық қасиеттеріне және су биотасына әсеріне шолуды жан-жақты жүргізген. Лайлану қалқыма заттардың нақты концентрациясын анықтау жиынтығын, су экожүйесіне әсерін толық бағалау үшін олардың өлшемдерінің таралуы мен химиялық құрамын және су сапасының тиімді стандарттарын әзірлеуді қарастыратынын көрсеткен.

Ауыр металдар мен металлоидтар қалқыма бөлшектердің бетінде тиімді сорбцияланууға және байланысқан күйде тасымалдануға қабілетті екендігі белгілі. Мұндай жағдайларда лайланудың жоғарылауы қатты фазамен байланысқан металдар үлесінің ұлғаюымен қатар жүреді, бұл олардың миграциялық қабілетін арттырады және қайталама ластану аймақтарын қалыптастырады. Бұл процестерге әсіресе Fe, Mn, Cu және Zn элементтері белсенді қатысады. Өзендердегі ауыр металдарды тасымалдаудың заманауи тұжырымдамалары ластаушы элементтерді тасымалдаудағы қалқыма бөлшектердің басым рөлін көрсетеді. Авторлардың [2] жұмыстарында қалқыма бөлшектердің маусымдық ауытқулары өзен жүйесіндегі металдардың таралуы мен жылдық тасымалдануын анықтаған, сонымен бірге металлоидтардың едәуір бөлігі, әсіресе су ағынының көтерілу кезеңдерінде, қалқыма бөлшектермен қауымдасып, тасымалданады. Мұндай процестердің негізгі теориялық негіздері монографияда [3] баяндалған, мұнда металдардың сулы ортадағы адсорбциясы мен миграциясының физикалық-химиялық механизмдері және олардың лайлану сипаттамаларымен байланысы егжей-тегжейлі сипатталған, бұл техногендік жүктелген өзендердің гидрохимиялық жағдайын бағалауда SPM -ны негізгі параметрге айналдырады.

Соңғы жылдары өнеркәсіптік және урбанизацияланған әсерге ұшыраған өзендердің гидрохимиялық жағдайына жүргізілген зерттеулер өнеркәсіптік су ағындарындағы лайланудың жоғары деңгейі көбінесе жер үсті суларындағы ауыр металдар концентрациясының жоғарылауымен байланысты екенін растады, өйткені шөгінділер мен қалқыма бөлшектер металдарды тиімді сіңіріп, олардың миграциясына ықпал ете алады. Бұл 2023 жыл бойы Хиндон өзенінің (Музаффарнагар округі, Үндістан) суындағы ауыр металдардың физикалық-химиялық параметрлері мен концентрацияларының маусымдық ауытқулары зерттелген зерттеу нәтижелеріне сәйкес келеді. Әртүрлі көрсеткіштер, соның ішінде лайлану, сондай-ақ ауыр металдардың концентрациясы талданған. Барлық маусымдарда лайлану мәндері рұқсат етілген шектен асып кеткен, бұл судың ластануының жоғары дәрежесін көрсетеді. Су сынамаларындағы Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Zn және Pb концентрациясы айқын маусымдық өзгергіштікті көрсетті: максималды мәндер жазда, минимумдар муссон маусымында тіркелген. Өзен суындағы ауыр металдардың көбеюінің негізгі себептеріне өнеркәсіптік ақаба сулар, ауылшаруашылық ағындары және қалдықтарды рұқсатсыз орналастыру жатады [4]. Сонымен, мақала авторлары лайлылықты су сапасының оптикалық параметрі ретінде ғана емес, сонымен қатар өнеркәсіптік ақаба сулардың әсерінен гидравликалық жүйелердегі ластаушы заттардың тасымалдану қарқындылығының көрсеткіші ретінде де қарастырады.

Авторлар [5] мақалада қалқыма қатты бөлшектер Хуанхэ өзен суындағы ауыр металдардың маңызды тасымалдаушысы екендігі көрсетілген. Нәтижелер көрсеткендей, ауыр металдардың көпшілігінің концентрациясы (еріген және қатты фазаларда) жаңбырлы маусымда құрғақ мезгілге қарағанда жоғары болған. Ауыр металдардың едәуір бөлігі (>70 %) қалқыма фазада тасымалданатыны және металдардың концентрациясының мутациясы жыл мезгіліне және су ағынының гидродинамикасына байланысты өзгеретіні анықталған.

Қалқыма қатты бөлшектер (ҚҚБ) судың лайлануын және өзен экожүйелеріндегі ауыр металдарды қоса алғанда, химиялық элементтердің тасымалдануын анықтайтын негізгі фактор болып табылады. Жұмыста [6] Янцзы өзені жүйесіндегі ҚҚБ концентрациясы жыл мезгілдеріне байланысты өзгеріп отыратыны, су тасқыны кезінде максимумға және құрғақшылық кезеңінде минимумға жететіні анықталды. ҚҚБ -ның түзілуі табиғи факторлармен (жауын-шашын, ағындар), сондай-ақ өндірістік және ауылшаруашылық төгінділерден, кеме қатынасы мен гидротехникалық жұмыстарды қоса алғанда, антропогендік әрекеттермен анықталады. Бұл бөлшектер ауыр металдар мен органикалық ластаушы заттарды өз беттеріне адсорбциялайды, бұл олардың арна бойымен қозғалуына және ластанудың таралуына ықпал етеді. Осылайша, ҚҚБ-ні зерттеу ластаушы заттардың миграциясын бағалауға мүмкіндік береді және өнеркәсіптік әсер ету жағдайында жер үсті суларының лайлылығы мен сапасын талдауда маңызды рөл атқарады.

Өзен қалқымаларының үйінділері жер үсті суларындағы ауыр металдарды тасымалдауда шешуші рөл атқарады, бұл Обь өзенінің орта ағысы мен оның Батыс Сібірдегі шағын салаларының мысалында анық көрсетілген. Маусымдық зерттеулерге сәйкес, қатты заттар құрамындағы бірқатар ауыр металдардың мөлшері жыл ішінде айтарлықтай өзгеретіні және өзеннің гидрологиялық жағдайымен анықталатыны белгілі болды [7].

Бірқатар жұмыстарда Байкал көлінің ең ірі саласы болып табылатын Селенга өзен бассейні трансшекаралық тасымалдауға да, жергілікті антропогендік көздерге де байланысты жер үсті суларының ауыр металдармен ластануының жоғары деңгейімен сипатталған. Кеңістіктік талдау көрсеткендей, Селенга өзенінің ластануына негізгі үлес су алабының жоғарғы ағысында, негізінен тау-кен және өндірістік қызметі дамыған аудандарда орналасқан көздерден түседі. Ең үлкен экологиялық қауіп мырышқа байланысты болды, оның концентрациясы рұқсат етілген мәндерден жиі асып түскен, сондай-ақ Mn, Fe, Cr, Cu және As маңызды ластаушы заттар ретінде қарастырылған. Алынған нәтижелер Селенга өзені бассейнінің су объектілеріне антропогендік жүктемені азайту бойынша шараларды жүйелі түрде бақылау мен әзірлеу қажеттілігін көрсетеді [8].

2011…2016 жылдар аралығында Селенга өзені бассейнінде жүргізілген ұзақ мерзімді далалық зерттеу нәтижелерінің қысқаша шолу салыстырмалы түрде бұзылмаған аудандарда, қала құрылысы аймақтарында және тау-кен өндірісінде фондық металдардың концентрациясы әлемдік орташа деңгейге жақын болғандықтан, судағы және қалқымалы шөгінділердегі бірқатар элементтердің (Zn, As, Cd, Cu, Mo, Pb) мөлшері фондық мәндерден 1…2 есеге асып түсетінін көрсеткен. Ең айқын ауытқулар еріген мышьяк пен кадмий үшін, әсіресе ірі өнеркәсіп орталықтарының аймақтарында тіркелген. Нәтижелер металдардың миграциясындағы қалқыма бөлшектердің шешуші рөлін көрсетеді және Селенга бассейніндегі техногендік ластану тек өзен экожүйелеріне ғана емес, сонымен қатар өзен атырауы мен төменгі ағысында орналасқан Байкал көліне де қауіп төндіретінін растайды [9].

2020…2023 жылдары Селенга өзені атырауында еріген Fe, Cu және Ni формаларының ең қарқынды ағыны қатты жауын-шашын мен су тасқыны жылдарында тіркелген, бұл топырақтың жоғарғы қабаттарынан органоминералды кешендердің шығарылуымен байланысты. Мұз асты кезеңінде тотығу-тотықсыздану және гидродинамикалық жағдайлардың өзгеруі жер асты суларынан және түпкі шөгінділерден Mn, Zn және Cr бөлінуіне ықпал етті. Шекті рұқсат етілген концентрациялардан асып кету жиілігін талдау атырау суларының ластану деңгейінің қалыптасуына Mn, Fe, Cu және Zn басымдылық үлесін көрсетті [10].

Келесі авторлар [11] жүргізілген зерттеулерде Іле өзенінің суындағы трансшекаралық телімде ауыр металдардың (Cd, Cu, Zn, Co, Ni) тасымалдануы және олардың таралуына Қапшағай гидроэлектростанциясының әсері бағаланған. Лайлылығы жоғары аймақтар ауыр металдардың ең көп шоғырланған аймақтарымен сәйкес келетіні

көрсетілген. Лайлылық тек қалқымалы заттардың ағымдағы ағынын ғана көрсетіп қоймай, сонымен қатар бұрын жинақталған ластаушы заттардың қайта бөлінуіне қатысатындығы, су экожүйелерінің екінші реттік ластануын күшейтетіні анықталды. Жоғарыда аталған авторлар [11] Қазақстан аумағындағы Іле өзен суындағы ауыр металдардың құрамын зерттеу мыс, мырыш, кобальт, никель концентрацияларының шекті рұқсат етілген мәндерден асып кеткенін көрсетті. Судағы Fe, Mn, Cu және Zn жалпы құрамының 60…85 %-ға дейінгі қалқыма фазамен байланысты екені анықталды, металдардың максималды концентрациясы лайлылығы жоғарылаған кезеңдер мен телімдерге сәйкес келетіні дәлелденген. Авторлар бөлшектердің шөгуіне байланысты лайлану азайған кезде металдардың еріген концентрацияларының азайғанын көрсеткен, бұл сорбциялық-десорбциялық процестердің шешуші рөл атқаратынын байқатады.

Қалалық жерлерде судың лайлануы жол беттерінен, өнеркәсіптік алаңдардан және құрылыс алаңдарынан ұсақ бөлшектерді тасымалдайтын жер үсті нөсер суларының ағынынан туындайды. Бұл қалқыма бөлшектер металдарға бай және тікелей ағындар болмаған кезде де судың гидрохимиялық құрамын айтарлықтай өзгерте алады. Қазақстанның өнеркәсіптік қалалары үшін бұл механизм жер үсті суларының сапасының нашарлауының негізгі факторы ретінде танылған. Келесі зерттеу [12] Алматы қаласының (Үлкен және Кіші Алматы, Есентай өзендері) су объектілерінің химиялық ластану деңгейін бағалау мен тұрмыстық және өндірістік ағынды сулардың төгілуіне байланысты өзен суларында ауыр металдардың едәуір мөлшерде болуын анықтаған. Органолептикалық қасиеттері мен химиялық көрсеткіштерін талдау жекелеген компоненттер бойынша ШРК-ның асып кетуін растады, бұл қалалық агломерациядағы жер үсті суларының табиғи режимінің терең бұзылуын көрсетеді.

Шығыс Қазақстан облысы Қазақстан Республикасының ерекше индустриялық дамыған өңірлерінің қатарына жатады, мұнда тау-кен өндіру, металлургия және энергетика кәсіпорындарының жоғары шоғырлануы жерүсті су объектілеріне тұрақты техногендік жүктемені қалыптастырады. Өңірдің өзендері урбанизацияланған және өнеркәсіптік аумақтар арқылы ағып өтеді, бұл олардың гидрохимиялық режимінің өзгеруіне, металдардың концентрациясының жоғарылауына және қалқымалы заттардың көбеюіне әкеледі. Соңғы жылдары Ертіс трансшекаралық өзенінің гидрохимиялық жағдайын зерттеу минералдану, иондық құрам, жалпы кермектілігі, еріген газ құрамы және pH сияқты негізгі химиялық көрсеткіштердің кеңістіктегі біртектілігін анықтады. Алынған деректер бассейннің қазақстандық бөлігіндегі гидрохимиялық режимнің өзгермелілігін көрсетеді, бұл тек табиғи айырмашылықтарды ғана емес, сонымен қатар әртүрлі шаруашылық жүктемелері бар аймақтардағы антропогендік факторлардың әсерін де көрсетеді [13].

2023 жылы Ертіс өзенінің қазақстандық бөлігінде (27 станция) жүргізілген далалық зерттеулер ауыр металдармен ластанудың кеңістікте айқын гетерогенділігін көрсетті. Негізінен өзеннің төменгі ағысында Cu және Fe бойынша ШРК мәнінен асып кетуі, сондай-ақ Cr және Zn бойынша жергілікті асып кетулер тіркелген. Нәтижелер, әсіресе трансшекаралық өзен жүйелерінде, қалқыма бөлшектермен және судың лайлануымен ықтимал байланысты металдарды тасымалдау процестерін ескере отырып, гидрохимиялық деректерді кешенді түсіндіру қажеттілігін көрсетеді [14].

Қазақстан Республикасы аумағындағы Ертіс трансшекаралық өзенінің гидрохимиялық жағдайы бойынша [15] су бағанындағы ауыр металдардың құрамы кеңістіктегі біртектілікпен және өндірістік және муниципалдық көздердің әсерімен байланысты жергілікті нормалардан асып кетуімен сипатталатындығын көрсетті. Өскемен маңындағы аудандарда темірді қоса алғанда, он алты макро- және микроэлемент анықталған, олар шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) 1,2...2 есеге асып түскен. Авторлар өнеркәсіптік қысым жағдайында ауыр металдарды үздіксіз бақылаудың маңыздылығын, сондай-ақ жоғары ағын жылдамдығы мен өзін-өзі сүзу жағдайларының еріген және қалқыма фазалар арасындағы элементтердің таралуына әсер ету мүмкіндігін

атап өтеді, бұл Ертіс өзені жүйесіндегі лайлылық пен ластаушы заттардың тасымалдану мәселелеріне тікелей қатысты.

Келесі жұмыста [16], Zn, Cu, Cd және Pb сияқты элементтер Шығыс Қазақстан өзендері үшін антропогендік жүктеменің басым көрсеткіштері болып табылатыны көрсетілген. Олардың концентрациясы қалалық жерлерде және өнеркәсіптік аймақтардан төмен жерлерде айтарлықтай артады, бұл қалалық ағынды сулар мен өнеркәсіптік шығарындылардың әсерін көрсетеді. Бұл металдардың кеңістіктік таралуы техногендік әсердің ең жоғары аймақтарын анықтауға және өзендердің гидрохимиялық режимінің трансформация дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді.

Заманауи басылымдарды талдау нәтижелері көрсеткендей, Шығыс Қазақстан өзендері судың лайлылығы мен ластаушы элементтердің миграциясы арасындағы тұрақты байланыстармен сипатталады. Дегенмен, жұмыстардың көпшілігінде химиялық талдау сұйық және қатты фазаларды нақты ажыратпай жүргізілген, бұл металдардың тасымалдану механизмдерін түсіндіруді қиындатады. Осыған байланысты лайлануды өлшеуді және еріген су фазасының элементтік құрамын талдауды біріктіретін кешенді тәсіл өзекті болып табылады [17].

Ертіс бассейнін кешенді зерттеулер лайлылық пен гидрохимиялық параметрлердің кеңістіктік гетерогенділігі, көбінесе антропогендік салалардың үлесіне байланысты екенін көрсетеді. Үлбі өзені - Ертіс өзеніне Өскемен қаласы шекарасында ауыр металдар мен қалқыма заттардың негізгі түсу көздерінің бірі ретінде қарастырылған [18].

Үлбі өзені бассейні Шығыс Қазақстанның жер үсті су жүйесінде ерекше орын алады, ол өнеркәсіптік нысандардың тығыздығының жоғарылығымен және тау-кен металлургиялыө игерулердің ұзақ тарихымен сипатталады. Аймақтық зерттеулер Үлбі өзені бассейнінің (Риддер аймағы) ауыр металдармен қатты ластанғанын көрсетеді. Атап айтқанда, Үлбі өзені (21 ШРК дейін), Тихая өзені (5 ШРК дейін) және Филипповка өзені (3 ШРК дейін) суларында Cd деңгейі шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) асып түскен [19].

Үлбі өзенінің Ертіс өзені су сапасын қалыптастырудағы көпшілікке белгілі рөліне қарамастан, өзеннің бойлық профилі бойындағы жер үсті суларының лайлылығы мен элементтік құрамын талдауды біріктіретін егжей-тегжейлі зерттеулер шектеулі болып қала береді. Жұмыстардың көпшілігі [20, 21] лайлылықтың кеңістіктік өзгергіштігін және элементтердің фазалық таралуын ескермей, өзеннің түпкі шөгінділеріне немесе интегралды көрсеткіштерін анықтауға бағытталған.

Сонымен, заманауи басылымдарды талдау барысында жер үсті суларының лайлылығы мен олардың элементтік құрамы қазіргі техногендік әсердің де, ластаушы заттарды тасымалдау процестерін де көрсететін өзара байланысқан көрсеткіштер екенін көрсетеді. Шығыс Қазақстан өзендері үшін, атап айтқанда Үлбі өзені үшін өнеркәсіптік әсер ету жағдайында судың лайлануы мен гидрохимиялық сипаттамаларын бір мезгілде бағалауға бағытталған кешенді зерттеулерге қажеттілік сақталады. Бұл осы зерттеудің ғылыми және практикалық маңыздылығын анықтайды.

Зерттеудің мақсаты қалқыма бөлшектердің тасымалдану процессімен байланысты олардың және химиялық элементтердің таралуының кеңістіктік заңдылықтарын айқындай отырып, Өскемен қаласы өнеркәсіптік әсерлер мен кенттену жағдайындағы Үлбі өзенін бойлай профилдік ағысының бойымен жер беті суларының лайлылығы мен гидрохимиялық құрамын кешенді бағалау болып табылады.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

2.1 Зерттеу нысаны және сынамаларды іріктеу

Зерттеу нысаны Шығыс Қазақстан аумағы арқылы өтетін және антропогендік жүктеменің айқын кеңістіктік әртектілігімен сипатталатын Үлбі өзені болып табылады. Зерттелетін телім шекарасында өзен табиғи және техногендік факторлардың әсерінен жер үсті суларының гидрохимиялық сипаттамаларының өзгеруін бақылауға мүмкіндік беретін

шартты түрде фондық, урбанизацияланған және өнеркәсіптік жүктелген аймақтарды дәйекті түрде кесіп өтеді.

Жер үсті суларының химиялық құрамының кеңістіктік өзгергіштігін бағалау үшін өзеннің жоғары ағысына, қала құрылысы шегіндегі телімге, өнеркәсіптік кәсіпорындардың ықпал ету аймағына, сондай-ақ Үлбі өзенінің Ертіс өзеніне құяр алдындағы төменгі бөлігін қамтитын репрезентативті тұстамалар жүйесіне жіктелінді. Тұстамалардың орналасуы іріктеу шарттарының салыстырмалылығын қамтамасыз етті және су ағыны бойымен антропогендік жүктеменің өсу градиентін көрсетті.

Жер үсті суларының сынамаларын фактіге негізделген іріктеу 2025 жылдың тамыз айында бекітілген гидрохимиялық мониторинг бағдарламасына сәйкес жүргізілді. Сынаманы алу өзен бассейнінің негізгі функционалдық аймақтарына сәйкес келетін төрт нүкте бойынша жүргізілді (кесте 1, сурет 1). Әрбір нүктеде үш параллель сынама алынды, олардың көмегімен кейінгі талдау үшін ортаңғы сынама алынды.

Кесте 1

Үлбі өзенінің жер үсті суларының сынамаларын алудың нақты нүктелері

№	Сынамаларды іріктеу нүктелері	Күні	Координаттар	Ескертпе
1	№1	27.08.2025	50°2′38.00″ С, 82°51′11.00″ Ш	Үлбінің жоғарғы бөлігі, шартты фон
2	№2	27.08.2025	50°0′9.66″ С, 82°40′57.28″ Ш	Орта ағыс, қалалық телім
3	№3	28.08.2025	49°58′14.59″ С, 82°37′34.44″ Ш	Өнеркәсіптік аймақтан төменгі телім
4	№4	28.08.2025	49°57′7.00″ С, 82°35′7.00″ Ш	Төменгі телім, Ертіске құяр алдында

№1 нүкте Үлбі өзенінің жоғарғы ағысында қала құрылысынан жоғары орналасқан және су алабының бастапқы табиғи гидрохимиялық фонын сипаттайды. Бұл телім минималды түрде тікелей техногендік әсерге ұшырайды және зерттеу жұмысында жер үсті суларының құрамын салыстырмалы талдау кезінде шартты фон ретінде пайдаланылды.

№2 нүкте қала шекарасында өзеннің орта ағысымен шектеседі және кенттенген аумақтың, соның ішінде коммуналдық-тұрмыстық ағынды сулардың, жер үсті нөсер суларының және тұрғын үй және көлік инфрақұрылымы аймағында пайда болатын диффузиялық ластану көздерінің әсерін көрсетеді.

№3 нүкте өнеркәсіптік аймақтан төмен орналасқан және өнеркәсіптік кәсіпорындардың жер үсті суларының сапасына жалпы әсерін бағалауға арналған. Бұл тұстаманың гидрохимиялық сипаттамалары ұйымдасқан және ұйымдастырылмаған өнеркәсіптік төгінділердің үлесін, сондай-ақ техногендік түрлендірілген жағалау аумақтарынан элементтердің қайталама түсу процестерін көрсетеді.

№4 нүкте Үлбі өзенінің Ертіске құяр алдында, оның төменгі ағысында орналасқан және зерттелетін телімнің бүкіл ұзындығы бойында табиғи және антропогендік факторлардың жиынтығының әсерінен пайда болатын жер үсті суларының интегралды жағдайын сипаттайды.

Осылайша, сынама алудың таңдап алынған сұлбасы Үлбі өзені жер беті суларының гидрохимиялық құрамының кеңістіктік өзгергіштігі мен өзен суының фондық жағдайдан қарқынды антропогенді әсерлер аймағына және одан әрі интегралды ағынның теліміне дейінгі түрленуін қадағалауды сипаттайды

2.2 Судың лайлылығы мен химиялық құрамын зерттеу әдістері.

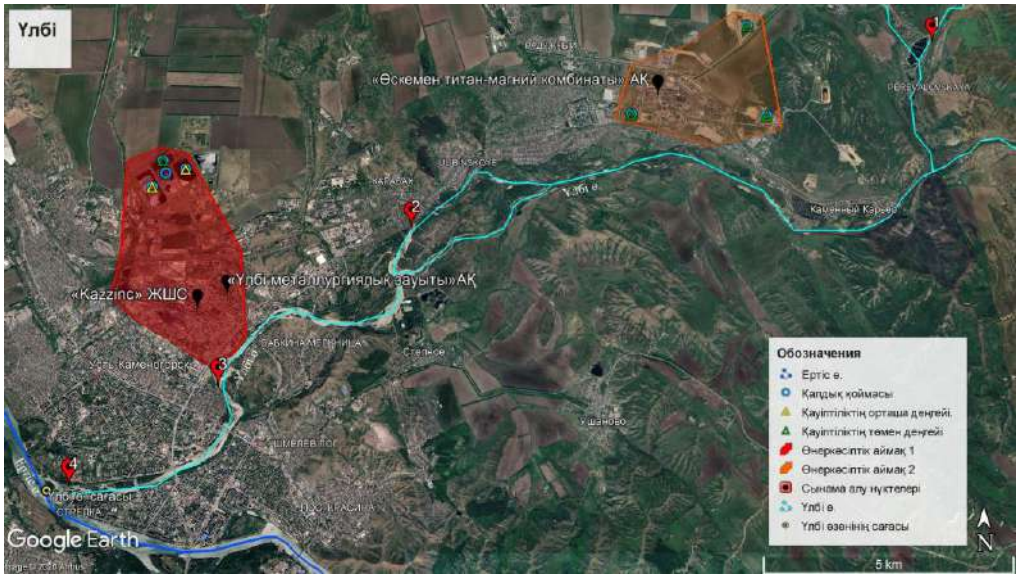
Судың лайлылығы далалық жағдайда ±0,1 NTU дәлдігімен Hanna HI 93414-02 турбидиметрін пайдаланып өлшенді. Әр нүкте үшін үш параллель өлшеу жүргізілді, өлшеуден алынған нәтижелер орташаланды [22].

Жер үсті суларының лайлылығы бейорганикалық және органикалық текті қалқыма бөлшектердің құрамын көрсететін интегралды физикалық-химиялық көрсеткіш ретінде анықталды. Бұл параметр су қабатының қатты фазамен қанығу дәрежесін сипаттау және ластаушы компоненттердің миграциясындағы қалқыма заттардың әлеуетті рөлін бағалау

үшін пайдаланылды. Лайлылықты өлшеу химиялық талдауды орындауға дейін жүргізілді және су нысандарының гидрохимиялық жағдайын бағалаудың бастапқы кезеңдерінің бірі ретінде қарастырылды.

Химиялық элементтерді талдау 0,45 мкм мембраналық сүзгілер арқылы сүзуден және сынаманы қышқылмен тұрақтандырғаннан кейін (HNO3, pH < 2) индуктивті байланысқан плазма әдісімен масса-спектрометриялық анықтау (ICP-MS) арқылы жүргізілді [23]. Макроэлементтер (Na, Mg, Ca, K, P), микроэлементтер және ауыр металдар (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, V, Sr, Li, B, W, Pb, As, Cd, Sb) анықталды. Дәлдікті бақылау үшін элементтердің сертификатталған стандартты ерітінділері пайдаланылды. Элементтердің концентрациясы мен лайлылықтың кеңістіктегі таралуы нүкте бойынша орташа мәндерді қолдану арқылы талданды [24]. Химиялық талдау су сынамаларының еріген фазасының элементтік құрамын анықтауға бағытталды, бұл тұрақсыз қалқыма фракцияның әсерін жоюға және алынған концентрациялардың су сапасының нормативтік мәндерімен дұрыс салыстырылуын қамтамасыз етуге мүмкіндік берді.

Үлбі өзенінің жер беті суларының сапасын қалыптастырудағы табиғи гидродинамикалық және антропогенді факторлардың үлесін бағалау мен ластағыш заттардың таралуының кеңістіктік ерекшеліктерін анықтау үшін лайлылық пен еріген фазаның құрамы туралы мәліметтер бірге қолданылды.

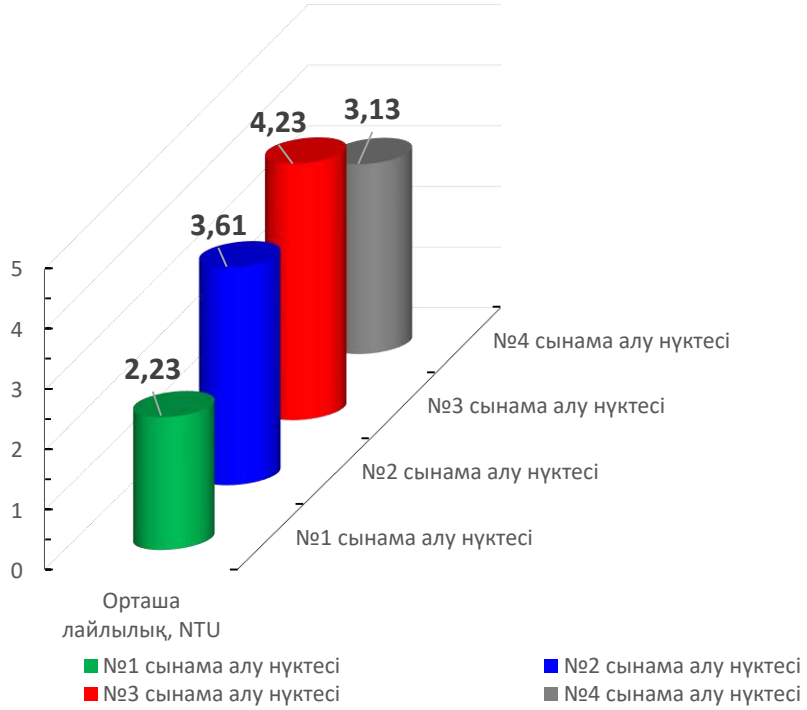


Сурет 1. *Спутниктік түсірілімдегі Үлбі өзенінен сынамаларды алудың нақты нүктелерінің орналасу сызбасы (Google Earth)*

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Жер үсті суларының лайлылығы - бейорганикалық және органикалық тектес қалқыма бөлшектердің құрамының кешенді өлшемі және көбінесе су ағындарына антропогендік жүктеменің индикаторы ретінде қолданылады. Алынған мәндер 2,23-тен 4,23 NTU-ге дейін, бұл зерттеу аймағында қалқыма фазаның пайда болуының гетерогенді жағдайларын көрсетеді (сурет 2). Ең төменгі лайлылық өзеннің жоғарғы бөлігінде (№1 нүкте - 2,23 NTU), қалалық құрылыстан жоғары орналасқан жерде тіркелді. Бұл телім фондық гидрохимиялық жағдайлармен және қалқыма заттардың табиғи пайда болуын көрсететін минималды антропогендік әсермен сипатталады. Қала шекарасында (№2 нүкте) лайлылық 3,61 NTU-ға дейін артады. Бұл көрсеткіштің өсуі кенттену әсеріне, соның ішінде жер үсті нөсер суларының ағынына, жағалаулық эрозияға және Өскемен қаласының орталық бөлігіне тән диффузиялық коммуналдық және тұрмыстық көздерге байланысты. Лайлылықтың жоғары мәндері өнеркәсіптік аймақтан төмен тіркелді (№3 нүкте - 4,23 NTU). Бұл антропогенді пайда болған қалқыма бөлшектердің қарқынды

ағынына, сондай-ақ гидродинамикалық процестермен қайта таралған ұсақ дисперсті материалдардың су қабатына енуімен байланысты екенін көрсетеді. Бұл телім аса жоғары антропогендік жүктememен сипатталады және қалқымалы ағынының белсенді қалыптасу аймағы ретінде роль атқарады. Өзеннің Ертіске қосылғанға дейінгі төменгі бөлігінде (№4 нүкте) лайлылық 3,13 NTU-ға дейін төмендейді. Бұл төмендеу қалқыма бөлшектердің ішінара шөгуіне, сондай-ақ гидродинамикалық жағдайлары тұрақты аймақтарға тән ағынның сұйытылуына байланысты болуы мүмкін.



Сурет 2. *Үлбі өзенінің бөктеріндегі лайланудың орташа мәні*

Жалпы алғанда, лайлылықтың Үлбі өзені ағысы бойынша таралуы қала және өнеркәсіптің аймақтың аумағында антропогенді әсердің жүйелі түрде өсуін, кейіннен төменгі ағыста көрсеткіштің төмендеуін көрсетеді. Бұл өзеннің төменгі телімінің қалқыма материалдарды Ертіске тасымалдаудың транзиттік аймағы ретінде роль атқаратынын растайды және өнеркәсіптік әсердің жағдайында жер үсті сулары сапасының кеңістіктік түрленуінің индикаторы ретінде лайлылық мәндерінің маңыздылығын айқындайды.

Жер үсті суларының лайлылығының артуы қалқыма фаза үлесінің артуын көрсетеді; дегенмен, бұл зерттеудегі химиялық талдау су сынамаларының сұйық (еріген) фазасында жүргізілді. Сондықтан, гидрохимиялық параметрлерді одан әрі қарастыру қатты фазаның тікелей үлесіне тәуелсіз, өзен бойындағы еріген элементтердің таралуын және олардың кеңістіктік өзгергіштігін бағалауға бағытталған. Соған қарамастан, кеңістіктік лайлылық үрдістерінің маңызды түсіндірмелік мәні бар, себебі қалқыма бөлшектер сорбциялық-десорбциялық процестер арқылы элементтердің еріген түрге екінші реттік ену көзі ретінде әрекет ете алады және сонымен қатар белсенді антропогендік әсер ету аймақтарын анықтай алады. Сондықтан, лайлылықтың өзгерістерін химиялық элементтер концентрациясының өзгерістерімен салыстыру кенттенген және өнеркәсіптік жүктеме жағдайында Үлбі өзенінің жер үсті су сапасының өзгеруін толығырақ сипаттауға мүмкіндік береді.

Үлбі өзенінің су экожүйесіндегі элементтік құрамын және ықтимал антропогендік әсерлерді бағалау үшін жер үсті су үлгілерінің масс-спектрометриялық талдауы жүргізілді. Жер үсті су үлгілерінің сандық талдау нәтижелері кестеде келтірілген (кесте 2).

Кесте 2

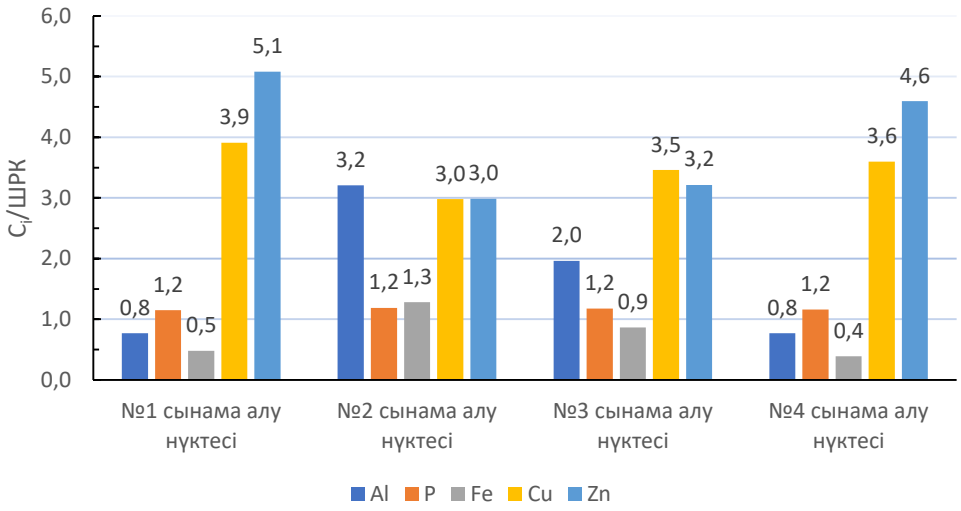
Үлбі өзенінің жер үсті суларының сынамаларындағы элементтердің бекітілген ШРК мәні [25] мен концентрациялары

Элементтер	ШРК, мг/дм^3	Сынама алынған нүктелер			
		№1	№2	№3	№4
		С, мг/дм^3			
Be	0.0001	0,00001	0,00002	0,00001	0,00003
B	≤0.5	0,00783	0,01020	0,00923	0,01053
Na	120	3,09	3,23	3,19	4,89
Mg	≤20	3,11	3,55	3,02	4,19
Al	0,04	0,03082	0,12834	0,07846	0,03074
P	0,1	0,11519	0,11882	0,11772	0,11582
K	50	0,83	0,77	0,67	0,85
Ca	180	6,15	6,76	5,92	8,31
Cr	0,1	0,00041	0,00049	0,00077	0,00044
Mn	0,01	0,00250	0,00309	0,00204	0,00122
Fe	0,1	0,04782	0,12809	0,08674	0,03915
Co	0,005	0,00008	0,00010	0,00011	0,00013
Ni	0,008	0,00066	0,00071	0,00072	0,00075
Cu	0,001	0,00391	0,00298	0,00346	0,00360
Zn	0,01	0,05084	0,02987	0,03214	0,04594
As	0,002	0,00060	0,00068	0,00083	0,00078
Mo	0,001	0,00097	0,00064	0,00061	0,00076
Cd	0,001	0,00062	0,00036	0,00033	0,00029
Pb	0,006	0,00059	0,00046	0,00057	0,00016

Үлбі өзенінің жер үсті суларының химиялық талдау нәтижелері зерттеу аймағындағы судың гидрохимиялық құрамы табиғи су жинау факторлары мен қалалық және өнеркәсіптік аймақтарда артатын антропогендік жүктемелердің біріккен әсерінен қалыптасатынын көрсетті. Тұрмыстық, ауыз су және балық шаруашылығы мақсаттарында пайдаланылатын су айдындары үшін шекті рұқсат етілген концентрациялармен (ШРК) зерттеу нәтижесінде алынған концентрацияларды салыстыру өзеннің экологиялық жағдайына жағымсыз әсер ететін элементтерді анықтауға мүмкіндік берді. Барлық телімдердегі сілтілі және сілтілік жер элементтерінің (Na, K, Ca, Mg) мөлшері тиісті ШРК-дан айтарлықтай төмен және өзеннің бойлық профилі бойынша салыстырмалы түрде біркелкі таралуымен сипатталады. Натрий концентрациясы 3,09-дан 4,89 мг/дм^3-ге дейін, магний 3,02-ден 4,19 мг/дм^3-ге дейін, кальций 5,92-ден 8,31 мг/дм^3-ге дейін және калий 0,67-ден 0,85 мг/дм^3-ге дейін өзгерген. Алынған мәндер негізінен табиғи гидрохимиялық фонды көрсетеді және айтарлықтай антропогендік әсерді көрсетпейді. Суда бериллий мен бор төмен концентрацияда кездеседі, бұл белгіленген стандарттардан бірнеше есе төмен. Бериллийдің мөлшері 0,00001-0,00003 мг/дм^3, ШРК мәні 0,0001 мг/дм^3 құраса, ал бордың мәні рұқсат етілген деңгейі 0,5 мг/дм^3 болса, ал зертелінген су сынамасында 0,0078-ден 0,0105 мг/дм^3-ге дейін аралықта болды. Бұл элементтердің таралуындағы кеңістіктік заңдылықтар анықталмағандығы, оларды су ортасының фондық компоненттері ретінде жіктеуге мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, бірқатар элементтер үшін ШРК мәнінен тұрақты түрде асып кеткен немесе стандартты мәндерге жақын концентрациялар тіркелді. Зерттелген барлық телімдерде фосфор концентрациясының ШРК мәнінен асып кетуі байқалды: норма бойынша 0,1 мг/дм^3 болғанда, оның мөлшері 0,115...0,119 мг/дм^3 құрады. Кенттенген аймақтардың коммуналды-тұрмыстық және жер үсті сулармен тұрақты түсу сипаты фосфор концентрациясының айқын көрсетілген бойлық градиентінің болмауымен түсіндіріледі. Алюминий концентрациясы айқын бейнеленген кеңістіктік әртектілікпен көрсетілген. Өзеннің жоғары және төмен телімдерінде Al мөлшері (0,030...0,031 мг/дм^3) ШРК-дан аспайды, бірақ қала шетінде және өнеркәсіптік аймақтың шекарасында

нормалық мәннен 2-3 есеге (0,128 мг/дм^3 дейін) артқаны тіркелді. Мұндай динамика ластану көздеріне алюминийдің негізінен қалқыма пішінде түсуімен және алыстаған сайын оның біртіндеп тұндырылуы негізгі шараларының бірі ретінде түсіндіріледі. Темірге де осы үлгі тән. Өзеннің қалалық бөлігінде ең жоғары Fe концентрациясы (0,128 мг/дм^3) анықталды, онда ол ШРК-дан (0,1 мг/дм^3) асып түсті. Ағыс бойынша темір мөлшері 0,039 мг/дм^3 дейін төмендейді, бұл қалқымалы қатты заттардың шөгінділерінің пайда болуы мен өзен ағынының сұйытылуын көрсетеді.



Сурет 3. *Бойлық профиль бойындағы Үлбі өзенінің жер үсті суларындағы элементтер концентрациясының ШРК мәндеріне қатынасы*

Ауыр металдардың ішінде мыс пен мырыш бойынша ең жағымсыз жағдай байқалды. Барлық сынама алу нүктелеріндегі мыс концентрациясы ШРК-дан (0,001 мг/дм^3) 3...4 есе асып (3 сурет), 0,0030...0,0039 мг/дм^3 құрады. Мыс концентрациясының артуы тұрақты және зерттеу аймағының барлық жерінде сақталады, бұл су ортасына мыстың үздіксіз түсетін көздерінің бар екенін көрсетеді. Мырыш сонымен қатар ШРК-ның тұрақты асып кетуімен (0,01 мг/дм^3) сипатталады, жоғарғы ағыс бөлігінде 0,0508 мг/л және төменгі ағыс бөлігінде 0,0459 мг/дм^3 ең жоғары мәндеріне жетеді. Бұл таралу ластанудың транзиттік сипатын және Zn-тың айтарлықтай қашықтыққа тасымалдау қабілетін көрсетеді. Хром, марганец, кобальт және никель концентрациялары барлық телімдерде нормалық мәндерден төмен екендігін көрсетті, алайда, Mn және Ni үшін қалалық және өнеркәсіптік аймақтарда орташа өсім байқалады, бұл ластанудың маңызды деңгейіне жетпей, антропогендік жүктеменің әсерін көрсетеді. Мышьяк деңгейі рұқсат етілген шекті концентрациядан (ШРК) аспайды, бірақ та өнеркәсіптік әсер ету аймағында максималды фондардың жоғары мәндерін байқауға болады. Молибден деңгейі нормативтік шектерге жақын, бұл антропогендік ластануды көрсетуі мүмкін, ал кадмий мен қорғасынның концентрациясы рұқсат етілген шекті деңгейден айтарлықтай төмен.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер Үлбі өзенінің гидрохимиялық жағдайы табиғи фондық құрам мен тұрақты антропогендік әсерлердің үйлесімімен анықталатынын көрсетеді, бұл фосфор, мыс және мырыштың артық деңгейінде, сондай-ақ алюминий мен темірдің жергілікті ауытқуларында айқын көрінеді. Ластаушы заттардың кеңістіктік таралуы қалалық және өнеркәсіптік аймақтардың су сапасын қалыптастырудағы негізгі рөлін көрсетеді және еріген және қалқымалы элементтерді ескере отырып, су ағынының экологиялық жағдайын кешенді бағалау қажеттілігін растайды.

Қалалық және өнеркәсіптік аймақтардағы алюминий мен темірдің жоғары концентрациясы Үлбі өзенінің бойлық профилі бойынша су лайлылығының өзгеруімен тығыз байланысты. Орташа лайлылық мәндері өзеннің жоғарғы ағысындағы 2,23 NTU-дан өнеркәсіптік аймақтан төмен максимум 4,23 NTU-ға дейін артады, содан кейін олар

Ертіс өзеніне құяр алдындағы төменгі ағысында 3,13 NTU-ға дейін аздап төмендейді. Бұл үрдіс кенттенген аймақ пен өнеркәсіптік аймақта қалқымалы бөлшектер ағынының артуын көрсетеді. Лайлылықтың жоғарылауы қалқыма және коллоидты түрдегі, ең алдымен алюминий, темір, мырыш және мыс түріндегі миграцияға бейім элементтер деңгейінің жоғарылауымен қатар жүреді. Al және Fe ең жоғары концентрациялары дәл ең жоғары лайлылық бар телімде тіркелді, бұл қалқыма бөлшектердің судың химиялық құрамын қалыптастырудағы басым рөлін көрсетеді. Бұл тау-кен және металлургиялық аймақтардағы өзендердегі аталған элементтердің айтарлықтай бөлігі ұсақ дисперсті минералды және жасанды бөлшектермен байланысты екендігімен сәйкес келеді. Зерттеу телімнің ортаңғы және төменгі бөліктеріндегі су лайлылығының жоғарылауы ауыр металдардың, әсіресе Cu және Zn-нің сорбциясы мен тасымалдануын жеңілдетеді, олардың концентрациясы барлық сынама алу нүктелерінде рұқсат етілген ең жоғары концентрациядан үнемі асып түседі. Бұл элементтердің жоғары концентрациясының сақталуы, тіпті төменгі ағыстағы лайлылықтың ішінара төмендеуімен де, қалқыма заттарды тасымалдауды да, еріген иондардың болуын да қамтитын біріктірілген ластану механизмін көрсетеді. Ертіске қосылғанға дейін өзеннің төменгі ағысындағы лайлылықтың төмендеуі алюминий мен темір концентрациясының ШРК-дан төмен деңгейге дейін төмендеуімен қатар жүреді, бұл қалқыма заттардың шөгінділерінің пайда болуын және өзен ағынының сұйылтылуын көрсетеді. Дегенмен, мыс пен мырыш үшін мұндай төмендеу байқалмайды, бұл олардың жоғары миграциялық қабілеті мен су фазасындағы тұрақтылығын көрсетеді.

Сонымен, судың лайлылығы Үлбі өзеніндегі ластаушы заттардың қайта таралу процессі мен антропогенді әсерлердің қарқындылығын бейнелейтін маңызды интегралды көрсеткіш болып табылады. Судың химиялық құрамы мен лайлылықты бірге талдау элементтердің миграция формасы мен көздерін толық түсінік берсе, сонымен бірге қаланың, өнеркәсіптік аймақтың және Ертіс өзенінің сағасының маңына таяу жоғары экологиялық жүктемеге ие телімдерді анықтауға мүмкіндік береді.

Бірқатар микроэлементтер үшін ШРК стандарттарының болмауына байланысты олардың кеңістіктік өзгергіштігі Үлбі өзенінің жоғарғы ағысында, қала құрылыстары орналасқан №1 нүктеге қатысты салыстырмалы талдау арқылы бағаланды, ол жергілікті эталондық нүкте ретінде пайдаланылды. Бұл тәсіл өзеннің бойлық профилі бойынша элементтер концентрациясындағы техногендік шартталған ауытқуларды анықтауға мүмкіндік береді (кесте 3).

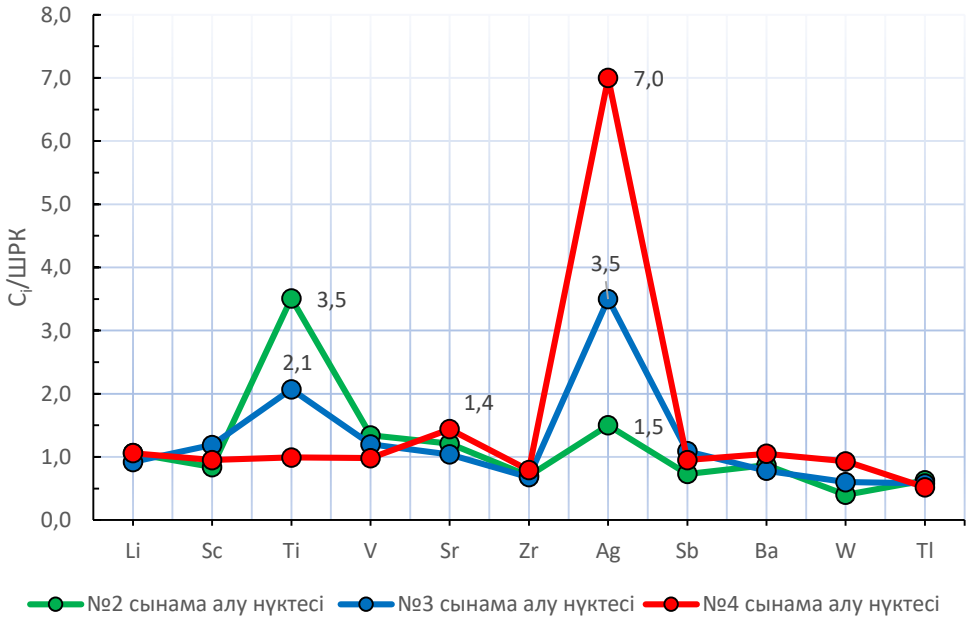
Кесте 3

Үлбі өзенінің жер үсті суларында салыстырмалы түрде фондық телімге (№1) қатысты ШРК бекітілмеген элементтердің концентрациясы

Элементтер	Сынама алынған нүктелер			
	№1 шартты жергілікті фон	№2	№3	№4
	С, мкг/дм^3			
Li	2,37	2,51	2,19	2,51
Sc	0,57	0,48	0,68	0,54
Ti	0,76	2,67	1,57	0,75
V	0,82	1,10	0,98	0,80
Sr	131,69	158,73	136,50	189,92
Zr	0,47	0,33	0,32	0,37
Ag	0,02	0,03	0,07	0,14
Sb	0,22	0,16	0,24	0,21
Ba	21,25	18,45	16,58	22,35
W	0,15	0,06	0,09	0,14
Tl	0,64	0,40	0,37	0,33
Bi	0,00	0,00	0,01	0,01

Литий фондық деңгейге жақын тұрақты концентрациялармен (2,19...2,51 мкг/дм^3) сипатталады, бұл негізінен табиғи көзді көрсетеді. Скандийдің мөлшері де аз өзгереді, №3

нүктеде фондық деңгейден шамамен 20 %-ға жоғары, бұл, қалқыма заттардың жергілікті үлесіне байланысты болуы мүмкін. Титан мен ванадий ең айқын кеңістіктік әртектілікті көрсетеді. Қала маңындағы (№ 2) Ti концентрациясы фондық мәннен ~3,5 есеге артқан, ал төменірек өнеркәсіптік аймақта (№ 3) 2 есеге жоғары, бұл жұқа дисперсті минералды және техногенді материалдардың түсуін растайды. Сәйкесінше, ванадий үшін қала аймағының маңында (1,3 есеге дейін) салыстырмалы фонның максималды артуы байқалса, азырақ деңгейде қарама-қарсы үрдіспен сипатталады. Стронций концентрациясының тұрақты артуы төменгі ағыс бойынша көрсетеді, яғни № 4 нүктеде (189,92 мкг/дм^3) жоғары мән фондық деңгейден шамамен 1,4 есе жоғары (4 сурет) екенін байқауға болады. Бұл су айдынының литогеохимиялық ерекшелігін және ақаба сулар мен құйылған сулардың есебінен жинақтаушы эффектіні көрсетеді. Цирконий үшін төмендегі барлық телімдер үшін, фондық концентрациямен салыстырғанда төмендетілген концентрациямен сипатталынады, бұл айтарлықтай антропогендік көздердің жоқтығын көрсетеді. Күмістің таралуы ерекше назар аударарлық, концентрациялар төменгі ағыста үнемі артқанын байқауға болады, ал төменгі ағыста фондық мәндерден 7 есеге (4 сурет) артқан. Бұл үрдіс өнеркәсіптік көздермен және су ортасындағы күмістің жоғары миграциялық қабілетімен байланысты болуы мүмкін. Сурьма, барий және вольфрам концентрацияларының өзгеруі тұрақты үрдістерді көрсетпейді және әдетте фондық мәндерге жақын ауытқиды, бұл олардың концентрациясына антропогендік әсердің шектеулі екенін көрсетеді. Таллий концентрациясы төменгі ағыста тұрақты түрде төмендейді (фонға қатысты 1,6...2 есе), бұл сүйылту және сорбциялық процестерге байланысты болуы мүмкін. Висмут іздік мөлшерде болады және тек өнеркәсіптік аймақтан төмен басталып анықталынды, бірақ оның абсолютті концентрациясы өте төмен болып қала береді.



Сурет 4. *Бойлық профиль бойындағы Үлбі өзенінің жер үсті суларындағы шартты жергілікті Фон мәндеріне элементтер концентрациясының қатынасы*

Жалпы алғанда, фондық жағдайға қатысты салыстырмалы талдау көптеген микроэлементтер үшін концентрацияның өзгеруі орташа екенін, ал титан, ванадий және әсіресе күміс кенттелген және өнеркәсіптік аймақтың әсерін анық екенін көрсетеді. Өзеннің төменгі ағысындағы су химиясының қалыптасуы жинақталған антропогендік әсер жағдайында жүреді, бұл Ертіске элементтердің еріген және қалқымалы түрлерінің

ағып, түсетінін анықтайды. Белгіленген ШРК мәндері жоқ элементтер үшін концентрациялардың кеңістіктік өзгергіштігі Үлбі өзенінің жоғарғы ағысында орналасқан, жергілікті фон ретінде қабылданған № 1 нүктеге қатысты бағаланды. Бұл тәсіл ағынның физикалық-химиялық сипаттамаларының, ең алдымен лайлылығының өзгеруін ескере отырып, судың химиялық құрамына антропогендік факторлардың әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

Су лайлылығының жоғары ағыс бөлігіндегі 2,23 NTU-дан өнеркәсіптік аймақтан төменірек максимум 4,23 NTU-ға дейін (№ 3 нүкте) артуы қатты фазамен байланысты бірнеше элементтердің концентрациясының артуымен қатар жүретіні анықталды. Титан ең маңыздысы: оның №2 нүктедегі мөлшері фон деңгейімен салыстырғанда 3,5 еседен астам артады, ал № 3 нүктеде ол екі еседен астам жоғары болып қалады. Ванадий үшін де осындай байланыс байқалады, оның концентрациясы лайлылығы жоғары аймақтарда 1,3 есеге дейін артады, бұл оның негізінен қалқыма бөлшектердің құрамында тасымалданатынын көрсетеді. Скандий сонымен қатар ең жоғары лайлылық аймағында (№ 3 нүкте) концентрацияның артуын көрсетеді, бұл фондық деңгейден шамамен 20 %-ға асып түседі, бұл оның ұсақ дисперсті минералды фракциямен байланысын растайды. Литий лайлылықтың өзгеруімен концентрацияның шамалы ауытқуларымен сипатталады, бұл оның негізінен еріген түрдегі миграциясы мен қалқыма заттардың құрамына әлсіз тәуелді екенін көрсетеді. Стронций лайлылықтың 3,13 NTU-ға дейін төмендеуіне қарамастан, ағыс бойымен концентрацияның тұрақты өсуін көрсетеді, №4 нүктеде максималды мәндерге жетеді. Бұл еріген формалардың жетекші рөлін және элементтің ағынының кумулятивтік сипатын көрсетеді, қалқыма заттармен тікелей байланысты емес. Керісінше, цирконий фондық деңгейлермен салыстырғанда барлық жерлерде төмен концентрациямен сипатталады, бұл оның төмен қозғалғыштығын және қалқыма фазадағы шектеулі ағынын көрсетеді. Күміс лайлылықпен айқын оң байланыс көрсетеді: оның концентрациясы жоғарғы бөліктен төменгі бөлікке қарай үнемі артып, 4-ші нүктеде максимумға жетеді, мұндағы күмістің мөлшері фондық мәннен 7 есе асады. Бұл антропогендік әсерге де, қалқыма бөлшектерге Ag сіңірілуіне де байланысты болуы мүмкін. Сурьма, барий және вольфрам үшін лайлылыққа байланысты айқын тәуелділік анықталған жоқ; олардың концентрациясы фондық мәндерге жуық ауытқиды, бұл антропогендік әсердің шектеулі екенін көрсетеді.

Таллий кері тәуелділік көрсетеді: лайлылық артқан сайын оның концентрациясы фондық деңгейлерге қатысты 1,6...2 есе төмендейді, бұл элементтің қатты фазамен бірге сорбциясына және кейінгі тұнбаға түсуіне байланысты болуы мүмкін. Висмут іздік мөлшерде анықталды және тек лайлылығы жоғары аймақтарда ғана кездеседі, осыған байланысты оның абсолютті концентрациясы өте төмен болып қалады.

Осылайша, алынған деректер су лайлылығының кеңістіктік ауытқулары Үлбі өзеніндегі іздік элементтердің таралуын басқаратын негізгі факторлардың бірі екенін көрсетеді. Қалқымалы түрде миграцияға бейім элементтер (Ti, V, Sc, Ag) кенттенген және өнеркәсіптік аймақтардың әсерін айқын көрсетеді, ал негізінен еріген күйдегі элементтер (Li, Sr) тегіс бойлықтың бойымен таралады және Ертістің химиялық ағындысын қалыптастырады.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Судың химиялық құрамын талдау барысында көптеген элементтердің ШРК шегінде екенін көрсетті. Алюминий (Al), темір (Fe) және мырыш (Zn) үшін нормадан артуы тіркелді: Al концентрациясы орташа ағыста 0,128 мг/дм^3 жетеді (0,04 мг/дм^3 ШРК-дан ~3,2 есе артық); Fe - орта ағысында 0,128 мг/дм^3 (0,1 мг/дм^3 ШРК-дан ~1,3 есе артық); Zn - жоғары ағысында 0,0508 мг/дм^3 (0,01 мг/дм^3 ШРК-дан ~5,1 есе артық) және төменгі ағысында 0,0459 мг/дм^3 (ШРК-дан ~4,6 есе артық). Al және Fe ең жоғары концентрациясы өзеннің орташа ағысына сәйкес келеді, бұл Өскемен қаласының кенттенген және өнеркәсіптік аймақтарынан ақаба сулар мен қалқыма бөлшектердің тасымалдануымен байланысты.

Еріген элементтердің өзен ағысы бойынша кеңістіктік таралуы негізінен телімнің жоғары бөлігінен төменгі бөлігіне дейін концентрацияның төмендеу тенденциясымен сипатталады. Бұл өзен суларының сұйылу процессі мен қалқыма заттардың біртіндеп тұнуымен байланысты. Сонымен бірге Sr, Li, Ti, V және Ag үшін төменгі телімде концентрацияның салыстырмалы түрде артуы байқалады, бұл өнеркәсіптік сулардың түсуімен және қалқыма фазада қауымдасқан элементтердің миграциясымен байланысты болуы мүмкін.

Жер үсті суларының лайлылығы жоғары ағыста 2,23 NTU диапазонынан максималды мәнге дейін 4,23 NTU өнеркәсіптік аймақта, одан әрі Ертіс өзеніне түсер алдында 3,13 NTU дейін төмендей отырып, өзгерген. Лайлылықтың артуы қалқыма бөлшектерде сорбциялану мүмкіндігі бар элементтер (Fe, Al, Ti, Zn) концентрациясының артуымен жүреді, бұл судың гидрохимиялық құрамының қатты фазаның тасымалдану процессімен тығыз байланыста екенін көрсетеді.

Өзеннің жоғары теліміндегі элементтердің салыстырмалы талдауы кезінде ШРК (Li, Sc, Ti, V, Sr, Zr, Ag, Sb, Ba, W, Tl, Bi) нормаларының болмауы, әсіресе ағыс бойынша тұрақты таралуы кезінде аталған тұстаманы шартты фондық ретінде қарастыруға мүмкіндік береді. Әсіресе айқын ауытқулар Sr мен Ag үшін орташа және төменгі ағыстарда байқалды, бұл кенттенген және өнеркәсіптік аймақтардың әсерінен екендігін көрсетеді.

Zn, Al және Fe антропогенді жүктеменің индикаторы болып табылады: олардың концентрациялары лайлылықтың артуымен өзара байланыстылықты көрсетеді және қалалық және өнерәсіптік аймақтың жергілікті әсерін көрсетеді. Мырыш өзеннің төменгі теліміне дейін жоғары мәнді сақтай отырып, ластану сипатының транзитін көрсетеді

Гидрохимиялық көрсеткіштер мен лайлылық бойынша мәліметтер қалалық және өнеркәсіптік аймақтардың шекарасында антропогенді әсердің өзеннің орташа ағысының аса айқын көрсетілген қалқыма бөлшектердің мөлшерінің артуымен және жекеленген металдарының концентрациясының жоғарлауымен байқалады

Алынған деректер гидрохимиялық көрсеткіштер мен судың лайлылығын техногенді жүктеменің индикаторы ретінде кешенді талдаудың ақпараттық құндылығын растайды. Нәтижелер Үлбі өзенінің Ертіске құяр телімінде экологиялық мониторинг стратегияларын әзірлеу мен одан әрі ластану бағасын жасаудың тиімді әдістерін негіздейді.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – НВС, ГКД; деректерді басқару – НВС, ГКД, ОАП, ЖКИ, ААП, ИВД; Ресми талдау – НВС, ГКД; Әдістеме – НВС, ГКД, ОАП; Визуализация – НВС, ААП; Бастапқы жобаны жазу – НВС, ГКД; Шолу жазу және редакциялау – НВС, ГКД, ОАП, ЖКИ, ААП, ИВД.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Бұл мақала BR24992854 «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия саласының тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін бәсекеге қабілетті ғылыми-негізделген технологияларды әзірлеу және іске асыру» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру жобасы бойынша орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Bilotta G.S., Brazier R.E. (2008) Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water Research, Vol. 42, pp. 2849–2861. https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018
2. Horowitz A.J. (2008) Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element fluxes. Hydrological Processes, Vol. 22, pp. 4213–4223. https://doi.org/10.1002/hyp.7117
3. Förstner U., Wittmann G.T.W. (2012) Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69385-4
4. Singh B.P., Varshney P., Chourasiya S., Vidyarthi V.K. (2025) Assessment of physicochemical properties and heavy metal contamination in riverine system and their impacts on public health. Discover Water, Vol. 5, pp. 50. https://doi.org/10.1007/s43832-025-00243-9
5. Liu X., Sheng Y., Liu Q., Li Z. (2024) Suspended Particulate Matter Affects the Distribution and Migration of Heavy Metals in the Yellow River. Science of the Total Environment, 2024, Vol. 912, pp.169537. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169537
6. Fan J., Yang J., Cheng F., Zhang S. (2023) The Source, Distribution, and Environmental Effects of Suspended Particulate Matter in the Yangtze River System. Water. Vol.15, pp. 3429. https://doi.org/10.3390/w15193429

7. Krickov I.V., Lim A.G., Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Dara O.M., Kolesnichenko Y., Zinchenko D.O., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. (2023) Seasonal Variations of Mineralogical and Chemical Composition of Particulate Matter in a Large Boreal River and Its Tributaries. Water, Vol. 15, pp. 633. https://doi.org/10.3390/w15040633
8. Nadmitov B., Hong S., In Kang S., Chu J.M., Gomboev B., Janchivdorj L., Lee C-H., Khim J.S. (2015) Large-scale monitoring and assessment of metal contamination in surface water of the Selenga River Basin (2007–2009). Environmental Science and Pollution Research, Vol. 22, pp. 2856–2867. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3564-6
9. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. (2020) River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin: Part I-Spatio-Temporal Patterns of Dissolved and Suspended Metals. Water, Vol. 12(8), pp. 2137. https://doi.org/10.3390/w12082137
10. Shiretorova V.G., Nikitina E.P., Nimbueva N.B., Bazarsadueva S.V., Budaeva O.D., Pintaeva E.Ts., Taraskin V.V., Radnaeva L.D. (2026) Dissolved metals in the Selenga River delta (Lake Baikal) during a high-water period: Spatiotemporal patterns, pollution levels, and environmental risk assessment. Journal of Great Lakes Research, pp.102776. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2026.102776
11. Mussakulkyzy A., Opp C., Amirgaliev N., Madibekov A., Ismukhanova L., Zhadi A. (2025) Transmission of heavy metals in river water and self-purification capacity of the Ile River. Applied Sciences, Vol. 15, No. 12, pp. 6548. https://doi.org/10.3390/app15126548
12. Sultangazieva G.S. (2024) Study of chemical pollution level in water resources of Almaty city. Reports of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Vol. 2, pp. 152–166. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.286
13. Романова С.М., Крупа Е.Г., Серикова А.С., Алексеев С.Н. (2024) Современная гидрохимическая характеристика водных объектов казахстанской части бассейна р. Ертис. Гидрометеорология және экология, Т.1, С. 121-132. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-121-132
14. Krupa E., Romanova S., Serikova A., Shakhvorostova L. (2024). A Comprehensive Assessment of the Ecological State of the Transboundary Irtysh River (Kazakhstan, Central Asia). Water, Vol. 16(7), pp. 973. https://doi.org/10.3390/w16070973
15. Aidarkhanova A., Larionova N., Tashekova A., Dyussembayeva M., Mamyrbayeva A., Timonova L., Shakenov Ye., Mulikova A., Aidarkhanov A. (2024) Assessment of the radionuclide and chemical composition of the Irtysh River water at the Republic of Kazakhstan territory. RSC Advances, Vol. 14, pp. 26208–26218. https://doi.org/10.1039/D4RA02557A
16. Seraya N., Daumova G., Petrova O., Garcia-Mira R., Polyakova A. (2025) Ecological Status of the Small Rivers of the East Kazakhstan Region. Sustainability, Vol. 17, pp. 6525. https://doi.org/10.3390/su17146525
17. Zhalmagambetova U., Assanov D., Neftissov A., Biloshchytskyi A., Radelyuk I. (2024). Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtysh River Basin (Kazakhstan). Water, Vol. 16(15), pp. 2203. https://doi.org/10.3390/w16152203
18. Мамырбекова Г., Қалыбекова Е., Анапьянова С., Колпакова В., Еремеева Ю., Шевцов М. (2024). Ертіс өзені су сапасына Үлбі саласының әсері. Izdenister Natigeler, т. 2 (102), 341–351 б. https://doi.org/10.37884/2-2024/33
19. Dyussembayeva M., Tashekova A., Shakenov Y., Kolbin V., Nurgaisinova N., Mamyrbayeva A., Abisheva M. (2025) Distribution characteristics and assessment of the content of heavy metals in small rivers of the Ulba riv. basin in the mining regions of East Kazakhstan. RSC Advances, Vol. 15, No. 14, pp. 11034–11044. https://doi.org/10.1039/d5ra00801h
20. Rakhymberdina M., Daumova G., Apshikur B., Kolpakova V. (2024) Integrated chemical-geoecological monitoring of the Yertis River. Engineered Science, Vol. 32, pp. 1328. https://doi.org/10.30919/es1328
21. Apshikur B., Rakhymberdina M., Levin E. (2025) Integrated research of the transboundary Yertis River. ES Energy & Environment, Vol. 27, pp. 1362. https://doi.org/10.30919/esee1362
22. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. А.Д. Семенова. - Л., Гидрометеоиздат, 1977 - 541 с.
23. СТ РК ИСО 17294-2-2006. Качество воды. Применение масс-спектрометриис индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) Часть 2: Определение 62 элементов. https://prg.kz/document/?doc_id=30371803&pos=22;274
24. EN ISO 7027-1-2016 Water quality – Determina tion of turbidity – Part 1: Quantitative meth ods (ISO 7027-1:2016), Available online: https://www.iso. org/standard/62801.html
25. Об утверждении единой системы классификации качества воды в поверхностных водных объектах и (или) их частях Приказ Министра водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан от 4 июня 2025 года № 111-НҚ, https://adilet.zan.kz/rus/docs/G25MA000111

REFERENCES

1. Bilotta G.S., Brazier R.E. (2008) Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. Water Research, Vol. 42, pp. 2849–2861. https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018
2. Horowitz A.J. (2008) Determining annual suspended sediment and sediment-associated trace element fluxes. Hydrological Processes, Vol. 22, pp. 4213–4223. https://doi.org/10.1002/hyp.7117
3. Förstner U., Wittmann G.T.W. (2012) Metal Pollution in the Aquatic Environment. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69385-4
4. Singh B.P., Varshney P., Chourasiya S., Vidyarthi V.K. (2025) Assessment of physicochemical properties and heavy metal contamination in riverine system and their impacts on public health. Discover Water, Vol. 5, pp. 50. https://doi.org/10.1007/s43832-025-00243-9
5. Liu X., Sheng Y., Liu Q., Li Z. (2024) Suspended Particulate Matter Affects the Distribution and Migration of Heavy Metals in the Yellow River. Science of the Total Environment, 2024, Vol. 912, pp.169537. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169537
6. Fan J., Yang J., Cheng F., Zhang S. (2023) The Source, Distribution, and Environmental Effects of Suspended Particulate Matter in the Yangtze River System. Water. Vol.15, pp. 3429. https://doi.org/10.3390/w15193429
7. Krickov I.V., Lim A.G., Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Dara O.M., Kolesnichenko Y., Zinchenko D.O., Vorobyev S.N., Pokrovsky O.S. (2023) Seasonal Variations of Mineralogical and Chemical Composition of Particulate Matter in a Large Boreal River and Its Tributaries. Water, Vol. 15, pp. 633. https://doi.org/10.3390/w15040633
8. Nadmitov B., Hong S., In Kang S., Chu J.M., Gomboev B., Janchivdorj L., Lee C-H., Khim J.S. (2015) Large-scale monitoring and assessment of metal contamination in surface water of the Selenga River Basin (2007–2009). Environmental Science and Pollution Research, Vol. 22, pp. 2856–2867. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3564-6

9. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Kosheleva N., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. (2020) River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin: Part I-Spatio-Temporal Patterns of Dissolved and Suspended Metals. Water, Vol. 12(8), pp. 2137. https://doi.org/10.3390/w12082137
10. Shiretorova V.G., Nikitina E.P., Nimbueva N.B., Bazarsadueva S.V., Budaeva O.D., Pintaeva E.Ts., Taraskin V.V., Radnaeva L.D. (2026) Dissolved metals in the Selenga River delta (Lake Baikal) during a high-water period: Spatiotemporal patterns, pollution levels, and environmental risk assessment. Journal of Great Lakes Research, pp.102776. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2026.102776
11. Mussakulkyzy A., Opp C., Amirgaliev N., Madibekov A., Ismukhanova L., Zhadi A. (2025) Transmission of heavy metals in river water and self-purification capacity of the Ile River. Applied Sciences, Vol. 15, No. 12, pp. 6548. https://doi.org/10.3390/app15126548
12. Sultangazieva G.S. (2024) Study of chemical pollution level in water resources of Almaty city. Reports of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Vol. 2, pp. 152–166. https://doi.org/10.32014/2024.2518-1483.286
13. Romanova S.M., Krupa E.G., Serikova A.S., Alekseev S.N. (2024) Sovremennaya gidrokhimicheskaya kharakteristika vodnykh ob"ektov kazakhstanskoi chasti basseina r. Ertis. Gidrometeorologiya zhane ekologiya, T.1, S. 121-132. https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-112-1-121-132. (In Russian).
14. Krupa E., Romanova S., Serikova A., Shakhvorostova L. (2024). A Comprehensive Assessment of the Ecological State of the Transboundary Irtysh River (Kazakhstan, Central Asia). Water, Vol. 16(7), pp. 973. https://doi.org/10.3390/w16070973
15. Aidarkhanova A., Larionova N., Tashekova A., Dyussembayeva M., Mamyrbayeva A., Timonova L., Shakenov Ye., Mulikova A., Aidarkhanov A. (2024) Assessment of the radionuclide and chemical composition of the Irtysh River water at the Republic of Kazakhstan territory. RSC Advances, Vol. 14, pp. 26208–26218. https://doi.org/10.1039/D4RA02557A
16. Seraya N., Daumova G., Petrova O., Garcia-Mira R., Polyakova A. (2025) Ecological Status of the Small Rivers of the East Kazakhstan Region. Sustainability, Vol. 17, pp. 6525. https://doi.org/10.3390/su17146525
17. Zhalmagambetova U., Assanov D., Neftissov A., Biloshchytskyi A., Radelyuk I. (2024). Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtysh River Basin (Kazakhstan). Water, Vol. 16(15), pp. 2203. https://doi.org/10.3390/w16152203
18. Mamyrbekova G., Qalybekova E., Anäpänova S., Kolpakova V., Eremeeva İu., Şevsov M. (2024). Ertıs özenı su sapasyna Ülbı salasynyñ äserı. Izdenister Natigeler, t. 2 (102), 341–351 b. https://doi.org/10.37884/2-2024/33. (In Kazakh).
19. Dyussembayeva M., Tashekova A., Shakenov Y., Kolbin V., Nurgaisinova N., Mamyrbayeva A., Abisheva M. (2025) Distribution characteristics and assessment of the content of heavy metals in small rivers of the Ulba riv. basin in the mining regions of East Kazakhstan. RSC Advances, Vol. 15, No. 14, pp. 11034–11044. https://doi.org/10.1039/d5ra00801h
20. Rakhymberdina M., Daumova G., Apshikur B., Kolpakova V. (2024) Integrated chemical-geoecological monitoring of the Yertis River. Engineered Science, Vol. 32, pp. 1328. https://doi.org/10.30919/es1328
21. Apshikur B., Rakhymberdina M., Levin E. (2025) Integrated research of the transboundary Yertis River. ES Energy & Environment, Vol. 27, pp. 1362. https://doi.org/10.30919/esee1362
22. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi / pod red. A.D. Semenova. - L., Gidrometeoizdat, 1977 - 541 s. (In Russian).
23. ST RK ISO 17294-2-2006. Kachestvo vody. Primenenie mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoi plazmoi (ISP-MS) Chast' 2: Opredelenie 62 elementov. https://prg.kz/document/?doc_id=30371803&pos=22;274. (In Russian).
24. EN ISO 7027-1-2016 Water quality – Determina tion of turbidity – Part 1: Quantitative meth ods (ISO 7027-1:2016), Available online: https://www.iso. org/standard/62801.html
25. Ob utverzhdenii edinoi sistemy klassifikatsii kachestva vody v poverkhnostnykh vodnykh ob"ektakh i (ili) ikh chastyakh Prikaz Ministra vodnykh resursov i irrigatsii Respubliki Kazakhstan ot 4 iyunya 2025 goda № 111- NQ, https://adilet.zan.kz/rus/docs/G25MA000111. (In Russian).

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МУТНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД РЕКИ УЛЬБА В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Наталья В. Серая к.х.н., профессор, Гульжан К. Даумова* к.т.н., профессор, Ольга А. Петрова к.т.н., ассоциированный профессор, Жанат К. Идришева к.т.н., профессор, Арина А. Полякова, Игорь А. Денисов

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; NSeraya@edu.ektu.kz (НВС), GDaumova@edu.ektu.kz (ГКД), OPetrova@edu.ektu.kz (ОАП), Zhidrisheva@edu.ektu.kz (ЖКИ), APolyakova@edu.ektu.kz (ААП), IDenisov@edu.ektu.kz (ИВД)

*Автор корреспондент: Гульжан К. Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Река Ульба; река Ертис; гидрохимия; мутность; поверхностные воды; техногенное воздействие; тяжелые металлы; экологический мониторинг

АБСТРАКТ

Проведено исследование гидрохимического состава и мутности поверхностных вод реки Ульба в условиях воздействия городской и промышленной зоны г. Усть-Каменогорска. Отобраны пробы на четырёх контрольных участках: верхнем течении выше города, среднем течении в городской черте, ниже промышленной зоны и на нижнем участке перед впадением в Ертис. Определены концентрации широкого спектра химических элементов, включая Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb и другие,

По статье:
Получено: 20.03.2026
Пересмотрено: 02.06.2026
Принято: 25.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

а также измерена мутность воды. Выявлено, что концентрации большинства элементов находятся в пределах предельно допустимых значений, при этом локальное превышение зафиксировано для Al, Fe, Sr и Ag в среднем и нижнем течении, что связано с антропогенным воздействием промышленных предприятий и городского стока. Мутность варьировала от 2,23 до 4,23 NTU, демонстрируя прямую связь с повышением содержания взвешенных частиц и металлов. Результаты исследования подтверждают информативность комплексного мониторинга гидрохимических показателей и мутности как индикаторов техногенной нагрузки, что позволяет оценивать экологическое состояние рек в зоне промышленного воздействия и формировать основу для дальнейшего экологического мониторинга.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS AND TURBIDITY OF THE SURFACE WATERS OF THE ULBA RIVER UNDER INDUSTRIAL IMPACT

Natalya V. Seraya Candidate of Chemical Sciences, professor, Gulzhan K. Daumova* Candidate of Technical Sciences, professor, Olga A. Petrova Candidate of Technical Sciences, associate professor, Zhanat K. Idrisheva Candidate of Technical Sciences, professor, Arina Polyakova, Igor Denisov

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; NSeraya@edu.ektu.kz, GDaumova@edu.ektu.kz, OPetrova@edu.ektu.kz , Zhidrisheva@edu.ektu.kz , APolyakova@edu.ektu.kz, IDenisov@edu.ektu.kz
*Author correspondent: Gulzhan Daumova, GDaumova@edu.ektu.kz

KEY WORDS

Ulba River; Yertis River; hydrochemistry; turbidity; surface waters; anthropogenic impact; heavy metals; environmental monitoring

About article:
Received: 20.03.2026
Revised: 02.06.2026
Accepted: 25.08.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

A study was conducted to assess the hydrochemical composition and turbidity of the surface waters of the Ulba River under the influence of urban and industrial activities in Ust-Kamenogorsk. Samples were collected at four monitoring sites: the upper reaches upstream of the city, the middle reaches within the city limits, downstream of the industrial zone, and the lower reaches before the confluence with the Yertis River. Concentrations of a broad range of chemical elements were determined, including Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Pb, etc., and water turbidity was also measured. The results showed that the concentrations of most elements were within established environmental standards; however, localized exceedances were observed for Al, Fe, Sr, and Ag in the middle and lower reaches. These exceedances can be attributed to anthropogenic impacts associated with industrial activities and urban runoff. Turbidity values ranged from 2.23 to 4.23 NTU, indicating a correlation with increased levels of suspended solids and metal concentrations. The study results confirm the effectiveness of integrated monitoring of hydrochemical parameters and turbidity as indicators of anthropogenic pressure, enabling the assessment of the ecological status of rivers in industrially impacted areas and providing a basis for further environmental monitoring.

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.

Гидрометеорология и экология

Scientific article

CHANGES IN WATER POLLUTION IN THE KARATAL RIVER DURING GLACIER SHRINKAGE IN THE SHYZHY AND KORA RIVER BASINS

Berikjan Oxikbayev Candidate of Biological sciences, associate professor, Yerkin Tokpanov Candidate of Geographical sciences, associate professor, Myrzabay Jetimov Candidate of Technical sciences, Yerlan Andasbayev* Doctor of Technical sciences, associate professor, Danagul Mukasheva PhD

Zhetysu University named after Ilyas Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan; berikjan-kil@mail.ru, tokpanov60@mail.ru, make._d_61@mail.ru, andasbayev.ya@gmail.com, danagul.mukasheva.84@mail.ru

*Corresponding author: Yerlan Andasbayev, andasbayev.ya@gmail.com

KEY WORDS

Shyzhy River, Kora River, Glaciers, Zhetysu Alatau (Dzungarian Alatau), glacier degradation, heavy metals, river runoff, anthropogenic pollution, Karatal River basin

ABSTRACT

This study examines the spatial and seasonal variability of water quality in glacier-fed river systems within the Karatal River basin, located in the north-western sector of the Zhetysu Alatau (Kazakhstan). The investigation focused on the Kora and Shyzhy rivers, which play a key role in forming the hydrological regime of the Karatal River. Fieldwork was carried out in 2025 and included two sampling campaigns (July and September), during which a total of 30 water samples were collected from the upper, middle, and lower river reaches. Hydro chemical analyses identified the presence of major ions, nutrients, and a range of trace elements (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Mn, Sb, Sr, Se, Ni, Al, Mo). The results indicate that water chemistry in the headwater zones is primarily governed by natural processes, including lithological weathering, interactions between meltwater and glacial–moraine deposits, and atmospheric deposition of aerosols onto snow and ice surfaces. Along the downstream gradient, a dual trend is observed: the reduction of certain constituents due to sorption and sedimentation, alongside localized increases associated with anthropogenic pressures. Measured concentrations of chemical constituents remained within the permissible limits established by the sanitary regulations of the Republic of Kazakhstan. Nevertheless, ongoing glacier retreat may intensify the mobilization of previously accumulated contaminants during periods of enhanced ablation. The findings highlight the importance of integrated monitoring approaches for glacier-fed river systems in order to ensure reliable water quality assessment and to minimize emerging environmental risks.

1. INTRODUCTION

Mountain glaciers of the Zhetysu (Dzungarian) Alatau constitute a critical component of the water resources of the Balkhash–Alakol basin and play a fundamental role in regulating the runoff of the Karatal, Koksu, Lepsy and other tributaries draining into Lake Balkhash. Their current condition is shaped by both large-scale climatic transformations and regional natural and anthropogenic influences [1…3].

Systematic glaciological investigations in the region have been conducted since the mid-twentieth century. According to the Catalogue of Glaciers of the USSR and subsequent studies, the Karatal River basin contained 356 glaciers in the mid-twentieth century, covering a total area of approximately 206 km² [4…5]. Further research by Cherkasov, Severskiy, Blagoveshchensky, Vilesov and other scholars has consistently demonstrated a persistent trend of glacier retreat across the region [6… 9].

Remote sensing data indicate that the glaciered area of the north-western Zhetysu Alatau declined from 215.0 km² in 1956 to 115.0 km² in 2015, while the total number of glaciers decreased from 356 to 206 [9…10]. These changes are accompanied by reductions in glacier length and alterations in accumulation and ablation regimes, which in turn exert a significant influence on river runoff formation [11] (Figure 1).

About article:
Received: 27.03.26
Revised: 01.04.26
Accepted: 09.06.2026
Published: 30.09.2026

For citation:
Oxikbayev B., Tokpanov Ye., Jetimov M., Andasbayev Ye., Mukasheva D., Changes in water pollution in the Karatal river during glacier shrinkage in the Shizhy and Kora river basins// Hydrometeorology and ecology 123 (3), 2026, 142-152.

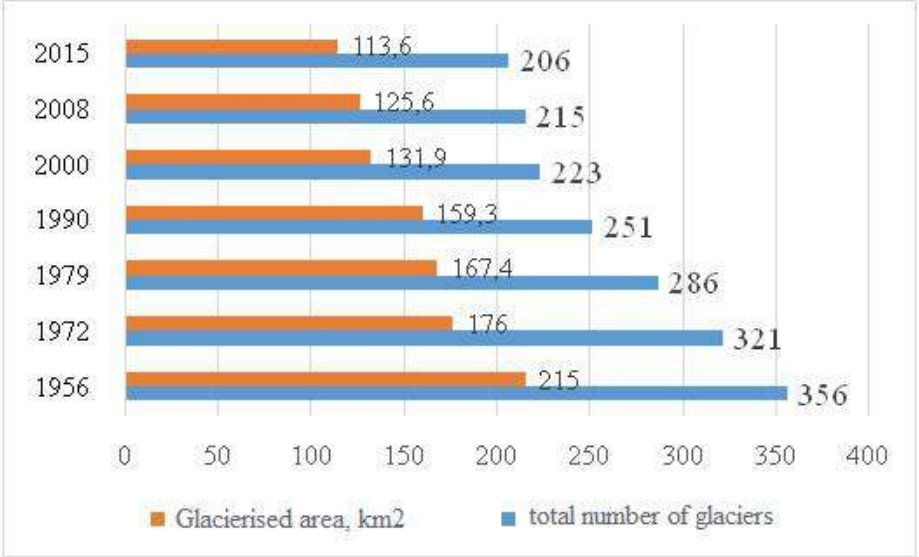


Figure 1. *Temporal changes in glacier mass and glacierised area in the Karatal River basin (1956...2015) [9…10]*

In addition to climatic drivers, the role of anthropogenic influence is becoming increasingly significant. Recent studies have documented the accumulation of heavy metals within components of mountain ecosystems in the Zhetysu Alatau [12…14], indicating that pollution processes exhibit both regional [3] and transboundary characteristics [15].

At the same time, the spatial variability of the chemical composition of waters formed by glacier melt and tributary inflows remains insufficiently explored [16]. In particular, the contribution of anthropogenic factors to water quality across different segments of the river network has not been comprehensively assessed [17…18].

The aim of the study is to determine the specific features of changes in the chemical composition and pollution of the Karatal River water under the conditions of glacier retreat in the Shyzhy and Kora river basins.

2. MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in the north-western sector of the Zhetysu (Dzungarian) Alatau within the Karatal River basin. The research focused on the watercourses of the Kora, Shyzhy and Karatal rivers, examining their upper, middle and lower reaches, which are largely sustained by glacier-fed runoff.

The study was based on long-term hydrometeorological records obtained from the Kosagash, Taubulak, Tekeli and Taldykorgan meteorological stations (RSE “Kazhydromet”), as well as data from Kazselezashchita, cartographic sources [19…20], and previously published research on regional glaciation [9].

Field investigations were carried out in 2025 and were supported by both field-based and laboratory analyses conducted in collaboration with researchers from the Department of Natural Sciences at Zhetysu University named after I. Zhansugurov and the Institute of High Mountain Biology of the University of Žilina (Slovakia).

The fieldwork encompassed glacier zones and the upper, middle and lower reaches of the Kora and Shyzhy rivers, which represent key tributaries of the Karatal River and are fed by glaciers such as Satpayev, Bessonov, Tronov (Mukan) and Kaskabulak (Figure 2).

Figure 2. *Inspection of the Kaskabulak Glacier at the source of the Kaskabulak River, a right-bank tributary of the Kora River. Photograph taken by the authors*

Water sampling was undertaken during two field campaigns, from 16 to 27 July and from 13 to 22 September 2025. In total, 30 water samples were collected from different segments of the hydrographic network, including the headwaters, middle and lower reaches of the Kora and Shyzhy rivers, as well as the upper course of the Karatal River.

Sampling locations were selected with consideration of altitudinal zonation and the characteristics of glacier-fed runoff formation. Samples were collected at the mouth of the Kaskabulak River (7.2 km from the glacier terminus, 2450 m a.s.l.), in the middle (2170 m) and lower (1028 m) reaches of the Kora River, as well as in the upper (2660 m), middle (2358 m) and lower (1027 m) reaches of the Shyzhy River. Additional sampling was conducted in the upper reach of the Karatal River (822 m a.s.l.) in the vicinity of Tekeli.

This spatial distribution of sampling sites enabled the assessment of hydrochemical changes along the flow path from glacier sources to downstream, more urbanised areas.

Water samples were collected in pre-cleaned, chemically resistant glass containers. Prior to sampling, all containers were rinsed with distilled water and subsequently with the sampled water. Each sample was labelled with information on location, date and time of collection.

Laboratory analyses were carried out in accredited laboratories of the Department of Sanitary and Epidemiological Control of the Zhetysu Region. The analytical programme included the determination of physicochemical, organoleptic and microbiological parameters. The elemental composition of the samples was analysed using instrumental analytical techniques.

Water quality assessment was conducted in accordance with the sanitary standards established by Order No. 26 of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan dated 20 February 2023 [21].

Data processing followed a comparative approach and involved the analysis of spatial variations in hydrochemical indicators across different river sections, with the obtained values evaluated against the established regulatory thresholds.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The Karatal River basin is situated in the north-western part of the Zhetysu (Dzungarian) Alatau [5] and represents one of the principal centres of contemporary glaciation in the region [13…14]. River runoff formation in this area is governed by the complex interplay of orographic, climatic and glaciological factors (Figure 3).

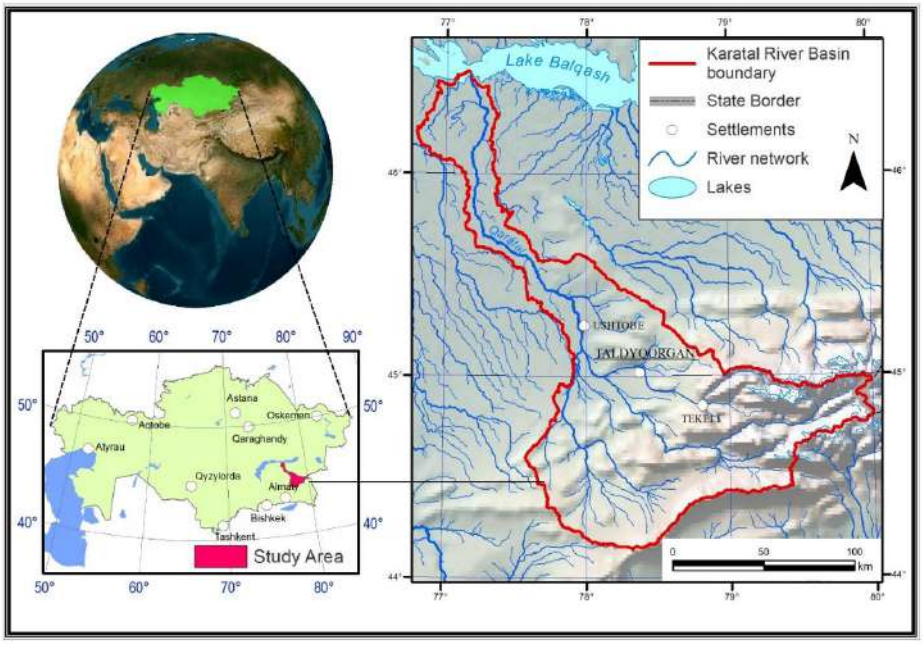


Figure 3. *Map of the Karatal River Basin as a Center of Contemporary Glaciation*

The boundaries of the basin are associated with the North-Central ridge of the Zhetysu Alatau (Zhamankol, Arasan, Koitas) and the chains of the South-Central ridges (Toksanbay, Satylu, Koyandy-Tau, Altyn-Emel), which are integrated within the Konuroba mountain system. This orographic configuration determines a pronounced altitudinal zonation, aspect-controlled differentiation of snow accumulation, and the formation of zones of solid precipitation accumulation.

According to glaciological studies [9], the extent of contemporary glaciation reaches approximately 84 km along the North-Central ridge and about 60 km along the South-Central ridge [22], which is consistent with field observations and the spatial distribution of glacial landforms in the headwater valleys.

The hydrographic network of the basin is characterised by the interaction of several subsystems. A key role is played by the right-bank tributaries, the Kora and Shyzhy rivers, which are fed by numerous glaciers [23]. The confluence of the Kora, Shyzhy and Koksu rivers within the Taldykorgan intermontane depression leads to the formation of the unified channel of the Karatal River, ensuring the sustained hydrological functioning of the basin [1].

Morphometric characteristics of the most significant glaciers contributing to runoff formation are presented in Table 1. The data provided in the table are for informational purposes.

Table 1

Morphometric Characteristics of the largest glaciers in the Karatal River Basin (2013) [2]

Glaciers	River Basin	Elevation Above Sea Level of the lower part of the glacier	Area, km²	Length, km	Volume, km³
Assubay	Kora	3250	16.7	8	1.83
Satbayev	Kora	3330	13.2	10.9	1.1
Bessonov	Shyzhy	2903	12.6	6	1.21
Tronov (Mukan)	Kora	3500	11.86	5.4	1.13
Ayussay	Shyzhy	3120	11.2	6	1.01
Kazan	Koksu	3120	10.9	5.8	0.80
Y.Altynsarin	Kora	3450	1.0	1.8	0.9

Abolina	Kora	3540	1.7	4.7	1.2
Kara Aryk	Koksu	3957	1.24	1.8	0.98
Demikpe	Koksu	3953	3.62	3.35	1.38

Analysis of the data presented in Table 1, together with long-term hydrological observations [8], indicates that contemporary glaciation plays [11] a decisive role in regulating the runoff of the Kora and Shyzhy rivers [20]. The linkage between glacier systems and the hydrological regime is reflected in the presence of valley glaciers at the river headwaters and in the pronounced seasonal variability of discharge.

The seasonal pattern of river flow in glacier- and snow-fed systems is characterized by a distinct peak during the period from May to August. This phase corresponds to intensified melting of seasonal snow cover and glacier bodies [8], including the Tronov, Bessonov, Altynsarin, Satpayev and Assubay glaciers, which leads to a marked increase in mean monthly discharge in the Kora and Shyzhy rivers [23].

Monitoring data from 2022…2025, combined with glaciological information [6], indicate that during this period the glaciers Tronov, Bessonov, Altynsarin, Demikpe, Kara-Aryk, Kazan, Satpaev, and Asubai experience the most intensive melting, resulting in an increase in the mean monthly discharge of the Kora, Shyzhy, and Koksu rivers [20…21].

Thus, the Karatal River basin constitutes a complex natural system in which the formation of river runoff is governed by the interplay of glacial feeding, orographic conditions, and the seasonal dynamics of hydrological processes [1…2]. This combination creates the prerequisites for the spatial differentiation of hydrochemical parameters of water [23].

The results of field expeditions and laboratory investigations have made it possible to characterize the hydrochemical state of the Kora, Shyzhy, and Karatal rivers, which are formed under conditions of glacial feeding in the north-western part of the Zhetysu Alatau. It has been established that the spatial differentiation of the chemical composition of water is determined by the combined influence of natural factors (glacial alimentation, lithology, and altitudinal zonation) and anthropogenic impacts, which intensify downstream [12…14].

The results of laboratory analysis of water samples collected in July 2025 are presented in Table 2.

Table 2

Results of laboratory analysis of water samples (16...17 July and 25...26 July 2025)

Chemical substances	Detected chemical substances, mg/dm³							
	Maximum permissible concentration (MPC), mg/dm³	Kaskabulak River, flowing into the Kora River (h = 2,414 m; 44°53′57″ N, 79°18′14″ E; 16 July 2025)	Middle course of the Kora River (h = 2,170 m; 44°59′52″ N, 79°18′14″ E; 17 July 2025)	Lower course of the Kora River (Tekeli) (h = 1,028 m; 44°51′33″ N, 78°46′04″ E; 17 July 2025	Upper course of the Shyzhy River (h = 2,660 m; 44°57′06″ N, 79°08′37″ E; 25 July 2025)	Middle course of the Shyzhy River (h = 2,358 m; 44°53′57″ N, 79°07′50″ E; 26 July 2025)	Lower course of the Shyzhy River (Tekeli) (h = 1,027 m; 44°51′33″ N, 78°46′04″ E; 26 July 2025)	Source of the Karatal River (Tekeli) (h = 822 m; 45°02′22″ N, 78°14′22″ E; 26 July 2025)
Cation								
Cu	1.0	0.003	0.001	0.001	0.001	0.002	0.0023	0.21
Pb	0.03	0.005	0.001	0.002	0.001	0.0024	0.0026	0.003
Zn	1.0	0.02	0.03	0.01	0.025	0.01	0.01	0.38
Cr	0.05	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.024
Cd	0.001	0.0006	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003	0.0004	0.005
Mn	1.0	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.025	0.031
Li	0.1	0.0004	0.0002	0.0001	0.0002	0.0001	0.0002	0.016
Sb	0.05	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003
Ba	0.1	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.026

Sr	7.0	1.26	2.17	2.03	2.17	2.03	2.05	1.53
Bi	0.1	0.006	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.039
Co	0.1	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002
Na	200	9.26	11.18	10.1	11.18	10.1	10.4	14.33
As	0.05	0.004	0.002	-	0.002	0.004	0.006	0.003
Se	0.01	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.005
Ni	0.1	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Al	0.5	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.004	0.003
Mo	0.25	0.003	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005
Anion								
Chlorides	350	37.2	34.9	37.2	35.0	36.3	37.3	37.4
Sulfates	500	44.0	44.11	44.0	50.2	44.0	44.3	42.03
Ammonia	2.0	0.01	0.08	0.1	0.07	0.07	0.09	0.06
Nitrates	3.3	0.018	0.024	0.01	0.031	0.028	0.032	0.018
Nitrites	45.0	0.03	0.09	1.23	0.006	0.032	0.053	1.022
pH		7.5	7.7	7.8	7.4	7.5	7.7	7.8
COD	15…30	17.4	17.8	18.0	15.3	17.4	17.9	17.4

During the summer period, characterized by the maximum intensity of glacial feeding [16], the hydrochemical regime of the studied rivers is distinguished by relative stability [23]. The reaction of the aquatic environment at all observation sites falls within neutral to slightly alkaline values (pH 7.4…7.8), indicating a balanced acid–base state. Chemical oxygen demand values range from 15.3 to 18.0 mg/dm³, reflecting a moderate content of organic matter.

The ionic composition of the water is predominantly of the sulphate–chloride type [16]. Sulphate concentrations range from 44.0 to 50.2 mg/dm³, while chloride concentrations vary between 34.9 and 37.4 mg/dm³. Sodium content ranges from 9.26 to 14.33 mg/dm³ and demonstrates an increasing trend downstream, which is attributable to both lithogenic processes and anthropogenic influences [23].

Concentrations of heavy metals and trace elements generally do not exceed the maximum permissible limits [24]; however, they exhibit pronounced spatial heterogeneity [12…14]. Minimal values are recorded in the upper reaches of the rivers (Cu 0.001…0.003 mg/dm³; Zn 0.01…0.02 mg/dm³), whereas an increase is observed in the lower reaches, particularly in the Karatal River. The most significant rise is noted for copper (up to 0.21 mg/dm³) and zinc (up to 0.38 mg/dm³), indicating localised anthropogenic impact within urbanised areas.

Concentrations of biogenic substances remain generally low, although variability is observed at certain sites. Elevated nitrite levels have been recorded in the lower reaches of the Kora and Shyzhy rivers (up to 1.23 and 1.02 mg/dm³, respectively), which may be associated with episodic pollutant inputs and intensified nitrogen transformation processes.

Thus, during the summer period, a relatively stable hydrochemical regime is established, albeit with the presence of local anomalies caused by anthropogenic impact

The data obtained in September 2025 are presented in Table 3.

Table 3

Results of laboratory analysis of water samples (13…14 September and 20…21 September 2025)

Chemical substances	Detected chemical substances, mg/dm³							
	Maximum permissible concentration (MPC), mg/dm³	Kaskabulak River, flowing into the Kora River (h = 2,414 m; 44°53′57″ N, 79°18′14″ E; 13 September 2025)	Middle course of the Kora River (h = 2,170 m; 44°59′52″ N, 79°18′14″ E; 14 September2025)	Lower course of the Kora River (Tekeli) (h = 1,028 m; 44°51′33″ N, 78°46′04″ E; 14 September 2025	Upper course of the Shyzhy River (h = 2,660 m; 44°57′06″ N, 79°08′37″ E; 20 September 2025)	Middle course of the Shyzhy River (h = 2,358 m; 44°53′57″ N, 79°07′50″ E; 21 September 2025)	Lower course of the Shyzhy River (Tekeli) (h = 1,027 m; 44°51′33″ N, 78°46′04″ E; 21 September 2025)	Source of the Karatal River (Tekeli) (h = 822 m; 45°02′22″ N, 78°14′22″ E; 21 September 2025)
Cation								
Cu	1.0	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.0023	0.0021
Pb	0.03	0.004	0.002	0.003	0.001	0.0024	0.0026	0.003

Zn	1.0	0.02	0.03	0.041	0.033	0.018	0.021	0.31
Cr	0.05	0.003	0.001	0.004	0.001	0.003	0.005	0.026
Cd	0.001	0.0005	0.0002	0.0004	0.0002	0.0003	0.0005	0.0004
Mn	1.0	0.01	0.03	0.05	0.02	0.02	0.03	0.033
Li	0.1	0.0004	0.0003	0.0005	0.0002	0.0003	0.0004	0.016
Sb	0.05	0.002	0.002	0.004	0.001	0.002	0.002	0.0022
Ba	0.1	0.002	0.002	0.004	0.001	0.003	0.005	0.004
Sr	7.0	1.20	2.27	2.33	2.17	2.23	2.25	2.24
Bi	0.1	0.003	0.004	0.006	0.002	0.005	0.006	0.007
Co	0.1	0.002	0.003	0.007	0.001	0.004	0.006	0.005
Na	200	9.23	11.11	12.3	11.12	12.1	12.18	11.45
As	0.05	0.003	0.003	0.004	0.002	0.004	0.004	0.003
Se	0.01	0.001	0.002	0.003	0.001	0.002	0.003	0.003
Ni	0.1	0.002	0.003	0.005	0.001	0.002	0.003	0.006
Al	0.5	0.001	0.001	0.004	0.002	0.004	0.004	0.005
Mo	0.25	0.001	0.003	0.005	0.001	0.004	0.003	0.003
				Anion				
Chlorides	350	38.4	38.9	39.2	36.0	37.5	38.2	37.8
Sulfates	500	44.2	44.23	44.31	42.2	44.5	44.6	44.0
Ammonia	2.0	0.01	0.07	0.07	0.05	0.04	0.06	0.05
Nitrates	3.3	0.016	0.021	0.23	0.013	0.018	0.021	0.021
Nitrites	45.0	0.02	0.08	0.08	0.07	0.09	0.09	0.08
pH		7.5	7.7	7.8	7.5	7.5	7.7	7.8
COD	15…30	17.6	17.8	18.3	17.3	17.4	17.7	17.3

During the autumn period, characterised by a reduction in discharge and a weakening of glacial feeding, the reaction of the aquatic environment remains neutral to slightly alkaline (pH 7.5…7.8). Chemical oxygen demand values vary within the range of 17.3…18.3 mg/dm³ and are comparable to those recorded in summer.

The ionic composition of the water remains of the sulphate–chloride type [23]. Chloride concentrations show a slight increase (up to 39.2 mg/dm³), while sulphates vary between 42.2 and 44.6 mg/dm³. A minor rise in sodium content (up to 12.3 mg/dm³) is also observed, which is associated with the reduced dilution effect of river discharge.

The concentrations of heavy metals and trace elements remain below maximum permissible limits; however, a moderate increase in several elements (Zn, Cr, Mn, Co, Ni, Sr) is recorded, particularly in the lower reaches of the rivers. In contrast to the summer period, anomalously high copper concentrations are not observed, and its levels stabilise at background values.

The concentrations of biogenic substances remain generally low; however, an increase in nitrate content (up to 0.23 mg/dm³) is noted, which may be associated with inputs from surface runoff. At the same time, nitrite concentrations decrease to 0.08…0.09 mg/dm³, indicating the stabilisation of biogeochemical processes.

Overall, the autumn period is characterised by a more stable hydrochemical regime and the absence of pronounced anomalies.

A comparative analysis of the July and September observations indicates that, while the general water type and acid–base conditions are preserved, differences are evident in the dynamics of trace elements and biogenic components. The summer period is characterised by greater variability and the presence of local anomalies associated with intensive glacier melting and enhanced surface runoff. In autumn, the chemical composition becomes more stable against the background of reduced water discharge.

A common pattern for both periods is the increase in the concentrations of most components downstream [25…26], reflecting the growing anthropogenic influence, particularly within urbanised areas, including the vicinity of the city of Tekeli [27…28].

Thus, the hydrochemical regime of the rivers in the Karatal basin is shaped by a combination of natural and anthropogenic factors, with glacial feeding and the transformation of runoff along the flow path from high-mountain regions to zones of economic activity playing a dominant role [29…31].

The obtained results reflect the interrelationship between natural and anthropogenic factors in shaping the hydrochemical composition of glacier-fed river runoff within the Karatal River basin [16…17]. The morphological structure of glaciation and its altitudinal position within the range of 3,300…4,000 m determine the role of glaciers as seasonal regulators of runoff: peak discharges of the Kora and Shyzhy rivers occur during the May–August period, when ablation processes intensify and the inflow of meltwater increases.

The geochemical characteristics of waters in the upper reaches primarily reflect the influence of natural factors [18], notably the weathering of rocks and the lithogeochemical background of the ablation zone [29]. Elevated concentrations of certain elements in samples associated with glacial headwaters may be attributed to the dissolution and migration of rock and moraine material components during the interaction of meltwater with unconsolidated deposits. An additional source of substances is atmospheric dust and aerosols, which accumulate on the surface of snow and ice and are subsequently incorporated into meltwater.

A comparison of upper sections of the river network with samples from the middle and lower reaches reveals divergent trends in the concentrations of chemical components [17]. Within transit reaches, some elements may decrease as a result of sorption and precipitation processes on alluvial channel deposits, forming zones of accumulation [24]. At the same time, an increase in the concentrations of a number of components is observed in the lower reaches of the Karatal River, indicating additional inputs associated with anthropogenic impact [27…28]. This may be linked to the influence of settlements, transport infrastructure, and economic activities.

From an environmental perspective, it is important to note that the concentrations of most monitored components in the analysed samples do not exceed current sanitary standards. However, the presence of spatial differentiation and localised increases in certain parameters indicates the need to consider potential cumulative effects. Bottom sediments may act as secondary accumulators of substances and, under changing hydrological conditions, may be remobilised into the aquatic environment.

A comparison of the obtained data with the results of previous glaciological studies suggests that changes in the state of glaciation may influence both the hydrological regime and the conditions governing the formation of water chemistry. In this context, regular water quality observations combined with monitoring of glacier systems are of particular importance.

The practical significance of the results lies in substantiating the need for the establishment of comprehensive monitoring within the Karatal River basin, including seasonal water sampling, control of the main chemical components, and consideration of both natural and anthropogenic factors influencing the formation of water quality.

4. CONCLUSION

Geochemical analysis of water samples revealed the presence of ions of heavy and rare metals (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Mn, Sb, Sr, Se, Ni, Al, Mo, etc.), as well as major anions and biogenic components, in glacier-fed river runoff. In the upper reaches associated with glacial sources, the chemical composition is characterised by a combination of naturally determined concentrations, formed through the weathering of rocks and the migration of elements within the ablation zone, together with the possible influence of atmospheric deposition of aerosol particles on the surface of snow and ice.

As water flows downstream, changes in its chemical composition are observed: concentrations of certain components decrease as a result of sorption and precipitation processes on channel sediments, whereas in the lower reaches an increase in the concentrations of specific substances is recorded, indicating additional anthropogenic inputs associated with economic activity within the basin.

Overall, the concentrations of most potentially toxic components in the analysed samples do not exceed the current sanitary standards of the Republic of Kazakhstan. At the same time,

the identified spatial variability in water composition highlights the need to consider potential accumulation processes and the secondary mobilisation of substances from bottom sediments.

A comparison of the obtained results with data from previous glaciological studies suggests that changes in the state of glaciation may influence the conditions governing the formation of water chemistry, particularly during periods of intensive melting.

The practical significance of the study lies in substantiating the need for the establishment of a comprehensive monitoring system in the north-western part of the Karatal River basin, including remote sensing of glaciers, seasonal water sampling at reference cross-sections, and extended hydrochemical analysis. The implementation of such a system will enable the timely detection of changes in water quality, the assessment of environmental risks, and the provision of scientific support for the protection of mountain catchments in the Zhetysu Alatau.

DATA AVAILABILITY

The data used in this study were obtained by the authors from RSE Kazhydromet sources, Remote Sensing Data.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Conceptualization – BO, MJ; data curation –YeT, DM; formal analysis – BO, YeA; мethodology –BO, MJ, YeT; software –BO, DM; supervision – BO, YeA; visualization – BO; writing – original draft –BO; writing –review & editing –BO, MJ, YeT, YeA.

FUNDING

This study was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (project AP26102759 "Study of the impact of physico-chemical and biological pollution of glaciers on selected indicators of flora and fauna and on water quality in the Karatal River ecosystem.").

REFERENCES

1. Kaldybayev, A., Chen, Y., & Vilesov, E. (2016). Glacier change in the Karatal river basin, Zhetysu (Dzhungar) Alatau, Kazakhstan. Annals of Glaciology, 57(71). DOI: 10.3189/2016AoG71A005
2. Issaldayeva, S., Alimkulov, S., Raimbekova, Z., Bekseitova, R., & Karatayev, M. (2023). The climatic and river runoff trends in Central Asia: The case of Zhetysu Alatau region, the south-eastern part of Kazakhstan. Heliyon, 9(6), e17897. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17897
3. Kogutenko, L., Severskiy, I., Shahgedanova, M., & Lin, B. (2019). Change in the Extent of Glaciers and Glacier Runoff in the Chinese Sector of the Ile River Basin between 1962 and 2012. Water, 11(8), 1668. DOI: 10.3390/w11081668
4. Katalog lednikov SSSR. T. 13. Senträlnyi i İujnyi Kazahstan. Vyp. 2. Basein oz. Balhaş. Ch. 5. Basein r. Karatala. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 154 s. [USSR Glacier Inventory. Vol. 13. Central and Southern Kazakhstan. Issue 2. Lake Balkhash Basin. Part 5. Karatal River Basin]. [in Russian]
5. Barandun, M., Fiddes, J., Scherler, M., Mathys, T., Saks, T., Petrakov, D., & Hoelzle, M. (2020). The state and future of the cryosphere in Central Asia. Water Security, 11, 100072. DOI: 10.1016/j.wasec.2020.100072
6. Vilesov E.N., Morozova V.İ. Sovremennye tendensii izmenenia razmerov oledenenia i lednikovogo stoka v baseine reki Karatal, Zapadnaia Jungaria. Gidrometeorologia i ekologia, 2006, № 3, S. 80–92. [Current trends in changes of glaciation size and glacier runoff in the Karatal River basin, Western Dzungaria]. [in Russian]
7. Vilesov E.N. İzmenenie razmerov gornogo oledenenia Kazahstana za vtoruiu polovinu 20 – nachalo 21 v. Gidrometeorologia i ekologia, 2016, № 2, S. 43–64. [Changes in the size of mountain glaciation in Kazakhstan from the second half of the 20th to the early 21st century]. [in Russian]
8. Almaty oblysynyñ 1:1 000 000 masştabty äkımşılık-aumaqtyq kartasy. Almaty: Kartografia RMQK, 2001. [Administrative-territorial map of Almaty region at a scale of 1:1,000,000]. (in Kazakh)
9. Pfeffer, W. T., Arendt, A. A., Bliss, A., Bolch, T., Cogley, J. G., Gardner, A. S., et al. (2014). The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. Journal of Glaciology, 60(221), 537–552. DOI: 10.3189/2014JoG13J176
10. Vilesov E.V., Morozova V.İ., Severski İ.V. Oledenenie Jungarskogo (Jetysu) Alatau: proşloe, nastoiaşee, buduşee. Almaty, 2013. 244 s.[Glaciation of the Dzungarian (Jetysu) Alatau: past, present, future]. [in Russian]
11. Severskiy, I., Vilesov, E., Armstrong, R., Kokarev, A., Kogutenko, L., Usmanova, Z., Morozova, V., & Raup, B. (2016). Changes in glaciation of the Balkhash–Alakol basin, central Asia, over recent decades. Annals of Glaciology, 57(71), 382–394. DOI: 10.3189/2016AoG71A575
12. Beard, D. B., Clason, C. C., Rangecroft, S., Poniecka, E., Ward, K. J., & Blake, W. H. (2022). Anthropogenic contaminants in glacial environments I: Inputs and accumulation. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 46(4), 630–648. DOI: 10.1177/03091333221107376
13. Beard D. B., Clason C. C., Rangecroft S., Poniecka E., Ward K. J., Blake W. H. Anthropogenic contaminants in glacial environments II: Release and downstream consequences // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2022. Vol. 46, no. 5. DOI: 10.1177/03091333221127342
14. Kang, S., Zhang, Q., Qian, Y., Ji, Z., Li, C., Cong, Z., Zhang, Y., Guo, J., Du, W., Huang, J., You, Q., Panday, A. K., Rupakheti, M., Chen, D., Gustafsson, Ö., Thiemens, M. H., & Qin, D. (2019). Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects. National Science Review, 6(4), 796–809. DOI: 10.1093/nsr/nwz031

15. Pittino, F., Buda, J., Ambrosini, R., Parolini, M., Crosta, A., Zawierucha, K., & Franzetti, A. (2023). Impact of anthropogenic contamination on glacier surface biota. Current Opinion in Biotechnology, 80, 102900. DOI: 10.1016/j.copbio.2023.102900
16. Janiga M., Janiga M., Brecelj S., Feješ S., Abduakasov A., Oxikbayev B., Haas M. Differences in the synergic accumulation of toxic elements in pelagic and benthic fish from glacier-fed rivers of the Dzungarian Alatau // Ekológia (Bratislava). 2023. Vol. 42, no. 4. P. 310–318
17. Kaldybayev, A., Chen, Y., Issanova, G., Wang, H., & Mahmudova, L. (2016). Runoff response to the glacier shrinkage in the Karatal river basin, Kazakhstan. Arabian Journal of Geosciences, 9(3). DOI: 10.1007/s12517-015-2106-y
18. Shulembayeva, K., Rodrigo-Ilarri, J., Rodrigo-Clavero, M. E., Khussainov, A., Kakabayev, A., Khussainova, R. (2023). Assessment of the hydrophysical and hydrochemical characteristics of Lake Burabay (Akmola Region, North Kazakhstan). Sustainability, 15, 15, 11788. DOI: 10.3390/su151511788
19. Karta L-44 M 1:1 000 000. M.: GUGK, 1985. [Map L-44, scale 1:1,000,000]. [in Russian]
20. Paul, F., Barrand, N. E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., et al. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Annals of Glaciology, 54(63), 171–182. DOI: 10.3189/2013AoG63A296
21. Prikaz ministra zdravoohranenia Respubliki Kazahstan ot 20 fevralä 2023 goda № 26. [Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan dated February 20, 2023 No. 26 on approval of sanitary rules for water bodies and water use]. [in Russian]
22. Cherkasov P.A. Sovremennoe sostoianie lednikov İli-Balhaşkogo regiona. In: Kudekov T.K. (ed.) Sovremennoe ekologicheskoe sostoianie ozera Balhaş. Almaty: Kaganat, 2002. S. 141–198.[Current state of glaciers in the Ili-Balkhash region]. [in Russian]
23. Carling, G. T., Rupper, S. B., Fernandez, D. P., Tingey, D. G., & Harrison, C. B. (2017). Effect of atmospheric deposition and weathering on trace element concentrations in glacial meltwater at Grand Teton National Park, Wyoming, U.S.A. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 49(3), 427–440. DOI: 10.1657/AAAR0016.071
24. Glazyrin G.E., Kodama Yu. Osenka izmenenia oledenenia v perehodnom rejime pri izmenenii klimata. Materialy glyatsiologicheskih issledovanii, 2003, vyp. 94, S. 212–215.[Assessment of glaciation changes under transitional climate conditions]. [in Russian]
25. Kokarev A.L. Osenka sovremennyh izmenenii gornolednikovyh sistem İugo-Vostochnogo Kazahstana: avtoref. dis. kand. geogr. nauk. Almaty, 2009. 20 s.[Assessment of current changes in mountain glacier systems of Southeastern Kazakhstan: abstract of PhD dissertation]. [in Russian]
26. Golubsov V.V., Lineiseva A.V. Postuplenie vody v reku Karatal za schet degradasii gornogo oledenenia. Gidrometeorologia i ekologia, 2010, № 4, S. 101–107.[Contribution of glacier degradation to water inflow in the Karatal River]. [in Russian]
27. Zhu T. [et al.]. Accumulation of pollutants in proglacial lake sediments: Impacts of glacial meltwater and anthropogenic activities // Environmental Science & Technology. 2020. Vol. 54, no. 13. DOI: 10.1021/acs.est.3c00511
28. Tóth, J., Papp, S. (2018). Hydrogeochemical characteristics of saline lakes in the Carpathian Basin. Central European Geology, 61(2), 185–203. DOI: 10.1556/24.61.2018.02.4
29. Utepbaeva I.A., Mukatai A. (2018). Spatio-temporal changes in the hydrochemical regime of lake Alakol during the fluid period. Hydrometeorology and Ecology, 1, 92–102.
30. Yapiyev V., Wade A. J., Shahgedanova M., Saidaliyeva Z., Madibekov A., Severskiy I. The hydrochemistry and water quality of glacierized catchments in Central Asia: A review of the current status and anticipated change // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2021. Vol. 38. Art. 100960. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100960.
31. Barkdull, N. S., Carling, G. T., Fernandez, D. P., Nelson, S. T., Bickmore, B. R., Tingey, D. G., Checketts, H. N., Packer, B. N., & Hale, C. A. (2021). Glaciers Control the Hydrogeochemistry of Proglacial Streams During Late Summer in the Wind River Range, Wyoming, United States. Frontiers in Earth Science, 9, 727575. DOI: 10.3389/feart.2021.727575

ШЫЖЫ ЖӘНЕ ҚОРА ӨЗЕНДЕРІ АЛАПТАРЫНДАҒЫ МҰЗДЫҚТАРДЫҢ АЗАЮЫ КЕЗЕҢІНДЕГІ ҚАРАТАЛ ӨЗЕНІНІҢ СУ ЛАСТАНУЫНЫҢ ӨЗГЕРІСТЕРІ

Берикжан К. Оксикбаев б.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Еркин А. Токпанов г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Мырзабай А. Джетимов т.ғ.к., Ерлан С. Андасбаев* т.ғ.д., қауымдастырылған профессор, Данагуль М. Мукашева PhD

І.Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған, Қазақстан; berikjan-kil@mail.ru, tokpanov60@mail.ru, make_d_61@mail.ru, andasbayev.ya@gmail.com, danagul.mukasheva.84@mail.ru
*Автор корреспондент: Ерлан С. Андасбаев andasbayev.ya@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Шыжы өзені, Қора өзені, Мұздықтар, Жетісу Алатауы (Жоңғар Алатауы), мұздықтардың деградациясы, ауыр металдар, өзен ағыны, антропогендік ластану, Қаратал өзені алабы

АБСТРАКТ

Мақалада Қаратал өзені алабының (Жетісу Алатауының солтүстік-батыс бөлігі, Қазақстан) мұздықпен қоректенетін өзендеріндегі су сапасының кеңістіктік және маусымдық өзгерістері қарастырылған. Зерттеу нысандары ретінде Қаратал өзенінің ағынын қалыптастыратын Қора және Шыжы өзендері алынды. Далалық зерттеулер 2025 жылы жүргізіліп, үлгі алу екі кезеңде (шілде және қыркүйек) жүзеге асырылды; жалпы өзендердің жоғарғы, орта және төменгі ағыстарынан 30 су үлгісі алынды. Гидрохимиялық талдау нәтижелері суда негізгі иондардың, биогендік компоненттердің және микроэлементтердің (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Mn, Sb, Sr, Se, Ni, Al, Mo) бар екенін көрсетті. Жоғарғы ағыстарда су құрамының қалыптасуы негізінен табиғи факторлармен – тау жыныстарының үгілуімен, еріген мұздық суларының мореналық шөгінділермен өзара әрекеттесуімен және мұздық бетінде аэрозольдердің атмосфералық

Мақала жайында:
Алынды: 27.03.2026
Қайта қаралды: 01.04.2026
Қабылданды: 09.06.2026
Жарияланды: 30.09.2026

жинақталуымен байланысты екені анықталды. Өзен бойымен химиялық құрамның екі бағытты динамикасы байқалады: бір жағынан, сорбция және тұну процестеріне байланысты кейбір компоненттердің концентрациясы төмендейді, екінші жағынан, антропогендік әсер байқалатын учаскелерде олардың артуы тіркеледі. Зерттелген үлгілердегі химиялық заттардың концентрациялары Қазақстан Республикасының қолданыстағы санитарлық нормативтерінен аспайды. Сонымен қатар, мұздықтардың деградациясы қарқынды еру кезеңінде жинақталған ластаушы заттардың босап шығуын күшейтуі мүмкін. Алынған нәтижелер су сапасын бағалау және экологиялық тәуекелдерді төмендету мақсатында мұздықпен қоректенетін өзен жүйелерінде кешенді мониторинг жүргізудің қажеттілігін негіздейді.

ИЗМЕНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ В РЕКЕ КАРАТАЛ В ПЕРИОД СОКРАЩЕНИЯ ЛЕДНИКОВ В БАССЕЙНАХ РЕК ШЫЖЫ И КОРА

Берикжан К. Оксикбаев к.б.н., ассоциированный профессор, Еркин А. Токпанов к.г.н., ассоциированный профессор, Мырзабай А. Джетимов к.т.н., Ерлан С. Андасбаев* д.т.н., ассоциированный профессор, Данагуль М. Мукашева PhD

Жетысуский университет им.И.Жансугурова, Талдыкорган, Казахстан; berikjan-kil@mail.ru, tokpanov60@mail.ru, make_d_61@mail.ru, andasbayev.ya@gmail.com, danagul.mukasheva.84@mail.ru
*Автор корреспондент: Ерлан С. Андасбаев andasbayev.ya@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

река Шыжы, река Кора, Ледники, Жетысуский Алатау (Джунгарский Алатау), деградация ледников, тяжёлые металлы, речной сток, антропогенное загрязнение, бассейн реки Каратал

По статье:
Получено: 27.03.26
Пересмотрено: 01.04.26
Принято: 09.06.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

В статье рассмотрены пространственные и сезонные изменения качества воды в ледниково-питаемых реках бассейна Каратал (северо-запад Жетысуского Алатау, Казахстан). Объектами исследования являлись реки Кора и Шыжы, формирующие сток реки Каратал. Полевые исследования проведены в 2025 году и включали два этапа отбора проб (июль и сентябрь), всего отобрано 30 проб воды в верхнем, среднем и нижнем течениях рек. Гидрохимический анализ выявил присутствие основных ионов, биогенных компонентов и микроэлементов (Pb, Cd, Zn, Cu, Cr, Mn, Sb, Sr, Se, Ni, Al, Mo). Установлено, что в верховьях состав воды определяется преимущественно природными факторами – выветриванием горных пород, взаимодействием талых вод с моренными отложениями и атмосферной аккумуляцией аэрозолей на поверхности ледников. Вниз по течению фиксируется двунаправленная динамика: снижение концентраций ряда компонентов вследствие сорбции и осаждения, а также их увеличение на участках с антропогенным воздействием. Концентрации химических веществ не превышают санитарные нормативы Республики Казахстан. Однако деградация оледенения может усиливать высвобождение накопленных загрязняющих веществ в период интенсивного таяния. Результаты обосновывают необходимость комплексного мониторинга ледниково-речных систем для оценки качества воды и снижения экологических рисков.

Publisher's Note: Statements, opinions, and data in all publications are those of the author(s) alone and not those of the Journal of Hydrometeorology and Ecology and/or the editor(s).

Гидрометеорология и экология

Scientific article

MAJOR SOURCES OF FINE PARTICULATE AIR POLLUTION IN FOOTHILL MEGACITY: THE CASE OF ALMATY

Ravil Mukhamediev [1,2] doctor of engineering science, Adilkhan Symagulov[1], Yan Kuchin [1,2], Alexey Terekhov [1,2] candidate of technical science, Liudmila Gorodetskaia[1*]

[1]Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan; ravil.muhamedyev@gmail.com (RM), a.symagulov@satbayev.university (AS), ykuchin@mail.ru (YK), aterekhov1@yandex.ru (AT), ludmila260601@gmail.com (LG)
[2]Institute of Information and Computing Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan; ravil.muhamedyev@gmail.com (RM), ykuchin@mail.ru (YK), aterekhov1@yandex.ru (AT)
*Corresponding author: Liudmila Gorodetskaia, ludmila260601@gmail.com

KEY WORDS

foothill basins,
air pollution,
fine particulate matter,
Pearson correlation.

ABSTRACT

This study analyzes air pollution by fine particulate matter (PM2.5) in Almaty, the largest megacity of Kazakhstan. The city is located in a basin formed by the spurs of the Zailiyskiy Alatau range. Due to its geographical features, it is highly exposed to pollution by anthropogenic fine particulate matter. The main sources of air pollution include transport, industrial enterprises, and heating systems. The objectives of this study are to identify the dominant source of pollution, to assess spatial heterogeneity between central and foothill districts, and to evaluate the effectiveness of household air purifiers in improving indoor air quality. Urban vehicular traffic exhibits a periodic temporal pattern, with daily minima at night and weekly minima on weekends. This dynamic behavior enables a quantitative assessment of its contribution to the overall PM2.5 concentration in the urban atmosphere. The results suggest that heat generation systems are likely to be the dominant contributor to PM2.5 pollution during the autumn–winter period. In addition, observations indicate that high pollution levels in foothill areas occur approximately 30% less frequently than in central districts. The use of household air purification systems may reduce indoor particulate matter concentrations severalfold under the observed conditions.

1. INTRODUCTION

Cities located in foothill basins face a number of unique environmental challenges associated with their geographical setting. Among these is air pollution, where limited air circulation leads to the accumulation of pollutants such as vehicular and industrial emissions in the atmosphere, resulting in elevated pollution levels [1].

The problem is exacerbated by temperature inversion, a phenomenon in which cold air is trapped near the surface while warmer air remains above. This inversion creates a “cap” that prevents the dispersion of pollutants, leading to smog accumulation and deterioration of air quality. During winter periods, temperature inversion can result in very low temperatures in lowland areas, increasing the demand for heating and further aggravating air quality due to higher emissions from heating systems.

According to the World Health Organization (WHO), air pollution causes approximately 7 million deaths annually (one in eight deaths worldwide) due to exposure to fine particulate matter. The associated health outcomes include ischemic heart disease (40%), stroke (40%), chronic obstructive pulmonary disease (COPD) (11%), lung cancer (6%), and acute lower respiratory infections in children (3%) [2]. Indoor air pollution is particularly harmful due to prolonged exposure to elevated concentrations of fine particulate matter and other airborne pollutants. The most dangerous pollutants are fine particles with a diameter of less than 10

micrometers (PM10), especially those smaller than 2.5 micrometers (PM2.5), as they can penetrate deep into the lungs and enter the bloodstream [3].

Residents of several large cities located in foothill basins suffer from significant air pollution [4]:

Lahore (Pakistan), situated in the foothills of the Himalayas, experiences severe pollution due to intense vehicular traffic and industrial emissions;

Krasnoyarsk (Russia), located in a basin between the Sayan Mountains and the Yenisei Ridge, faces pollution primarily from metallurgical and chemical industries;

Santiago (Chile), located near the Andes, is affected by vehicle emissions and industrial activities;

Ulaanbaatar (Mongolia), situated in a mountain-surrounded basin, experiences severe winter pollution primarily due to coal-fired power plants and residential heating [5];

Bishkek (Kyrgyzstan), located in the foothills of the Tien Shan, faces pollution from transport, industry, and coal-based heating systems [6,7], with the problem being most acute during the cold season;

About article:
Received:10.04.2026
Revised:14.04.2026
Accepted:17.08.2026
Published: 30.09.2026

Dushanbe (Tajikistan), located near the Pamir Mountains, is affected by dust, transport emissions, industrial activity, residential heating, and waste burning [8];

Salt Lake City (USA) experiences severe air pollution associated with temperature inversions and emissions from transportation and residential heating [9].

According to retrospective data reported in [10], eight out of fourteen cities in Kazakhstan were classified as having a “high” level of air pollution in 2019. The leading city in terms of air pollution indicators is Almaty—one of the largest cities in Central Asia and the largest city in Kazakhstan [11]. The Almaty region accounts for 20.8% of the national GDP. As of the end of 2024, the city’s population exceeded 2.28 million people. Almaty is located in the foothills of the Zailiyskiy Alatau range. Recent studies have identified several Central Asian cities, including Almaty, as emerging regional hotspots of particulate air pollution, highlighting the broader environmental significance of PM2.5 pollution in the region [12]

For citation:
Mukhamediev R., Symagulov A., Kuchin Ya., Terekhov A., Gorodetskaia L., Major Sources of Fine Particulate Air Pollution in Foothill Megacity: The Case of Almaty// Hydrometeorology and Ecology, 123 (3), 2026, 153-166.

Several factors contribute to air pollution in Almaty. These include anthropogenic factors related to human activities (heat and power generation, transport, and industrial enterprises). Recent studies have also explored advanced data-driven approaches for PM2.5 prediction in Almaty, further emphasizing the importance of identifying major pollution sources and understanding their temporal variability [13]

Natural factors also play a significant role, including air mass transport processes such as mountain-valley circulation, which facilitates atmospheric cleansing, and temperature inversion in the surface layer, which inhibits pollutant dispersion.

Although the major sources of pollution in the city are generally known, identifying the most influential ones is essential for informed decision-making aimed at improving living conditions in the urban agglomeration. The case of Almaty provides an opportunity to analyze key pollution sources typical for megacities located in foothill basins.

Based on a dataset collected during 2024 and early 2025, this study addresses the following objectives:

- to identify the dominant source of air pollution in the city;
- to assess differences in pollution levels between central and foothill districts;
- to evaluate the effectiveness of household air purification systems in reducing indoor exposure to fine particulate matter.

The paper is structured as follows:

Section 2 describes the data collection process and the methodological approach used to identify dominant pollution sources;

Section 3 presents the results;

Section 4 discusses the findings;

the Conclusion outlines the limitations of the study and directions for future research.

2. MATERIALS AND METHODS

The main sources of air pollution considered in this study can be conditionally divided into stationary sources, whose emissions do not depend on weekdays or weekends, and non-stationary sources, whose emissions vary significantly depending on the day of the week:

1) Conditionally stationary sources:

a) combined heat and power plants (CHPs), some of which operate on coal;

b) households using solid fuels for heating during the winter period.

2) Conditionally non-stationary sources:

a) transport, whose intensity varies depending on the time of day and day of the week;

b) industrial enterprises, which often reduce their activity during weekends and holidays.

Considering the seasonal operation of CHPs and residential heating systems, as well as the weekly variability of traffic intensity, it is possible to assess the contribution of these sources to particulate matter concentrations in the city. It is assumed that emissions from industrial enterprises remain relatively stable throughout the year, with reductions during holidays and weekends. Traffic load on urban roads decreases significantly during weekends and holidays. In contrast, heating systems operate continuously regardless of the time of day or day of the week, with heat output depending on ambient air temperature.

To analyze the main causes of air pollution in Almaty, the following steps were performed:

a dataset on air pollution was collected using Atmotube Pro sensors at two locations in Almaty;

a synchronized dataset on urban traffic was compiled;

a dataset on average monthly temperatures for 2024 was incorporated;

the dates of activation and deactivation of CHPs in the city were identified;

average monthly pollution levels were calculated for the selected locations;

correlation analysis was performed between traffic intensity and average monthly PM2.5 concentration (amPM2.5), between CHP operational capacity and amPM2.5, and between average monthly temperature and amPM2.5.

2.1 Data Collection

Data collection was carried out from January 2024 to February 2025. The locations of the data collection points are shown in Figure 1.

Figure 1. *Data collection points in Almaty. The locations are marked with red circles(A -43.188695, 76.930872, B - 3.261284, 76.929322) . On the right, the portable air quality monitoring device Atmotube Pro is shown*

The two monitoring locations were selected to represent contrasting urban settings: location A corresponds to a more central, densely built-up area affected by intensive traffic and urban emissions, whereas location B represents a foothill residential area with different dispersion conditions and lower traffic pressure. The approximate geographic coordinates of the monitoring points were added to Figure 1 and its caption. The choice of these locations was

intended to compare central and foothill parts of Almaty rather than to provide full city-wide spatial coverage.

Atmotube Pro is a portable air quality monitor based on optical particle sensing for PM1, PM2.5, and PM10 and an integrated sensor for VOCs and basic meteorological parameters (atmospheric pressure, humidity, and air temperature). The use of low-cost air quality sensors has become increasingly common in urban air pollution studies, although appropriate consideration of calibration and measurement uncertainty remains important [14].

Before measurement campaigns, the devices were operated according to the manufacturer's recommendations. The study focused on relative temporal and spatial differences rather than on regulatory-grade absolute concentration assessment. Therefore, possible sensor uncertainty, humidity effects, and device-to-device variability were considered as limitations of the study.

Measurements were recorded five times during the daytime at approximately 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, and 21:00. As a result, a dataset was formed for each monitoring location; an example is presented in Table 1.

Table 1

Sample fragment of the dataset collected at location B

year	month	day	time	AQS	PM1	PM2.5	PM10	VOCs
2024	1	6						
2024	1	7	9	0	105	115	110	1.65
2024	1	7	18	0	154	169	176	0.83
2024	1	7	21	0	127	140	148	2.2
2024	1	8	9	56	9	10	12	1.25
2024	1	8	12	47	17	20	23	1.8
2024	1	8	18	55	39	44	46	0.57
2024	1	8	21	66	25	27	29	0.6
2024	1	9	9	65	15	17	19	0.66
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2025	2	27	9	79	15	17	19	0.07
2025	2	27	21	68	26	30	32	0.09
2025	2	28	9	72	22	26	29	0.2

In total, the dataset contains 836 records for location B and approximately 2000 records for location A. Since data collection was performed manually, the dataset for location A contains missing values. In particular, measurements at location A were not conducted from mid-July through August.

Average monthly air temperature values were obtained from the website http://www.pogodaiklimat.ru/history/36870.htm (Table 2).

Table 2

Average monthly air temperature in Almaty from January 2024 to February 2025

Month	Average monthly air temperatures in Almaty
January	-1.2
February	-3.9
March	5.6

April	12.8
May	17.6
June	24.5
July	25.1
August	25.6
September	15.9
October	11.8
November	5
December	-3.3
January	-2.6
February	-1.5

The portal https://yandex.kz/ was used as a source of meteorological data (wind speed and direction, humidity, and temperature) and traffic data. Due to technical constraints, traffic data were collected from May 2024 to February 2025. Traffic data were recorded at the same three-hour intervals as the air pollution measurements.

Additionally, the dates of switching off and switching on central heating in Almaty for 2024 and 2025 were taken into account. Central heating began to be turned off on April 15, 2024 [15], and was gradually resumed starting from October 7 [16].

To assess the effectiveness of indoor air purification systems, additional measurements of indoor air pollution levels were conducted in premises equipped with compact household air purifiers.

2.2 Quantitative Assessment of the Relationship Between Sources and Pollution Levels

To identify statistically significant relationships between pollution sources and PM2.5 concentrations, the linear correlation coefficient (Pearson correlation coefficient [17]) was used. The Pearson correlation coefficient between variables h and y, each consisting of n observations, is calculated as follows:

$$Rp(y,h) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^{n}(h_i - \bar{h})^2}$$

where $y^{(i)}$ and $h^{(i)}$ are the observed values of variables y and h, $\bar{y}$ and $\bar{h}$ are their mean values:

$\bar{h} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$

A value of Rp = 1 indicates a perfect positive linear relationship;

Rp = −1 indicates a perfect negative linear relationship;

Rp = 0 indicates no linear relationship.

Pearson correlation was used as an exploratory measure of linear association and was not interpreted as direct evidence of causality. To avoid overinterpretation, the results were considered together with the temporal structure of emission sources, seasonal heating operation, weekday–weekend traffic differences, and meteorological context. Statistical significance of the correlation coefficients was assessed using the corresponding p-values.

3. RESULTS

3.1 Monthly Average Concentrations of Particulate Matter

The datasets collected between January 2024 and February 2025 made it possible to calculate monthly average concentrations of particulate matter (Tables 3 and 4).

Table 3

Monthly average concentrations of fine particulate matter at location A

Month	Number of measurements	PM1	PM2.5	PM10
January	148	38.27	44.62	48.68
February	153	39.88	44.53	46.98
March	118	22.88	26.08	28.39
April	161	11.58	13.57	14.82
May	145	9.59	11.44	12.61
June	114	6.12	7.97	9.43
July	28	4.5	5.99	6.93
September	88	9.81	11.8	13.03
October	126	14.51	17.03	21.91
November	134	24	27.69	30.07
December	114	33.16	38.95	44.21
January	111	29.15	33.82	36.73
February	89	55.59	63.31	67.95

Note: Data collection at location A was not conducted from mid-July through August.

Table 4

Monthly average concentrations of fine particulate matter at location B

Month	PM1	PM2.5	PM10
January	50.19	57.65	62.55
February	56.29	63.62	67.97
March	35.88	41.02	44.25
April	14.27	16.73	18.06
May	10.32	12.49	13.88
June	7.32	9.25	10.65
July	7.61	9.56	10.88
August	7.49	9.39	10.65
September	11.06	13.31	14.69
October	18.72	21.96	23.94
November	33.68	39.84	44.7
December	60.99	68.65	73.18
January	51.52	59.22	64.58
February	59.56	68.31	74.22

Figure 2 shows the variation in PM2.5 concentrations in the two studied areas of the city.

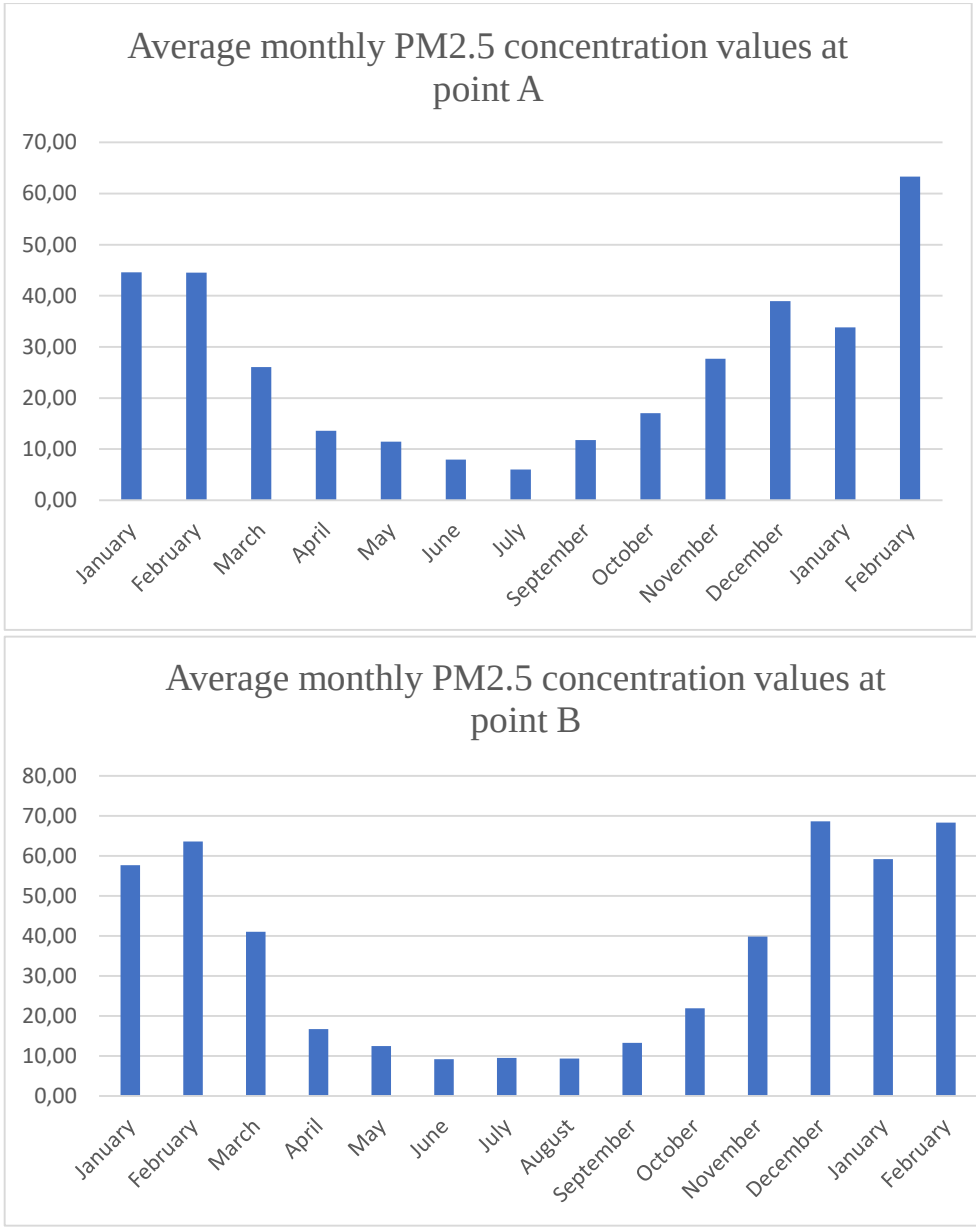


Figure 2. *Monthly average PM2.5 concentrations*

To assess the influence of stationary pollution sources, monthly average concentrations of particulate matter were calculated separately for weekdays and weekends (Figure 3)

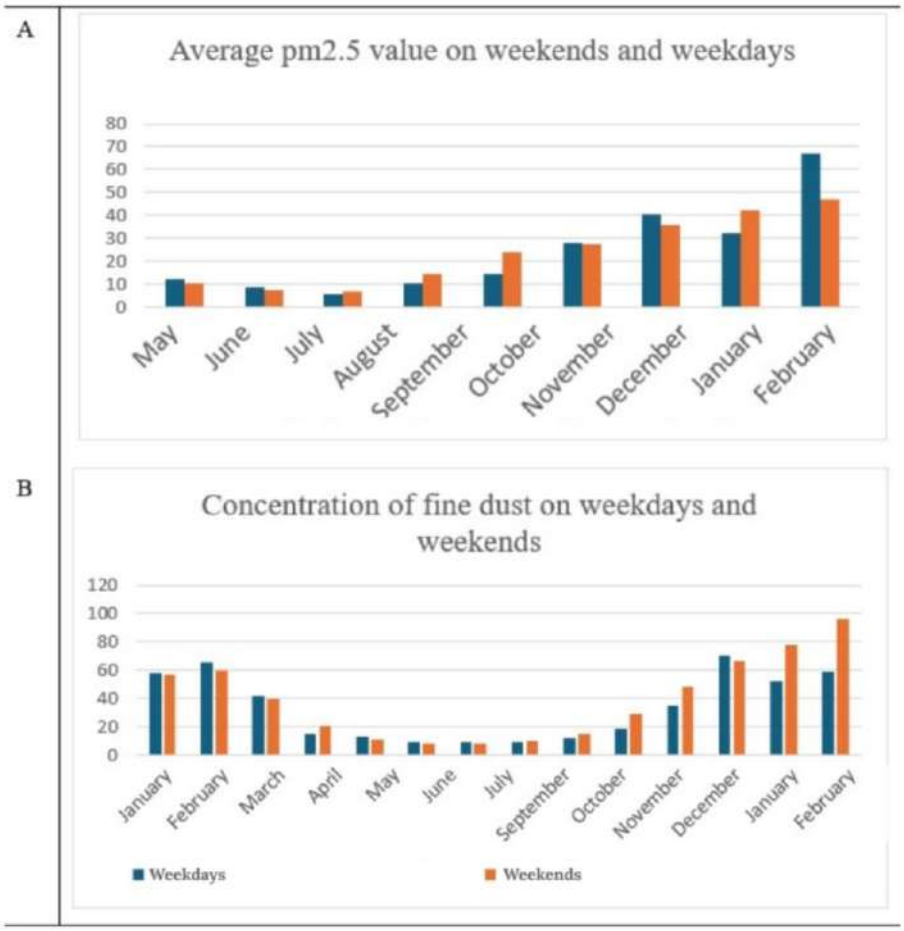


Figure 3. *Average pm2.5 value on weekends and weekdays*

It should be noted that the correlation between PM2.5, PM1, and PM10 concentrations exceeds 0.99. Therefore, all subsequent analyses performed for PM2.5 are also applicable to PM1 and PM10.

3.2 Traffic Levels and Fine Particulate Matter Concentrations on Weekdays and Weekends

Urban traffic levels were recorded starting from May 2024. Table 5 presents the monthly average values of traffic intensity and fine particulate matter concentrations in the urban atmosphere for weekdays and weekends.

Table 5

Monthly average concentrations of particulate matter and traffic levels in the city on weekdays and weekends

Month	PM2.5_B on weekdays	PM2.5_B on weekends	PM2.5_A on weekdays	PM2.5_A on weekends	traffic on week-days	traffic on week-ends
May	12.91667	11.59565	12.13	10.17	4.4	2.54
June	9.45	8.845	8.22	7.84	3.66	2.32
July	9.15641	8.182353	5.46	7	4.15	1.73
September	12.67647	14.96154	10.26	14.5	5.38	2.46
October	18.76111	29.64667	14.45	24.59	5.41	2.8
November	35.49259	48.21429	27.87	27.31	5.6	3.34
December	70.50476	66.48889	39.34	37.92	6.03	3.6
January	51.85429	77.64286	32.02	42	4.38	2.77
February	58.95833	96.375	66.84	47.21	5.4	2.65

For visualization purposes, the average monthly traffic levels for weekdays and weekends are illustrated in Figure 4. Over the observation period, the average traffic level was 5.05 units on weekdays and 2.79 units on weekends.

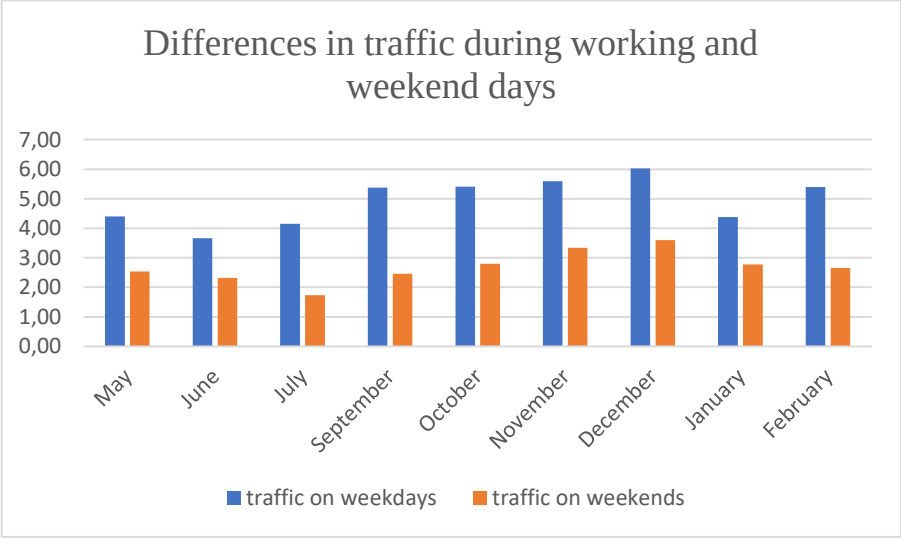


Figure 4. *Differences in traffic levels between weekdays and weekends*

It should be noted that traffic levels are influenced by weather conditions. During the autumn–winter period, precipitation such as rain and snowfall leads to reduced vehicle speeds, while the number of vehicles remains approximately the same, resulting in traffic congestion.

Since traffic levels differ by nearly a factor of two between weekdays and weekends, it is reasonable to assess how air pollution levels vary accordingly. A significant difference in pollution levels between these periods would indicate a substantial contribution of vehicular traffic to pollution in the near-surface atmospheric layer of the city.

3.3 Correlation Analysis Between Pollution Sources and Particulate Matter Concentrations

The data presented above make it possible to estimate the correlation between particulate matter concentrations and the processes and factors influencing air pollution (Table 6).

Table 6

Correlation coefficients between monthly average PM2.5 concentrations and influencing factors

Factors	A/ p-values	B/ p-values
operation of heating systems	0.84889/ $p < 10^{-6}$	0.934362/ $p < 10^{-6}$
air temperature	-0.89336/ $p < 10^{-6}$	-0.95835/ $p < 10^{-6}$
traffic intensity and industrial activity	0.593284/ $p < 10^{-6}$	0.680287/ $p < 10^{-6}$

The correlation analysis shows relationships between PM2.5 concentrations and the following factors:

- operation of heating systems;
- air temperature;
- traffic intensity and industrial activity.

All reported Pearson correlation coefficients were statistically significant ($p < 10^{-6}$). However, these results indicate statistical associations and should not be interpreted as evidence of causal relationships.

Although the primary focus of this study is the identification of major PM2.5 sources in Almaty, the assessment of household air purifiers was included as an applied component aimed at evaluating a practical measure for reducing personal exposure during periods of elevated

outdoor pollution. The average particulate matter concentrations measured indoors, compared to outdoor air, are presented in Table 7.

Table 7

Average particulate matter concentrations measured outdoors and indoors in premises equipped with air purifiers

Measurement location	Outdoor air	Indoor air
A	42.61	14.56
B	34.03	20.48

Note. The higher annual average outdoor pollution level at location A is due to the fact that the number of measurements during the summer period at this location is approximately half of that at location B.

4. DISCUSSION

The sources of air pollution in Almaty can be conditionally divided, based on their temporal dynamics, into two types: relatively stationary sources (combined heat and power plants (CHPs) operating in base load mode, as well as CHPs and residential heating systems during the heating season) and non-stationary or periodic sources (vehicular traffic and industrial enterprises with predictable reductions in activity during nighttime and weekends).

This complex system of anthropogenic emissions interacts with meteorological factors, which themselves exhibit complex dynamics. These include both regular regional wind patterns, such as mountain–valley circulation, and episodic processes such as cyclones and Arctic air intrusions. As a result, the quantitative level of air pollution recorded by sensors cannot be approximated by simple relationships with clear physical interpretations of the contribution of individual sources. A significant quasi-random component associated with weather variability is present.

Meteorological conditions may substantially modify the observed PM2.5 concentrations. Low wind speeds and stable atmospheric stratification reduce horizontal and vertical dispersion and favor pollutant accumulation, whereas stronger winds and mountain–valley circulation can enhance ventilation of the urban basin. High relative humidity may also affect particulate matter measurements and promote particle growth, while precipitation episodes usually contribute to particle removal from the near-surface atmosphere. In winter, the combined effect of increased heating demand, frequent temperature inversions, and weak dispersion conditions can lead to prolonged accumulation of fine particles. Therefore, the observed seasonal increase in PM2.5 should be interpreted as the result of both emission intensity and meteorological conditions that regulate accumulation and dilution.

Nevertheless, identifying the dominant sources of pollution is crucial for the development of effective air quality management strategies. In this study, the periodic nature of urban traffic is used as an indirect indicator to identify dominant pollution sources. It can be observed that CHPs and residential heating systems operate continuously during the heating season regardless of the day of the week, whereas traffic levels on weekends average only about 56% of weekday levels.

However, as shown in the presented results, pollution levels do not decrease proportionally on weekends. In some months, pollution levels are even higher on weekends than on weekdays. This suggests that the primary contributors to air pollution in Almaty during the winter period are CHPs and residential heating systems.

This assumption is supported by correlation analysis between pollution levels and CHP operation, as well as between particulate matter concentrations and ambient air temperature. The strong correlation between pollution indicators and air temperature directly indicates the influence of heat generation systems on urban air quality. Modern CHP control systems maintain a constant steam temperature in district heating networks, which leads to increased fuel consumption during colder periods and reduced consumption as ambient temperature rises. The

empirically derived correlation between CHP operational parameters and pollution levels is statistically significant.

In contrast, the relatively low correlation between traffic intensity and particulate matter concentrations indicates that vehicular traffic contributes significantly less to particulate pollution, particularly during the heating season. This is further supported by the absence of a pronounced weekly pattern in pollution levels. Only during the summer period is a slight difference observed between weekday and weekend pollution levels; however, the available data are insufficient for statistically robust conclusions.

Overall, the collected data and performed analyses lead to the following conclusions.

The average concentration of particulate matter indoors, in premises equipped with air purification systems, is significantly lower than outdoors.

The primary source of fine particulate air pollution is heat generation systems.

This conclusion is consistent with findings reported in [8], which state that “in most urban areas of Central and Eastern Europe, the Western Balkans, and Central Asia, seasonal peaks in air pollution are caused by residential heating during winter.” However, the results obtained in this study differ from commonly cited sources that identify transport as the main contributor to urban air pollution [18]. According to our analysis, this is not the case.

A reduction in environmental impact can be achieved by transitioning heating systems to natural gas or, preferably, to electricity generated from environmentally friendly sources (renewable energy or nuclear power). Additional reductions in emissions could be achieved by limiting other combustion-related activities, such as waste burning and open-fire cooking. Although the contribution of these sources is difficult to quantify, improving urban environmental practices could further enhance air quality once heating systems transition to cleaner energy sources.

Vehicular traffic contributes relatively little to particulate air pollution in the city. The contribution of transport and industrial enterprises is several times lower than that of heating systems and becomes noticeable mainly during the spring and summer periods, when overall particulate pollution levels decrease significantly.

4. CONCLUSION

In analyzing the characteristics of pollution sources in the urban atmosphere, the authors aimed to identify the group of sources that make the greatest contribution to air pollution. The key methodological approach was the classification of sources into relatively stationary (with emissions independent of the day of the week) and non-stationary or periodic (with emissions varying significantly depending on the day of the week).

This approach made it possible, based on a relatively limited dataset obtained from two sensors, to conclude that the primary source of air pollution in the megacity of Almaty is heat generation systems, both within the city and in suburban areas, particularly those relying on solid fuel combustion. In combination with the city’s geographical features, this leads to high concentrations of fine particulate matter. During winter months, pollution levels of this type often exceed permissible limits severalfold.

Reducing emissions through the transition to gas-based or electric heating systems could significantly decrease particulate concentrations in Almaty’s air. It should also be noted that indoor air purification systems can provide substantial protection and reduce health risks during the transition period while urban CHPs are being modernized.

As for transport, its contribution, as well as that of industrial enterprises, is relatively small and becomes noticeable mainly during the summer period.

This study is subject to several limitations:

the analysis is based on data from only two sensors;

the dataset covers a period of just over one year;

the available data are insufficient to draw statistically significant conclusions regarding the impact of traffic during the summer period;

meteorological parameters, such as wind speed and direction, were considered only as part of aggregated statistics, although they may play a significant role in predictive modeling.

Future research involving a larger network of sensors will help to overcome these limitations. In addition, further work will focus on developing methods for forecasting air pollution with high temporal and spatial resolution.

DATA AVAILABILITY

This study uses both the authors' own data, obtained during field measurements conducted in Almaty from 2024 to early 2025, and published materials from Kazakhstani and international researchers relevant to the study of atmospheric air pollution by fine particulate matter. Additionally, the study incorporates generalized data on weather conditions, heating system operation, and traffic load, obtained from open information sources and analytical reports. Additional data may be provided by the authors upon reasonable request.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization – RM; methodology – YK; writing and editing – LG; investigation – RM, AS, YK.

FINANCIAL SUPPORT

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992908, Support System for Agricultural Crop Production Optimization via Remote Monitoring and Artificial Intelligence Methods (Agroscope); and Grant No. BR21881908, Complex of Urban Ecological Support (CUES)).

REFERENCES

1. Ding Y., Peng J. (2018). Impacts of urbanization of mountainous areas on resources and environment: Based on ecological footprint model. Sustainability, 10, 765. https://doi.org/10.3390/su10030765
2. World Health Organization. (2014). 7 million deaths annually linked to air pollution. [Electronic resources] URL: https://www.who.int/ru/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution (date of access: 10.04.2026)
3. Garcia A., Santa-Helena E., De Falco A., de Paula Ribeiro J., Gioda A., & Gioda C. R. (2023). Toxicological effects of fine particulate matter (PM2.5): health risks and associated systemic injuries—systematic review. Water, Air, & Soil Pollution, 234(6), 346.
4. Dangerous atmosphere: Top 10 cities and countries with the most polluted air. [Electronic resources] URL: https://newizv.ru/news/2024-03-07/opasnaya-atmosfera-top-10-gorodov-i-stran-s-samym-zagryaznennym-vozduhom-427895 (date of access: 10.04.2026)
5. Mongolia's children choke in toxic pollution. [Electronic resources] URL: https://www.rfi.fr/en/international-news/20250312-mongolia-s-children-choke-in-toxic-pollution (date of access: 10.04.2026)
6. Shukurov I. S. (2018). Problems of airing cities located in mountain basin. Atlantis Press. [Electronic resources] URL: https://www.atlantis-press.com/article/55915039.pdf (date of access: 10.04.2026)
7. How to solve the smog problem in Bishkek and what is its main cause? Expert opinions. [Electronic resources] URL: https://kaktus.media/doc/491285_kak_reshit_problemy_smoga_v_bishkeke_i_chto_iavliaetsia_ee_glavnoy_prichinoy_mneniia_ekspertov.html (date of access: 10.04.2026)
8. World Bank. (2023). Air quality management in the Republic of Tajikistan. [Electronic resources] URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099081723150529416/pdf/P18001408270f40e80b900006bd7a098720.pdf (date of access: 10.04.2026)
9. Silcox G. D., Kelly K. E., Crosman E. T., Whiteman C. D., Allen B. L. (2012). Wintertime PM2.5 concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley. Atmospheric Environment, 46, 17–24. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.041
10. Assanov D., Zapasnyi V., Kerimray A. (2021). Air quality and industrial emissions in the cities of Kazakhstan. Atmosphere, 12, 314. https://doi.org/10.3390/atmos12030314
11. What air did Almaty residents breathe in 2024? [Electronic resources] URL: https://air.org.kz/research/kakim-vozduhom-dyshali-almatintsy-v-2024-godu/ (date of access: 10.04.2026)
12. Clean Air Asia. (2023). Air Quality in Asia: Status and Trends 2023 Edition. [Electronic resources] URL: https://cleanairasia.org/our-resources/publications/air-quality-asia-status-and-trends-2023-edition (date of access: 02.08.2026)
13. Issakhov A., Rysmambetov N., Abylkassymova A. (2025). Predicting particulate matter (PM2.5) air pollution levels in Almaty city using machine learning techniques. Modeling Earth Systems and Environment, 11, 236. https://doi.org/10.1007/s40808-025-02397-w
14. deSouza P., Kahn R., Stockman T., Obermann W., Crawford B., Wang A., Crooks J., Li J., Kinney P. (2022). Calibrating networks of low-cost air quality sensors. Atmospheric Measurement Techniques, 15(21), 6309–6328. https://doi.org/10.5194/amt-15-6309-2022
15. The date of heating shutdown in Almaty has been announced. [Electronic resources] URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/nazvana-data-otklyucheniya-otopleniya-v-almatyi-531548/ (date of access: 10.04.2026)
16. When heating will be turned on in Almaty: date announced. [Electronic resources] URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/kogda-vklyuchat-otoplenie-v-almatyi-nazvana-data-549786/ (date of access: 10.04.2026)
17. Pearson K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. Proceedings of the Royal Society of London, 58, 240–242.
18. What is the main source of air pollution in Almaty, experts explain. [Electronic resources] URL: https://www.nur.kz/society/2127006-chto-yavlyaetsya-naibolshim-istochnikom-zagryazneniya-vozduha-v-almaty-obyasnili-ekologi/ (date of access: 10.04.2026)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ding Y., Peng J. (2018). Impacts of urbanization of mountainous areas on resources and environment: Based on ecological footprint model. Sustainability, 10, 765. https://doi.org/10.3390/su10030765
2. World Health Organization. (2014). 7 миллионов смертей ежегодно связаны с загрязнением воздуха [Electronic resources] URL: https://www.who.int/ru/news/item/25-03-2014-7-million-premature-deaths-annually-linked-to-air-pollution (date of access: 10.04.2026)
3. Garcia A., Santa-Helena E., De Falco A., de Paula Ribeiro J., Gioda A., & Gioda C. R. (2023). Toxicological effects of fine particulate matter (PM2.5): health risks and associated systemic injuries—systematic review. Water, Air, & Soil Pollution, 234(6), 346.
4. Опасная атмосфера: ТОП-10 городов и стран с самым загрязненным воздухом. [Electronic resources] URL: https://newizv.ru/news/2024-03-07/opasnaya-atmosfera-top-10-gorodov-i-stran-s-samym-zagryaznennym-vozduhom-427895 (date of access: 10.04.2026)
5. Mongolia's children choke in toxic pollution. [Electronic resources] URL: https://www.rfi.fr/en/international-news/20250312-mongolia-s-children-choke-in-toxic-pollution (date of access: 10.04.2026)
6. Shukurov I. S. (2018). Problems of airing cities located in mountain basin. Atlantis Press. [Electronic resources] URL: https://www.atlantis-press.com/article/55915039.pdf (date of access: 10.04.2026)
7. Как решить проблему смога в Бишкеке и что является ее главной причиной? Мнения экспертов. [Electronic resources] URL: https://kaktus.media/doc/491285_kak_reshit_problemy_smoga_v_bishkeke_i_chto_iavliaetsia_ee_glavnoy_prichinoy_mneniia_ekspertov.html (date of access: 10.04.2026)
8. Всемирный банк. (2023). Управление качеством воздуха в Республике Таджикистан. [Electronic resources] URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099081723150529416/pdf/P18001408270f40e80b900006bd7a098720.pdf (date of access: 10.04.2026)
9. Silcox G. D., Kelly K. E., Crosman E. T., Whiteman C. D., Allen B. L. (2012). Wintertime PM2.5 concentrations during persistent, multi-day cold-air pools in a mountain valley. Atmospheric Environment, 46, 17–24. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.041
10. Assanov D., Zapasnyi V., Kerimray A. (2021). Air quality and industrial emissions in the cities of Kazakhstan. Atmosphere, 12, 314. https://doi.org/10.3390/atmos12030314
11. Каким воздухом дышали алматинцы в 2024 году? [Electronic resources] URL: https://air.org.kz/research/kakim-vozduhom-dyshali-almatintsy-v-2024-godu/ (date of access: 10.04.2026)
12. Clean Air Asia. (2023). Air Quality in Asia: Status and Trends 2023 Edition. [Electronic resources] URL: https://cleanairasia.org/our-resources/publications/air-quality-asia-status-and-trends-2023-edition (date of access: 02.08.2026)
13. Issakhov A., Rysmambetov N., Abylkassymova A. (2025). Predicting particulate matter (PM2.5) air pollution levels in Almaty city using machine learning techniques. Modeling Earth Systems and Environment, 11, 236. https://doi.org/10.1007/s40808-025-02397-w
14. deSouza P., Kahn R., Stockman T., Obermann W., Crawford B., Wang A., Crooks J., Li J., Kinney P. (2022). Calibrating networks of low-cost air quality sensors. Atmospheric Measurement Techniques, 15(21), 6309–6328. https://doi.org/10.5194/amt-15-6309-2022
15. Названа дата отключения отопления в Алматы. [Electronic resources] URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/nazvana-data-otklyucheniya-otopleniya-v-almatyi-531548/ (date of access: 10.04.2026)
16. Когда включат отопление в Алматы: названа дата. [Electronic resources] URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/kogda-vklyuchat-otoplenie-v-almatyi-nazvana-data-549786/ (date of access: 10.04.2026)
17. Pearson K. (1895). Note on regression and inheritance in the case of two parents. Proceedings of the Royal Society of London, 58, 240–242.
18. Что является наибольшим источником загрязнения воздуха в Алматы, объяснили экологи. [Electronic resources] URL: https://www.nur.kz/society/2127006-chto-yavlyaetsya-naibolshim-istochnikom-zagryazneniya-vozduha-v-almaty-obyasnili-ekologi/ (date of access: 10.04.2026)

ТАУ ЕТЕГІНДЕ ОРНАЛАСҚАН МЕГАПОЛИСТЕГІ ҰСАҚ ДИСПЕРСТІ БӨЛШЕКТЕРМЕН АУАНЫҢ ЛАСТАНУЫНЫҢ НЕГІЗГІ КӨЗДЕРІ: АЛМАТЫ ҚАЛАСЫ МЫСАЛЫНДА

Равиль И. Мұхамедиев [1,2] и.ғ.д., Адилхан Сымағұлов[1], Ян И. Кучин [1,2], Алексей Г. Терехов [1,2] т.ғ.к., Людмила А. Городецкая[1*]

[1]Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы, Қазақстан; ravil.muhamedyev@gmail.com, a.symagulov@satbayev.university, ykuchin@mail.ru, aterekhov1@yandex.ru, ludmila260601@gmail.com
[2]ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан; ravil.muhamedyev@gmail.com, ykuchin@mail.ru, aterekhov1@yandex.ru,
*Автор корреспондент: Людмила А. Городецкая, ludmila260601@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

тау бөктеріндегі қазаншұңқырлар,
ауаның ластануы,
Ұсақ дисперсті бөлшектер,
Пирсон корреляциясы

АБСТРАКТ

Осы жұмыста Қазақстанның ең ірі мегаполисі — Алматы қаласының атмосфералық ауасының ұсақ дисперсті бөлшектермен (PM2.5) ластануы талданады. Қала Іле Алатауы жотасының сілемдерінен құралған қазаншұңқырда орналасқан. Географиялық ерекшеліктеріне байланысты ол антропогендік шығу текті ұсақ дисперсті бөлшектермен жоғары деңгейде ластануға ұшырайды.

Мақала жайында:
Алынды:10.04.2026
Қайта қаралды: 14.04.2026
Қабылданды:17.08.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Ауаның негізгі ластаушы көздері — көлік, өнеркәсіп кәсіпорындары және жылу жүйелері. Зерттеудің мақсаттары: ластанудың басым көзін анықтау, қаланың орталық және тау бөктеріндегі аудандары арасындағы кеңістіктік айырмашылықтарды бағалау, сондай-ақ тұрмыстық ауа тазартқыштардың үй ішіндегі ауа сапасын жақсарту тиімділігін анықтау. Қалалық автокөлік қозғалысы уақыт бойынша периодтық сипатқа ие: тәуліктік минимумдар түнгі уақытта, ал апталық минимумдар демалыс күндері байқалады. Бұл динамика аталған көздің қалалық атмосферадағы PM2.5 концентрациясына қосатын үлесін сандық тұрғыдан бағалауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері күз-қыс кезеңінде жылу энергиясын өндіру жүйелері PM2.5 ластануының басым көзі болуы мүмкін екенін көрсетеді. Сонымен қатар, бақылаулар тау бөктеріндегі аудандарда жоғары ластану деңгейлерінің қаланың орталық бөлігімен салыстырғанда шамамен 30%-ға сирек тіркелетінін көрсетеді. Бақыланған жағдайларда тұрмыстық ауа тазарту жүйелерін қолдану үй-жайлардағы ұсақ дисперсті бөлшектердің концентрациясын бірнеше есе төмендетуі мүмкін.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ПЫЛЕВЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПРЕДГОРНОМ МЕГАПОЛИСЕ НА ПРИМЕРЕ АЛМАТЫ

Равиль И. Мухамедиев[1,2] д.инж.н., Адилхан Сымагулов[1], Ян И. Кучин[1,2], Алексей Г. Терехов[1,2] к.т.н., Людмила А. Городецкая[1*]

[1] КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан; ravil.muhamedyev@gmail.com, a.symagulov@satbayev.university, ykuchin@mail.ru, aterekhov1@yandex.ru, ludmila260601@gmail.com
[2] Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан; ravil.muhamedyev@gmail.com, ykuchin@mail.ru, aterekhov1@yandex.ru
*Автор корреспондент: Людмила А. Городецкая, ludmila260601@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

предгорные котловины,
загрязнение воздуха,
мелкодисперсные пылевые частицы,
корреляция Пирсона.

По статье:
Получено: 10.04.2026
Пересмотрено: 14.04.2026
Принято: 17.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

В настоящей работе анализируется загрязненность мелкодисперсными частицами воздушной среды Алматы, крупнейшего мегаполиса Казахстана. Город находится в котловине из отрогов хребта Заилийский Алатау. В силу географических особенностей он подвергается большому загрязнению мелкодисперсными пылевыми частицами антропогенного происхождения. Источниками загрязнения воздуха являются транспорт, предприятия и системы отопления. В настоящей работе ставится задачи выявления наиболее масштабного загрязнителя, оценки неравномерности загрязнения между центральными и предгорными районами и способности бытовых очистителей воздуха улучшать качество воздуха в помещениях. Городской автомобильный трафик представляет собой периодическую временную функцию с суточными минимумами в ночное время и недельными минимумами в выходные дни. Такая динамическая особенность в интенсивности этого источника загрязнения воздуха позволяет количественно оценивать его значимость в общем уровне концентрации пылевых частиц PM2.5 городского воздушного бассейна. Полученные результаты позволяют предположить, что в осенне-зимний период системы теплоснабжения могут являться основным источником загрязнения воздуха PM2.5. Кроме того, наблюдения показывают, что в предгорных районах высокие уровни загрязнения фиксируются примерно на 30% реже, чем в центральной части города. В условиях проведенных наблюдений применение бытовых систем очистки воздуха может снижать концентрацию мелкодисперсных частиц в жилых помещениях в несколько раз.

Publisher's Note: Statements, opinions, and data in all publications are those of the author(s) alone and not those of the Journal of Hydrometeorology and Ecology and/or the editor(s).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПРОДУКТОВ УТИЛИЗАЦИИ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОТИВ ВРЕДИТЕЛЕЙ ЯБЛОНИ

Арман Б. Маханбетов[1] PhD, ассоцированный профессор, Тулкинжон Э. Гаипов[1] кандидат химических наук, Давлат Х. Юлдашбек[1*], Арнур М. Кенжегалиев[2], Жулдыз А. Дюсенова[3] кандидат технических наук, Гульмира Д. Исенова[2] кандидат биологических наук, Гульнисам О. Рвайдарова[2] кандидат биологических наук

[1]Международный казахско-турецкий университет имени Ходжи Ахмеда Ясави, Туркестан, Казахстан; arman.makhanbetov@ayu.edu.kz (А.Б.М.); tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz (Т.Э.Г.); davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz (Д.Х.Ю.)
[2]Казахский научно-исследовательский институт защиты и карантина растений имени Жазкена Жиембаева, Алматы, Казахстан; arnur_1992@mail.ru (А.М.К.); isenova.gd@gmail.com (Г.Д.И.); gulnisam@inbox.ru (Г.О.Р.)
[3]РГП «Казгидромет», Управления климатических исследований Научно-исследовательского центра, Астана, Казахстан; dyussenova_zh@meteo.kz (Ж.А.Д.)
*Автор корреспондент: Давлат Х. Юлдашбек, e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

яблоня,
вредители,
полисульфид кальция,
известково-серный отвар,
биологическая активность.

АБСТРАКТ

В условиях устойчивого развития сельского хозяйства возрастает потребность в экологически безопасных и эффективных средствах защиты растений. Особый интерес представляет использование продуктов переработки серосодержащих промышленных отходов как источника биологически активных соединений. Целью настоящего исследования являлась оценка биологической активности полисульфида кальция (известково-серного отвара – ИСО, 40 %-ного водного раствора), полученного на основе серосодержащих отходов, против комплекса вредителей яблони. Полевые исследования проведены в условиях яблоневого сада Алматинской области с использованием общепринятых методик фитосанитарного мониторинга. Установлено, что применение ИСО в концентрациях 1,0...3,0 % обеспечивает высокую биологическую эффективность против клещей (*Panonychus ulmi, Bryobia rubrioculus*), а также гусениц *Cydia pomonella* и мучнистых червецов. Биологическая эффективность варьировала от 74,1 % до 90,3 % в зависимости от концентрации препарата. Наибольший эффект достигнут при концентрации 3,0 %, при которой снижение повреждённости листьев клещами составило 90,3 %, а плодов – 88,5 %. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности полисульфида кальция, полученного из серосодержащих отходов, и подтверждают перспективность его применения в интегрированных системах защиты растений. Использование данного препарата способствует снижению пестицидной нагрузки и рациональному использованию вторичных ресурсов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая наука демонстрирует устойчивый рост интереса к разработке экологически безопасных инсектицидных препаратов и использованию побочных продуктов различного происхождения в качестве сырья. Так, показано, что отходы растительного происхождения, в частности алоэ вера, могут быть переработаны в натуральные инсектициды благодаря содержанию комплекса биологически активных соединений, обладающих инсектицидными свойствами [1]. Это подтверждает перспективность вовлечения отходов в агрохимические технологии.

МРНТИ 68.37.13 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-167-176 УДК 632.7.04/.08

По статье:
Получено: 17.04.2026
Пересмотрено:13.07.2026
Принято: 11.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026.

Для цитирования:
Маханбетов А., Гаипов Т., Юлдашбек Д., Кенжегалиев А., Дюсенова Ж., Изучение биологической активности продуктов утилизации серосодержащих отходов против вредителей яблони// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 167-176.

Параллельно активно развиваются нанотехнологические подходы. В частности, разрабатываются нанопестициды с повышенной адгезией к поверхности растений, что снижает потери действующего вещества и повышает эффективность обработки. Отмечается необходимость создания препаратов, сочетающих высокую биологическую активность и экологическую безопасность [2].

Актуальной остаётся проблема рационального использования промышленных отходов, накопление которых приводит к загрязнению окружающей среды и экономическим потерям [3]. В то же время сельское хозяйство сохраняет потребность в эффективных средствах защиты растений, поскольку без фитосанитарных мероприятий потери урожая могут быть значительными. Применение традиционных химических инсектицидов сопровождается негативными экологическими последствиями, включая загрязнение почвы и водоёмов, а также накопление остаточных количеств в продукции. По оценкам, до 80...90 % распыляемых препаратов оседает вне целевого объекта [4].

В этой связи особое значение приобретают технологии получения экологически безопасных препаратов на основе серосодержащих соединений, включая композиции, формируемые с использованием побочных продуктов промышленных производств. Применение таких отходов позволяет одновременно решать задачи утилизации техногенного сырья и получения эффективных средств защиты растений.

Препараты, получаемые на основе взаимодействия серы с известью, применяются в сельском хозяйстве на протяжении длительного времени. Современные исследования направлены на повышение их эффективности, стабильности и экологической безопасности.

В ряде работ [5...7] показано, что применение серосодержащих неорганических соединений, включая композиции на основе полисульфидов кальция, эффективно снижает поражение плодовых культур и потери урожая. Дополнительно установлено их влияние на почвенную микробиоту и ростовые процессы растений. В лабораторных и полевых условиях подтверждена эффективность таких препаратов против широкого спектра вредителей, включая мраморного клопа (*Halyomorpha halys*) и паутинного клеща (*Tetranychus urticae*), при допустимом уровне воздействия на энтомофагов [8, 9].

Тем не менее, имеющиеся данные по фитосанитарному состоянию яблоневых насаждений в Казахстане ограничены исследованиями дикорастущих форм, в частности *Malus sieversii*, и преимущественно касаются фитопатогенов, тогда как вопросы комплексной оценки вредителей и эффективности защитных мероприятий в условиях культурных садов Юго-Восточного Казахстана остаются недостаточно изученными [10]. Климатические особенности региона, включая температурные колебания, режим увлажнения и специфику фитосанитарной нагрузки, могут существенно влиять на результативность обработки [11, 12]. В связи с этим целью настоящего исследования является оценка инсектицидной эффективности известково-серной системы в реальных агроэкологических условиях.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Химический состав серного кека сернокислотного пройзводства определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) и классическими аналитическими методами.

Получение известково-серного отвара (ИСО) осуществляли в укрупнённо-лабораторных условиях (реактор объёмом 200 л) при температуре 90...95 °С, продолжительности обработки до 2 ч и соотношении компонентов серный кек : известь : вода = 2,5 : 1 : 18.

Полевые исследования проводили в яблоневом саду крестьянского хозяйства «Олжас» (Карасайский район Алматинской области). Объектом служил промышленный участок площадью 5 га с деревьями сорта Апорт в стадии активной вегетации. Агротехнические мероприятия включали полив, подкормку, мульчирование, санитарную обрезку и механическую обработку почвы.

Фитосанитарный мониторинг проводили при следующих агрометеорологических условиях: температура воздуха +26…+28 °С, относительная влажность 55...60 %, осадки отсутствовали, наблюдалась переменная облачность. Указанные условия способствовали активному развитию вредителей.

Мониторинг выполняли в соответствии с методическими рекомендациями по оценке фитосанитарного состояния плодовых насаждений. Осмотр проводили по диагональной схеме с охватом всех зон сада. На каждой точке обследовали 5...7 деревьев. Оценке подвергались стволы, ветви, листья и плоды.

Для сбора мелких и подвижных представителей энтомофауны использовали энтомологические сачки диаметром 30 см с мелкоячеистой сеткой [13]. Пробы отбирали с 10 случайно выбранных деревьев в пределах каждой зоны [14]. Материал консервировали в 70% этаноле и направляли на лабораторную диагностику [15].

На 20 контрольных деревьях устанавливали ловчие пояса из гофрированного картона, которые снимали через 10 суток с последующим анализом на наличие вредителей, в том числе гусениц яблонной плодожорки (*Cydia pomonella*).

Полевые опыты по оценке биологической эффективности ИСО (40% в.р.) проводили по четырёхвариантной схеме: контроль и три опытных варианта с концентрацией 1,0; 2,0 и 3,0 %. Каждый вариант включал не менее 5 учётных деревьев, размещённых случайным образом. Для предотвращения перекрёстного влияния предусматривали буферные зоны.

Обработку проводили методом мелкодисперсного опрыскивания с использованием ранцевого опрыскивателя «Solo 451». Работы выполняли в утренние часы (8:00...10:30) при температуре около +23 °С, относительной влажности 55...60 % и отсутствии осадков [16]. Опрыскивание осуществляли до полного смачивания листовой поверхности без стекания капель.

Биологическую эффективность ИСО оценивали по динамике численности вредителей (клещей, гусениц, червецов) на 5-й, 10-й и 15-й дни после обработки. Оценка проводилась по результатам повторного фитосанитарного мониторинга.

Расчёт биологической эффективности (%) выполняли по формуле:

где:

Э – биологическая эффективность, %;

К – среднее значение численности вредителей в контрольном варианте;

О – среднее значение численности вредителей в опыте.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта исследования рассмотрен серный кек, образующийся на предприятии ДЗО SSAP в процессе фильтрации расплавленной серы из ванны плавления. Материал характеризуется высоким содержанием серы (77,01 %), а также наличием железа (3,322 %), кремния (2,673 %) и кальция (1,254 %). Примесные элементы (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ba и др.) присутствуют в относительно низких концентрациях – от десятков до сотен ppm. Высокое содержание серы и сравнительно низкий уровень примесей определяют технологическую целесообразность использования кека в качестве сырья для получения серосодержащих соединений.

Проведён фракционный анализ исходного серного кека, результаты которого представлены в таблице 1.

Таблица 1

Фракционный анализ серного кека

Фракция	Масса (г)	Содержание S (%)	±3σ (%)
-0,1 мм	34,62	81,58	0,77
0,1...0,25 мм	120,22	74,79	0,25
0,25...0,5 мм	161,05	69,03	0,28
0,5…1 мм	255,1	68,42	0,29
1…2 мм	216,23	71,53	0,83
+2 мм	206,09	68,60	0,30

Анализ данных фракционного состава серного кека показывает, что содержание серы варьирует в пределах от 68,42% до 81,58% в зависимости от крупности частиц. Наибольшее содержание серы характерно для тонкой фракции (-0,1 мм), тогда как в более крупных фракциях (0,25…2 мм и выше) наблюдается незначительное снижение её концентрации. При этом основная масса материала сосредоточена в фракциях 0,5...2 мм, что определяет их наибольший вклад в общий баланс серы.

В результате проведённых исследований и расчёта материального баланса установлено, что основная часть серы переходит в жидкую фазу, а степень её извлечения составляет 92,76 %. Для кальция данный показатель существенно ниже и составляет 56 %, что свидетельствует о его частичном сохранении в твёрдом остатке. Полученные данные показывают, что в условиях проведённой экстракции процесс преимущественно обеспечивает переход серосодержащих соединений в раствор.

Образование активных серосодержащих соединений в известково-серной системе протекает при взаимодействии гидроксида кальция с серой с образованием полисульфидов и тиосульфата кальция [17…20]:

$$3Ca(OH)_2 + 12S \rightarrow 2CaS_5 + CaS_2O_3 + 3H_2O \quad (2)$$

В водной среде полисульфиды кальция неустойчивы и подвергаются окислительно-восстановительным превращениям с выделением тонкодисперсной элементарной серы:

$$CaS \cdot S_x + 3O \rightarrow CaS_2O_3 + S_{x-1} \quad (3)$$

Дополнительно под действием диоксида углерода происходит их разложение:

$$CaS \cdot S_x + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO3 + H_2S + S_x \quad (4)$$

Формирующаяся тонкодисперсная сера характеризуется развитой удельной поверхностью, что обеспечивает её высокую реакционную способность и биоцидную активность.

Данные СЭМ подтверждают образование частиц различной морфологии – от субмикронных до агрегированных (рис. 1).

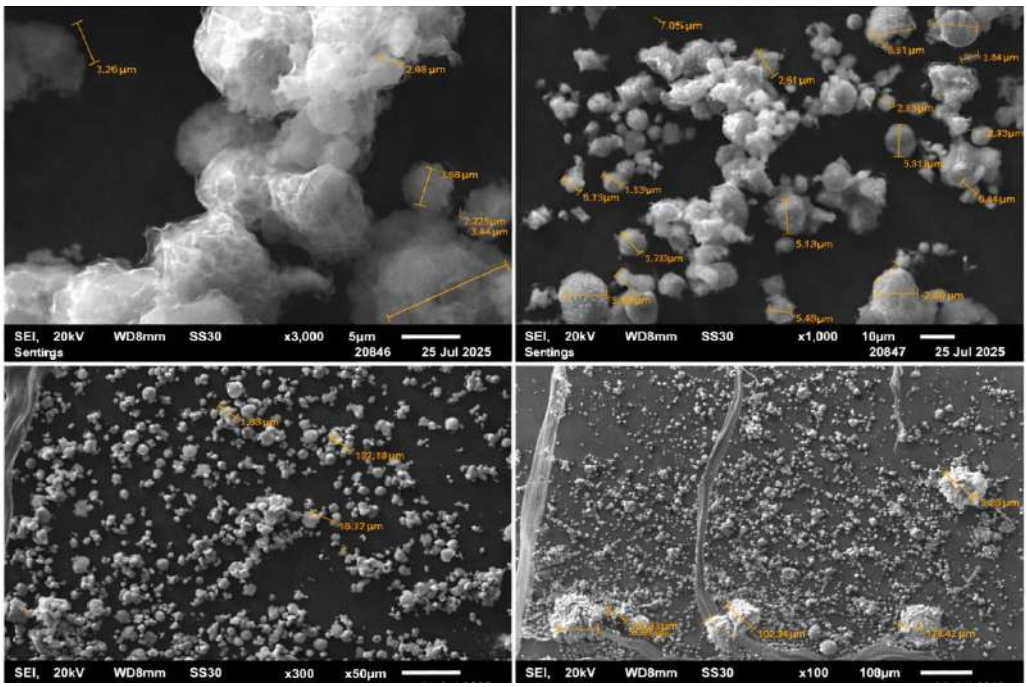


Рисунок 1. *Электронно-микроскопическое изображение тонкодисперсных частиц серы*

Такая морфология объясняет инсектицидное действие серы: мелкие частицы легко удерживаются на поверхности растений, прочно фиксируются в микропорах кутикулы и обеспечивают длительный контакт с насекомыми-вредителями. Высокая удельная поверхность частиц способствует более активному взаимодействию с покровами насекомых и приводит к их поражению.

Для подтверждения состава был проведён энергодисперсионный анализ (EDS). Полученные результаты свидетельствуют, что образец практически полностью состоит из серы (среднее значение 97,33 мас.%) (таб. 2).

Таблица 2

Элементный состав образца по данным СЭМ-EDS

Спектр	O, %	Si, %	S, %	Fe, %	Итог, %
1	6,57	0,21	92,46	0,75	100,00
2	0,00	0,18	99,82	0,00	100,00
3	0,00	0,28	99,72	0,00	100,00
Среднее	2,19	0,22	97,33	0,25	100,00

Таким образом, данные СЭМ и EDS подтверждают формирование тонкодисперсной серы высокой чистоты, обладающей развитой удельной поверхностью и потенциальной биоцидной активностью.

Для оценки практической эффективности полученного состава проведён фитосанитарный мониторинг в яблоневом саду крестьянского хозяйства «Олжас».

В результате мониторинга яблоневого сада КХ «Олжас», выявлены следующие основные выявленные вредители: красный плодовый клещ (Panonychus ulmi), бурый плодовый клещ (Bryobia rubrioculus), мучнистые червецы (сем. Pseudococcidae) и яблонная плодожорка (Cydia pomonella).

Степень поврежденности плодов и листьев яблони приведены в таблице 3.

Таблица 3

Поврежденность плодов и листьев в к/х Олжас

Культура, сорт	Площадь садов, га	Яблонная плодорожка		Красный и бурый плодовые клещи		Мучнистый червец	
		Встречаемость	Поврежденности плодов, %	Встречаемость	Поврежденности листьев, %	Встречаемость	Поврежденности листьев, %
Яблоня, Апорт	5	+++	35,1	+	31,5	+	9,1

Примечание: + - встречаемость до 5%; ++ - встречаемость до 25-50%; +++ - встречаемость более 50%.

Анализ полученных в ходе полевого эксперимента данных позволяет сделать вывод о высокой биологической активности ИСО при использовании его в различных концентрациях. Согласно данным, представленным в таблице 4, применение всех тестируемых доз ИСО обеспечило значительное снижение численности вредоносных организмов по сравнению с контролем (без обработки), причём эффект сохранялся в течение всего периода наблюдений (5, 10 и 15 сутки после обработки).

Таблица 4

Биологическая эффективность против вредителей на 15-й день

Варианты	Поврежденность, %		Биологическая эффективность, %	
	Яблонной плодорожкой, плодов	Красный и бурый плодовые клещи, листьев	Яблонной плодорожкой, плодов	Красный и бурый плодовые клещи, листьев
Контроль (без обработки)	35	31	-	-
ИСО, 1,0%	9	8	74,2	74,1
ИСО, 2,0%	7	5	80	83,8
ИСО, 3,0%	4	3	88,5	90,3

Биологическая эффективность ИСО по отношению к клещам (Panonychus ulmi и Bryobia rubrioculus) и другим вредителям (гусеницы Cydia pomonella и мучнистые червецы) варьировала в пределах от 74,1% до 90,3% в зависимости от концентрации рабочего раствора. Наиболее высокий эффект наблюдался при применении ИСО в концентрации 3,0%, где степень снижения повреждённости листьев клещами составила 90,3%, а плодов – 88,5%. Эти данные свидетельствуют о выраженном контактном и овицидном действии полисульфида кальция при повышенной концентрации серосодержащих соединений.

Нижняя доза ИСО (1,0%) также показала удовлетворительный уровень активности, обеспечивая снижение повреждённости листьев на 74,1%, а плодов – на 74,2%, что может быть использовано при необходимости снижения пестицидной нагрузки или в условиях умеренного поражения.

Таким образом, ИСО проявил стабильное и воспроизводимое действие в условиях открытого грунта, демонстрируя эффективность не только в отношении клещей, но и в борьбе с комплексом вредных организмов сада. Это делает ИСО перспективным средством для интегрированных систем защиты яблони, где важную роль играет не только результативность, но и экологическая безопасность воздействия.

Анализ экологических характеристик показал, что препарат, не обладая выраженным системным действием, действует преимущественно контактно и не оказывает длительного негативного влияния на полезную энтомофауну сада, в том числе на популяции хищных клещей и паразитоидов. Это подтверждает допустимость его применения в рамках программ биологически ориентированного контроля вредителей.

Кроме того, высокая эффективность ИСО при минимальном уровне остаточных накоплений делает его особенно актуальным в производстве экологически чистой, органической и экспортно-ориентированной плодоводческой продукции.

Таким образом, применение ИСО может рассматриваться как экономически обоснованное и экологически безопасное мероприятие, способное стать частью комплексной стратегии защиты плодовых насаждений в условиях юго-восточного региона Казахстана.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что серный кек сернокислотного производства является перспективным сырьём для получения биологически активных серосодержащих соединений. В процессе известково-серной экстракции достигается высокая степень извлечения серы в жидкую фазу (до 92,76 %), что обеспечивает формирование активных полисульфидных систем.

В ходе последующих превращений формируется тонкодисперсная элементарная сера с развитой удельной поверхностью. Это подтверждается данными СЭМ и EDS, свидетельствующими о высокой степени чистоты продукта (до 97,33 мас.% серы) и формировании структуры, определяющей его биоцидную активность.

Полевые испытания показали, что ИСО обладает высокой биологической эффективностью против комплекса вредителей яблони. Препарат обеспечивает существенное снижение степени повреждённости растений при различных концентрациях и сохраняет стабильное действие в условиях открытого грунта.

При этом ИСО характеризуется преимущественно контактным механизмом действия и не оказывает выраженного негативного влияния на полезную энтомофауну.

Таким образом, применение ИСО позволяет одновременно решать задачи утилизации техногенного сырья и защиты растений. Полученные результаты подтверждают перспективность его использования в интегрированных системах защиты и технологиях устойчивого садоводства.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из следующих источников; данные, подтверждающие результаты исследования, приведены в статье.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – А.Б.М., Т.Э.Г., Д.Х.Ю.; Управление данными - Т.Э.Г., Ж.А.Д.; Формальный анализ – А.М.К. ГДИ. Г.О.Р.; Методология - А.Б.М., Д.Х.Ю.; Программное обеспечение - Т.Э.Г., Д.Х.Ю., А.М.К.; Отслеживание - А.Б.М.; Визуализация – А.М.К. ГДИ. Г.О.Р.; Написание исходного проекта – А.Б.М., Т.Э.Г.; написание и редактирование – А.Б.М., Д.Х.Ю., Ж.А.Д.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность Центру научно-технологических инициатив «Самгау», а также ТОО «Samruk-Kazyna Ondeu» за оказанную финансовую и организационную поддержку при реализации проекта.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансировании научно-исследовательских, научно-технических и (или) опытно-конструкторских работ по договору № 002-2024-R/D от 17.04.2024 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bandyopadhyay D. UTRGV researchers turn aloe vera waste into natural insecticide. // The Newsroom. [Электрон. ресурс]. – 2025. – URL: https://www.utrgv.edu/newsroom/2025/02/utrgv-researchers-turn-aloe-vera-waste-into-natural-insecticide.htm (дата обращения: 25.03.2026).
2. Arcot Y., Mu M., Iepure M., Yodong R. K., Zhou W., Min Y., Cisneros-Zevallos L., Akbulut M. E. S., Akbulut M. B. Influence of nanopesticide surface chemistry on adsorption to plant cuticle and wax layer: The role of zeta potential and wetting. // Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 54. – pp. 105190. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105190
3. Beleno M. T., Torres A. I., Tzintzun O., Torres-Ramos R. Agro-industrial waste valorization: An environmental improvement strategy. In M. A. Coronado Ortega & J. R. Ayala Bautista (Eds.), Biomass: The novel green gold – current trends and future uses of biomass resources. // Nova Science Publishers. – 2024. – pp. 181-227.
4. Peng X., Jiang Y., Chen Z., Osman A. I., Farghali M., Rooney D. W., Yap P. S. Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: A review. // Environmental Chemistry Letters. – 2023. – Vol. 21(2). – pp. 765-801. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5
5. Rancane R., Valiuskaite A., Ozolina-Pole L., Bundzena G., Filipovics M., Rasiukeviciute N. The effectiveness of synthetic and inorganic substances in different apple scab control strategies. // Agriculture. – 2024. – Vol. 14(3). – pp. 383. https://doi.org/10.3390/agriculture14030383
6. Xia Q., Jiang W., Liu S., Qin L., Zhao G., Li Z., Yin C., Mao Z., Wang Y. Effects of crystal lime sulfur fumigation and application of root-growth-promoting agents on the control of apple replant disease. // Horticulturae. – 2023. – Vol. 9(8). – pp. 901. https://doi.org/10.3390/horticulturae9080901

7. Liu H., Bai C., Guo Y., Yang Z., Luo X., Liu S., Huang Y., Yao L. The combined use of soil conditioner and foliar sulfur spray successfully prevents dark pericarp disease induced by manganese toxicity in litchi. // Agronomy. – 2024. – Vol. 14(3). – pp. 449. https://doi.org/10.3390/agronomy14030449
8. Chierici E., Marchetti E., Poccia A., Russo A., Giannuzzi V. A., Governatori L., Zucchi L., Rondoni G., Conti E. Laboratory and field efficacy of natural products against the invasive pest Halyomorpha halys and side effects on the biocontrol agent Trissolcus japonicus. // Scientific Reports. – 2025. Vol. 15. – pp. 4622. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87325-9
9. Vacacela Ajila H. E., Oliveira E. E., Lemos F., Haddi K., Goncalves P. H. M., Venzon M., Pallini A. Effects of lime sulfur on Neoseiulus californicus and Phytoseiulus macropilis, two naturally occurring enemies of the two-spotted spider mite (Tetranychus urticae). Pest Management Science. – 2020. – Vol. 76(3). – pp. 996-1004. https://doi.org/10.1002/ps.5608
10. Исмаилова Э. Т., Саданов А. К., Шемшура О. Н., Байдалинов А. И., Тлеубекова Д. А., Баймаханова Г. Б., Жармухамедова Г. А., Жуманова Ж. К. Фитосанитарный мониторинг дикоплодовых насаждений яблони Сиверса. Микробиология и вирусология. – 2022. – Vol. (1). – pp. 57-58. https://doi.org/10.53729/MV-AS.2022.01.04
11. Ma C. S., Zhang W., Peng Y., Zhao F., Chang X. Q., Xing K., Zhu L., Ma G., Yang H. P., Rudolf V. H. W. Climate warming promotes pesticide resistance through expanding overwintering range of a global pest. Nature Communications. – 2021. – Vol. 12. – pp. 5351. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25505-7
12. Matthews G. A., Bateman R., Miller P. Pesticide application methods. Chapter, 20. – John Wiley & Sons, 2014. – pp. 487-498. https://doi.org/10.1002/9781118351284
13. Волков В. Л., Лакотко А. А. Методы сбора, фиксации биологического материала и приготовление биопрепаратов. Ч. 2. – Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2014. – 52 с.
14. Койшыбаев М., Муминджанов Х. Методические указания по мониторингу болезней, вредителей и сорных растений. – Анкара: FAO. [Электрон. ресурс]. 2016. – 28 с. – URL: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/677bf646-66c4-420b-a0f0-f86ab8d91985/content (дата обращения: 25.03.2026).
15. Marquina D., Buczek M., Ronquist F., Lukashik P. The effect of ethanol concentration on the morphological and molecular preservation of insects for biodiversity studies. // PeerJ. – 2021. – Vol. 9. – pp. e10799. https://doi.org/10.7717/peerj.10799
16. Nuyttens D., De Schampheleire M., Verboven P., Brusselman E., Dekeyser D. Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. // Transactions of the ASABE, 52(5). – 2009. – pp. 1471-1480. https://doi.org/10.13031/2013.29127
17. Kleinjan W. E., de Keizer A., Janssen A. J. H. Kinetics of the chemical oxidation of polysulfide anions in aqueous solution. // Water Research. – 2005. – Vol. 39(17). – pp. 4093-4100. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.006
18. Licht S., Davis J. Disproportionation of aqueous sulfur and sulfide: Kinetics of polysulfide decomposition. // Journal of Physical Chemistry B. – 1997. – Vol. 101(14). – pp. 2540-2547.
19. Luther G. W., Findlay A. J., Macdonald D. J., Owings S. M., Hanson T. E., Beinart R. A., Girguis P. R. Thermodynamics and kinetics of sulfide oxidation by oxygen. // Frontiers in Microbiology. – Vol. 2. – pp. 62. https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00062
20. Rickard D., Luther G. W. Chemistry of iron sulfides. // Chemical Reviews. – 2007. – Vol. 107(2). – pp. 514-562. https://doi.org/10.1021/cr0503658

REFERENCES

1. Bandyopadhyay, D. (2025). UTRGV researchers turn aloe vera waste into natural insecticide. The Newsroom, October 10. URL: https://www.utrgv.edu/newsroom/2025/02/utrgv-researchers-turn-aloe-vera-waste-into-natural-insecticide.htm
2. Arcot, Y., Mu, M., Iepure, M., Yodong, R. K., Zhou, W., Min, Y., Cisneros-Zevallos, L., Akbulut, M. E. S., Akbulut, M. B. (2024). Influence of nanopesticide surface chemistry on adsorption to plant cuticle and wax layer: The role of zeta potential and wetting. Surfaces and Interfaces, vol. 54, pp. 105190. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.105190
3. Beleno, M. T., Torres, A. I., Tzintzun, O., Torres-Ramos, R. (2024). Agro-industrial waste valorization: An environmental improvement strategy. In M. A. Coronado Ortega & J. R. Ayala Bautista (Eds.), Biomass: The novel green gold – current trends and future uses of biomass resources. Nova Science Publishers, pp. 181-227.
4. Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., Yap, P.S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: A review. Environmental Chemistry Letters, vol. 21(2), pp. 765-801. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5
5. Rancane, R., Valiuskaite, A., Ozolina-Pole, L., Bundzena, G., Filipovics, M., Rasiukeviciute, N. (2024). The effectiveness of synthetic and inorganic substances in different apple scab control strategies. Agriculture, vol. 14(3), pp. 383. https://doi.org/10.3390/agriculture14030383
6. Xia, Q., Jiang, W., Liu, S., Qin, L., Zhao, G., Li, Z., Yin, C., Mao, Z., Wang, Y. (2023). Effects of crystal lime sulfur fumigation and application of root-growth-promoting agents on the control of apple replant disease. Horticulturae, vol. 9(8), pp. 901. https://doi.org/10.3390/horticulturae9080901
7. Liu, H., Bai, C., Guo, Y., Yang, Z., Luo, X., Liu, S., Huang, Y., Yao, L. (2024). The combined use of soil conditioner and foliar sulfur spray successfully prevents dark pericarp disease induced by manganese toxicity in litchi. Agronomy, vol. 14(3), pp. 449. https://doi.org/10.3390/agronomy14030449
8. Chierici, E., Marchetti, E., Poccia, A., Russo, A., Giannuzzi, V. A., Governatori, L., Zucchi, L., Rondoni, G., Conti, E. (2025). Laboratory and field efficacy of natural products against the invasive pest Halyomorpha halys and side effects on the biocontrol agent Trissolcus japonicus. Scientific Reports, vol. 15, pp. 4622. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87325-9
9. Vacacela Ajila, H. E., Oliveira, E. E., Lemos, F., Haddi, K., Goncalves, P. H. M., Venzon, M., Pallini, A. (2020). Effects of lime sulfur on Neoseiulus californicus and Phytoseiulus macropilis, two naturally occurring enemies of the two-spotted spider mite (Tetranychus urticae). Pest Management Science, vol. 76(3), pp. 996-1004. https://doi.org/10.1002/ps.5608
10. Ismailova, E. T., Sadanov, A. K., Shemshura, O. N., Baidalinov, A. I., Tleubekova, D. A., Baimakhanova, G. B., Zharmukhamedova, G. A., Zhumanova, Zh. K. (2022). Fitosanitarnyi monitoring dikoplodovykh nasazhdenii yabloni Siversa. [Phytosanitary monitoring of wild fruit stands of Sievers' apple tree]. Mikrobiologiya i virusologiya, vol.1, 57-58. https://doi.org/10.53729/MV-AS.2022.01.04 [in Russian]
11. Ma, C. S., Zhang, W., Peng, Y., Zhao, F., Chang, X. Q., Xing, K., Zhu, L., Ma, G., Yang, H. P., Rudolf, V. H. W. (2021). Climate warming promotes pesticide resistance through expanding overwintering range of a global pest. Nature Communications, vol. 12, pp. 5351. https://doi.org/10.1038/s41467-021-25505-7

12. Matthews, G. A., Bateman, R., Miller, P. (2014). Pesticide application methods. John Wiley & Sons, Book Chapter, 20, pp. 487-498. https://doi.org/10.1002/9781118351284
13. Volkov, V. L., & Lakotko, A. A. (2014). Metody sbora, fiksatsii biologicheskogo materiala i prigotovlenie biopreparatov. [Methods for Collecting and Preserving Biological Material and Preparing Biological Products]. Part 2. Vitebsk: VGU imeni P. M. Masherova, 52 pp. [in Russian]
14. Koishybaev, M., & Mumindzhanov, Kh. (2016). Metodicheskie ukazaniya po monitoringu boleznei, vreditelei i sornykh rastenii. [Guidelines for Monitoring Diseases, Pests, and Weeds]. FAO, 28 p. URL: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/677bf646-66c4-420b-a0f0-f86ab8d91985/content [in Russian]
15. Marquina, D., Buczek, M., Ronquist, F., Lukashik, P. (2021). The effect of ethanol concentration on the morphological and molecular preservation of insects for biodiversity studies. PeerJ, vol. 9, pp. e10799. https://doi.org/10.7717/peerj.10799
16. Nuyttens, D., De Schampheleire, M., Verboven, P., Brusselman, E., Dekeyser, D. (2009). Droplet size and velocity characteristics of agricultural sprays. Transactions of the ASABE, 52(5), pp. 1471-1480. https://doi.org/10.13031/2013.29127
17. Kleinjan, W. E., de Keizer, A., Janssen, A. J. H. (2005). Kinetics of the chemical oxidation of polysulfide anions in aqueous solution. Water Research, vol. 39(17), pp. 4093-4100. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.006
18. Licht, S., Davis, J. (1997). Disproportionation of aqueous sulfur and sulfide: Kinetics of polysulfide decomposition. Journal of Physical Chemistry B, vol. 101(14), pp. 2540-2547.
19. Luther, G. W., Findlay, A. J., Macdonald, D. J., Owings, S. M., Hanson, T. E., Beinart, R. A., Girguis, P. R. (2011). Thermodynamics and kinetics of sulfide oxidation by oxygen. Frontiers in Microbiology, vol. 2, pp. 62. https://doi.org/10.3389/fmicb.2011.00062
20. Rickard, D., Luther, G. W. (2007). Chemistry of iron sulfides. Chemical Reviews, vol. 107(2), pp. 514-562. https://doi.org/10.1021/cr0503658

КҮКІРТ ҚҰРАМДЫ ҚАЛДЫҚТАРДЫ ҚАЙТА ӨҢДЕУ ӨНІМДЕРІНІҢ АЛМА ЗИЯНКЕСТЕРІНЕ ҚАРСЫ БИОЛОГИЯЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Арман Б. Маханбетов[1] PhD, қауымдастырылған профессор, Тулкинжон Э. Гаипов[1] химия ғылымдарының кандидаты, Давлат Х. Юлдашбек[1*], Арнур М. Кенжегалиев[2], Жулдыз А. Дюсенова[2] техника ғылымдарының кандидаты, Гульмира Д. Исенова[2] биология ғылымдарының кандидаты, Гульнисам О. Рвайдарова[2] биология ғылымдарының кандидаты

[1]Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті, Түркістан қ., Қазақстан; arman.makhanbetov@ayu.edu.kz (А.Б.М.); tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz (Т.Э.Г.) davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz (Д.Х.Ю.)
[2]Жазкен Жиембаев атындағы Қазақ өсімдік қорғау және карантин ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан; arnur_1992@mail.ru (А.М.К.); isenova.gd@gmail.com (Г.Д.И.); gulnisam@inbox.ru (Г.О.Р.)
[3]«Қазгидромет» РМК, Ғылыми-зерттеу орталығының Климаттық зерттеулер басқармасы, Астана, Қазақстан; dyussenova_zh@meteo.kz (Ж.А.Д.)
*Автор корреспондент: Давлат Х. Юлдашбек, e-mail: davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

алма ағашы,
зиянкестер,
кальций полисульфиді,
әк-күкіртті қайнатпа,
биологиялық белсенділік

Мақала жайында:
Алынды: 17.04.2026
Қайта қаралды: 13.07.2026
Қабылданды: 11.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Ауыл шаруашылығының тұрақты дамуы жағдайында экологиялық қауіпсіз және тиімді өсімдіктерді қорғау құралдарын әзірлеу өзекті болып табылады. Бұл жұмыста күкірт құрамды өнеркәсіптік қалдықтар негізінде алынған кальций полисульфидінің (әк-күкіртті қайнатпа – ӘКҚ, 40%-дық сулы ерітінді) алма зиянкестеріне қарсы биологиялық белсенділігі зерттелді. Зерттеу Алматы облысындағы алма бағында далалық жағдайда жүргізілді. Нәтижесінде кальций полисульфидінің 1,0...3,0% концентрацияларында кенелерге (*Panonychus ulmi, Bryobia rubrioculus*), сондай-ақ алма жемір көбелегінің (*Cydia pomonella*) дернәсілдеріне және ұнтақты құрттарға қарсы жоғары тиімділік көрсететіні анықталды. Биологиялық тиімділік препарат концентрациясына байланысты 74,1%-дан 90,3%-ға дейін өзгерді. Ең жоғары әсер 3,0% концентрацияда байқалды, мұнда кенелермен зақымдану жапырақтарда 90,3%-ға, ал жемістерде 88,5%-ға төмендеді. Алынған нәтижелер күкірт құрамды қалдықтардан алынған кальций полисульфидінің тиімділігін дәлелдейді және оны өсімдіктерді қорғаудың интеграцияланған жүйелерінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді. Бұл препаратты қолдану пестицидтік жүктемені азайтып, қайталама ресурстарды ұтымды пайдалануға мүмкіндік береді.

STUDY OF THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF SULFUR-CONTAINING WASTE RECYCLING PRODUCTS AGAINST APPLE PESTS

Arman B. Makhanbetov[1] PhD, Tulkinzhon E. Gaipov[1] Candidate of chemical sciences, Davlat Kh. Yuldashbek[1*], Arnur M. Kenzhegaliev[2], Zhuldyz A. Dyussenova[3] Candidate of technical sciences, Gulmira D. Issenova[2] Candidate of biological sciences, Gulnissam O. Rvaidarova[2] Candidate of biological sciences

[1]Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan; arman.makhanbetov@ayu.edu.kz (ABM); tulkinzhon.gaipov@ayu.edu.kz (TEG) davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz (DKhY)
[2]Zhazken Zhiembayev Kazakh Research Institute of Plant Protection and Quarantine, Almaty, Kazakhstan; arnur_1992@mail.ru (AMK); isenova.gd@gmail.com (GDI); gulnisam@inbox.ru (GOR)
[3]Kazhydromet State Enterprise, Climate Research Department of the Research Centre, Astana, Kazakhstan; dyussenova_zh@meteo.kz (ZhAD)
*Author correspondent: Davlat Yuldashbek, davlat.yuldashbek@ayu.edu.kz

KEY WORDS

apple tree,
pests,
calcium polysulfide,
lime sulfur solution,
biological activity.

About article:
Received: 17.04.2026
Revised: 13.07.2026
Accepted: 11.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

In the context of sustainable agricultural development, there is an increasing demand for environmentally safe and effective plant protection products. Particular attention is being paid to the use of sulfur-containing industrial waste as a source of biologically active compounds. The aim of this study was to evaluate the biological activity of calcium polysulfide (lime sulfur solution – LSS, a 40% aqueous solution) obtained from sulfur-containing waste against a complex of apple pests. Field experiments were conducted in an apple orchard in the Almaty region using standard phytosanitary monitoring methods. The results showed that the application of calcium polysulfide at concentrations of 1.0…3.0% provided high biological efficacy against mites (*Panonychus ulmi*, *Bryobia rubrioculus*), as well as *Cydia pomonella* larvae and mealybugs. The biological efficacy ranged from 74,1% to 90,3% depending on the concentration. The highest efficacy was observed at a concentration of 3,0%, where the reduction in mite damage reached 90,3% on leaves and 88,5% on fruits. The findings confirm the high efficacy of calcium polysulfide derived from sulfur-containing waste and demonstrate its potential for use in integrated pest management systems. Its application contributes to reducing pesticide load and promoting the rational utilization of secondary resources.

Примечание издателя: заявления. мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам). а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Scientific article

MULTICOMPONENT ASSESSMENT OF POLLUTION AND ECOLOGICAL STATUS OF SURFACE WATERS OF THE BRAZHINSKY STREAM (EASTERN KAZAKHSTAN)

Natalya Seraya, Candidate of Chemical Sciences, Professor, Gulzhan Daumova, Candidate of Technical Sciences, Professor, Olga Petrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Makpal Kaissina, Arina Polyakova, Olga Vasilyeva, Igor Denissov.

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; NSeraya@edu.ektu.kz (NS), GDaumova@edu.ektu.kz (GD), OPetrova@edu.ektu.kz (OP), MKaysina@edu.ektu.kz (MK), APolyakova@edu.ektu.kz (AP), OVasilyeva@edu.ektu.kz (OV), IDenisov@edu.ektu.kz (ID)

*Author correspondent: Gulzhan Daumova, GDaumova@edu.ektu.kz

KEYWORDS

Brazhinsky Stream, surface water quality, heavy metals, Water Pollution Index (WPI), water turbidity, anthropogenic impact, hydrochemical analysis

ABSTRACT

This study presents a multicomponent assessment of pollution and the ecological status of surface waters in the Brazhinsky Stream, located within the city of Ust-Kamenogorsk (Eastern Kazakhstan). The assessment is based on the analysis of water turbidity and hydrochemical composition. The results show that turbidity values range from 47.7 to 54.3 NTU, indicating a high content of suspended solids and their significant role in the transport of pollutants. Hydrochemical analysis revealed persistent exceedances of maximum permissible concentrations for several elements, with copper, zinc, aluminum, and iron making the greatest contribution to overall contamination. Copper concentrations reach up to 44.2 times the permissible limit, while zinc concentrations are as high as 9.8 times the allowable level, indicating pronounced anthropogenic impact. An integrated assessment of water quality was carried out using the Water Pollution Index (WPI), with values of 2.27, 2.75, and 3.68 recorded for the upper, middle, and lower sections of the stream, respectively. According to the classification scheme, these values correspond to the category of "polluted water," with a clear trend of increasing contamination downstream. It is shown that the Brazhinsky Stream, despite not directly discharging into the Irtysh River, plays an important role in the redistribution of pollutants within the system of surface and groundwater. The findings indicate a significant anthropogenic load on the watercourse and highlight the need for regular hydrochemical monitoring of small streams in urbanized areas.

1. INTRODUCTION

Under conditions of intensive industrial development, the issue of surface water quality is becoming increasingly important, particularly in urbanized regions with a well-developed mining and metallurgical sector [1...3]. The city of Ust-Kamenogorsk is one of the largest industrial centers in Kazakhstan, where non-ferrous metallurgy, energy production, and mechanical engineering enterprises are concentrated. Long-term anthropogenic impact has led to the release of substantial amounts of pollutants into the environment, including heavy metals, which are capable of accumulating in ecosystem components and exerting prolonged adverse effects on the hydrosphere [4...6].

Small watercourses play a particularly important role in shaping the ecological status of aquatic systems, yet they are often excluded from regular monitoring programs [7, 8]. At the same time, they act as primary accumulators of pollutants and as pathways for their transfer into larger water systems [9]. The Brazhinsky Stream is one such watercourse – a small stream flowing within the urban area of Ust-Kamenogorsk and subjected to complex anthropogenic pressures. Despite the absence of direct discharge into the Irtysh River, this stream may exert an

indirect influence on both surface and groundwater systems through infiltration processes and the redistribution of contaminants.

An important aspect in the assessment of surface water quality is the comparison of obtained data with regulatory standards, in particular maximum permissible concentrations (MPCs), which allows for the evaluation of anthropogenic pressure on a watercourse. At the same time, it should be taken into account that elevated concentrations of certain elements may be associated with the natural geochemical features of a region. For example, studies of the Olgokhta River have shown that concentrations of several elements (e.g., Fe and Mn) may exceed regulatory levels without a direct link to anthropogenic impact [10]. In this regard, the use of regulatory criteria in combination with consideration of natural background conditions enables a more accurate interpretation of hydrochemical data and the identification of components of anthropogenic origin.

About article:
Received: 17.04.2026
Revised: 11.08.2026
Accepted: 14.09.2026
Published:30.09.2026

Results of studies on small watercourses show that elevated concentrations of heavy metals may form not only under the influence of anthropogenic factors, but also under conditions of minimal human impact due to the natural geochemical characteristics of a territory. For example, in small rivers on the western slope of the Irandek Ridge, exceedances of MPCs have been recorded for elements such as Cu, Fe, Pb, Zn, and Cd, which is attributed to the leaching of ore-bearing and bedrock formations and the specific geological structure of the area [11]. These findings indicate that, when assessing surface water quality based on regulatory standards, it is necessary to consider the potential influence of natural factors, which enables a more substantiated interpretation of results and the differentiation between natural and anthropogenic components of pollution.

For citation:
Seraya N., Daumova G., Petrova O., Kaissina M., Polyakova A., Vasilyeva O., Denissov I., Multicomponent Assessment of Pollution and Ecological Status of Surface Waters of the Brazhinsky Stream (Eastern Kazakhstan)// Hydrometeorology and Ecology 123 (3), 2026, 177-192.

Thus, the integrated consideration of regulatory indicators and natural factors is a necessary condition for an objective assessment of the water quality of small watercourses. Contemporary approaches to water quality assessment are based on a comprehensive analysis of hydrochemical parameters and the application of integrated indices that allow for the generalization of multicomponent information on pollution [12, 13]. Particular attention is given to heavy metals such as copper, zinc, iron, and aluminum, which are characterized by high toxicity, persistence in the natural environment, and the ability to bioaccumulate [14...16]. In addition, turbidity is an important indicator of the ecological status of aquatic systems, reflecting the content of suspended solids and their role in the transport of pollutants [17].

The Brazhinsky Stream is a small watercourse located within the city of Ust-Kamenogorsk, flowing from north to southwest through an urbanized area. It originates in the northern foothills of the Uba Ridge and belongs to the Irtysh River Basin. The total length of the stream is approximately 14.3 km, with a catchment area of 36 km². The width of the riverbed between the banks reaches about 10 m, while the actual width of the water flow during the low-flow period is significantly smaller. The water depth during the low-flow period does not exceed 0.3 m.. The bed is predominantly sandy–silty with inclusions of fine gravel. The hydrological regime is characterized by a predominance of snowmelt feeding: peak discharges occur in spring, whereas during the low-water period the flow decreases significantly and may be intermittently disrupted by rainfall-driven flood events.

Thus, the studied watercourse is characterized by pronounced seasonal variability in runoff and increased sensitivity to external, including anthropogenic, impacts. According to design and environmental documentation, the Brazhinsky Stream serves as a recipient of stormwater and industrial wastewater, which determines its vulnerability to pollution [18].

It should be noted that the Brazhinsky Stream is not among the water bodies subject to regular state hydrological monitoring with publicly available observation data. Therefore, information on its hydrological regime and individual extreme hydrological events is limited and is available mainly from open-access published sources.

In regional media publications, cases of anthropogenic impact on the watercourse have been reported, including the discharge of contaminated waters from energy infrastructure facilities. An incident of pollution of the Brazhinsky Stream associated with an accidental release

of clarified water from the territory of the Ust-Kamenogorsk CHP Plant used for the transport of ash-and-slag waste has been documented [19]. A sudden deterioration in water quality has also been reported, accompanied by changes in water color and signs of severe contamination [20]. Additional sources of pollution include organic waste, such as grain residues entering the stream, as well as littering of the riparian zone, indicating a persistent nature of anthropogenic impact [21]. According to publicly published sources, the stream is characterized by pronounced flood activity and is considered a potentially hazardous element of the urban drainage system, as evidenced by flooding events during the snowmelt period [22]. In this regard, regular hydraulic engineering works are carried out on the Brazhinsky Stream, including dredging of bottom sediments and channel deepening, aimed at preventing flooding and maintaining the drainage function of the watercourse.

The presented data indicate the complex nature of anthropogenic impacts on the Brazhinsky Stream and highlight its significant role in shaping the ecological condition of the urban aquatic system.

Despite the existence of individual studies devoted to the hydrochemistry of large rivers in Eastern Kazakhstan [23, 24], small watercourses in urbanized areas remain insufficiently investigated, which limits the ability to provide an objective assessment of environmental risks and to develop effective environmental protection measures. In this regard, there is a need for detailed multicomponent studies aimed at identifying spatial patterns of pollution and assessing the ecological status of such aquatic systems. The aim of the present study is a comprehensive assessment of pollution and the ecological condition of surface waters in the Brazhinsky Stream based on the analysis of turbidity, hydrochemical composition, and the calculation of the integrated Water Pollution Index (WPI), as well as the identification of the role of this watercourse in the redistribution of pollutants within the urban area. The scientific novelty of this study lies in obtaining new data on the spatial distribution of pollutants in the Brazhinsky Stream, identifying priority pollutants, comprehensively assessing the ecological status of a small urbanized watercourse using the Water Pollution Index and visualizing the spatial distribution of pollutants through a heat map.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Study area and sampling

The object of the present study was the Brazhinsky Stream (Figure 1), located within the city of Ust-Kamenogorsk (Eastern Kazakhstan) (Figure 2).

a) *b)*

Figure 1. *Surface waters of the Brazhinsky Stream within the urban area of Ust-Kamenogorsk. (a - 61a Nursultan Nazarbayev Street (the actual width of the water flow during the sampling period: 2.9 m); b - 1/5 Mostovaya Street (the actual width of the water flow during the sampling period: 2.6 m).)*

The watercourse flows through an area of intensive industrial development and is subject to significant anthropogenic impact (Figure 3). Water sampling was carried out at three sites representing different sections of the stream: the upper reach (Brazh 1), the middle reach (Brazh 2), and the lower reach (Brazh 3). The sampling points were selected taking into account the hydrological regime and the location of potential pollution sources. Surface water sampling was conducted in August–September 2025 in accordance with the hydrochemical monitoring program (Table 1, Figures 2...3).

Table 1

Actual sampling sites

No.	Site	Sampling date	Coordinates of sampling point	Remarks
1	Brazh 1	26.08.2025	50°02′21.27″ N, 82°35′09.11″ E	Brazhinsky Stream tributary, headwaters
2	Brazh 2	24.09.2025	49°59′03.52″ N, 82°35′44.52″ E	Middle reach of the Brazhinsky Stream
3	Brazh 3	24.09.2025	49°59′04.24″ N, 82°33′27.93″ E	Lower (outlet) reach of the Brazhinsky Stream

Figure 2. *Overview map of the Brazhinsky Stream and locations of sampling sites*

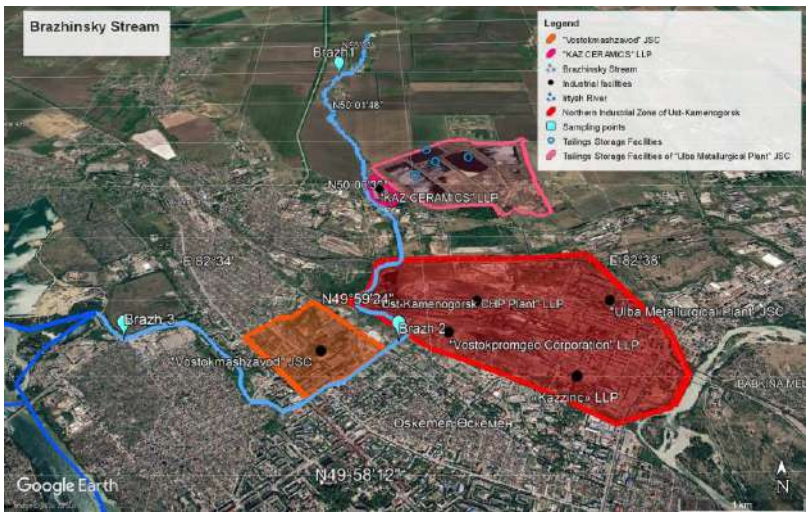


Figure 3. *Scheme of the distribution of anthropogenic impact sources within the Brazhinsky Stream catchment area*

According to the information bulletins of RSE "Kazhydromet" [25], the study was conducted within the same summer–autumn hydrological season, which is characterized by a unified hydrochemical monitoring regime for surface waters. The obtained results were interpreted to assess the spatial distribution of hydrochemical parameters along the Brazhinsky Stream.

Surface water samples were collected in accordance with ST RK ISO 5667-6-2017 [26] and GOST 59024-2020 [27]. At each sampling site, three point samples were collected from different parts of the cross-section of the watercourse, namely from both banks and the central part of the channel. Sampling was carried out in flowing water, avoiding areas of stagnant water, accumulated bottom sediments, and dense aquatic or riparian vegetation. Samples were collected at a depth of 20...30 cm below the water surface to avoid collecting the surface film and disturbing bottom sediments.

The volume of each point sample was 0.5 dm³. The three point samples were then combined in equal proportions to obtain one composite sample with a total volume of 1.5 dm³, representing the water composition at each sampling site.

Pre-cleaned polyethylene containers with tightly sealed lids were used for sample collection. During transportation, the samples were stored in a thermal container and protected from direct sunlight. Since the Brazhinsky Stream is located within the city of Ust-Kamenogorsk, all samples were delivered to the laboratory within one hour after collection, and the analyses began immediately upon their arrival. For metal analysis, a separate aliquot of each sample was acidified with nitric acid to pH < 2 and stored at a temperature of 2...5 °C.

2.2 Methods

Within the framework of this study, stream discharge was not measured. Therefore, the interpretation of the spatial distribution of pollutants is based on the analysis of the hydrochemical composition and turbidity of the surface waters.

Water turbidity was measured in field conditions using a Hanna HI 93414-02 turbidimeter with an accuracy of ±0.1 NTU. At each sampling site, three replicate measurements were taken, and the results were averaged [28]. Turbidity of surface waters was considered as an integral indicator of suspended solids content and was used to assess their role in the migration of pollutants. All measurements were carried out prior to chemical analysis.

Chemical analyses were performed at the Laboratory of Analytical Research of the VERITAS Center of Excellence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University. Chemical element analysis was performed using inductively coupled plasma mass spectrometry

(ICP-MS) after sample filtration through 0.45 μm membrane filters and acidification for preservation (HNO_3, pH < 2) [29]. Macro- and microelements, including heavy metals, were determined. Quality control of the analytical measurements was performed using standard calibration solutions, and the reported results represent the mean values of parallel determinations [30]. The combined analysis of turbidity and the chemical composition of the Brazhinsky Stream water was used to identify spatial patterns in the distribution of pollutants and to assess the influence of natural and anthropogenic factors.

In the present study, the assessment of surface water quality in the Brazhinsky Stream was carried out using the Water Pollution Index (WPI) to process and integrate information on the chemical composition of surface waters, with the aim of obtaining a comprehensive evaluation of their pollution level. According to the methodology, the degree of water pollution in a water body can be assessed based on a set of pollutants at any sampling site, over any defined time period, and using any set of hydrochemical parameters [31]. In this study, maximum permissible concentrations (MPCs) of harmful substances for fisheries water bodies were used as reference standards [32], as these standards are the most stringent among the existing surface water quality standards and are widely applied in the environmental assessment of natural water body pollution. The use of fishery MPCs makes it possible to assess the potential impact of pollutants on aquatic ecosystems and ensures the comparability of the obtained results with those of both domestic and international studies.

The exceedance factor of the maximum permissible concentration (MPC) was calculated for each chemical element as the ratio of the measured concentration of the substance to the corresponding regulatory limit value:

$$\frac{C_i}{MPCi} \quad (1)$$

where *Ci* - is the measured concentration of the iii-th element in water (mg/dm³);

MPCi - is the maximum permissible concentration of the corresponding element (mg/dm³).

For the integrated assessment of water pollution in the Brazhinsky Stream, the Water Pollution Index (WPI) was calculated as the arithmetic mean of the MPC exceedance factors for all considered components:

$$\mathrm{WPI} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{MPC_i} \quad (2)$$

where *Ci* - is the measured concentration of the element; *MPCi* - is the maximum permissible concentration; *n* - is the number of considered parameters.

This index is an integrated dimensionless indicator of water pollution level and is used for comparative assessment of water quality at different sampling sites. Only regulated substances with established MPC values were included in the calculation. Exceedance factors below unity (in cases where MPCs were not exceeded) were also included in the WPI calculation, which allows for consideration of the overall chemical load on the water body. Based on the obtained results, the pollution level was assessed (Table 2) and priority pollutants were identified.

Table 2

Water classification according to WPI

No.	WPI	Water quality
1	<0,3	very clean
2	0,3 … 1,0	clean
3	1,0 … 2,5	moderately polluted
4	2,5 … 4,0	polluted
5	4,0 … 6,0	dirty
6	> 6,0	very dirty

3. RESULTS AND DISCUSSION

The cartographic scheme of the Brazhinsky Stream (Figure 1) illustrates its spatial location within the city of Ust-Kamenogorsk, as well as its relationship with the main natural and anthropogenic components of the environment. The watercourse is situated within the right-bank part of the valley of the Irtysh River and has a total length of approximately 14.3 km. The stream originates in the northern part of the study area (approximately 49.99° N, 82.63° E) and flows predominantly from north to southwest, passing through agricultural lands and further across the urbanized territory of the city. In the middle reach (site “Brazh 1”), the watercourse retains a relatively natural character; however, downstream (site “Brazh 2”) it intersects an area of intensive industrial development. In the lower reach (site “Brazh 3”), the stream loses a well-defined channel and, according to cartographic data, has no direct surface connection to the Irtysh River, partially discharging into topographic depressions and the groundwater system.

Morphologically, the Brazhinsky Stream belongs to gully–ravine type watercourses. The channel is meandering and unbranched, with steep banks 2...3 m high. The stream width within the main banks is about 10 m, while the actual width of the flowing water during the autumn sampling period was significantly smaller, ranging from 2.6 to 2.9 m at the study sites (Figure 1). The banks are steep and unstable with respect to erosion, which promotes the active transport of suspended matter, especially during rainfall-induced flood events. The average water depth is approximately 0.1 m, the flow velocity is 0.25 m/s, the channel roughness coefficient is 0.04, and the mean monthly discharge (95% exceedance probability) is 0.01 m³/s. The channel bed is predominantly sandy–silty with inclusions of fine gravel and vegetation. The watercourse is perennial, with a pronounced increase in discharge during periods of intensive precipitation [18].

The hydrological regime of the stream is characterized by pronounced seasonal variability. During the spring flood period (late March to early April), increases in water levels and discharge are observed due to snowmelt, and rainfall-induced flood events may also occur. The low-water (baseflow) period, which typically establishes in May under conditions of no precipitation, is marked by a substantial decrease in runoff, which may be intermittently interrupted by rainfall events. The highest discharges and water levels are recorded during the spring flood. Thus, the Brazhinsky Stream is a small watercourse with predominantly snowmelt-fed hydrology and a significant contribution of short-term rainfall-driven flood events to runoff formation. In combination with the morphological characteristics of the channel, this promotes the active transport of suspended solids.

Within the Brazhinsky Stream catchment area, the main sources of anthropogenic impact are localized. In the middle reach, along the left bank over a distance of approximately 0.9 km, the industrial site of KAZ CERAMICS is located, from which stormwater and meltwater runoff is discharged directly into the stream channel. The buffer zone between the facility fence and the stream bank is partially occupied by tree plantations; however, further upstream, approximately 70 m from the channel, the tailings storage facility of the Ulba Metallurgical Plant (Figure 2) is situated, the influence of which may be manifested through surface runoff formed along the fence and entering the watercourse. In the lower reach, the stream flows through the northern industrial zone of the city, which includes large enterprises such as Kazchrome (Kazzinc) LLP and Vostokmashzavod, corresponding to the area of maximum anthropogenic pressure.

Thus, the Brazhinsky Stream is a small urban watercourse flowing through the city of Ust-Kamenogorsk, which is characterized by a high degree of industrial development. Its morphological features, hydrological regime, and spatial location relative to industrial facilities create favorable conditions for the formation and transport of pollutants. At the same time, the absence of a direct surface connection to the Irtysh River indicates its important role in the redistribution of contaminants between surface and groundwater systems within the studied basin.

Under these conditions, the assessment of factors controlling the mechanisms of pollutant transport within the watercourse becomes particularly important. One such factor is the content of suspended particles, which can participate in the migration of contaminant compounds. In this

regard, to provide a more comprehensive characterization of pollutant redistribution processes in the Brazhinsky Stream, an analysis of water turbidity was carried out as an indicator reflecting the development of the suspended phase and its role in transport processes. Elevated turbidity values recorded at all studied sites of the Brazhinsky Stream (Table 3) indicate a high content of suspended matter in the watercourse. The maximum turbidity was observed in the headwaters (Brazh 1), reaching 54.3 NTU, while in the middle and lower reaches (Brazh 2 and Brazh 3), values were 47.7 NTU. Such a distribution may be attributed to the input of suspended material from the catchment area and active channel erosion processes in the upper part of the stream.

Table 3

Mean turbidity values (NTU) by sampling sites

No.	Site code	Mean turbidity (NTU)	Site description
1	Brazh 1	54.3	Tributary, headwaters of the stream
2	Brazh 2	47.7	Middle reach of the Brazhinsky Stream
3	Brazh 3	47.7	Lower (outlet) reach of the Brazhinsky Stream

Heavy metals are capable of adsorbing onto the surface of suspended particles, which facilitates their transport in association with the solid phase. Under the conditions of the Brazhinsky Stream, this creates prerequisites for the migration of pollutants along the channel, as well as for their accumulation in bottom sediments and in zones of reduced flow velocity. Given the absence of a direct surface connection between the stream and the Irtysh River, increased water turbidity may promote the involvement of pollutants in infiltration processes and their subsequent transport within the groundwater flow system.

The obtained results are consistent with current understanding of the role of suspended solids in the migration of heavy metals in small urbanized watercourses. According to previous studies, an increase in the concentration of suspended particles promotes the adsorption of cadmium, zinc, lead, and other metals onto the surface of the solid phase, thereby increasing their transport capacity and facilitating their subsequent accumulation in bottom sediments. These processes are particularly pronounced in small watercourses with unstable banks and active channel erosion, where suspended matter becomes one of the main carriers of pollutants [33].

A hydrochemical study of the Brazhinsky Stream waters was conducted at three cross-sections representing different parts of the watercourse: the headwaters (Brazh 1), the middle reach (Brazh 2), and the mouth section (Brazh 3). The obtained results of chemical element concentration analyses (Table 4) made it possible to perform a comprehensive assessment of the water pollution level. The analysis showed that the chemical composition of the Brazhinsky Stream waters is characterized by significant spatial variability. For most elements, an increasing trend in concentrations is observed downstream, indicating the accumulation of pollutants as the stream flows through the urbanized area of Ust-Kamenogorsk. The most pronounced changes are observed for alkali and alkaline earth elements. In particular, the sodium concentration increases from 4.79 mg/dm³ in the headwaters to 42.84 mg/dm³ in the middle reach, followed by a slight decrease to 28.31 mg/dm³ in the mouth section. A similar trend is observed for magnesium, whose concentration rises from 3.65 mg/dm³ to 31.48 mg/dm³, which may be associated with the input of mineral salts from surface runoff and anthropogenic sources.

Calcium concentrations range from 10.30 to 31.23 mg/dm³, remaining well below the maximum permissible concentrations, which indicates the predominantly natural origin of this element.

The Eastern Kazakhstan region is characterized by a complex geological structure and a widespread occurrence of ore deposits, which determines the presence of a natural geochemical background of a number of elements in natural waters. In this regard, elevated concentrations of certain components may be partly associated with natural factors. In particular, the increased concentrations of iron and aluminum (Table 4) may be attributed to the leaching of rock-forming minerals, as well as to the transport of fine-dispersed particles within suspended matter. At the same time, the identified exceedances of maximum permissible concentrations, which are of a persistent nature, indicate that natural factors are not the sole source of these elements. This

suggests a significant role of anthropogenic impact in the formation of the chemical composition of the Brazhinsky Stream waters.

In this context, particular attention should be paid to the distribution of heavy metals, which serve as key indicators of anthropogenic pollution in aquatic systems. The concentration of aluminum exceeds the maximum permissible concentration (MPC) at all sampling sites. In the upstream section, the concentration reaches 0.147 mg/dm³, corresponding to 3.7 MPC. In the middle reach, the aluminum level decreases to 2.4 MPC; however, in the mouth section, it increases again to 4.8 MPC, which may indicate an additional input of this element in the lower part of the stream. Iron concentrations also exceed regulatory limits at all studied sites. The highest exceedance is observed in the headwaters of the stream, reaching 3.2 MPC, whereas in the middle reach the level decreases to 1.2 MPC. In the mouth section, the concentration increases again to 2.2 MPC. Elevated iron content may be associated with both the natural geochemical characteristics of the area and anthropogenic pollution sources.

It should be noted that, in areas with well-developed mining and metallurgical industries, distinguishing between the natural and anthropogenic sources of pollution is a challenging task. Under such conditions, elevated aluminum concentrations are often associated with a combination of natural rock weathering and additional inputs from industrial emissions and surface runoff, as has been repeatedly reported in studies of mining regions [34]. The review by [35] showed that, in mining areas, Fe is among the elements that most frequently exceed background levels and water quality standards, together with Cu, Zn, Mn, and Pb.

Table 4

Mean turbidity values (NTU) by sampling sites

Element	MPC_i, mg/dm³	Brazh 1			Brazh 2			Brazh 3		
		C_i, mg/dm³	$\frac{C_i}{MPC_i}$	$\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{MPC}$	C_i, mg/dm³	$\frac{C_i}{MPC_i}$	$\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{MPC_i}$	C_i, mg/dm³	$\frac{C_i}{MPC_i}$	$\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{MPC}$
Be	0.0001	0.00007	0.70		0.00002	0.20		0.00003	0.30	
B	≤0.5	0.24630	0.49		0.23420	0.47		0.17820	0.36	
Na	120	4.79	0.04		42.84	0.36		28.31	0.24	
Mg	≤20	3.65	0.18		31.48	1.57		20.25	1.01	
Al	0.04	0.14702	3.68		0.09557	2.39		0.19371	4.84	
P	0.1	0.11320	1.13		0.10790	1.08		0.12060	1.21	
K	50	1.07	0.02		3.27	0.07		3.14	0.06	
Ca	180	10.30	0.06		31.23	0.17		23.83	0.13	
Cr	0.1	0.00350	0.04		0.00539	0.05		0.00601	0.06	
Mn	0.01	0.00760	0.76	43.22	0.00488	0.49	52.21	0.00659	0.66	69.97
Fe	0.1	0.32093	3.21		0.12453	1.25		0.22242	2.22	
Co	0.005	0.00108	0.22		0.00062	0.12		0.00077	0.15	
Ni	0.008	0.00334	0.42		0.00388	0.49		0.00462	0.58	
Cu	0.001	0.02422	24.22		0.03257	32.57		0.04424	44.24	
Zn	0.01	0.05846	5.85		0.07026	7.03		0.09821	9.82	
As	0.002	0.00243	1.22		0.00286	1.43		0.00394	1.97	
Mo	0.001	0.00066	0.66		0.00222	2.22		0.00153	1.53	
Cd	0.001	0.00014	0.14		0.00014	0.14		0.00019	0.19	
Pb	0.006	0.00109	0.18		0.00065	0.11		0.00239	0.40	
WPI			2.27			2.75			3.68	
Water quality			Moderately polluted			Polluted			Polluted	

The most significant exceedance of regulatory limits is observed for copper. Its concentration amounts to 24.2 MPC in the headwaters, 32.6 MPC in the middle reach, and 44.2 MPC in the mouth section. Thus, copper represents the principal contaminant of the Brazhinsky Stream waters. Such high concentrations may be related to industrial activities characteristic of the Ust-Kamenogorsk area. A similar pattern is observed for zinc, with concentrations of 5.8 MPC in the headwaters, 7.0 MPC in the middle reach, and 9.8 MPC in the mouth section. The increase in zinc concentration downstream also indicates its anthropogenic origin. Arsenic is present at concentrations exceeding regulatory limits by 1.2 ... 2.0 times, which likewise suggests potential anthropogenic impact (Figure 4).

The spatial increase in copper and zinc concentrations downstream is consistent with the results of studies conducted in urbanized catchments, which have shown that land use, industrial activities, and the condition of riparian zones have a significant impact on heavy metal concentrations in small watercourses. In industrial catchments, a significant proportion of the heavy metal load can be directly attributed to industrial sources and surface runoff from urbanized areas [36, 37].

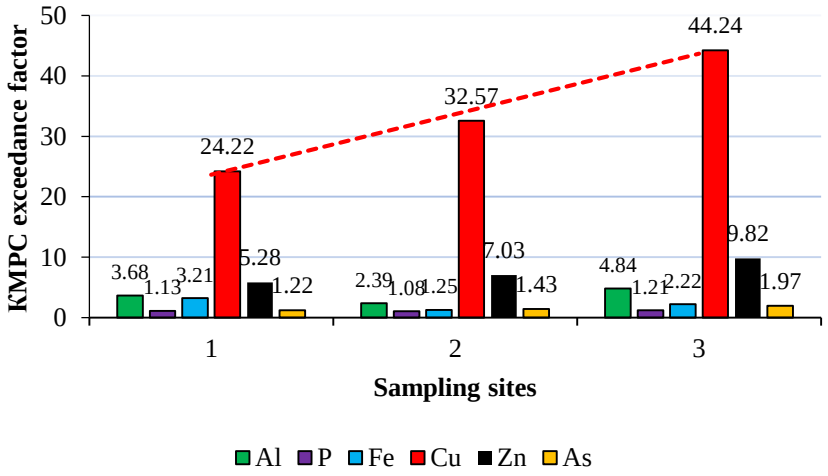


Figure 4. *Multiples of maximum permissible concentration (MPC) for major pollutants at the studied sampling sites of the Brazhinsky Stream*

The analysis of the heat map of maximum permissible concentration (MPC) exceedance for major elements (Figure 5) shows that copper and zinc make the greatest contribution to the overall pollution level, exhibiting the highest MPC multiples.

Element	Brazh 1	Brazh 2	Brazh 3	Scale
Cu	24.22	32.57	44,24	50.00
Zn	5.85	7.03	9.82	45.00
Al	3.68	2.39	4.84	40.00
Fe	3.21	1.25	2.22	35.00
As	1.22	1.43	1.97	30.00
Mo	0.66	2.22	1.53	25.00
Mn	0.76	0.49	0.66	20.00
Mg	0.18	1.57	1.01	15.00
P	1.13	1.08	1.21	13.00
Ni	0.42	0.49	0.58	11.00
B	0.49	0.47	0.36	9.00
Be	0.7	0.2	0.3	7.00
Co	0.22	0.12	0.15	5.00
Pb	0.18	0.11	0.4	3.00
Cd	0.14	0.14	0.19	2.00
Ca	0.06	0.17	0.13	1.00
Na	0.04	0.36	0.24	0.50

Cr	0.04	0.05	0.06	0.10
K	0.02	0.07	0.06	0.00

Figure 5. *Heat map of the spatial distribution of maximum permissible concentration (MPC) exceedance factors for elements across the sampling sites of the Brazhinsky Stream*

The obtained results indicate that pollution in the Brazhinsky Stream is dominated by a limited number of priority pollutants.

Elevated values are also observed for aluminum and iron, indicating their significant role in forming the overall chemical composition of the stream waters.

The spatial distribution of the indicators demonstrates an increase in the degree of pollution downstream of the stream, which is particularly pronounced for copper and zinc. A number of elements (Be, Cr, Mn, Co, Ni, Cd, Pb) occur at concentrations significantly below the maximum permissible levels. For example, beryllium concentrations range from 0.2 to 0.7 MPC, chromium from 0.04 to 0.06 MPC, and nickel from 0.42 to 0.58 MPC. This indicates that these elements do not have a substantial impact on the overall pollution level of the studied watercourse and can be considered part of the background contamination.

The identified patterns are confirmed by the results of the water pollution index (WPI) calculation, the values of which increase from 2.27 in the headwaters to 3.68 in the lower reach of the stream (Figure 6).

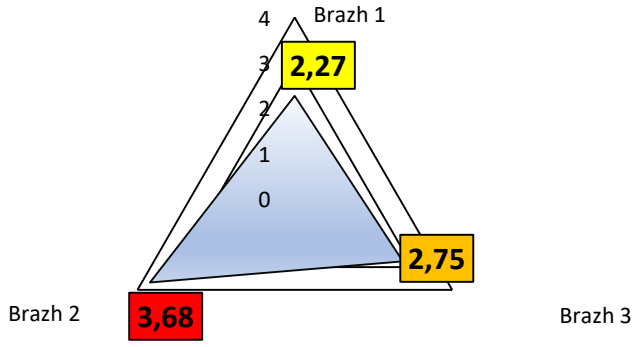


Figure 6. *Spatial distribution of the water pollution index (WPI) across the sampling sites of the Brazhinsky Stream*

This indicates the cumulative nature of pollution within the urbanized area. Thus, the heat map and WPI values consistently reflect the spatial differentiation of pollution, allowing the identification of priority pollutants and confirming the intensification of anthropogenic impact downstream of the Brazhinsky Stream.

According to the adopted water quality classification, WPI values in the range of 2.5…4 correspond to the “polluted water” category. The obtained index values demonstrate a clear trend of increasing pollution downstream: Brazh 1 < Brazh 2 < Brazh 3 (Figure 7). This indicates a gradual accumulation of pollutants within the stream channel and confirms the influence of anthropogenic factors on the formation of the water chemical composition. The greatest contribution to the integrated pollution index is made by the following elements: copper, zinc, aluminum, iron, and arsenic. These components determine the overall level of environmental pressure on the aquatic system.

The consistency between the results obtained from the analysis of MPC exceedance ratios and those derived from the calculation of the integrated Water Pollution Index (WPI) indicates the high informative value of an integrated approach to water quality assessment. Such an approach is widely used in contemporary surface water studies because it accounts for the

combined effects of multiple pollutants and provides a more objective assessment of the ecological status of a water body [38].

Despite its small size, the Brazhinsky Stream may serve as a significant local accumulator and transporter of anthropogenic pollutants within the urban area. Given the detected concentrations of copper and zinc exceeding regulatory limits by several tens of times, this stream should be considered a potential pathway for the migration of heavy metals within both surface and, likely, groundwater systems. According to cartographic data, the Brazhinsky Stream does not directly discharge into the Irtysh River; instead, in its lower reach it likely loses surface runoff and partially discharges into subsurface horizons. This suggests the possibility of further pollutant transport not only via surface flow but also through subsurface pathways. The obtained results confirm the need for regular monitoring of the chemical composition of small streams in urbanized areas, as even in the absence of direct inflow into major rivers, they may play a significant role in the redistribution of pollutants within a river basin.

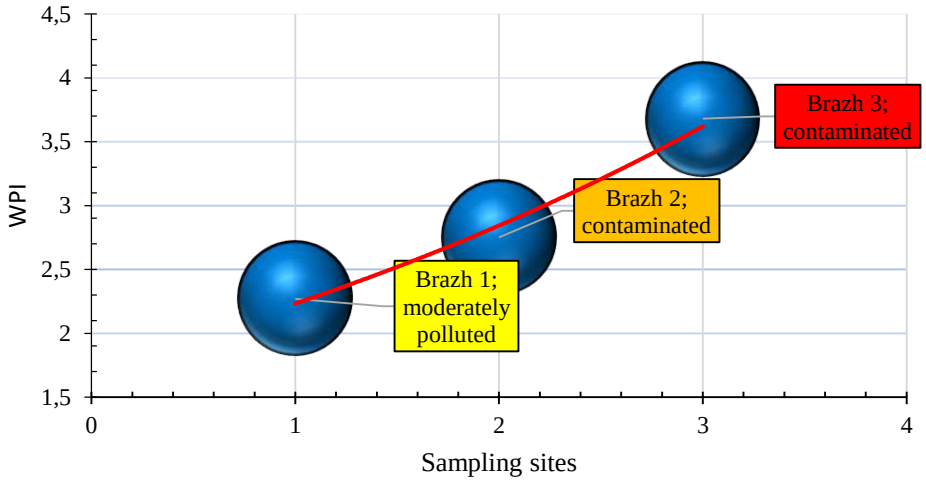


Figure 7. *Variation in the level of water pollution along the flow of the Brazhinsky Stream*

The obtained results emphasize that small watercourses, despite their relatively low discharge and local scale, can play an important role in the accumulation and redistribution of pollutants within urbanized areas. Such watercourses are often the most sensitive indicators of local industrial impacts and make it possible to identify pollution sources much earlier than they become evident in larger rivers. Therefore, monitoring of small watercourses should be considered an important element of the environmental monitoring system in industrial regions.

4. CONCLUSION

The conducted study made it possible to perform a comprehensive assessment of the ecological state of the waters of the Brazhinsky Stream located within the city of Ust-Kamenogorsk. It was established that the formation of the stream's chemical composition is governed by both natural and anthropogenic factors, with a predominant role of anthropogenic pressure. The spatial location of the stream within an area of intensive industrial development, as well as its morphological and hydrological characteristics, creates favorable conditions for the active input, transport, and accumulation of pollutants.

It should be noted that the identified spatial differences significantly exceed the possible seasonal variations in the measured parameters during the study period, making it possible to use the obtained data to assess the spatial distribution of pollution in the watercourse.

The turbidity analysis revealed a high content of suspended solids at all investigated sampling sites (47.7...54.3 NTU), which facilitates the migration of heavy metals in the solid phase and their accumulation in bottom sediments. Hydrochemical analysis identified persistent

exceedances of maximum permissible concentrations (MPC) for a number of elements, among which copper, zinc, aluminum, and iron make the greatest contribution to pollution. Copper concentrations reach 24.2...44.2 MPC, while zinc levels range from 5.8 to 9.8 MPC, indicating a pronounced anthropogenic origin of the contamination.

A specific feature of the Brazhinsky Stream is the absence of a direct surface inflow into the Irtysh River, which determines its role as an element in the redistribution of pollutants between surface and groundwater systems. Under these conditions, the stream may act as a local accumulator and conduit of anthropogenic contaminants, including their potential further migration into subsurface horizons.

Thus, the Brazhinsky Stream is a small urbanized watercourse subjected to significant anthropogenic impact. Its ecological condition is characterized as polluted, while the transport processes of contaminants are complex and spatially differentiated. The obtained results confirm the necessity of regular hydrochemical monitoring of small watercourses in urbanized areas as important components in the formation of the ecological state of aquatic systems.

DATA AVAILABILITY

The data used in the study were obtained as a result of an experimental analysis of surface water samples.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization – NS, GD; Resources – NS, GD, OP, MK, AP, OV, ID; Formal analysis – NS, GD; Methodology – NS, GD, OP, AP; Visualization – NS, AP, OP; Writing-original draft preparation - NS, GD, MK; Writing — review and editing – NS, GD, OP, MK, AP, OV, ID.

FINANCIAL SUPPORT

The article presents the results of scientific research obtained during the implementation of a scientific and technical program of Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan BR24992854 on the topic: “Development and implementation of competitive science-based technologies to ensure sustainable development of mining and metallurgy industry East Kazakhstan region” within the framework of program-targeted financing.

REFERENCES

1. Lotfi, S., Chakit, M, Belghyti, D.. (2020). Groundwater quality and pollution index for heavy metals in Saïs Plain, Morocco. Journal of Environmental Health Science and Engineering, Vol. 10, No. 26, pp. 200603. https://doi.org/ 10.5696/2156-9614-10.26.200603
2. Alimbaev, T., Mazhitova, Zh., Beksultanova, G., TentigulKyzy, N. (2020). Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: environmental problems and possible solutions. E3S Web Conference, Vol. 175, pp. 14019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514019.
3. Khan, M., Omer, T., Ellahi, A., Ur Rahman, Z., Niaz, R., & Ahmad Lone, S. (2023). Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water of selected rivers. Geocarto International, Vol. 38, No. 1, pp. 2256313. https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256313
4. Kolpakova, V., Yeremeyeva, Y., Anapyanova, S., Mamyrbekova, G., Nurekenova, R., Utepbergenova, L., Shakhmov, Z., Aniskin, A. (2024). Hydroecological assessment of the Kazakh part of the Yertis River under conditions of industrial development. Results Engineering, Vol. 24, pp. 103578. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103578
5. Alimbaev, T., Omarova, B., Abzhapparova, B., Ilyassova, K., Yermagambetova, K., Mazhitova, Zh. (2020). Environment of East Kazakhstan: state and main directions of optimization. E3S Web Conferences, Vol. 175, pp. 14008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514008
6. Sydykov, Y., Sailaubay, Y., Maslov, K., Zhanbossinova, A., Detochkina, V. (2025). Irtysh: Environmental Risks and Threats. BIO Web of Conferences, Vol. 179, pp. 14005. https://doi.org/10.1051/bioconf/202517914005
7. Ariza Restrepo, J.L., Rodriguez Diaz, Y.J., Onate Barraza, H.C., Ariza Restrepo, J.L., Rodriguez Diaz, Y.J., Onate Barraza, H.C. (2023). Water Quality Indices (WQI) and Contamination Indices (WPI) a Bibliographic Review. Tecnura, Vol. 27, pp. 121–140. https://doi.org/10.14483/22487638.20052
8. Seraya, N., Daumova, G., Petrova, O., Garcia-Mira, R., Polyakova, A. (2025). Ecological Status of the Small Rivers of the East Kazakhstan Region. Sustainability, Vol. 17, pp. 6525. https://doi.org/10.3390/su17146525
9. Wątor K., Zdechlik R. (2021). Application of water quality indices to the assessment of the effect of geothermal water discharge on river water quality – case study from the Podhale region (Southern Poland), Ecological Indicators, Vol. 121, pp. 107098, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107098
10. Averin, D. E., Zubarev, V. A. (2022). Soderzhanie tyazhelykh metallov v komponentakh maloi reki, ne podverzhennoi vliyaniyu antropogennoi deyatelnosti [Content of heavy metals in components of a small river not affected by anthropogenic activity]. Regional’nye problemy, Vol. 25, No. 4, pp. 22–30. https://doi.org/10.31433/2618-9593-2022-25-4-22-30 [in Russian].
11. Yanturin, S. I., Khisametdinova, A. Yu., Buskunova, G. G. (2021). Soderzhanie tyazhelykh metallov v poverkhnostnykh vodakh malykh rek zapadnogo sklona khrebta Irandek [Content of heavy metals in surface waters of small rivers of the western

slope of the Irandek ridge]. Samara Journal of Science, Vol. 10, No. 2, pp. 131–135. https://doi.org/10.17816/snv2021102120 [in Russian]
12. Zhalmagambetova, U., Assanov, D., Neftissov, A., Biloshchytskyi, A., Radelyuk, I. (2024). Implications of Water Quality Index and Multivariate Statistics for Improved Environmental Regulation in the Irtysh River Basin (Kazakhstan). Water, Vol. 16, pp. 2203. https://doi.org/10.3390/w16152203
13. Aidarkhanova A., Larionova N., Tashekova A., Dyussembayeva M., Mamyrbayeva A., Timonova L., Shakenov Ye., Mulikova A., Aidarkhanov A. (2024) Assessment of the radionuclide and chemical composition of the Irtysh River water at the Republic of Kazakhstan territory. RSC Advances, Vol. 14, pp. 26208–26218. https://doi.org/10.1039/D4RA02557A
14. Burlibaeva, D.M., Burlibaev, M.Z., Ryskeldieva, A.M., Kaidarova, R.K., Opp, C., Amirgaliev, N.A. (2020). Dynamics of concentrations changes of heavy metal group pollutants in surface water of the transboundary Ertis River on the territory of the Republic of Kazakhstan. Journal of Geography and Environmental Management, Vol. 57, No. 2, pp. 54–68. https://doi.org/10.26577/JGEM.2020.v57.i2.05
15. Rakhymberdina, M., Daumova, G., Apshikur, B., Shults, R., Toguzova, M., Assylkhanova, Zh., Kolpakova, V., Kapasov, A. (2024). Integrated Chemical-Geoecological Monitoring and Engineering Approaches for Pollution Reduction in the Yertis River. Engineered Science, Vol. 32, pp. 1328. https:// doi.org/10.30919/es1328
16. Krupa, E., Romanova, S., Serikova, A., Shakhvorostova, L.A (2024). Comprehensive Assessment of the Ecological State of the Transboundary Irtysh River (Kazakhstan, Central Asia). Water, Vol. 16, pp. 973. https://doi.org/10.3390/w16070973
17. Matos, T., Martins, M., Henriques, R., Goncalves, L. (2024). A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. Journal of Water Process Engineering, Vol. 64, pp. 105624. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105624
18. Project of standards for permissible discharges (PD) of pollutants entering a water body with wastewater (Brazhinsky stream) For Kazceramics LLP. Discharge standards project for 2026–2035. Altaytekhenergo LLP, Ust-Kamenogorsk, 2025. 60 p. [in Russian]
19. Загрязнение русла Бражьего ручья произошло из-за дефекта в трубопроводе УК ТЭЦ // YK-news.kz. – 23.07.2015. – URL: https://m.yk-news.kz/news/загрязнение-русла-бражьего-ручья-произошло-из-за-дефекта-в-трубопроводе-ук-тэц (дата обращения: 10.04.2026).
20. В Усть-Каменогорске сильно загрязнен Бражий ручей // Усть-Каменогорск City. – 10.07.2015. – URL: https://ust-kamenogorsk.city/novosti-ust-kamenogorska/2132/ (дата обращения: 10.04.2026).
21. Жители Усть-Каменогорска зафиксировали загрязнение водоёма, предположительно, зерноотходами // YK-news.kz. – 01.06.2020. – URL: https://m.yk-news.kz/video/жители-усть-каменогорска-зафиксировали-загрязнение-водоёма-предположительно-зерноотходами (дата обращения: 10.04.2026).
22. Косенов А. Бражий ручей вышел из берегов в Усть-Каменогорске // Tengrinews.kz. – 23.03.2014. – URL: https://tengrinews.kz/events/brazii-rucei-vysel-iz-beregov-v-ust-kamenogorske-252422/ (дата обращения: 10.04.2026).
23. Ryskeldieva, A., Burlibaeva, D., Yerdesbay, A., Kamelkhan, G., Sarova, N. (2023). Clarke concentrations of heavy metals in surface waters of the transboundary river Yertis (Kazakhstan). Water Sciences, Vol. 37, pp. 18–27. https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2193453
24. Burlibayeva, D.M., Burlibayev, M.Z., Opp, C., Bao, A.M. (2016). Regime dynamics of hydro chemical and toxicological parameters of the Irtysh River in Kazakhstan. Journal of Arid Land, Vol. 8, pp. 521–532. https://doi.org/10.1007/s40333-016-0083-y
25. Information bulletin on the state of the environment in East Kazakhstan and Abai regions, Kazhydromet Branch for East Kazakhstan and Abai regions, 2025, Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 2025 – 48 p, https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayuschey-sredy/2025. [in Russian]
26. ST RK ISO 5667-6-2017 "Water quality. Sampling. Part 6. Guidelines for sampling from rivers and watercourses". [in Russian]
27. GOST 59024-2020 "Water. General sampling requirements". [in Russian]
28. RD. Guidelines for the Chemical Analysis of Surface Inland Waters, ed. A. D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 345 p. [in Russian]
29. ST RK ISO 17294-2-2006. Water quality — Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) — Part 2: Determination of 62 elements. [in Russian] https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30371803&pos=5;-106#pos=5;-106
30. ISO 7027-1:2016 Water quality — Determination of turbidity. Part 1: Quantitative methods or GOST R 57164-2016. Drinking water — Methods for determination of odour, taste and turbidity, 2019. 23 p.
31. RD 52.24.643-2002. Method for integrated assessment of the pollution level of surface waters based on hydrochemical parameters. [in Russian]
32. Order of the Minister of Water Resources and Irrigation of the Republic of Kazakhstan dated 4 June 2025 No. 111-NQ “On approval of the unified system for classification of water quality in surface water bodies and (or) their parts”. [in Russian] https://adilet.zan.kz/rus/docs/G25MA000111
33. Aleksander-Kwaterczak, U., Plenzler, D. (2019). Contamination of small urban watercourses on the example of a stream in Krakow (Poland). Environmental Earth Sciences, Vol. 78, pp. 530. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8509-4
34. Hızlı, S., Karaoğlu, A.G., Gören, A.Y., Kobya, M. (2023). Identifying Geogenic and Anthropogenic Aluminum Pollution on Different Spatial Distributions and Removal of Natural Waters and Soil in Çanakkale, Turkey. ACS Omega, Vol. 8, No. 9, pp. 8557–8568. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c07707
35. Moulatlet, G.M., Yacelga, N., Rico, A., Mora, A., Hauser-Davis, R.A., Cabrera, M., Capparelli, M.V. (2023). A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. Chemosphere, Vol. 339, pp. 139700. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139700
36. Huang, J., Gergel, S.E. (2022). Landscape indicators as a tool for explaining heavy metal concentrations in urban streams. Landscape and Urban Planning, Vol. 220, pp. 104331. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104331
37. Jamwal, P., Nayak, D., Urs, P.R., Thatey, M.Z., Gopinath, M., Idris, M., Lele, S. (2022). A multi-pronged approach to source attribution and apportionment of heavy metals in urban rivers. Ambio, Vol. 51, pp. 2182–2200. https://doi.org/10.1007/s13280-022-01734-y
38. Hossain, M., Patra, P.K. (2020). Water pollution index – A new integrated approach to rank water quality. Ecological Indicators, Vol. 117, pp. 106668. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106668

БРАЖИНСКИЙ БҰЛАҒЫНЫҢ (ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН) БЕТКІ СУЛАРЫНЫҢ ЛАСТАНУЫ МЕН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫНА КӨПКОМПОНЕНТТІ БАҒА БЕРУ

Наталья Серая, Химия ғылымдарының кандидаты, Профессор, Гульжан Даумова, Техника ғылымдарының кандидаты, Профессор, Ольга Петрова, Техника ғылымдарының кандидаты, Доцент, Макпал Кайсина, Арина Полякова, Ольга Васильева, Игорь Денисов.

[1]Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан; NSeraya@edu.ektu.kz (NS), GDaumova@edu.ektu.kz (GD), OPetrova@edu.ektu.kz (OP), MKaysina@edu.ektu.kz (MK), APolyakova@edu.ektu.kz (AP), OVasilyeva@edu.ektu.kz (OV), IDenisov@edu.ektu.kz (ID)
*Автор корреспондент: Гульжан Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Бражинский бұлағы, беткі сулардың сапасы, ауыр металдар, су ластану индексі (WPI), су лайлылығы, антропогендік әсер, гидрохимиялық талдау

Мақала жайында:
Алынды: 17.04.2026
Қайта қаралды: 11.08.2026
Қабылданды: 14.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Жұмыста Бражинский бұлағының беткі суларының ластануы мен экологиялық жағдайына көпкомпонентті баға беру ұсынылған. Зерттеу су лайлылығы мен гидрохимиялық құрамын талдау негізінде жүргізілді. Су лайлылығы 47,7...54,3 ФЕ аралығында өзгеретіні анықталды, бұл қалқыма заттардың жоғары мөлшерін және олардың ластаушы компоненттердің көшуіндегі маңызды рөлін көрсетеді. Гидрохимиялық талдау бірқатар элементтер бойынша шекті рұқсат етілген концентрациялардың тұрақты артуын көрсетті, олардың ішінде ластануға ең үлкен үлес қосатындар - мыс, мырыш, алюминий және темір. Мыстың концентрациясы 44,2 ШРК-ға дейін, мырыштікі - 9,8 ШРК-ға дейін жетеді, бұл айқын техногендік әсерді білдіреді. Судың сапасын интегралды бағалау үшін су ластану индексі (WPI) қолданылды, оның мәндері жоғары, орта және төменгі учаскелер үшін тиісінше 2,27; 2,75 және 3,68 болды. Жіктеме бойынша бұл «ластанған су» санатына сәйкес келеді және ағыс бойымен төмен қарай ластану деңгейінің арту үрдісін көрсетеді. Бражинский бұлағы Ертіс өзеніне тікелей құйылмағанына қарамастан, беткі және жерасты сулары жүйесінде ластаушы заттардың қайта бөлінуінде маңызды рөл атқаратыны көрсетілді. Алынған нәтижелер су ағысына антропогендік жүктеменің жоғары екенін дәлелдейді және урбанизацияланған аумақтардағы шағын су ағындарын тұрақты гидрохимиялық мониторингтеудің қажеттілігін растайды.

МНОГОКОМПОНЕНТНАЯ ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД БРАЖИНСКОГО РУЧЬЯ (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН)

Наталья Серая, Кандидат химических наук, Профессор, Гульжан Даумова, Кандидат технических наук, Профессор, Ольга Петрова, Кандидат технических наук, Доцент, Макпал Кайсина, Арина Полякова, Ольга Васильева, Игорь Денисов.

Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан; NSeraya@edu.ektu.kz (NS), GDaumova@edu.ektu.kz (GD), OPetrova@edu.ektu.kz (OP), MKaysina@edu.ektu.kz (MK), APolyakova@edu.ektu.kz (AP), OVasilyeva@edu.ektu.kz (OV), IDenisov@edu.ektu.kz (ID)
*Автор корреспондент: Гульжан Даумова, GDaumova@edu.ektu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Бражинский ручей, качество поверхностных вод, тяжёлые металлы, индекс загрязнения воды (WPI), мутность воды, антропогенное воздействие, гидрохимический анализ

АБСТРАКТ

В работе представлена многокомпонентная оценка загрязнения и экологического состояния поверхностных вод Бражинского ручья, расположенного в пределах города Усть-Каменогорск (Восточный Казахстан). Исследование выполнено на основе анализа мутности и гидрохимического состава воды. Установлено, что мутность воды варьирует в пределах

По статье:
Получено: 17.04.2026
Пересмотрено:11.08.2026
Принято: 14.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

47,7...54,3 ФЕ, что свидетельствует о высоком содержании взвешенных веществ и их значимой роли в миграции загрязняющих компонентов. Гидрохимический анализ показал наличие устойчивых превышений предельно допустимых концентраций по ряду элементов, среди которых наибольший вклад в загрязнение вносят медь, цинк, алюминий и железо. Концентрации меди достигают 44,2 ПДК, цинка - до 9,8 ПДК, что указывает на выраженное техногенное воздействие. Для интегральной оценки качества воды использован индекс загрязнения воды (WPI), значения которого составили 2,27; 2,75 и 3,68 для верхнего, среднего и нижнего створов соответственно. Согласно классификации, это соответствует категории «загрязнённая вода» с тенденцией увеличения степени загрязнения вниз по течению. Показано, что Бражинский ручей, несмотря на отсутствие прямого впадения в реку Иртыш, играет важную роль в перераспределении загрязняющих веществ в системе поверхностных и подземных вод. Полученные результаты свидетельствуют о значительной антропогенной нагрузке на водоток и подтверждают необходимость регулярного гидрохимического мониторинга малых водотоков урбанизированных территорий.

Publisher's Note: Statements, opinions, and data in all publications are those of the author(s) alone and not those of the Journal of Hydrometeorology and Ecology and/or the editor(s).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гаухар К. Бишимбаева[1] д.т.н., Сауле М. Нурмакова*[1] к.т.н., Рустем В. Шарипов[1], Карлыгаш Ж. Буленова[2], Закен А. Искаков[2], Айдана А. Мырзабекова[1], Амантай Далбанбай[1], Ербол М. Карманов[1], Магзум Ж. Садыков[1]

[1] НАО «Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева» (Satbayev University), Алматы, Казахстан; g.bishimbayeva@satbayev.university (Г.К.Б.), s.nurmakova@satbayev.university (С.М.Н.), s.rustemv@gmail.com (Р.В.Ш.), kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б), zaken.is@mail.ru (З.А.И), Myrzabekova.inp@gmail.com (А.А.М.), a.dalbanbay@satbayev.university (А.Д), Yerposhock@gmail.com (Е.М.К.), Magzumych@mail.ru (М.Ж.С.)
[2] ТОО "Институт высоких технологий", Алматы, Казахстан, kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б), zaken.is@mail.ru (З.А.И),
* Автор корреспондент: Сауле М. Нурмакова, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

редкоземельные элементы, урановые месторождения, керновые пробы, техногенные образования, минералогический анализ, шлиховое обогащение, монацит, редкометальная минерализация, тяжелая фракция

АБСТРАКТ

В работе выполнено минералого-геохимическое исследование редкоземельных элементов в отработанных керновых пробах уранового месторождения Казахстана. Объектом исследования являлись пробы керна, отобранные из рудных, подрудных и нерудных интервалов скважин. Для оценки вещественного состава применён комплекс методов, включающий шлиховое обогащение, гравитационное разделение в тяжелой жидкости, магнитную сепарацию, а также минералогический, иммерсионный, капельно-микрохимический, люминесцентный и микрозондовый анализы. Установлено, что керновый материал представлен преимущественно глинистыми породами с включениями кварцевых песков и сульфидной минерализацией (пирит, марказит), а также минералами урана. В тяжелой фракции шлиховых проб выявлены минералы, потенциально концентрирующие редкоземельные элементы, включая монацит, сфен (титанит) и гранат. Монацит зафиксирован во всех исследованных пробах в виде редких и единичных зёрен, его содержание, как правило, не превышает 0,01 г. Дополнительно выявлены минералы тантало-ниобиевой группы, шеелит и акцессорные минералы (циркон, рутил, апатит, анатаз). Полученные результаты свидетельствуют о наличии редкоземельной минерализации в отработанном керне и указывают на его потенциальную перспективность как объекта для дальнейших геохимических исследований и оценки распределения РЗЭ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Мировое научное сообщество проявляет значительный интерес к вопросам добычи и производства редкоземельных элементов (РЗЭ), что обусловлено их высокой экономической значимостью для высокотехнологичных отраслей промышленности и рисками нестабильности поставок на мировой рынок. Европейский союз отнёс РЗЭ к категории критически важных сырьевых материалов, поскольку их трудно заменить в современных технологических устройствах без потери эффективности. В этих условиях извлечение РЗЭ из различных источников сырья приобретает особую актуальность в контексте устойчивого развития и перехода к принципам циркулярной экономики. Вовлечение техногенных отходов в переработку соответствует принципам устойчивого развития [1].

МРНТИ 38.35.24; 38.33.15 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-193-203 УДК 550.4:553.04

По статье:
Получено: 06.05.2026
Пересмотрено: 15.06.2026
Принято: 23.06.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Бишимбаева Г.К., Нурмакова С.М., Шарипов Р.В., Буленова К.Ж., Искаков З.А., Мырзабекова А.А., Далбанбай А., Карманов Е.М., Садыков М.Ж., Минералого-геохимический анализ редкоземельного потенциала техногенных отходов урановых месторождений// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 193-203.

Широкое применение РЗЭ определяет их ключевую роль в развитии высокотехнологичных и низкоуглеродных отраслей. Они используются при производстве ветровых генераторов, электромобилей, катализаторов для снижения выбросов, энергоэффективных источников света и других экологически ориентированных технологий. Благодаря этому РЗЭ часто называют «зелёными металлами». На их основе получают легированные материалы, постоянные магниты, люминофоры и другие функциональные продукты, обладающие уникальными оптическими, электрическими, каталитическими и магнитными свойствами. Во многих странах РЗЭ рассматриваются как стратегический ресурс, нередко обозначаемый как «промышленное золото», поскольку они обеспечивают развитие высокотехнологичного производства и экономики.

Одним из ключевых факторов роста спроса на РЗЭ является развитие электрического транспорта. Производство гибридных (HEV) и полностью электрических автомобилей (EV) связано с использованием постоянных магнитов на основе неодима, функционирующих при повышенных температурах и требующих легирования диспрозием для обеспечения высокой коэрцитивной силы. Согласно прогнозным оценкам, к 2030 году ожидается значительный рост производства электромобилей, что обусловливает увеличение спроса на РЗЭ [2]. В контексте энергетического перехода и декарбонизации особое значение приобретают неодим, диспрозий, тербий, иттрий и европий. РЗЭ широко применяются в производстве люминофоров, стекла специального назначения, устойчивых к различным видам излучения, а также огнеупорных материалов. Многие их соединения характеризуются высокой температурой плавления и химической устойчивостью [3].

Экономически рентабельные месторождения РЗЭ ограничены и сосредоточены в небольшом числе стран. Содержание РЗЭ в земной коре составляет 130 – 240 мкг/г [4]. Основным мировым производителем на сегодняшний день остается Китай, обеспечивающий около 70 …90 % добычи РЗЭ [5…7]. Развитие технологий переработки, а также меры экспортного регулирования позволяют стране оказывать определяющее влияние на глобальные поставки редкоземельного сырья [8…11].

РЗЭ широко распространены в земной коре, однако месторождения с промышленными концентрациями встречаются значительно реже. Согласно отчёту Европейской комиссии «Strengthening the European rare earths supply chain» доступные ресурсы РЗЭ существенно превышают текущие объёмы их добычи [12]. Руды характеризуются сложным и многокомпонентным составом и содержат наряду с РЗЭ ниобий, тантал, железо, алюминий и другие элементы. Известно более 250 минералов содержащих РЗЭ, включая монацит, ксенотим, бастнезит и другие. В большинстве случаев преобладают лёгкие РЗЭ (LREE) по сравнению с тяжёлыми (HREE). Это определяет необходимость разработки новых технологий комплексной переработки сложного сырья [13].

В последние годы возрастает интерес к извлечению РЗЭ из альтернативных источников, включая техногенные образования: хвосты обогащения, шлаки, золошлаковые отвалы, фосфогипс и отработанные керновые материалы. Эти объекты рассматриваются как потенциальные источники РЗЭ требующие детального минералого-геохимического изучения [14].

В данной работе исследуются отработанные керновые пробы, отобранные из скважин уранового месторождения, с целью выявления признаков рудоносности, рудообразования и минералогических особенностей распределения РЗЭ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемого материала использованы 31 представительная проба кернового материала уранового месторождения Казахстана, отобранные для изучения распределения РЗЭ. Отбор осуществлялся из рудных, околорудных и вмещающих интервалов скважин с повышенными концентрациями полезных компонентов, определёнными по данным каротажных исследований. Перед проведением аналитических исследований кер-

новый материал подвергался поэтапному обогащению и фракционированию с целью концентрирования тяжёлых минеральных фаз потенциально содержащих РЗЭ. Составные пробы кернового материала из трёх скважин были усреднены путём объединения квартованных навесок с последующим интенсивным перемешиванием до получения однородной массы. Полученный материал подвергали сухому ситовому анализу с использованием сита с размером ячейки 0,5 мм, с выделением двух классов крупности: крупного (> 0,5 мм) и мелкого (< 0,5 мм). Обе фракции взвешивались для определения гранулометрического распределения.

Мелкая фракция (< 0,5 мм) подвергалась ручному отмучиванию и промывке с получением шлиховых концентратов, которые затем высушивались и взвешивались. Далее осуществлялось разделение концентратов по плотности с использованием бромоформа ($CHBr_3$, плотность 2,90 г/см^3), в результате чего получали тяжёлую и лёгкую фракции. Обе фракции промывались этанолом, высушивались и взвешивались отдельно. Тяжёлая фракция дополнительно подвергалась магнитной сепарации с использованием ручных постоянных магнитов и последующему разделению многополюсным электромагнитом по методике А.Я. Сочнева. В результате выделялись магнитная, электромагнитная и немагнитная фракции.

Все последующие исследования проводились на фракционированных и обогащённых пробах кернового материала. Минералогическое изучение РЗЭ-содержащих фаз выполнялось на шлиховых концентратах крупностью < 0,5 – > 0,1 мм. Морфологические и физико-оптические свойства зерен изучались под бинокулярным микроскопом МБС-9 при увеличении ×25. Идентификация минералов осуществлялась с применением капельно-микрохимических реакций и иммерсионного метода с подбором жидкостей по показателям преломления. Исследования проводились на поляризационном микроскопе Leica DM 2500P в проходящем свете. Дополнительная диагностика элементного и фазового состава минералов выполнялась с использованием электронного микрозонда JEOL Superprobe-733 (Япония). Люминесцентные свойства минералов немагнитной фракции исследовались методом катодолюминесценции на установке «Люменскоп». Регистрировались характеристики свечения минералов при электронном возбуждении, что использовалось для дополнительной минералогической идентификации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследований проанализированы 31 проба отработанного кернового материала из трёх скважин уранового месторождения Казахстана с целью оценки минерального состава и выявления фаз, потенциально концентрирующих РЗЭ. Минералогический анализ обогащённой фракции крупностью > 0,5 мм показал, что исследуемый материал представлен преимущественно рыхлыми, слабосцементированными и слабослюдистыми глинистыми породами. В ряде образцов фиксируются слабокарбонатизированные глины различной зернистости (средне-, мелко- и тонкозернистые) с прослоями кварцевых песков. Цветовая вариация глинистого материала отражает его минеральный и геохимический состав и включает светло-серые, зеленовато-голубые, тёмно-серые, пепельно-серые и локально ожелезнённые разновидности (жёлто-бурые и красновато-бурые окраски, связанные с присутствием гидроксидов железа).

В составе рудных минералов во всех изученных пробах установлено присутствие урановых минералов, представленных свободными зернами, микровкраплениями и дисперсной пропиткой в глинистой матрице. Из сульфидной ассоциации повсеместно фиксируется пирит. Свободные зерна золота в изученном материале не обнаружены.

Для фракции крупностью < 0,5 …0,1 мм был получен шлиховый концентрат, подвергнутый дальнейшему разделению по плотности и магнитным свойствам. Разделение в тяжелой жидкости (бромоформ, плотность 2,90 г/см^3) позволило выделить тяжёлую и лёгкую фракции. Тяжёлая фракция дополнительно была разделена магнитной сепарацией на магнитную, электромагнитную и немагнитную составляющие. Результаты массопереноса и распределения фракций приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты по разделению керновых проб размером (d << 0,5мм – + 0,1 мм) на фракции

№	№ обогащенных проб керна	Вес дробленных проб *d* << 0,5 – 0,1 мм, г	Вес шлиха (концентрата) *d* << 0,5 – 0,1 мм, г	Выход тяжелой фракции, г	Вес магнитной фракции, г	Вес электромагнитной фракции, г	Вес немагнитной фракции, г	Выход легкой фракции, г
			Скважина 1					
1	Пр.3-2-2	1 795,45	25,40	0,36	зн	0,30	0,05	24,70
2	Пр.3-2-8	1 884,70	22,70	0,09	незн	0,05	0,03	22,45
3	Пр.5-2-0	1 043,78	13,90	0,26	зн	0,09	0,16	13,60
4	Пр.5-2-2	914,70	16,95	0,21	зн	0,02	0,18	13,40
5	Пр.5-2-0	986,30	18,25	0,12	незн	0,09	0,03	17,90
6	Пр.6-2-4	1 023,35	14,75	0,75	зн	0,03	0,72	13,00
7	Пр.6-2-6	1647,20	14,65	2,70	зн	0,035	2,66	11,60
8	Пр.6-2-8	1 950,55	17,40	1,20	незн	0,09	1,10	15,90
9	Пр.6-2-9	917,07	12,55	0,31	зн	0,06	0,23	12,25
10	Пр.7-2-0	611,65	15,95	0,71	незн	0,07	0,62	13,80
			Скважина 2					
11	Пр.13-1-5	180,60	30,20	0,76	зн	0,04	0,71	29,40
12	Пр.13-1-7	862,45	14,85	0,60	зн	0,05	0,54	14,00
13	Пр.13-1-9	998,00	24,45	0,56	зн	0,035	0,52	8,60
14	Пр.14-1-0	224,00	11,55	0,16	незн	0,03	0,12	7,10
15	Пр.14-1-5	980,00	24,90	0,19	зн	0,10	0,08	8,55
16	Пр.14-1-6	626,10	14,55	0,40	зн	0,16	0,33	7,80
17	Пр.14-1-8	144,10	11,20	0,17	зн	0,04	0,12	6,00
18	Пр.15-1-4	123,20	18,75	0,22	< 0,01	0,05	0,16	8,20
19	Пр.16-1-4	965,70	17,15	0,10	< 0,01	0,04	0,04	7,20
20	Пр.16-1-6	649,10	19,20	0,44	< 0,01	0,04	0,36	7,20
21	Пр.16-1-7	156,50	23,80	0,10	зн	0,02	0,07	10,10
			Скважина 3					
22	Пр.22-3-7	32,0	14,75	0,13	зн	0,05	0,07	7,80
23	Пр.23-3-0	314,50	21,40	0,19	зн	0,02	0,16	6,85
24	Пр.23-3-2	1 483,50	32,70	0,40	незн	0,08	0,29	9,10
25	Пр.23-3-4	33,0	11,65	0,20	ед зн	0,03	0,15	7,0
26	Пр.23-3-6	224,40	17,05	0,80	< 0,01	0,15	0,62	8,0
27	Пр.23-3-8	79,00	16,35	0,28	0,01	0,08	0,16	9,60
28	Пр.24-3-3	594,50	11,70	0,22	незн	0,07	0,13	11,40
29	Пр.24-3-6	441,20	11,80	3,06	<0,01	0,02	2,97	8,30
30	Пр.24-3-8	302,40	14,10	0,13	зн	0,02	0,08	10,50
31	Пр.24-3-9	101,00	7,90	0,40	незн	0,04	0,35	7,20

Примечание: зн – значительное, незн – незначительное; ед зн – единичное значение

В целом установлено:

- по Скважине 1 выход тяжёлой фракции варьировал в пределах 0,09 … 2,70 г, при выходе лёгкой фракции 11,6 – 24,7 г;
- по Скважине 2 – 0,10 – 0,76 г и 6,0 – 29,4 г соответственно;
- по Скважине 3 – 0,13 – 3,06 г и 6,85 – 11,4 г соответственно.

Максимальные значения выхода тяжёлой фракции фиксируются локально, что указывает на неравномерное распределение тяжёлых минералов в пределах разреза и возможную линзовидную природу их концентрации.

Комплекс минералогических, иммерсионных, капельно-микрохимических, люминесцентных и рентгеноспектральных (микрозондовых) исследований позволил установить сложный полиминеральный состав тяжёлой фракции и выделить группы минералов, потенциально связанных с концентрацией РЗЭ. Результаты количественного распределения минералов и фазового состава, полученные различными аналитическими методами, представлены на рисунке 1.

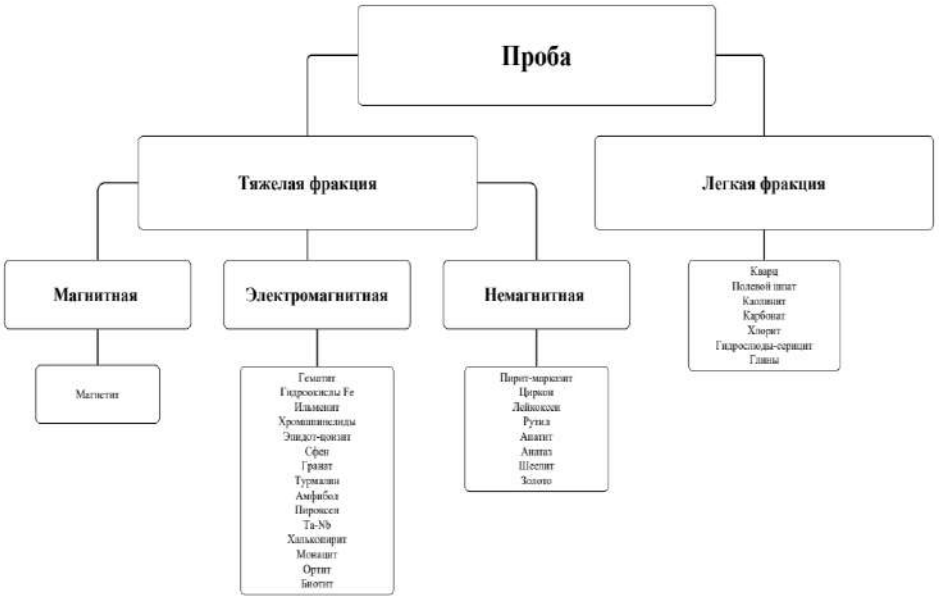


Рисунок 1. *Минералы тяжелой и легкой фракции шлиховых проб обогащённого керна на месторождении урановой промышленности РК*

Как следует из рисунка 1, в тяжелой электромагнитной фракции идентифицированы монацит, сфен (титанит) и гранат, которые рассматриваются как потенциальные носители тяжелых РЗЭ (HREE).

Минералогический анализ магнитной фракции показал, что основным компонентом является магнетит, однако его содержание носит подчинённый характер. Магнетит представлен преимущественно изометричными зернами черного цвета. В ряде случаев фиксируются гематитизированные и мартитизированные разности, характеризующиеся тёмно-бурой и рыжевато-бурой окраской, что отражает процессы окислительного преобразования первичного магнетита.

Электромагнитная фракция отличается наиболее сложным минеральным составом. Доминирующую роль играют эпидот-цоизитовые агрегаты, содержание которых достигает до 90 %. Данные минералы присутствуют практически во всех исследованных пробах и местами демонстрируют признаки интенсивных вторичных преобразований. Визуально они характеризуются бледно-зеленой окраской с фисташковым оттенком.

В подчинённых количествах в составе силикатной части электромагнитной фракции присутствуют акцессорные минералы: сфен (бурого цвета) (рисунок 2), гранат (розовых и светло-розовых, реже желтоватых оттенков) (рисунок 3), турмалин (темно-зеленый), а также единичные зерна амфибола, пироксена, биотита и ортита.

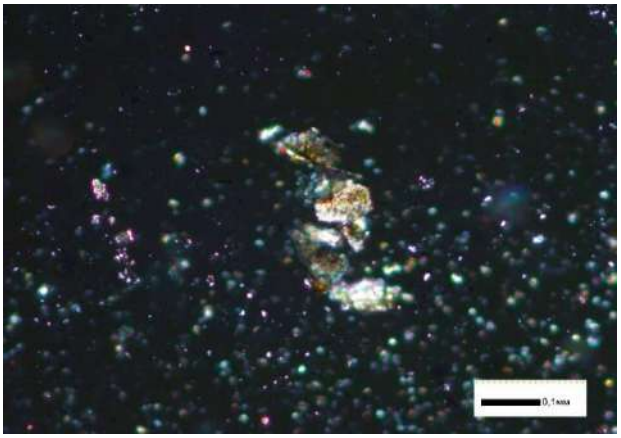


Рисунок 2. *Сфен бурый (увеличение 100-ное в иммерсии)*

Сопоставление данных показывает, что основная масса потенциально рудоносных компонентов концентрируется в тяжёлой и электромагнитной фракциях, что подтверждает эффективность применённой схемы гравитационно-магнитного обогащения для выделения минералов-индикаторов РЗЭ. Люминесцентные исследования немагнитной фракции выявили вариации свечения, указывающие на неоднородность минерального состава и присутствие минералов с различными центрами активации, что дополнительно подтверждает сложный генетический характер исследуемого материала.

Сфен (титанит) является типичным акцессорным минералом магматических и метаморфических пород и рассматривается как важный концентратор РЗЭ, где они изоморфно замещают Ca в кристаллической решетке. В ряде исследований показано, что содержание РЗЭ в титаните может достигать нескольких мас. %, при этом распределение элементов зависит от условий кристаллизации и состава материнской системы

Литературные данные [15] подтверждают, что титанит является одним из ключевых минералов-носителей легких РЗЭ (LREE), особенно в магматических породах, где наблюдается их преобладание над тяжелыми РЗЭ (HREE). При метаморфических и метасоматических процессах соотношение LREE/HREE может существенно изменяться вплоть до преобладания HREE, что определяется парагенетической ассоциацией минералов [16]. Фракционирование РЗЭ в титаните контролируется совокупностью физико-химических параметров, включая температуру, давление и минеральный парагенезис [17,18]. При этом распределение РЗЭ в титаните метасоматических систем остается недостаточно изученным, что повышает значимость полученных данных.

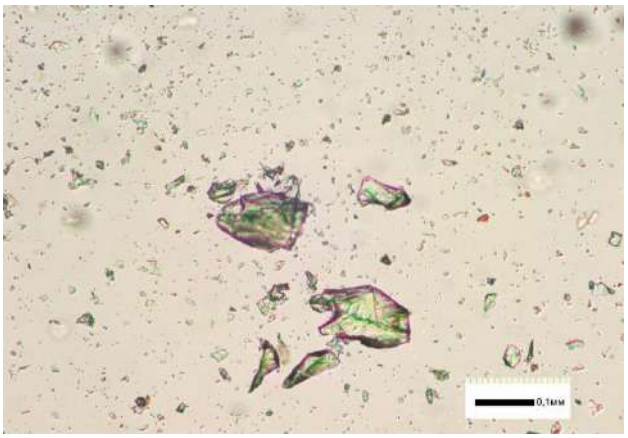


Рисунок 3. *Гранат (увеличение 100-кратное в иммерсии)*

Гранат также рассматривается как потенциальный концентратор тяжелых РЗЭ (HREE). Согласно [19-21], в ряде типов пород гранаты могут выступать основными носителями РЗЭ и иттрия (Y), при этом суммарное содержание РЗЭ может превышать 10 000 ppm. Существенным преимуществом граната как потенциального носителя РЗЭ является его слабая ассоциация с ураном и торием, в отличие от монацита. Среди оксидных минералов в исследованных фракциях установлены гематит и ильменит. Хромшпинелиды встречаются во всех пробах в единичных зернах, представлены хорошо ограненными октаэдрическими кристаллами черного цвета. Минералы тантало-ниобиевой группы выявлены в трех пробах и представлены мелкими призматическими зернами. Гидроксиды железа присутствуют во всех исследованных образцах в переменных количествах и отражают процессы вторичного окисления первичных сульфидов.

Особое внимание привлекает присутствие монацита – фосфата РЗЭ. Во всех пробах он фиксируется в виде редких и единичных зерен, реже его содержание достигает < 0,01 г. Морфологически монацит представлен плоско-таблитчатыми непрозрачными зернами

желтовато-бурой и красновато-бурой окраски. Диагностика минерала подтверждена иммерсионными методами (проба № 7-2-0, рисунок 4) и данными микрозондового анализа (проба № 23-3-2).

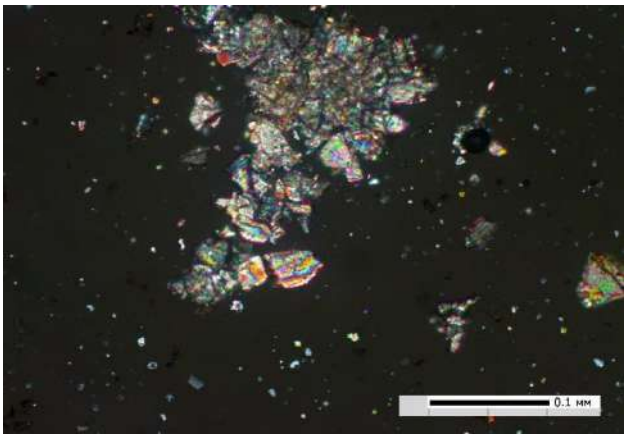


Рисунок 4. *Моноцит (увеличение 200-кратное в иммерсии)*

Немагнитная фракция характеризуется относительно однородным составом. Основу составляет пирит-марказитовая ассоциация, представленная зернами различной морфологии: игольчатой, копьевидной и агрегатной, часто с включениями глинистого вещества. В отдельных случаях фиксируются признаки окислительного изменения сульфидов, а также глобулярные формы. В подчиненных количествах присутствуют циркон, лейкоксен; реже встречаются рутил, апатит и анатаз (проба № 16-1-4). В пробе № 7-2-0 установлено единичное зерно золота (0,07 × 0,075 мм), представленное тонкопластинчатой формой с ровными краями и золотисто-желтой окраской (рисунок 5).

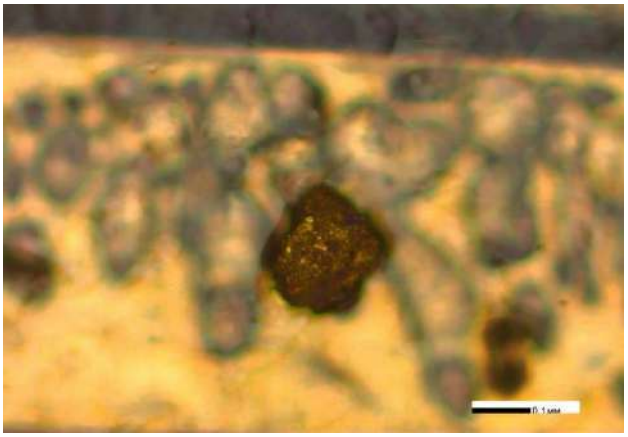


Рисунок 5. *Золото (Копейка, увеличение 100-кратное)*

Морфология золота указывает на ограниченную транспортировку и слабую степень переотложения. Несмотря на редкость, выявление монацита имеет принципиальное значение, поскольку данный минерал является одним из основных носителей РЗЭ. Его локализация в электромагнитной фракции подтверждает принадлежность к тяжелой силикатной ассоциации и может указывать на участие магматических или метасоматических процессов в формировании рудной системы.

Наличие монацита даже в следовых количествах свидетельствует о редкоземельной специализации разреза и обосновывает необходимость дальнейших геохимических исследований с акцентом на количественное определение РЗЭ. Монацит относится к группе безводных фосфатов РЗЭ и тория с общей формулой (Ce, La, Nd, Th)PO_4. Его кристаллохимия характеризуется широким развитием изоморфных замещений в катионной

подрешетке, включая гетеровалентные схемы замещения Th^{4+} и РЗЭ (REE^{3+}) с участием P^{5+} и Si^{4+}.

Содержание ThO_2 в монаците варьирует в пределах 3,5...10 %, U_3O_8...0,1...0,4 %. Суммарное содержание РЗЭ (Ce, La, Nd) составляет 55...74 %, тогда как доля иттрия (Y) и тяжелых РЗЭ (HREE) обычно не превышает 1...8 %. Содержание P_2O_5 изменяется от 18,4 до 31,5 % [22]. Монацит впервые описан Г. Брейтгауптом в 1829 году как самостоятельный минерал, встречающийся в виде обособленных зерен [23]. В природных условиях он широко распространен как акцессорный минерал гранитов, преимущественно биотитовых, где характеризуется преобладанием легких РЗЭ (LREE) и повышенным содержанием тория. Монацит из основных пород изучен существенно слабее [24].

С технологической точки зрения монацит относится к труднорастворимым фосфатам РЗЭ, что требует предварительного вскрытия его кристаллической структуры. Основными промышленными методами переработки являются кислотное и щелочное вскрытие. Кислотные методы основаны на обработке концентрированной серной кислотой при повышенных температурах с последующим переводом РЗЭ в растворимые формы и последующим их разделением (экстракция, ионный обмен) [25…27]. Щелочное вскрытие осуществляется растворами NaOH при высоких температурах с образованием гидроксидов РЗЭ и растворимых фосфатов натрия.

Кислотные методы характеризуются высокой степенью извлечения, но сопровождаются коррозионной нагрузкой и образованием радиоактивных отходов. Щелочные методы обеспечивают более эффективное разделение тория и РЗЭ, но требуют высоких энергозатрат. Выбор технологической схемы определяется минеральным составом сырья, содержанием тория, гранулометрией и экономическими параметрами переработки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность полученных минералогических и аналитических данных позволяет рассматривать выявленные особенности распределения минеральных ассоциаций не только как характеристику вещественного состава отработанного кернового материала, но и как индикатор скрытой редкоземельной специализации разреза уранового месторождения. Установлено, что даже при низкой концентрации рудных фаз фиксируется устойчивая ассоциация акцессорных минералов (сфен, гранат, эпидот-цоизитовые агрегаты) традиционно рассматриваемых как потенциальные носители РЗЭ. Особое значение имеет идентификация монацита, присутствующего в единичных зернах, что, несмотря на его низкую распространённость, подтверждает наличие фосфатной формы концентрирования РЗЭ в пределах исследуемой системы.

Полученные результаты указывают, что отработанный керновый материал уранового месторождения не является геохимически инертным субстратом, а сохраняет признаки наследованной редкоземельной минерализации пространственно связанной с урановой и сульфидной ассоциациями.

Таким образом, выявленная минеральная парагенетическая связь (U–Fe–REE–Ti–Nb–Ta системы) позволяет рассматривать исследуемый объект как потенциальный источник комплексной редкометальной минерализации, требующий дальнейшей количественной геохимической оценки и уточнения форм нахождения РЗЭ.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из различных источников, включая собственные исследования.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Г.К.Б.; Управление данными – Р.В. Ш.; Формальный анализ – Н.С.М., К.Ж. Б.; Методология-К.Ж. Б, З.А.И.; Программное обеспечение – Е.М.К; Отслеживание – З.А.И.; Визуализация – А.А.М.,А.Д; Написание исходного проекта – Г.К.Б., С.М.Н., Е.М.К.; Написание и редактирование – Г.К.Б., С.М.Н., Е.М.К.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP23490633 «Извлечение попутных ценных компонентов из технологических растворов в гидрометаллургическом производстве»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezaei, M., Sanchez-Lecuona, G., & Abdolazimi, O. (2025). A cross-disciplinary review of rare earth elements: Deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. Minerals, 15(7), Article 720. https://doi.org/10.3390/min15070720
2. Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. Natural Resources Research, 27(2), 201–216. https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5
3. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность...реализовать имеющиеся возможности. Горная промышленность. 2020;(5):68–84. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84.
4. Zepf, V. (2013). Rare earth elements: What and where they are. In Rare Earth Elements (pp. 11–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8_2
5. Mancheri, N. (2012). Chinese monopoly in rare earth elements: Supply–demand and industrial applications. China Report, 48(4), 449–468. https://doi.org/10.1177/0009445512466621
6. Liang, T., Li, K., & Wang, L. (2014). State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. Environmental monitoring and assessment, 186(3), 1499–1513. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3469-8
7. Patil, A. B., Paetzel, V., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2022). Separation and Recycling Potential of Rare Earth Elements from Energy Systems: Feed and Economic Viability Review. Separations, 9(3), 56. https://doi.org/10.3390/separations9030056
8. Hayes-Labruto, L., Schillebeeckx, S. J., Workman, M., & Shah, N. (2013). Contrasting perspectives on China's rare earths policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. Energy Policy, 63, 55–68. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.121
9. Wübbeke, J. (2013). Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. Resources Policy, 38(3), 384–394. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005
10. Han, A., Ge, J., & Lei, Y. (2015). An adjustment in regulation policies and its effects on market supply: Game analysis for China's rare earths. Resources Policy, 46(2), 30–42. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.07.007
11. Hu, X., Sun, B., Wang, C., Lim, M. K., Wang, P., Geng, X., Yao, C., & Chen, W.-Q. (2023). Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective. Resources Policy, 81, Article 103321. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103321.
12. Kooroshy, J., Tiess, G., Tukker, A., & Walton, A. (Eds.). (2015). Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options: A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON) (Ref. Ares (2015)2544417). European Commission. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
13. Б.К.Кенжалиев, Т.Ю. Суркова, Э.А. Пирматов, С.Б. Юлусов, Д.М. Есимова Извлечение редких и редкоземельных элементов из минерального и техногенного сырья. - Алматы, 2025. 358 с.
14. Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. Journal of Petrology, 37(3), 521–552. https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.52)
15. Михайленко Д.С., Губанов Н.В., Подугольникова Е.Е., Корсаков А.В., Сюй Ю.-Г., Степанов А.С. Ключевые минералы-концентраторы редкоземельных элементов в эклогитах из кимберлитов // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. Т. 19. С. 217–221. https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.040
16. Стативко В.С., Кузнецов А.Б., Смоленский В.В., Ризванова Н.Г., Сергеева Н.А. Геохимические особенности титанита и U-Pb возраст граната из минеральных копей Южного Урала // Записки Горного института. 2025. Т. 274. № 16495. С. 76-94. EDN TLQGYP
17. Garber, J. M., Hacker, B. R., Kylander-Clark, A. R. C., Stearns, M., & Seward, G. (2017). Controls on trace element uptake in metamorphic titanite: Implications for petrochronology. Journal of Petrology, 58(6), 1031–1057. https://doi.org/10.1093/petrology/egx046
18. Alex Zirakparvar, N. (2022). Industrial garnet as an unconventional heavy rare earth element resource: Preliminary insights from a literature survey of worldwide garnet trace element concentrations. Ore Geology Reviews, 148, Article 105033. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105033.
19. Klimpel, F., Bau, M., & Graupner, T. (2021). Potential of garnet sand as an unconventional resource of the critical high-technology metals scandium and rare earth elements. Scientific Reports, 11, Article 5306. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84614-x
20. Hönig, S., Čopjaková, R., Škoda, R., Novák, M., Dolejš, D., Leichmann, J., & Galiová, M. V. (2014). Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith, Czech Republic. American Mineralogist, 99(10), 1922–1941. https://doi.org/10.2138/am-2014-4728
21. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. Т. 2. Минералогия рудных элементов / Под ред. К.А.Власова. М.: Наука, 1964. 830 с.
22. Юшкин Н.П., Иванов О.К., Попов В.А. Введение в топоминералогию Урала. М.: Наука, 1986. 294 с
23. С. Г. Ковалев, Е. А. Тимофеева, Е. О. Пиндюрина. Монацитовая минерализация западного склона южного урала Геологический сборник № 8. Информационные материалы, Институт геологии Уфимского научного центра РАН 21_02_09 с.138-144
24. Alves, R. C., Nascimento, M., Paulino, J. F., & Afonso, J. C. (2021). Selection of a hydrometallurgical process for rare earths extraction from a Brazilian monazite. Hydrometallurgy, 200, Article 105556. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105556
25. Sadri, F., Nazari, A. M., & Ghahreman, A. (2017). A review on the cracking, baking and leaching processes of rare earth element concentrates. Journal of Rare Earths, 35(8), 739–752. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60971-2.
26. Watts, H., & Fisher, T. (2021). Leaching the Unleachable Mineral: Rare Earth Dissolution from Monazite Ore in Condensed Phosphoric Acid. Minerals, 11(9), 931. https://doi.org/10.3390/min11090931
27. Yang, X., Rozelle, P. L., & Pisupati, S. V. (2021). The effect of caustic soda treatment to recover rare earth elements from secondary feedstocks with low concentrations. Minerals Engineering, 173, Article https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107184.

REFERENCES

1. Rezaei, M., Sanchez-Lecuona, G., & Abdolazimi, O. (2025). A cross-disciplinary review of rare earth elements: Deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. Minerals, 15(7), Article 720. https://doi.org/10.3390/min15070720
2. Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. Natural Resources Research, 27(2), 201–216. https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5
3. Kryukov, V. A., Yatsenko, V. A., & Kryukov, Ya. V. (2020). Redkozemelnaya promyshlennost...realizovat imeyushhiesya vozmozhnosti [Rare earth industry: Realizing existing opportunities]. Gornaya promyshlennost, (5), 68–84. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-68-84 [in Russian].
4. Zepf, V. (2013). Rare earth elements: What and where they are. In Rare Earth Elements (pp. 11–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8_2
5. Mancheri, N. (2012). Chinese monopoly in rare earth elements: Supply–demand and industrial applications. China Report, 48(4), 449–468. https://doi.org/10.1177/0009445512466621

6. Liang, T., Li, K., & Wang, L. (2014). State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. Environmental Monitoring and Assessment, 186(3), 1499–1513. https://doi.org/10.1007/s10661-013-3469-8
7. Patil, A. B., Paetzel, V., Struis, R. P. W. J., & Ludwig, C. (2022). Separation and recycling potential of rare earth elements from energy systems: Feed and economic viability review. Separations, 9(3), Article 56. https://doi.org/10.3390/separations9030056
8. Hayes-Labruto, L., Schillebeeckx, S. J., Workman, M., & Shah, N. (2013). Contrasting perspectives on China's rare earths policies: Reframing the debate through a stakeholder lens. Energy Policy, 63, 55–68. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.121
9. Wübbeke, J. (2013). Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. Resources Policy, 38(3), 384–394. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005
10. Han, A., Ge, J., & Lei, Y. (2015). An adjustment in regulation policies and its effects on market supply: Game analysis for China's rare earths. Resources Policy, 46, 30–42. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.07.007
11. Hu, X., Sun, B., Wang, C., Lim, M. K., Wang, P., Geng, X., Yao, C., & Chen, W.-Q. (2023). Impacts of China's exports decline in rare earth primary materials from a trade network-based perspective. Resources Policy, 81, Article 103321. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103321
12. Kooroshy, J., Tiess, G., Tukker, A., & Walton, A. (Eds.). (2015). Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options: A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON) (Ref. Ares (2015)2544417). European Commission. https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en
13. Kenzhaliev, B. K., Surkova, T. Yu., Pirmatov, E. A., Yulusov, S. B., & Esimova, D. M. (2025). Izvlechenie redkikh i redkozemelnykh elementov iz mineralnogo i tekhnogennogo syrya [Extraction of rare and rare earth elements from mineral and technogenic raw materials]. Almaty. 358 p. [in Russian].
14. Bea, F. (1996). Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths: Implications for the chemistry of crustal melts. Journal of Petrology, 37(3), 521–552. https://doi.org/10.1093/petrology/37.3.521
15. Mikhailenko, D. S., Gubanov, N. V., Podugolnikova, E. E., Korsakov, A. V., Xu, Y.-G., & Stepanov, A. S. (2022). Klyuchevye mineraly-kontsentratory redkozemelnykh elementov v eklogitakh iz kimberlitov [Key mineral concentrators of rare earth elements in eclogites from kimberlites]. Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN, 19, 217–221. https://doi.org/10.31241/FNS.2022.19.040 [in Russian].
16. Stativko, V. S., Kuznetsov, A. B., Smolenskii, V. V., Rizvanova, N. G., & Sergeeva, N. A. (2025). Geokhimicheskie osobennosti titanita i U-Pb vozrast granata iz mineralnykh kopei Yuzhnogo Urala [Geochemical features of titanite and U-Pb age of garnet from mineral mines of the Southern Urals]. Zapiski Gornogo instituta, 274(16495), 76–94. EDN TLQGYP [in Russian].
17. Garber, J. M., Hacker, B. R., Kylander-Clark, A. R. C., Stearns, M., & Seward, G. (2017). Controls on trace element uptake in metamorphic titanite: Implications for petrochronology. Journal of Petrology, 58(6), 1031–1057. https://doi.org/10.1093/petrology/egx046
18. Zirakparvar, N. A. (2022). Industrial garnet as an unconventional heavy rare earth element resource: Preliminary insights from a literature survey of worldwide garnet trace element concentrations. Ore Geology Reviews, 148, Article 105033. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105033
19. Klimpel, F., Bau, M., & Graupner, T. (2021). Potential of garnet sand as an unconventional resource of the critical high-technology metals scandium and rare earth elements. Scientific Reports, 11, Article 5306. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84614-x
20. Hönig, S., Čopjaková, R., Škoda, R., Novák, M., Dolejš, D., Leichmann, J., & Galiová, M. V. (2014). Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith, Czech Republic. American Mineralogist, 99(10), 1922–1941. https://doi.org/10.2138/am-2014-4728
21. Vlasov, K. A. (Ed.). (1964). Geokhimiya, mineralogiya i geneticheskie tipy mestorozhdenii redkikh elementov. T. 2. Mineralogiya rudnykh elementov [Geochemistry, mineralogy and genetic types of deposits of rare elements. Vol. 2. Mineralogy of ore elements]. Moscow: Nauka. 830 p. [in Russian].
22. Yushkin, N. P., Ivanov, O. K., & Popov, V. A. (1986). Vvedenie v topomineralogiyu Urala [Introduction to the topomineralogy of the Urals]. Moscow: Nauka. 294 p. [in Russian].
23. Kovalev, S. G., Timofeeva, E. A., & Pindyurina, E. O. (2009). Monatsitovaya mineralizatsiya zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [Monazite mineralization of the western slope of the Southern Urals]. Geologicheskii sbornik № 8. Informatsionnye materialy, Institut geologii Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN, 138–144 [in Russian].
24. Alves, R. C., Nascimento, M., Paulino, J. F., & Afonso, J. C. (2021). Selection of a hydrometallurgical process for rare earths extraction from a Brazilian monazite. Hydrometallurgy, 200, Article 105556. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105556
25. Sadri, F., Nazari, A. M., & Ghahreman, A. (2017). A review on the cracking, baking and leaching processes of rare earth element concentrates. Journal of Rare Earths, 35(8), 739–752. https://doi.org/10.1016/S1002-0721(17)60971-2
26. Watts, H., & Fisher, T. (2021). Leaching the unleachable mineral: Rare earth dissolution from monazite ore in condensed phosphoric acid. Minerals, 11(9), Article 931. https://doi.org/10.3390/min11090931
27. Yang, X., Rozelle, P. L., & Pisupati, S. V. (2021). The effect of caustic soda treatment to recover rare earth elements from secondary feedstocks with low concentrations. Minerals Engineering, 173, Article 107184. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107184

УРАН КЕН ОРЫНДАРЫНЫҢ ТЕХНОГЕНДІК ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ СИРЕК ЖЕР ЭЛЕМЕНТТЕРІ ӘЛЕУЕТІН МИНЕРАЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Гаухар К. Бишимбаева[1] т.ғ.д., Сауле М. Нурмакова[1] т.ғ.к., Рустем В. Шарипов[1], Карлыгаш Ж. Буленова[2], Закен А. Искаков[2], Айдана А. Мырзабекова[1], Амантай Далбанбай[1], Ербол М. Карманов[1], Магзум Ж. Садыков[1]

[1] КеАҚ «Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Satbayev University), Алматы, Қазақстан; g.bishimbayeva@satbayev.university (Г.К.Б.), s.nurmakova@satbayev.university (С.М.Н.), s.rustemv@gmail.com (Р.В.Ш.), kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б), zaken.is@mail.ru (З.А.И), a.dalbanbay@satbayev.university (А.Д) Myrzabekova.inp@gmail.com (А.А.М.), Yerposhock@gmail.com (Е.М.К), Magzumych@mail.ru (М.Ж.С.)

[2] «Жоғары технологиялар институты» ЖШС, Алматы, Қазақстан, kbulenova73@mail.ru (К.Ж.Б), zaken.is@mail.ru (З.А.И),

*Автор корреспондент: Сауле М. Нурмакова, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

сирек жер элементтері, уран кен орындары, керн үлгілері, техногендік түзілімдер, минералогиялық талдау, шлихтық байыту, монацит, сирек металды минералдану, ауыр фракция

Мақала жайында:
Алынды: 06.05.2026
Қайта қаралды: 15.06.2026
Қабылданды: 23.06.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Бұл жұмыста Қазақстандағы уран кен орнының пайдаланылған керн үлгілеріндегі сирек жер элементтеріне минералогиялық-геохимиялық зерттеу жүргізілді. Зерттеу нысаны ретінде ұңғымалардың кенді, кенасты және кенсіз интервалдарынан алынған 31 керн үлгісі қарастырылды. Зерттеу барысында шлихтық байыту, ауыр сұйықтықта бөлу, магниттік сепарация, сондай-ақ минералогиялық, иммерсиялық, тамшылы-микрохимиялық, люминесценттік және микрозондтық талдау әдістері қолданылды. Зерттелген керн негізінен сазды жыныстардан, кварцты құм қабаттарынан және сульфидті минералданудан (пирит, марказит), сондай-ақ уран минералдарынан тұратыны анықталды. Ауыр фракция құрамында сирек жер элементтерін шоғырландыра алатын минералдар — монацит, сфен (титанит) және гранат анықталды. Монацит барлық үлгілерде сирек және жеке түйірлер түрінде кездеседі, оның мөлшері, әдетте, 0,01 г-дан аспайды. Сонымен қатар тантал-ниобий тобының минералдары, шеелит және қосалқы минералдар (циркон, рутил, апатит, анатаз) анықталды. Алынған нәтижелер пайдаланылған керн материалында сирек жер элементтерінің минералдануы бар екенін көрсетеді және оны әрі қарай геохимиялық зерттеулер жүргізу үшін перспективалы объект ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSIS OF THE RARE EARTH POTENTIAL OF TECHNOGENIC WASTES FROM URANIUM DEPOSITS

Gaukhar K. Bishimbayeva[1], Saule M. Nurmakova[1], Rustem V. Sharipov[1], Karlygash Zh. Bulenova[2], Zaken A. Iskakov[2], Aidana Myrzabekova[1], Amantay Dalbanbay[1], Yerbol M. Karmanov[1], Magzum Zh. Sadykov[1]

[1] NPJSC "Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev" (Satbayev University), Almaty, Kazakhstan; g.bishimbayeva@satbayev.university (G.K.B.), s.nurmakova@satbayev.university (S.M.N.), s.rustemv@gmail.com (R.V.Sh.), Myrzabekova.inp@gmail.com (A.A.M.), a.dalbanbay@satbayev.university (A.D), Yerposhock@gmail.com (Y.M.K), Magzumych@mail.ru (M.Zh.S.)
[2] "Institute of High Technologies" LLP, Almaty, Kazakhstan, kbulenova73@mail.ru (K.Zh.B), zaken.is@mail.ru (Z.A.I),
*Author correspondent: Saule M. Nurmakova, s.nurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

KEY WORDS

rare earth elements, uranium deposits, core samples, technogenic formations, mineralogical analysis, gravity concentration (panning), monazite, rare-metal mineralization, heavy fraction

About article:
Received: 06.05.2026
Revised: 15.06.2026
Accepted: 23.06.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This study presents a mineralogical and geochemical investigation of rare earth elements (REE) in leached core samples from a uranium deposit in Kazakhstan. A total of 31 samples were collected from ore-bearing, sub-ore, and barren intervals of boreholes. The analytical workflow included gravity concentration (panning), heavy liquid separation, magnetic separation, and a combination of mineralogical, immersion, microchemical, luminescence, and electron microprobe analyses. The core material is predominantly composed of clay-rich sediments with quartz interlayers and sulfide mineralization (pyrite, marcasite), along with uranium-bearing phases. The heavy fraction contains minerals capable of hosting REE, including monazite, titanite (sphene), and garnet. Monazite, identified in all samples as sparse and isolated grains, represents the principal REE-bearing phase, although its abundance is generally low (<0.01 g). Additional associated minerals include Nb–Ta phases, scheelite, and accessory minerals such as zircon, rutile, apatite, and anatase. The results indicate the presence of REE mineralization within the leached core material and suggest its potential relevance for further geochemical assessment.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ ФЕНОЛОВ МОДИФИЦИРОВАННЫМ ОТХОДОМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Нурия Е.Айкенова[1] к.т.н., Гаусар Мурат [1], Гузель У. Абилова[2] PhD, Умбеталы К.Сарсембин[3] PhD , Ерик С. Меркибаев[3] PhD, Сауле М.Нурмакова[3] к.т.н.

[1]Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан; aikenova_nye@enu.kz (НЕА), (МГ)
[2]Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан; gabilova@zhubanov.edu.kz (ГУА),
[3]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Казахстан u.sarsembin@satbayev.university (УКС), y.merkibayev@satbayev.university (ЕСМ), snurmakova@satbayev.university (НСМ)
*Автор корреспондент: Сауле М. Нурмакова snurmakova@satbayev.university, mnurma@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

фенол, адсорбция, хромошпинелевый шлам, щелочная модификация, изотерма Ленгмюра, сточные воды

АБСТРАКТ

В работе исследована возможность использования хромошпинелевого шлама ХШП-02 (богатая фракция) Актюбинского завода ферросплавов в качестве сорбента для извлечения фенола из сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий. Проведена щелочная модификация шлама 1 М NaOH при 70 °C с последующим прокаливанием при 450 °C. Физико-химические свойства охарактеризованы методами XRF, СЭМ, ИК-спектроскопии и ТГА/ДСК. Наилучшее описание равновесия адсорбции обеспечивают модели Ленгмюра и Редлих-Петерсона (R^2 = 1,000). Максимальная адсорбционная ёмкость -36.00 мг/г; оптимальная доза 0.30 г/100 мл обеспечивает удаление 96 % фенола. $\Delta G°$ = -5.97 кДж/моль подтверждает самопроизвольный физический характер адсорбции и возможность регенерации сорбента.

По статье:
Получено: 25.06.2026
Пересмотрено: 05.09.2026
Принято: 11.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Айкенова Н.Е., Мурат Г., Абилова Г.У., Сарсембин У.К., Меркибаев Е.С., Нурмакова С.М., Очистка сточных вод промышленных предприятий от фенолов модифицированным отходом металлургического производства// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 204–217.

1. ВВЕДЕНИЕ

Нефтеперерабатывающая промышленность является одним из наиболее водоёмких секторов: современные заводы потребляют от 0,4 до 1,6 м³ пресной воды на кубический метр переработанной сырой нефти [1,2]. Сточные воды содержат эмульгированные углеводороды, аммиак, сульфиды, тяжёлые металлы и фенольные соединения, среди которых фенол выделяется как наиболее токсикологически значимый компонент [3...5]. Концентрация фенола в необработанных стоках – 50...300 мг/л, тогда как нормативы сброса составляют 0,5...1,0 мг/л [6,7]. Достижение эффективности очистки 99 % и выше требует многоступенчатых интегрированных подходов [8,9].

Фенол оказывает выраженное токсическое воздействие на водные экосистемы: острые летальные эффекты у рыб наблюдаются при 10-25 мг/л, сублетальные - при 1...5 мг/л (Panigrahy et al., 2022). ВОЗ установила ПДК фенола в питьевой воде - 0,001 мг/л. Метаболическая активация фенола до бензохинонов обусловливает его генотоксический и канцерогенный потенциал [10,11].

Существующие технологии – расширенное окисление, мембранная фильтрация, биологическая очистка – обладают существенными ограничениями при обработке больших объёмов промышленных стоков [12]. На этом фоне адсорбция с использованием сорбентов на основе промышленных отходов привлекает особое внимание: она технически проста, экономически конкурентоспособна и соответствует принципам циркулярной экономики [13,14]. Хромитовый шлам (ХШП), образующийся при производстве феррохромных сплавов, является перспективным материалом в данном контексте, однако систематические исследования его адсорбционных свойств применительно к фенолу в литературе практически отсутствуют. Цель настоящей работы-

исследование модифицированного ХШП-02 Актюбинского завода ферросплавов в качестве сорбента для удаления фенола: физико-химическая характеристика материала, сравнение моделей изотерм и оценка термодинамических параметров.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Материалы

Объектом исследования являлся ХШП-02 (богатая фракция) - хромошпинель из фильтр-кеков Актюбинского завода ферросплавов (филиал АО «ТНК «Казхром», Казахстан). По результатам предварительных испытаний трёх видов шлама наибольшую сорбционную эффективность показал ХШП-02. Для экспериментов использовалась фракция (сито Tagler слк-200 Россия) 0.063-0.25 мм. Реагенты квалификации «ч.д.а.»: NaOH, KBr, KI, $Na_2S_2O_3$, HCl, H_2O_2, фенол (C_6H_5OH).

2.2. Методы

Щелочная модификация

Исходный шлам сушили при 105 ± 5 °C до постоянной массы. Щелочную активацию проводили при Т:Ж = 1:10 в 1 М NaOH, 70 °C, 3 ч. Твёрдую фазу промывали до pH 7-8, затем прокаливали 2 ч при 450 °C (скорость нагрева 7 °C/мин). Полученный материал обозначен АМ-01.[15]

Физико-химическая характеристика

Элементный состав определяли методом XRF на спектрометре Rigaku NEX CG II (мишени Al, Mo, Cu, RX9; метод фундаментальных параметров). Морфологию поверхности изучали методом СЭМ. Функциональные группы идентифицировали ИК-спектроскопией (FTIR). Термическое поведение (PerkinElmer STA 6000 (NETZSCH STA 409 PC/PG)) исследовали методами ТГА и ДСК (25-800 °C).

Адсорбционные эксперименты

Адсорбцию изучали в статических условиях при 298 К; C_0 = 100 мг/дм³. Дозу адсорбента варьировали от 0.05 до 0.50 г (V = 100 мл). Остаточный фенол определяли методом бромирования с йодометрическим титрованием. Адсорбционную ёмкость рассчитывали: $qe = (C_0 - Ce)\cdot V/m$; степень удаления: $E = (C_0 - Ce)/C_0 \times 100\%$. Равновесие описывали моделями Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Редлиха-Петерсона (адекватность по R^2). Энергию Гиббса рассчитывали: $\Delta G° = -RT \ln KL$[16]. Каждый образец анализировали не менее чем в трех независимых измерениях (n = 3). За результат принимали среднее значение трех измерений.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный XRF-анализ элементного состава шламов

Сравнительный анализ трёх образцов хромошпинелевого шлама (ХШП-01 богатая и бедная фракции, ХШП-02 богатая фракция) методом XRF показал, что основным структурообразующим элементом во всех пробах является кислород (36.9-38.8 %), что указывает на преимущественное содержание металлов в форме оксидов и гидроксидов (Таблица 1).

Таблица 1

Элементный состав образцов ХШП по данным XRF-анализа, масс. %

Элемент	Символ	ХШП-01 (богатая фракция)	ХШП-01 (бедная фракция)	ХШП-02 (богатая фракция)
Хром	Cr	16.10	12.20	18.80
Кальций	Ca	0.47	1.22	18.10
Магний	Mg	25.50	26.70	9.50
Железо	Fe	5.94	4.61	4.87
Кремний	Si	9.98	7.89	5.62
Калий	K	0.71	2.08	1.82

Алюминий	Al	2.22	2.25	1.22
Хлор	Cl	0.15	1.18	1.00
Сера	S	0.37	0.88	0.76
Цинк	Zn	0.42	1.26	0.73
Марганец	Mn	0.58	0.50	0.43
Никель	Ni	0.16	0.11	0.13
Титан	Ti	0.07	0.02	0.03
Кислород	O	37.10	38.80	36.90

Для дальнейших исследований выбран ХШП-02 (богатая фракция). Образец отличается повышенным содержанием Ca (18.10 %), что способствует формированию поверхностной основности и усиливает кислотно-основное взаимодействие с гидроксильными группами фенола. Пониженное содержание Si (5.62 %) и Mg (9.50 %) указывает на меньшую долю силикатной матрицы, менее активной в отношении адсорбции органических соединений, что потенциально увеличивает долю доступной для сорбции поверхности. [17,18]

Морфология поверхности (СЭМ)

СЭМ-анализ (Oxford instruments,x-maxn) зафиксировал трансформацию структуры материала на каждом этапе обработки. Исходный шлам (Рис. 1) обладает плотной, малопористой структурой с крупными монолитными агрегатами, ограничивающими доступ к внутреннему объёму материала. После щелочной модификации (Рис. 2) поверхность приобретает развитую систему пор и микротрещин, частицы фрагментируются, что обеспечивает диффузию молекул фенола к активным центрам сорбента [19]. После адсорбции (Рис. 3) поровое пространство заполнено адсорбированным веществом, поверхность сглажена, что подтверждает высокую сорбционную активность модифицированного материала.

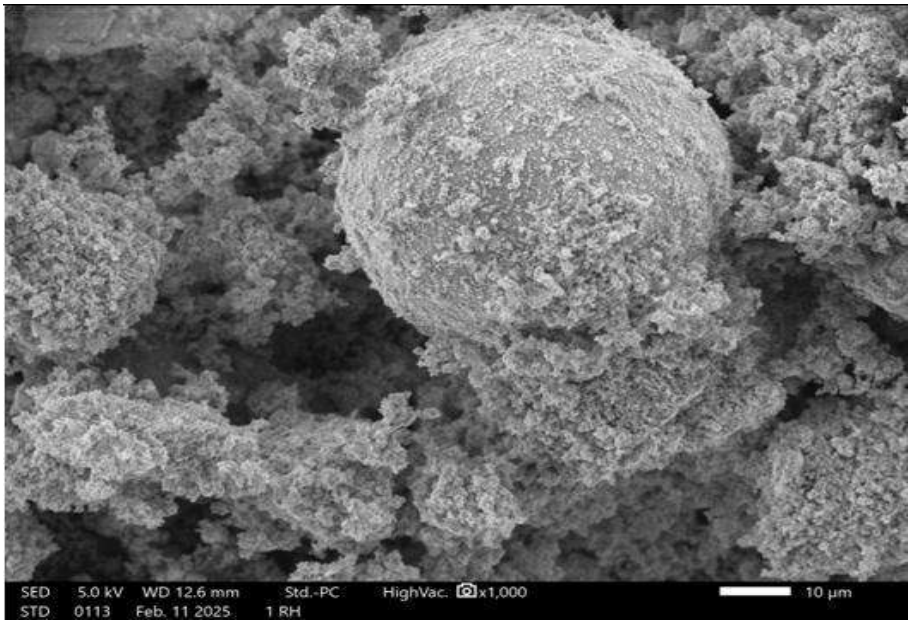


Рисунок 1. *Микрофотография поверхности исходного шлама ХШП-02. Увеличение ×1000*

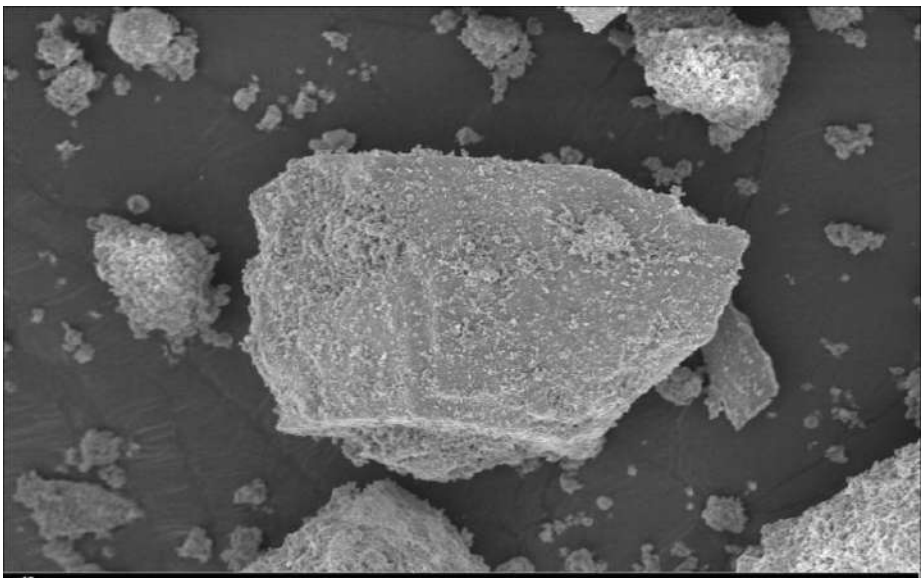


Рисунок 2. *Микрофотография поверхности шлама ХШП-02 после щелочной модификации. Увеличение ×1000*

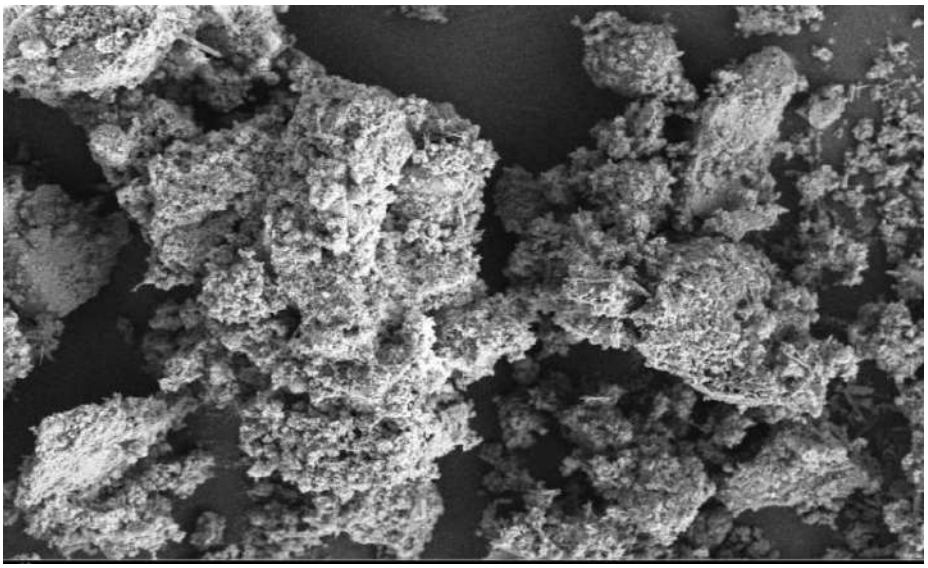


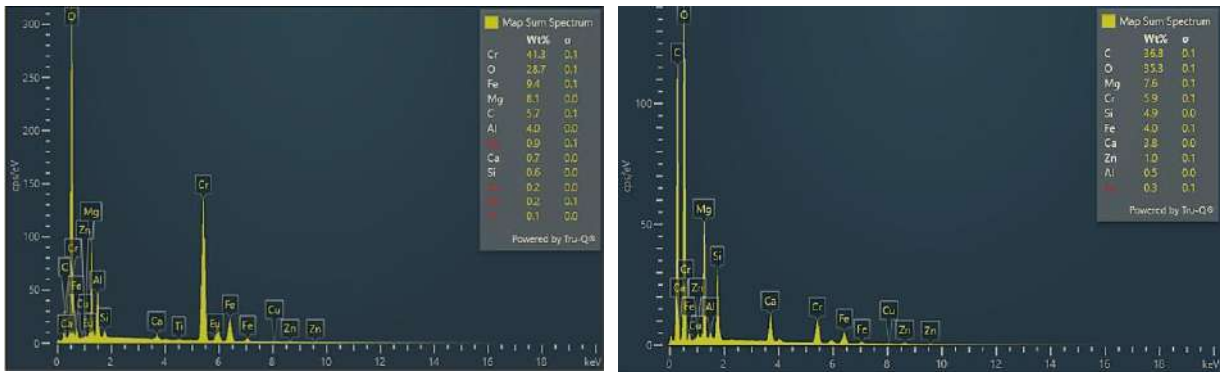
Рисунок 3. *Микрофотография поверхности модифицированного шлама после процесса адсорбции фенолов*

Увеличение ×1000

EDS-анализ поверхности

Сравнительный EDS-анализ(Oxford instruments,x-maxn) (Рис. 4) показал, что исходный сорбент характеризуется высоким содержанием неорганических компонентов: Cr -41.3 масс.%, Fe

-9.4 масс.%, Mg – 8,1 масс.%, O - 28.7 масс.%, при содержании C -5.7 масс.%. После адсорбции фенола массовая доля углерода возрастает более чем в 6 раз – до 36.8 масс.%, тогда как доля хрома снижается до 5.9 масс.% за счёт экранирования минеральной основы сорбента слоем адсорбированного органического вещества. Это прямо подтверждает закрепление молекул фенола в пористой структуре сорбента.



а) б)

Рисунок 4. *Энергодисперсионные спектры поверхности сорбента ХШП-02 (богатая фракция): а) исходный образец; б) после адсорбции фенола*

ИК-Фурье-спектроскопия

Сравнение ИК-спектров АМ-01 до и после адсорбции (Рис. 5) выявило значительное уширение и рост интенсивности полосы ν(O-H) в области 3340.71 см$^{-1}$, что свидетельствует об образовании водородных связей между гидроксильными группами фенола и поверхностью сорбента. Рост интенсивности полосы 1411.89 см$^{-1}$ (колебания ароматического кольца и деформационные колебания O–H) подтверждает присутствие ароматических фрагментов фенола. Появление новых полос при 999.13, 873.75 и 623.01 см$^{-1}$ (валентные и деформационные колебания C-O и C-H ароматического кольца) указывает на внедрение молекул фенола в структуру адсорбента[21,22]. Механизм сорбции имеет смешанный характер: физическая адсорбция за счёт π–π-взаимодействий и хемосорбция за счёт водородных связей.

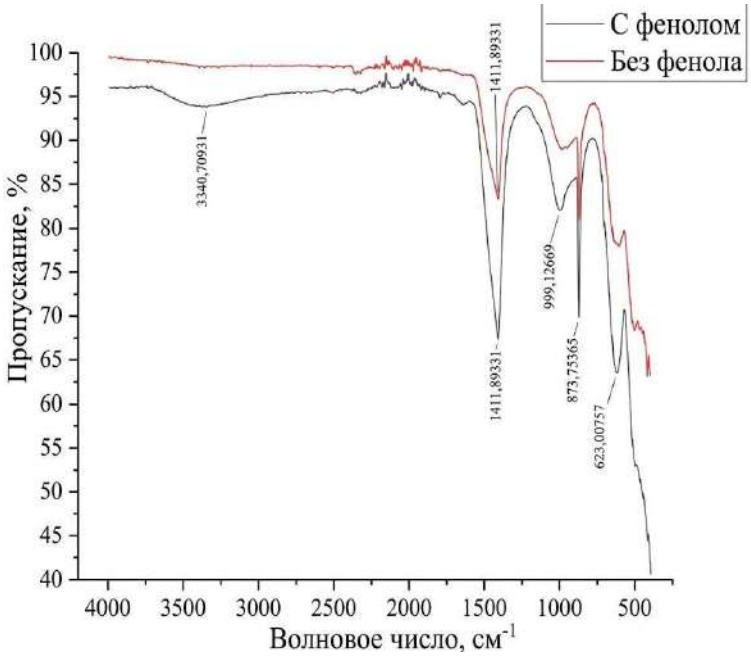


Рисунок 5. *ИК-спектры модифицированного шлама (АМ-01) до и после адсорбции фенола*

Термический анализ (ТГА/ДСК)

ТГА (PerkinElmer STA 6000 (NETZSCH STA 409 PC/PG)) исходного адсорбента (Рис. 6) показывает три стадии: до 160 °C - удаление влаги (~1.2 %); 160...600 °C - термолиз органических примесей [23]; выше 650 °C -диссоциация карбонатов (остаток 91.29 %). После адсорбции (Рис. 7) остаточная масса снижается до 87.78 % (на 3.51 %

больше потерь), что является прямым доказательством закрепления фенола в порах материала.

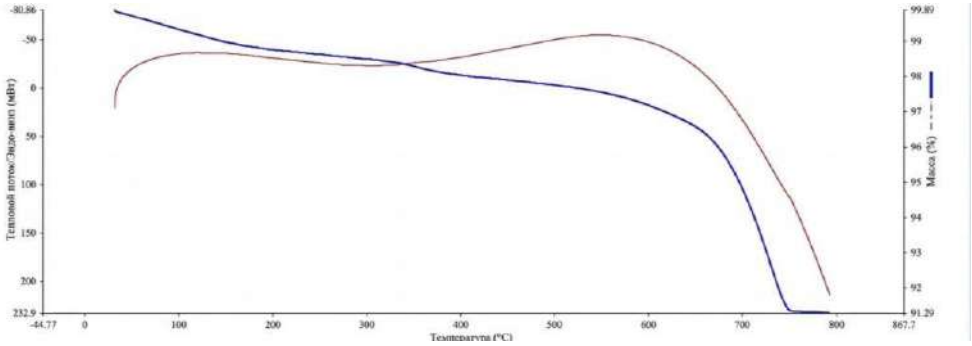


Рисунок 6. *Термический анализ адсорбента до очистки*

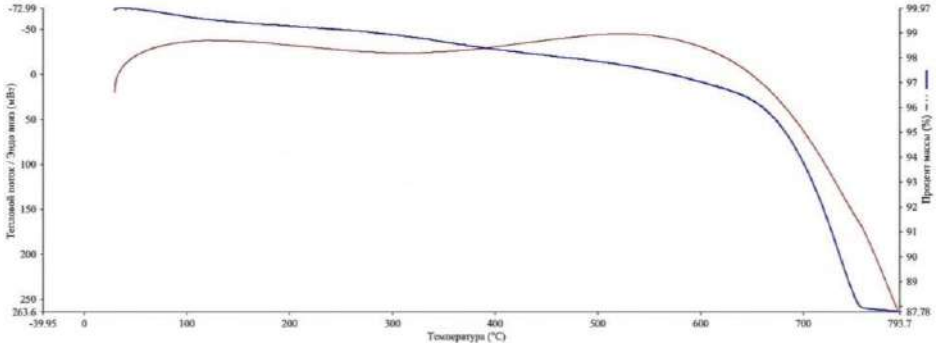
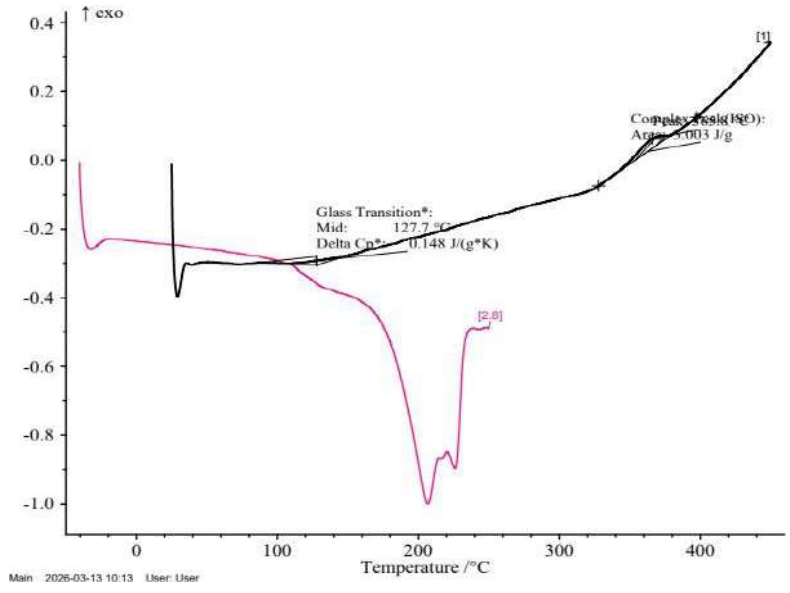


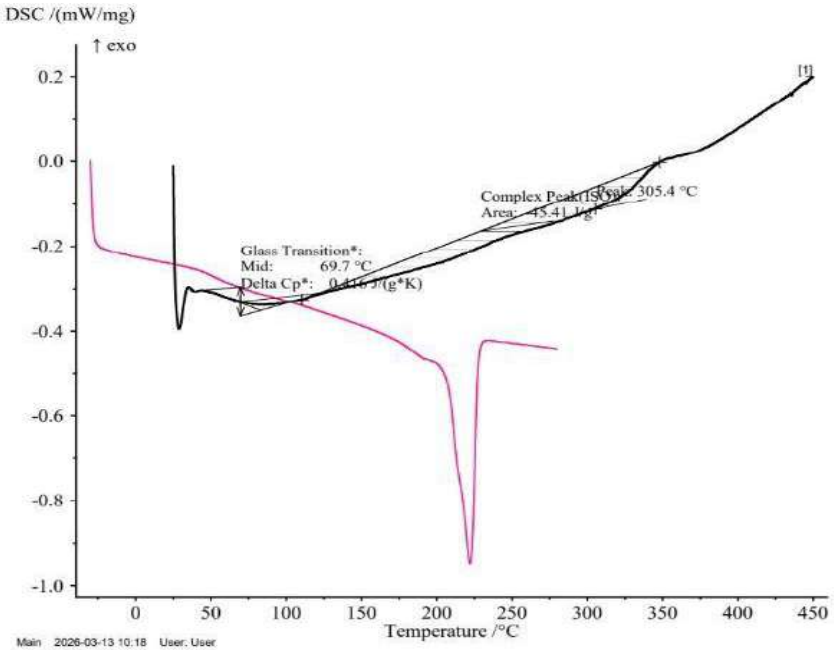
Рисунок 7. *Термический анализ адсорбента после очистки*

ДСК исходного образца (Рис. 8а) показывает стеклование при 127.7 °C (ΔCp = 0.148 Дж/г·К). После адсорбции (Рис. 8б) температура стеклования смещается до 69.7 °C при росте ΔCp до 0.416 Дж/г·К, что указывает на пластифицирующий эффект фенола; в области

305.4 °C фиксируется новый тепловой эффект (45.41 Дж/г), отсутствующий у исходного образца и соответствующий разложению адсорбированного фенольного комплекса.



а)



б)

Рисунок 8. *Термограммы ДСК исследуемого адсорбента на основе шлама-02: а) до адсорбции; б) после адсорбции*

Изотермы адсорбции

Экспериментальные данные обработаны по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Редлиха-Петерсона (Рис. 9...13, Таблица 2).

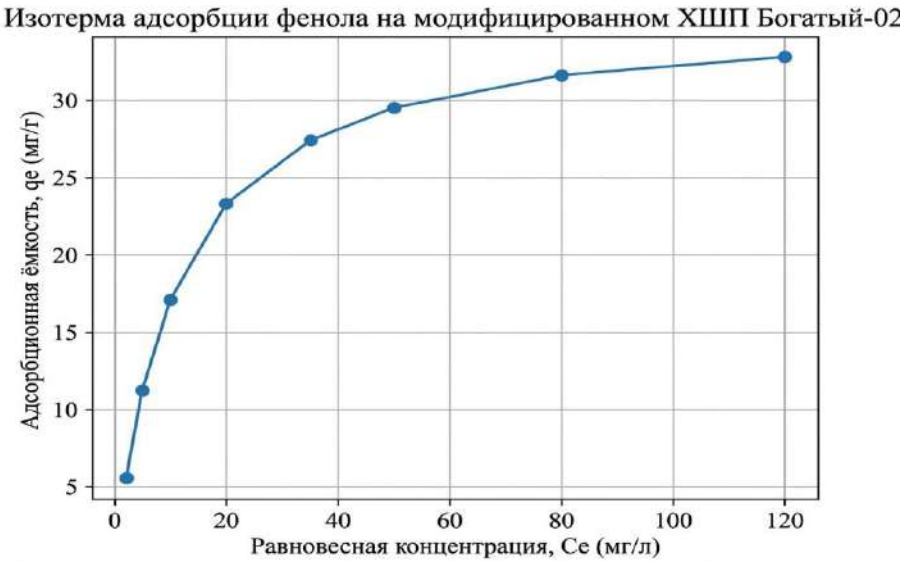


Рисунок 9. *Изотерма адсорбции фенола на модифицированном ХШП-02 (богатая фракция)*

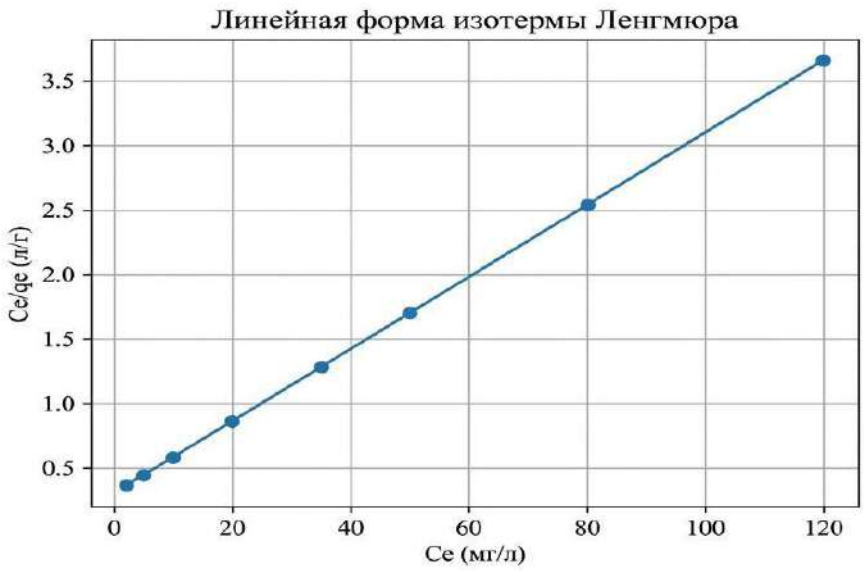


Рисунок 10. *Линеаризованный график Ленгмюра*

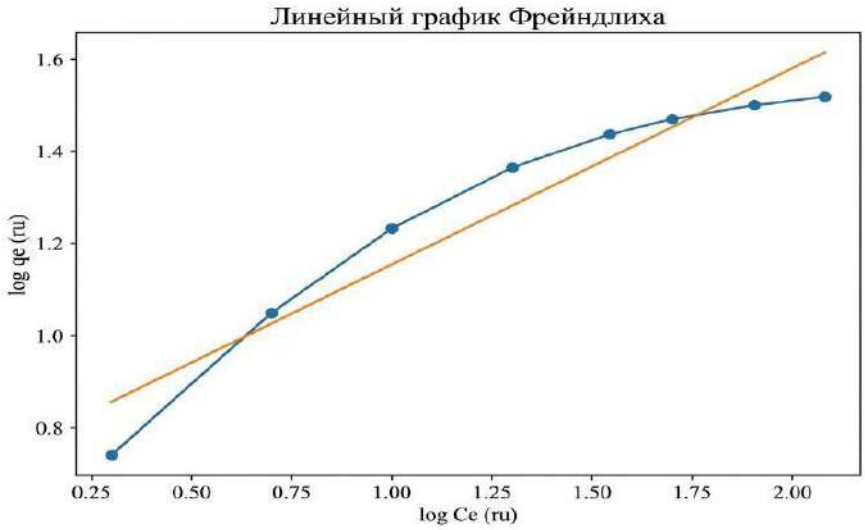


Рисунок 11. *Линеаризованный график Фрейндлиха*

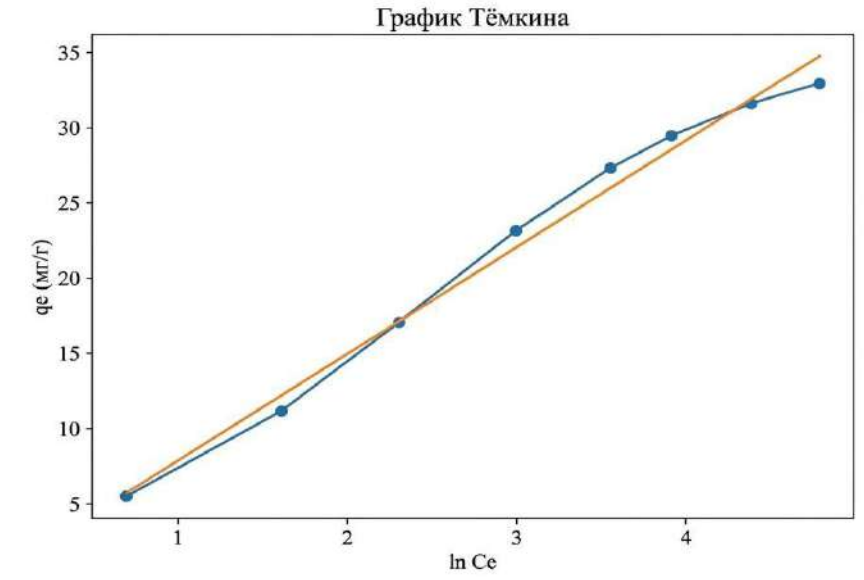


Рисунок 12. *График Темкина в координатах qe - ln Ce*

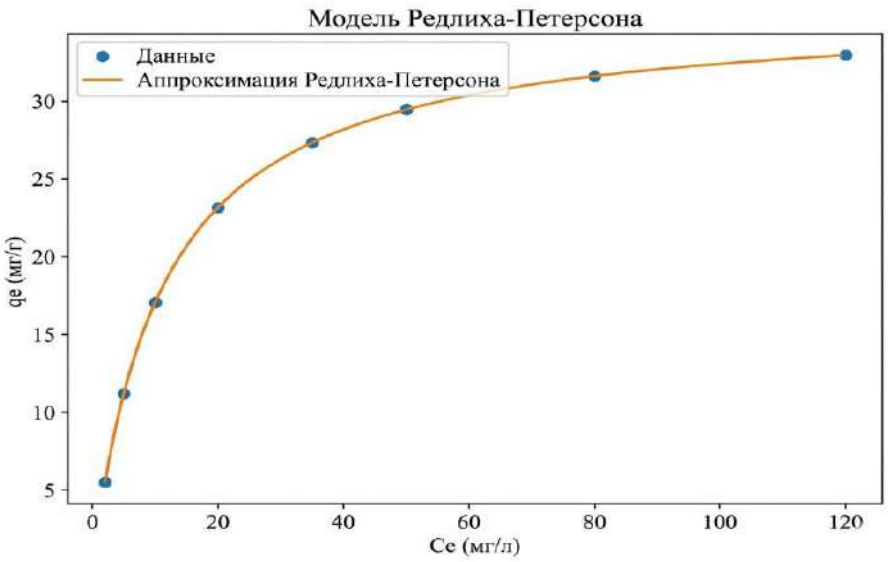


Рисунок 13. *Нелинейная аппроксимация по модели Редлиха-Петерсона*

Таблица 2

Параметры изотерм адсорбции фенола на АМ-01

Параметры модели

Модель Ленгмюра			**Модель Фрейндлиха**			**Модель Темкина**			**Модель Редлиха–Петерсона**			
KL	am	R^2	KF	n	R^2	AT	B	R^2	KR	α	β	R^2
0.09	36.00	1.000	5.34	2.345	0.922	1.118	6.589	0.988	3.240	0.09	1.000	1.000

Наилучшее описание равновесия обеспечивают модели Ленгмюра и Редлиха-Петерсона (R^2 = 1.000), что свидетельствует о монослойной адсорбции на однородной поверхности; значение β = 1.000 независимо подтверждает применимость изотермы Ленгмюра. Низкое значение константы Темкина (B = 6.589 Дж/моль) характерно для физической адсорбции.

Оптимизация дозы адсорбента (Рис. 14) показала, что при 0.05 г степень удаления фенола составляет лишь 18 % (из-за недостаточного числа активных центров), при 0.30 г резко возрастает до 96 %, а дальнейшее увеличение до 0.50 г даёт незначительный прирост (~1 %). Оптимальная доза составляет 0.30 г/100 мл.

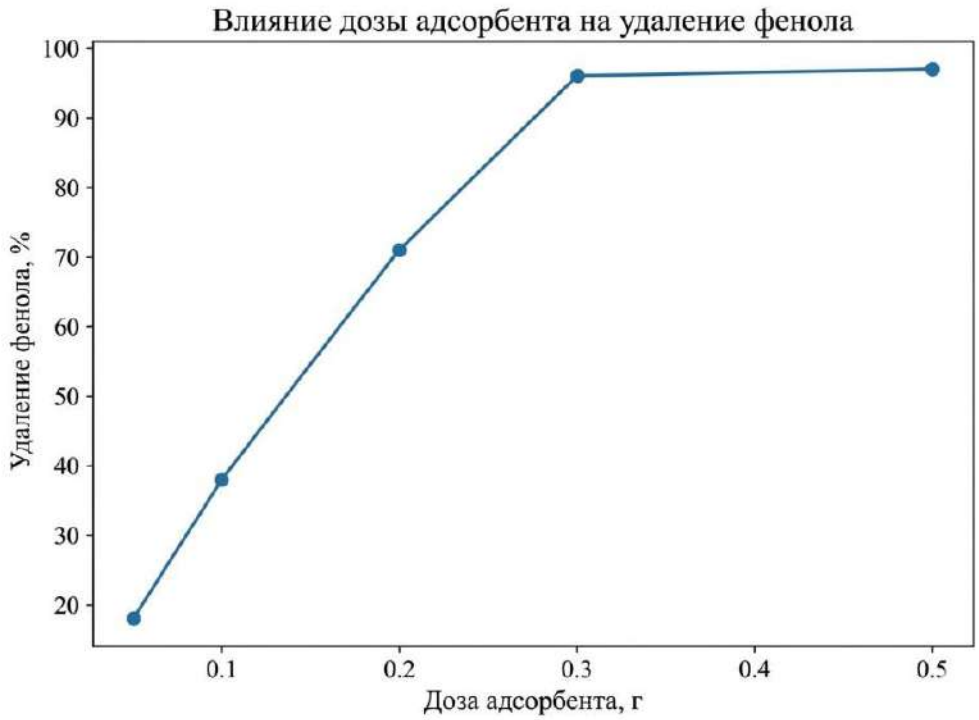


Рисунок 14. *Влияние дозы адсорбента на степень удаления фенола*

Сравнение с литературными данными по адсорбции фенола

Для оценки места разработанного адсорбента АМ-01 (модифицированный ХШП-02) среди известных сорбентов фенола проведено сопоставление максимальной адсорбционной ёмкости и эффективности удаления с опубликованными данными для сорбентов, полученных из промышленных и сельскохозяйственных отходов (Таблица 3).

Таблица 3

Сравнение сорбента АМ-01 (ХШП-02) с литературными данными по адсорбции фенола

Сорбент	**Максимальная адсорбционная ёмкость, мг/г**	**Эффективность удаления фенола, %**	**Источник**
АМ-01 (модифицированный ХШП-02, хромошпинелевый шлам, щелочная активация NaOH + прокаливание)	36.00	96 (доза 0.30 г/100 мл)	настоящая работа
Активированный уголь из скорлупы Fox nutshell, ZnCl2-активация (Kumar, Jena, 2016)	158.9	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[13]
Биоуголь из ствола масличной пальмы, паровой пиролиз (Lawal et al., 2021)	62.89	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[14]
Биоуголь из скорлупы сосновых шишек, пиролиз 550 °C (Mohammed et al., 2018)	21.2	99	[19]
Активированный уголь из нефтешлама, KOH-активация (Mojoudi et al., 2019)	434	не указана авторами отдельно от кривых дозирования	[21]

Примечание: показатели для сорбентов [13, 14, 19, 21] приведены по данным соответствующих публикаций (см. Список литературы) и получены в разных экспериментальных условиях (исходная концентрация фенола, доза адсорбента, температура), что ограничивает их прямое количественное сопоставление с настоящей работой.

Полученные результаты показывают, что адсорбционная ёмкость АМ-01 (36.00 мг/г) ниже, чем у специально активированных углеродных сорбентов (158.9...434 мг/г), но сопоставима с рядом биоуглей растительного происхождения и превышает показатели ряда сорбентов, полученных без химической активации. При этом преимуществом АМ-01 является использование многотоннажного отхода металлургического производства и относительно простая одностадийная щелочная модификация без применения дорогостоящих активирующих агентов (ZnCl2, KOH, H3PO4), что определяет экономическую привлекательность сорбента при сопоставимой эффективности удаления фенола (96%).

Термодинамика адсорбции (энергия Гиббса)

$\Delta G° = -RT \ln KL = -(8.314)(298)(-2.4079) \approx -5.97$ кДж/моль

Отрицательное значение $\Delta G°$ подтверждает самопроизвольный характер адсорбции фенола на ХШП-02 при 298 К. Величина 5.97 кДж/моль находится в диапазоне 0-20 кДж/моль, характерном для физической адсорбции, что указывает на обратимость процесса и перспективность регенерации сорбента для повторного использования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнительный анализ существующих методов очистки сточных вод от фенола (окисление, биологическая очистка, мембранные процессы) показал, что адсорбция на основе промышленных отходов обеспечивает оптимальное сочетание эффективности и технологической простоты, одновременно решая задачи очистки воды и утилизации отходов.
2. Из трёх исследованных образцов хромошпинелевого шлама для разработки сорбента выбран ХШП-02 (богатая фракция) благодаря повышенному содержанию кальция (18.10 %). Щелочная модификация дала адсорбент АМ-01: СЭМ показал формирование пористой структуры после модификации и её заполнение после адсорбции; EDS зафиксировал рост доли углерода с 5.7 до 36.8 масс.%; ИК-спектроскопия выявила полосы, характерные для ароматического кольца и фенольной ОН-группы; термический анализ показал дополнительную потерю массы (~3.5 %) и тепловой эффект при 305 °С после сорбции. В совокупности эти данные подтверждают закрепление фенола на поверхности и в порах АМ-01.
3. Оптимальная доза адсорбента составила 0.30 г/100 мл, обеспечивающая удаление около 96 % фенола из раствора.
4. Равновесие адсорбции наилучшим образом описывается моделями Ленгмюра и Редлиха–Петерсона ($R^2 = 1.000$); предельная ёмкость монослоя -36 мг/г. Энергия Гиббса $\Delta G° = -5.97$ кДж/моль свидетельствует о самопроизвольной физической адсорбции с возможностью регенерации сорбента.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения АМ-01 на стадиях доочистки стоков нефтеперерабатывающих заводов, что снижает экологическую нагрузку на водные объекты и затраты на коммерческие адсорбенты, способствуя переходу к принципам замкнутого цикла производства за счёт вовлечения промышленных отходов в повторное использование.

Формулировка и представление выводов на основе полученных результатов; сопоставление полученных результатов с уже имеющимися результатами по данной тематике; оценка практической ценности полученных результатов.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в настоящем исследовании, получены авторами в ходе экспериментальных исследований. Данные, подтверждающие результаты исследования, доступны у соответствующего автора по обоснованному запросу.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Н.Е. Айкенова, С.М. Нурмакова; управление данными – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; формальный анализ – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, Е.С. Меркибаев; методология – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, С.М. Нурмакова; надзор – Н.Е. Айкенова, С.М. Нурмакова; визуализация – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; написание первоначального варианта – Н.Е. Айкенова, Г. Мурат; написание, рецензирование и редактирование – Н.Е. Айкенова, Г.К. Абилова, У.К. Сарсембин, Е.С. Меркибаев, С.М. Нурмакова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проводились в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на 2024-2026 годы по программе № BR24992882 «Разработка новых технологий по переработке техногенных отходов с улучшением экологической обстановки в регионе»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anku W. W., Mamo M. A., Govender P. P. Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods // Phenolic Compounds — Biological Activity. – InTechOpen, 2017. – P. 419–443. – https://doi.org/10.5772/66927
2. Al-Gheethi A. A. et al. Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents // Chemosphere. – 2022. – Vol. 287. – Art. 132080. – https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080
3. Barquilha C. E. R., Braga M. C. B. Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars // Bioresource Technology Reports. – 2021. – Vol. 15. – Art. 100728. – https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728
4. Brillas E., Garcia-Segura S. Benchmarking Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton processes // Separation and Purification Technology. – 2020. – Vol. 237. – Art. 116337. – https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116337
5. Crini G., Lichtfouse E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment // Environmental Chemistry Letters. – 2018. – Vol. 17. – P. 145–155. – https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9
6. Dai Q. et al. Co-pyrolysis biochar from sewage sludge and lignin // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – Art. 107898. – https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107898
7. El-Naas M. H., Surkatti R., Al-Zuhair S. Petroleum refinery wastewater treatment: a pilot scale study // Journal of Water Process Engineering. – 2016. – Vol. 14. – P. 71–76. – https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.005
8. Grace Pavithra K. et al. A review on advancements in extraction and removal of phenols from phenolic wastewater // Environmental Research. – 2023. – Vol. 237. – Art. 117005. – https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117005
9. Ho S.-H. et al. High-efficiency removal of lead from wastewater by biochar from anaerobic digestion sludge // Bioresource Technology. – 2017. – Vol. 246. – P. 142–149. – https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.025
10. Inyang M. I. et al. A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. – 2016. – Vol. 46, No. 4. – P. 406–433. – https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880
11. Jafarinejad S. Simulation for performance and economic evaluation of activated sludge process in petroleum refinery // ChemEngineering. – 2019. – Vol. 3, No. 2. – Art. 45. – DOI: 10.3390/chemengineering3020045
12. Kim S. et al. Review of adsorption-membrane hybrid systems for water treatment // Chemosphere. – 2022. – Vol. 286. – Art. 131916. – https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131916
13. Kumar A., Jena H. M. Removal of methylene blue and phenol onto activated carbon from Fox nutshell // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 137. – P. 1246–1259. – https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.177
14. Lawal A. A. et al. Adsorption mechanism of phenol removal by biochar from oil palm frond // Environmental Pollution. – 2021. – Vol. 269. – Art. 116197. – https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116197
15. Lima É. C. et al. A critical review of thermodynamic parameters on adsorption equilibria // Journal of Molecular Liquids. – 2019. – Vol. 273. – P. 425–434. – https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048
16. Mamman S. et al. Influence of adsorption parameters on phenolic compounds removal // Desalination and Water Treatment. – 2024. – Vol. 320. – Art. 100631. – https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100631
17. Mhlongo N. L. et al. Phenolic compounds occurrence and human health risk assessment // Frontiers in Toxicology. – 2024. – Vol. 5. – Art. 1269601. – https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1269601
18. Mohamad Said K. A. et al. A review of technologies for phenol removal from wastewater // Process Safety and Environmental Protection. – 2021. – Vol. 151. – P. 257–289. – https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.015
19. Mohammed N. A. S. et al. Phenol adsorption on biochar from pine fruit shells // Journal of Environmental Management. – 2018. – Vol. 226. – P. 377–385. – https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.033
20. Mohd A. Presence of phenol in wastewater effluent and its removal // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2020. – Vol. 102, No. 6. – P. 1362–1384. – https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738412
21. Mojoudi N. et al. Phenol adsorption on microporous activated carbons from oily sludge // Scientific Reports. – 2019. – Vol. 9. – Art. 19352. – https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4
22. Muhammad S. et al. Agricultural-waste-based nano-activated carbon for wastewater treatment // Agriculture. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – Art. 1737. – https://doi.org/10.3390/agriculture12101737
23. Mukherjee A. et al. Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass // Frontiers in Materials. – 2022. – Vol. 9. – Art. 870184. – https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184

REFERENCES

1. Anku, W. W., Mamo, M. A., & Govender, P. P. (2017). Phenolic compounds in water: sources, reactivity, toxicity and treatment methods. In Phenolic Compounds — Biological Activity (pp. 419–443). InTechOpen. https://doi.org/10.5772/66927

2. Al-Gheethi, A. A., et al. (2022). Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents. Chemosphere, 287, 132080. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080
3. Barquilha, C. E. R., & Braga, M. C. B. (2021). Adsorption of organic and inorganic pollutants onto biochars. Bioresource Technology Reports, 15, 100728. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100728
4. Brillas, E., & Garcia-Segura, S. (2020). Benchmarking Fenton, photo-Fenton, electro-Fenton processes. Separation and Purification Technology, 237, 116337. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116337
5. Crini, G., & Lichtfouse, E. (2018). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. Environmental Chemistry Letters, 17, 145–155. https://doi.org/10.1007/s10311-018-0785-9
6. Dai, Q., et al. (2022). Co-pyrolysis biochar from sewage sludge and lignin. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(3), 107898. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107898
7. El-Naas, M. H., Surkatti, R., & Al-Zuhair, S. (2016). Petroleum refinery wastewater treatment: a pilot scale study. Journal of Water Process Engineering, 14, 71–76. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.10.005
8. Grace Pavithra, K., et al. (2023). A review on advancements in extraction and removal of phenols from phenolic wastewater. Environmental Research, 237, 117005. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117005
9. Ho, S.-H., et al. (2017). High-efficiency removal of lead from wastewater by biochar from anaerobic digestion sludge. Bioresource Technology, 246, 142–149. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.025
10. Inyang, M. I., et al. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 46(4), 406–433. https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880
11. Jafarinejad, S. (2019). Simulation for performance and economic evaluation of activated sludge process in petroleum refinery. ChemEngineering, 3(2), 45. DOI:10.3390/chemengineering3020045
12. Kim, S., et al. (2022). Review of adsorption-membrane hybrid systems for water treatment. Chemosphere, 286, 131916. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131916
13. Kumar, A., & Jena, H. M. (2016). Removal of methylene blue and phenol onto activated carbon from Fox nutshell. Journal of Cleaner Production, 137, 1246–1259. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.177
14. Lawal, A. A., et al. (2021). Adsorption mechanism of phenol removal by biochar from oil palm frond. Environmental Pollution, 269, 116197. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116197
15. Lima, É. C., et al. (2019). A critical review of thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Journal of Molecular Liquids, 273, 425–434. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048
16. Mamman, S., et al. (2024). Influence of adsorption parameters on phenolic compounds removal. Desalination and Water Treatment, 320, 100631. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100631
17. Mhlongo, N. L., et al. (2024). Phenolic compounds occurrence and human health risk assessment. Frontiers in Toxicology, 5, 1269601. https://doi.org/10.3389/ftox.2023.1269601
18. Mohamad Said, K. A., et al. (2021). A review of technologies for phenol removal from wastewater. Process Safety and Environmental Protection, 151, 257–289. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.015
19. Mohammed, N. A. S., et al. (2018). Phenol adsorption on biochar from pine fruit shells. Journal of Environmental Management, 226, 377–385. https://doi.org/ 10.1016/j.jenvman.2018.08.033
20. Mohd, A. (2020). Presence of phenol in wastewater effluent and its removal. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 102(6), 1362–1384. https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1738412
21. Mojoudi, N., et al. (2019). Phenol adsorption on microporous activated carbons from oily sludge. Scientific Reports, 9, 19352. https://doi.org/10.1038/s41598-019-55794-4
22. Muhammad, S., et al. (2022). Agricultural-waste-based nano-activated carbon for wastewater treatment. Agriculture, 12(10), 1737. https://doi.org/10.3390/agriculture12101737
23. Mukherjee, A., et al. (2022). Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass. Frontiers in Materials, 9, 870184. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184

МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНЕРКӘСІБІНІҢ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН ҚАЛДЫҒЫМЕН ӨНДІРІСТІК КӘСІПОРЫНДАРДЫҢ САРҚЫНДЫ СУЛАРЫН ФЕНОЛДАРДАН ТАЗАРТУ

Нурия Е.Айкенова[1] т.ғ.к., Г. Мурат [1], Гузель У. Абилова[2] PhD, Умбеталы К.Сарсембин[3] PhD, Ерик С. Меркибаев[3] PhD, Сауле М.Нурмакова[3] т.ғ.к..

[1]Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; aikenova_nye@enu.kz (НЕА), (МГ)
[2]Қ. Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Актөбе, Қазақстан; gabilova@zhubanov.edu.kz (ГУА),
[3]К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті (Satbayev University), Алматы, Қазақстан;
u.sarsembin@satbayev.university (УКС), y.merkibayev@satbayev.university (ЕСМ), snurmakova@satbayev.university (НСМ)
*Автор корреспондент: Сауле М. Нурмакова snurmakova@satbayev.university. mnurma@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

фенол, адсорбция, хром-шпинель шөгіндідер, сілтілік модификация, Лангмюр изотермасы, қалдық сулар

АБСТРАКТ

Бұл зерттеу Ақтөбе ферроқорытпа зауытынан алынған XShP-02 хромшпинелі шламының (бай бөлігі) мұнай өңдеу зауыттарының ағынынан фенолды сорбент ретінде жою әлеуетін зерттейді. Шлам 70 °C-та 1 M NaOH ерітіндісімен сілтілік модификациядан өтіп, кейін 450 °C-та кальцинацияланды. Физико-химиялық қасиеттері XRF, SEM, ИҚ спектроскопия және TGA/DSC әдістерімен сипатталды. Лангмюр және Редлих–Петерсен модельдері адсорбциялық тепе-

Мақала жайында:
Алынды: 25.06.2026
Қайта қаралды: 05.09.2026
Қабылданды: 11.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

теңдікті ең жақсы сипаттайды (R^2 = 1,000). Ең жоғары адсорбциялық сыйымдылық 36,00 мг/г; 0,30 г/100 мл оңтайлы доза фенолдың 96 %-ын жоюды қамтамасыз етеді. ΔG° = -5,97 кДж/моль адсорбцияның спонтанды физикалық сипатын және сорбентті қайта өңдеу мүмкіндігін растайды.

REMOVAL OF PHENOLS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER USING MODIFIED METALLURGICAL WASTE

Nuriya E. Aikenova Candidate of Technical Sciences, G. Murat[1], Guzel U. Abilova[2] PhD, Umbetaly K. Sarsembin[3] PhD, Yerik S. Merkibayev[3] PhD, Saule M. Nurmakova[3] Candidate of Technical Sciences

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; aikenova_nye@enu.kz (NEA), (GM)
[2]K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan; gabilova@zhubanov.edu.kz (GUA)
[3]K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University (Satbayev University), Almaty, Kazakhstan;
u.sarsembin@satbayev.university (UKS), y.merkibayev@satbayev.university (ESM), snurmakova@satbayev.university (SMN)

*Corresponding author: Saule M. Nurmakova, snurmakova@satbayev.university; mnurma@mail.ru

KEY WORDS

a phenol, adsorption, chromi-um-spinel sludge, alkaline modification, Langmuir iso-therm, waste water

About article:
Received: 25.06.2026
Revised: 05.09.2026
Accepted:11.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This study investigates the potential for using XShP-02 chromium spinel sludge (rich fraction) from the Aktobe Ferroalloy Plant as a sorbent for the removal of phenol from the effluent of oil refineries. The sludge was subjected to alkaline modification with 1 M NaOH at 70 °C, followed by calcination at 450 °C. The physicochemical properties were characterised using XRF, SEM, IR spectroscopy and TGA/DSC. The Langmuir and Redlich–Peterson models provide the best description of the adsorption equilibrium (R^2 = 1.000). The maximum adsorption capacity is 36.00 mg/g; an optimal dose of 0.30 g/100 ml ensures the removal of 96% of phenol. ΔG° = -5.97 kJ/mol confirms the spontaneous physical nature of the adsorption and the possibility of sorbent regeneration.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ТРАНСГРАНИЧНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БАССЕЙНА РЕКИ ИРТЫШ

Ержан Н. Сагатбаев[1], PhD., Тангал Т. Турсынова[1], PhD., Айман Б. Карабалаева[2], PhD.

[1] «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, sagatbaeve@mail.ru (ЕНС), tangaltt@mail.ru (ТТТ)
[2] «Astana International University», г. Астана, Казахстан, karabalayevaa@gmail.com (АБК)
*Автор корреспондент: Айман Б. Карабалаева, karabalayevaa@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Территориальное планирование, ландшафтное планирование, рациональное природопользование, бассейн реки Иртыш.

АБСТРАКТ

В статье рассматриваются возможности территориального планирования как инструмента решения трансграничных экологических проблем бассейна реки Иртыш. Исследование основано на применении бассейнового и ландшафтного подходов, позволяющих комплексно оценить состояние природных систем и определить направления рационального природопользования. Проведен анализ современного экологического состояния бассейна Иртыша на территории Казахстана с учетом природных и антропогенных факторов, оказывающих влияние на водные ресурсы. Особое внимание уделено проблемам сокращения речного стока, трансграничного водопользования, загрязнения поверхностных вод промышленными и сельскохозяйственными стоками, изменениям гидрологического режима и трансформации ихтиофауны. Представлены результаты оценки воздействия хозяйственной деятельности на речные экосистемы, рассмотрены последствия увеличения водозабора в верховьях Иртыша, а также угрозы устойчивому развитию региона. На основе проведенного анализа сформулированы рекомендации по совершенствованию территориального планирования, развитию водосберегающих технологий, внедрению экологически ориентированных методов управления водными ресурсами и укреплению международного сотрудничества в сфере рационального использования трансграничных вод. Полученные результаты могут быть использованы при разработке стратегий устойчивого развития и схем территориального планирования трансграничных речных бассейнов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Территориальное планирование является комплексным процессом, в рамках которого определяются перспективные направления развития территорий с учётом специфики их пространственной структуры. Оно предусматривает обоснование размещения и дальнейшего развития различных видов хозяйственной деятельности, а также эффективное и рациональное использование природно-ресурсного потенциала. Важную роль в данном процессе играет ландшафтное планирование, позволяющее анализировать территорию как единую систему, в которой тесно взаимодействуют природные и социально-экономические составляющие. Такой подход обеспечивает возможность всесторонней оценки текущего состояния природных комплексов и определения наиболее приемлемых способов адаптации хозяйственной деятельности к сложившейся ландшафтной структуре. В результате природопользование понимается не только как процесс освоения и эксплуатации доступных ресурсов, но и как система мер, ориентированная на их рациональное использование, сохранение, восстановление и обеспечение возможностей для дальнейшего воспроизводства.

Понятие «природопользование» вошло в научный оборот благодаря Ю. Н. Куражковскому, который предложил данный термин в 1959 году. В дальнейшем его содержание постепенно расширялось, что способствовало формированию отдельного

прикладного научного направления, рассматривающего закономерности и принципы хозяйственного взаимодействия человека с природной средой. В узком смысле под природопользованием понимается комплекс видов деятельности, связанных с извлечением компонентов природы, их последующим применением в производственных процессах, восстановлением, а также предотвращением загрязнения окружающей среды. При более широком толковании это понятие характеризует всю систему взаимоотношений между обществом и природой. Она включает социально-экономическую деятельность, предполагающую как использование природных ресурсов и условий, так и воздействие на них, преобразование, восстановление и сохранение. Основной целью подобного взаимодействия выступает обеспечение благоприятных условий для жизнедеятельности и благополучия людей. Следовательно, природопользование обладает широким практическим содержанием и в различных формах присутствует практически во всех направлениях хозяйственной деятельности человека.

Исследователи [1] рассматривают два основных типа природопользования - рациональное и нерациональное. Рациональное природопользование основывается на максимально эффективном освоении природных ресурсов при обязательном сохранении условий для их дальнейшего возобновления как за счёт естественных процессов, так и посредством целенаправленной деятельности человека. В качестве примеров такого подхода можно привести восстановление лесных массивов, переработку и повторное применение вторичного сырья, а также организацию особо охраняемых природных территорий.

Нерациональное использование природных ресурсов, в отличие от рационального подхода, сопровождается их постепенным истощением и ухудшением состояния, развитием пастбищной и рекреационной дигрессии, а также загрязнением компонентов окружающей среды. Одной из важнейших задач рационального природопользования становится предупреждение и снижение подобных негативных последствий. Соответствующие способы и технологии определяются в ходе ландшафтного планирования с учётом природной специфики конкретной территории. В процессе такой оценки выявляются основные источники антропогенного воздействия, устанавливается степень их влияния и его характер - физический, химический либо биологический. Значительное внимание при этом уделяется состоянию водной среды, поскольку водные объекты способны аккумулировать последствия различных форм хозяйственной деятельности и испытывать комплексное антропогенное воздействие.

По статье:
Получено: 03.07.2026
Пересмотрено:21.08.2026
Принято: 14.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Сагатбаев Е.Н., Турсынова Т.Т., Карабалаева А.Б., Территориальное планирование как инструмент решения трансграничных экологических проблем бассейна реки Иртыш // Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 218–229.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе был использован бассейновый принцип исследования [2], позволяющий рассматривать состояние ландшафтов всей водосборной территории через оценку экологических характеристик речной системы. В трактовке А. Г. Булавко [3] бассейн реки выступает как единая система формирования водного баланса, внутри которой выпадающие атмосферные осадки перераспределяются и переходят в различные составляющие общего водного режима.

Исследование участка бассейна Иртыша, расположенного на территории Казахстана (рис. 1), проводилось в три этапа, отражающих последовательность выполнения ландшафтно-планировочных работ. На начальной стадии, охватывавшей 2009...2011 гг., осуществлялись маршрутные полевые экспедиции по Восточно-Казахстанской области с проведением отбора проб. Собранный материал включал 176 экземпляров уклеи, для которых были изучены основные биологические показатели. Дополнительно у 5 особей исследовали морфологические характеристики фиксированного материала. Все необходимые измерения и обработка полученных показателей выполнялись в соответствии с общепринятой методикой исследования рыб, разработанной И. Ф. Правдиным [4].

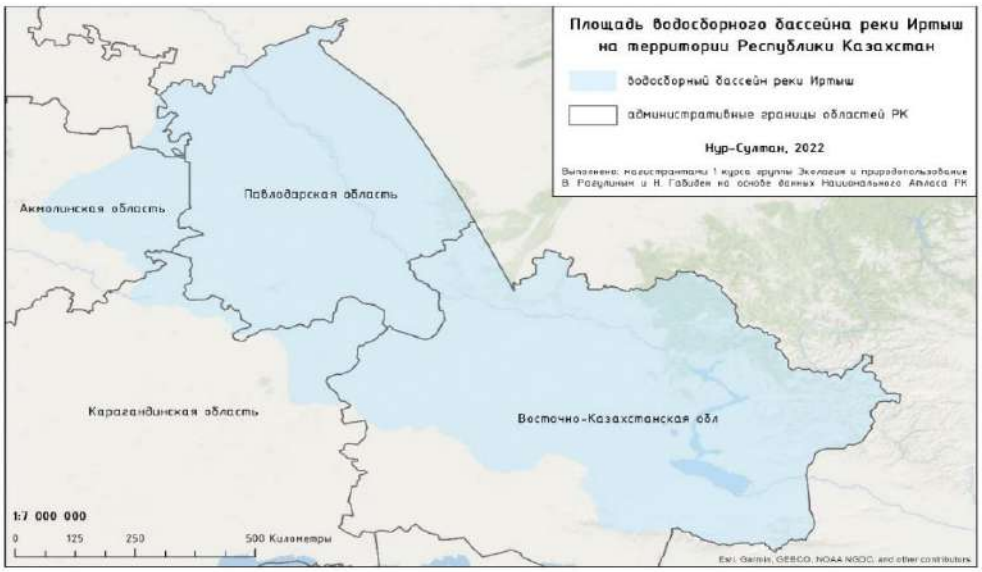


Рисунок 1. *Площадь водосборного бассейна реки Иртыш на территории РК*

На втором, оценочном этапе проводились прогнозные работы, предусмотренные программой 037 «Государственный кадастр и учет рыбных ресурсов и других водных животных». Возраст каждой исследованной особи определяли посредством анализа чешуи, после чего собранные материалы подвергались статистической обработке с использованием стандартных методических подходов [1, 3]. Чтобы исключить существенное влияние возрастной разнородности на итоговые показатели, в анализ включали только половозрелых рыб одной размерной группы с длиной тела 11...12 см. На завершающей стадии исследования основное внимание было сосредоточено на разработке практических предложений, направленных на улучшение экологического состояния экосистем Иртышского бассейна посредством применения подходов и инструментов территориального планирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среди крупнейших источников пресной воды Казахстана особое место занимают Иртыш и Или, имеющие важное значение для социально-экономического развития страны. Сток Иртыша посредством канала Иртыш–Караганда обеспечивает водоснабжение Астаны, Караганды, Семипалатинска, Павлодара, Экибастуза и Темиртау, одновременно удовлетворяя потребности аграрного сектора Центрального Казахстана. Истоки верхнего участка реки, известного как Кара-Иртыш, или Черный Иртыш, находятся на территории Китая, где формируется примерно 9,0 км³ стока ежегодно. Сегодня китайская сторона использует около 1,0…1,5 км³ воды в год, однако в перспективе данный показатель может достигнуть 4,0…5,0 км³ [5]. Рост объёмов изъятия воды может привести к заметному сокращению её притока в Бухтарминское и Шульбинское водохранилища, находящиеся ниже по течению.

Негативные изменения отмечаются также в российской части нижнего течения Иртыша, где уменьшение объёмов стока уже отражается на условиях судоходства и состоянии водных ресурсов. Существенную обеспокоенность в данном контексте вызывает интенсивное хозяйственное освоение западных территорий Китая. В СУАР функционирует канал Черный Иртыш-Карамай, посредством которого часть речного стока направляется в район разработки Карамайского нефтяного месторождения. Одновременно предусматривается дальнейшее увеличение забора воды из верховьев реки Или для расширения сельскохозяйственных угодий, преимущественно занятых зерновыми культурами и хлопком. Дальнейшее освоение региона предполагает также развитие гидротехнической инфраструктуры, включая строительство новых каналов,

водохранилищ, плотин, гидроэлектростанций и других сооружений, регулирующих использование водных ресурсов.

Подобные проекты вызывают обеспокоенность Казахстана и России из-за возможных экологических последствий. В настоящее время Китай использует около 10 % стока Черного Иртыша, при этом, согласно экспертным оценкам, за последние 30 лет общий сток реки сократился примерно в три раза. Дальнейшее увеличение водозабора может значительно ухудшить состояние экосистем и водообеспечение территорий Восточного и Центрального Казахстана.

Проблема становится особенно серьёзной с учётом возможных последствий дальнейшего сокращения стока Черного Иртыша. По прогнозам, увеличение водозабора в КНР может привести к снижению уровня озера Зайсан, отделению его от Бухтарминского водохранилища и уменьшению регулирующей ёмкости последнего. Это также способно негативно отразиться на судоходстве, состоянии водных экосистем и рыбном хозяйстве, включая сокращение объёмов вылова рыбы. Ожидаемое увеличение водопотребления Китаем в 2...3 раза может существенно изменить водохозяйственный баланс Иртыша и ограничить возможности дальнейшего развития гидроэнергетики, водного транспорта и других отраслей экономики Казахстана и России.

Краткая характеристика воздействия природопользования на состояние вод реки Иртыш

Водные ресурсы Иртыша имеют стратегическое значение для обеспечения населения, промышленного сектора и сельскохозяйственного производства. Их использование не ограничивается территорией речного бассейна: благодаря каналу имени К. Сатпаева вода поступает также в засушливые районы Центрального Казахстана. От устойчивого водоснабжения Иртыша во многом зависит развитие одного из крупнейших индустриальных районов республики, включающего Восточно-Казахстанскую, Павлодарскую и Карагандинскую области. Общая территория этих трёх регионов составляет свыше 836 тыс. км². Здесь проживает более 4 млн человек, что соответствует приблизительно одной четверти всего населения Казахстана.

Напряжённость ситуации с водными ресурсами формируется под одновременным влиянием природных процессов и хозяйственной деятельности человека. К числу наиболее существенных естественных факторов относятся аридность климатических условий, неодинаковая обеспеченность отдельных территорий водными ресурсами, а также выраженная изменчивость объёмов речного стока во внутригодовом разрезе и на протяжении многолетних периодов (рис. 2 и 3).

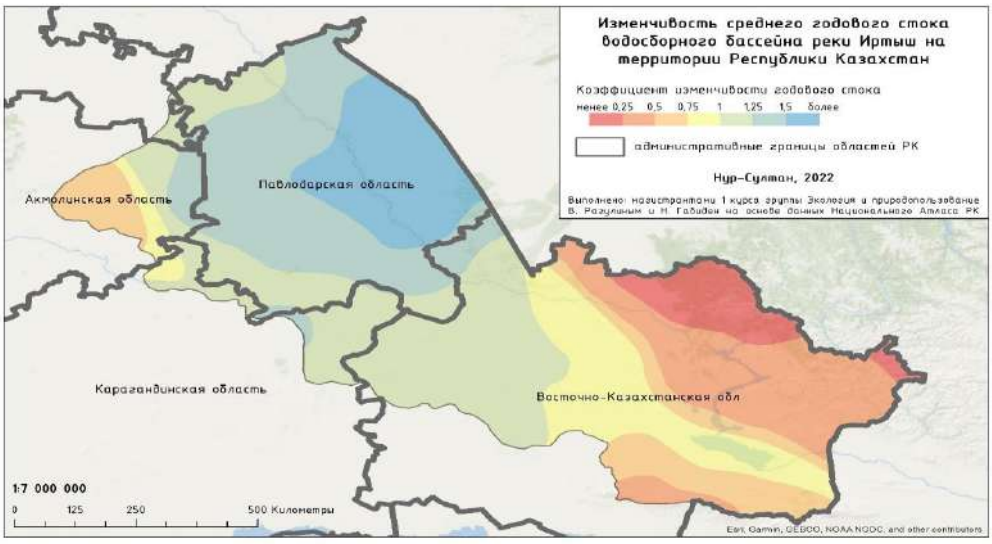


Рисунок 2. *Изменчивость ср. годового стока водосборного бассейна реки Иртыш на территории РК*

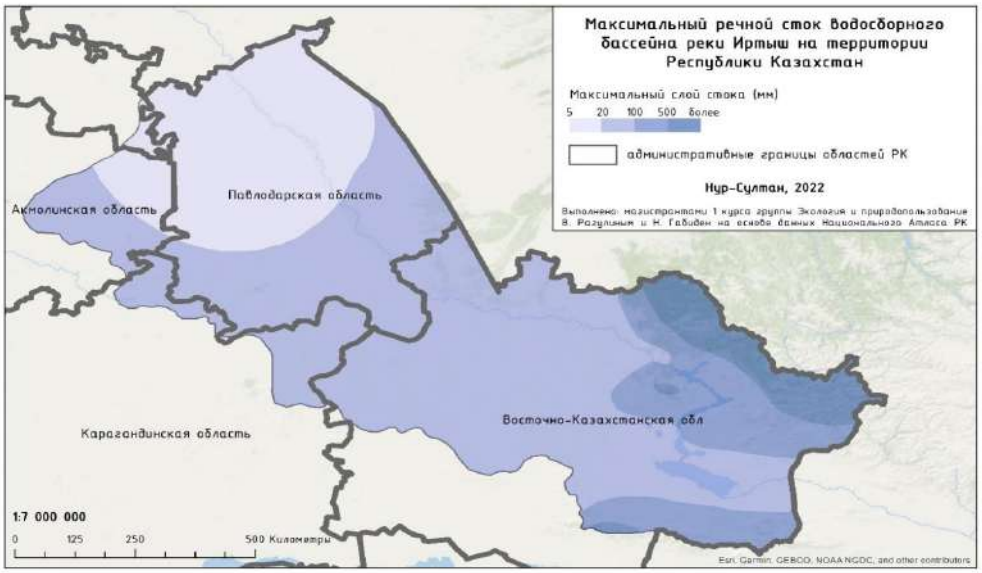


Рисунок 3. *Максимальный Речной сток водосборного бассейна реки Иртыш на территории РК*

Особенности хозяйственного водопользования создают дополнительную нагрузку на фоне естественных колебаний годового стока и его неодинакового распределения по территории. Расширение экономической деятельности ведёт к росту потребления воды и одновременно усиливает загрязнение водных объектов. Экологическое состояние Иртыша испытывает негативное воздействие из-за сброса промышленных вод, не прошедших необходимую очистку либо очищенных недостаточно и содержащих нефтепродукты, фенолы и синтетически активные соединения. В казахстанской части бассейна 53 крупных предприятия ежегодно направляют в реку порядка 260 млн м³ сточных вод. В Павлодарской области общая нагрузка на водную систему достигает примерно 30 км³ в год, превышая объём доступных водных ресурсов приблизительно на 21 %. При этом 19,0 км³/год составляют обязательные судоходные попуски в нижнее течение, 6,6 км³ приходится на сельскохозяйственное водопотребление и 4,4 км³ - на обеспечение промышленных объектов [6].

Проблемное состояние водных ресурсов Иртышского бассейна связано не только с уменьшением их доступного количества, но и с заметным снижением качества воды. Одним из факторов таких изменений выступает искусственное регулирование речного стока, нарушающее сложившийся естественный режим реки и оказывающее отрицательное воздействие на устойчивость, состояние и нормальное функционирование всей водной экосистемы.

Среди наиболее серьёзных экологических проблем бассейна Иртыша, связанных с различными направлениями природопользования, особое значение имеет ухудшение состояния воды в реке и её притоках вследствие поступления токсичных веществ от промышленных объектов. Не менее существенным фактором является изношенность систем водоснабжения в городах и сельских поселениях, которая способствует потерям водных ресурсов, подтоплению отдельных территорий и повторному загрязнению питьевой воды при повреждениях инженерных сетей. Дополнительное воздействие на речную систему оказывают недостаточно очищенные или вовсе не прошедшие очистку стоки с промышленных площадок и сельскохозяйственных территорий, а также сброс теплообменных вод, изменяющий температурный режим водоёмов. Отдельной проблемой остаётся увеличение количества стихийных свалок в окрестностях населённых пунктов. В связи с этим

оценка современного состояния речных экосистем и подготовка эффективных природоохранных решений требуют комплексного анализа характера и интенсивности воздействия основных видов природопользования на компоненты окружающей среды.

Данные экологического мониторинга [6] свидетельствуют о загрязнении речных вод фенолами, тяжёлыми металлами, нефтепродуктами и радионуклидами, концентрация которых в отдельных случаях превышает предельно допустимые значения в несколько раз. В среднем за последние пять лет ежегодное водопотребление в Казахстане составляло более 22,1 км³, при этом около 95 % приходилось на поверхностные воды (рис. 4). Распределение водных ресурсов между регионами остаётся неравномерным (рис. 5), а основным потребителем является сельское хозяйство, на долю которого приходится более 60 % общего объёма водопотребления страны (рис. 6) [5].

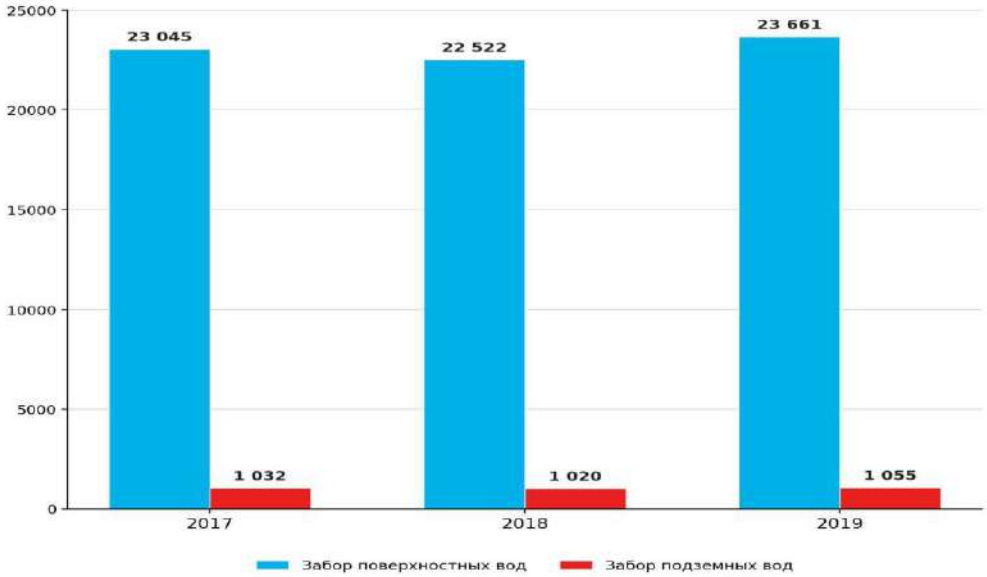


Рисунок 4. *Забор воды из поверхностных и подземных источников за 2017…2019 годы (млн м³)*

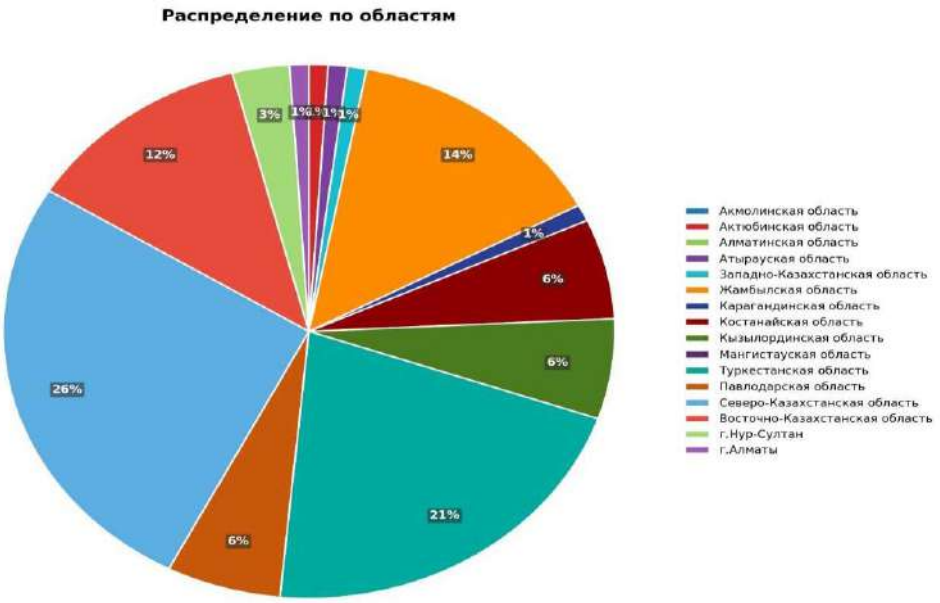


Рисунок 5. *Забор воды из поверхностных и подземных источников за 2019 год по регионам Республики Казахстан (%)*

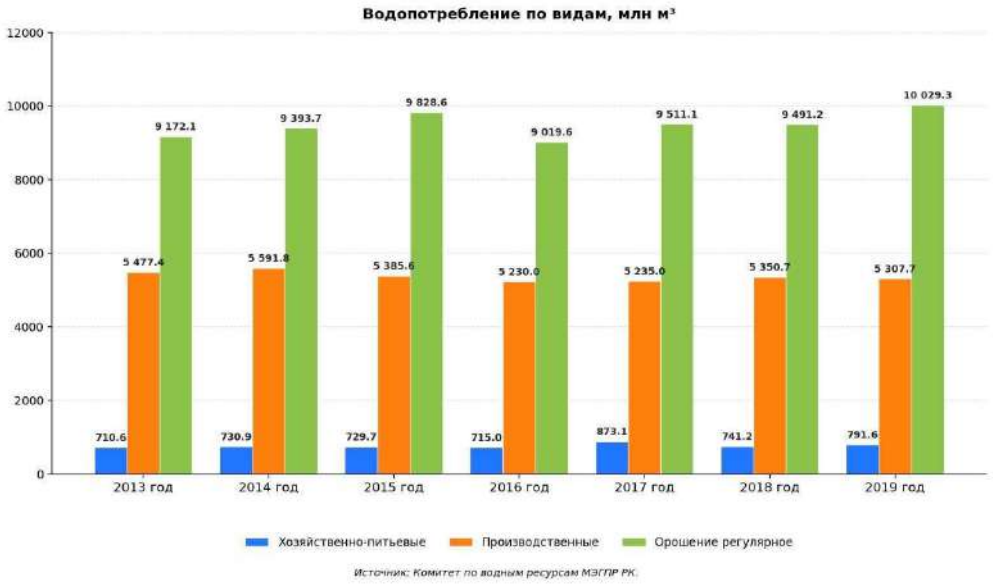


Рисунок 6. *Динамика водопотребления по отраслям экономики за 2013…2019 годы (млн м^3)*

Состояние животного мира водоёма является одним из показателей экологических проблем бассейна Иртыша. Во второй половине XX – начале XXI века антропогенное воздействие заметно изменило состав и численность ихтиофауны реки. Строительство Бухтарминского, Усть-Каменогорского и Шульбинского водохранилищ привело к утрате части нерестилищ сибирского осетра и нельмы, а также сокращению мест нереста и нагула местных видов рыб. Одновременно распространение чужеродных видов, таких как лещ и судак, способствовало снижению запасов, ранее преобладавших плотвы и щуки.

Дополнительной проблемой остаётся загрязнение вод, особенно в районе Алтая, где формируется значительная часть речного стока. По данным Казгидромета за первую половину 2016 года, среди наиболее загрязнённых притоков Иртыша выделялись Брекса, Тихая, Ульба, Красноярка и Глубочанка. Их состояние во многом связано с горнодобывающей промышленностью и загрязнением от старых отвалов. Летом 2016 года химическое загрязнение стало причиной массовой гибели рыбы. А. Убаськин [7, 8], исследовавший последствия прорыва дамбы в Риддере, отмечал попадание значительных объёмов свинца и цинка в Ульбу с возможным дальнейшим распространением загрязняющих веществ по Иртышу.

Гидробионты нижнего Иртыша испытывают значительное антропогенное воздействие, связанное прежде всего с загрязнением вод и браконьерским выловом. Дополнительное значение имеют карповые рыбы, которые могут выступать промежуточными хозяевами личинок описторхид. Описторхоз относится к наиболее распространённым паразитарным заболеваниям и представляет медицинскую, санитарную, экологическую и ветеринарную проблему [9].

В последние годы в водных экосистемах Восточного Казахстана фиксируется распространение ранее нехарактерных для региона видов. К их числу относится уклея - представитель семейства карповых, имеющий широкое распространение в водоёмах России и европейских стран. Предполагается, что в бассейн Иртыша данный вид проник именно с российской территории. Ранее на территории Казахстана уклея была известна преимущественно в дельте Волги, а также в бассейнах отдельных рек и озёр западной части страны, при этом в основных материалах по ихтиофауне Иртыша сведения о ней отсутствовали [10]. В течение 1990-х годов присутствие уклеи было зафиксировано в реках Ишим и Тобол, а уже с начала 2000-х годов она стала отмечаться в водоёмах Верхне-Иртышского бассейна, в том числе непосредственно в Иртыше и Шульбинском водохранилище.

Хотя уклея появилась в бассейне Верхнего Иртыша относительно недавно, за короткий период она стала заметным компонентом местного ихтиоценоза. Высокая экологическая приспособляемость и способность использовать разнообразные пищевые ресурсы способствуют активному расселению вида и достижению значительной численности в отдельных биотопах. На первых этапах наблюдений уклея отмечалась в исследовательских уловах лишь в единичных случаях, однако впоследствии частота её встречаемости и численность существенно возросли и стали сопоставимы с показателями таких распространённых видов, как плотва и окунь.

В 2006 году в районе затона Кобелевский доля уклеи составляла около 10-11 % при результативности 0,54 кг/сеть, а к 2009 году увеличилась до 23 % и 1,0 кг/сеть соответственно. В 2010…2011 гг. уклея уже доминировала в мелкоячейных сетях (12…20 мм), составляя 90…95 % общей численности рыб при средней результативности улова 1,86 кг/сеть.

Уклея представляет собой небольшую, активно передвигающуюся рыбу, для которой характерно преимущественно стайное поведение. Половозрелые особи обычно обитают в русловых участках реки, в то время как молодые рыбы чаще держатся в прибрежной зоне, на мелководных участках и в заливах. В водоёмах исследуемого бассейна наибольшая зафиксированная длина уклеи достигает примерно 15…16 см. Согласно имеющимся данным, продолжительность жизненного цикла этого вида относительно невелика и составляет не более шести лет.

В водах Иртыша и Шульбинского водохранилища уклея характеризуется относительно высокими темпами роста. У представителей отдельных возрастных групп ежегодное увеличение длины составляет примерно 1…2 см, что превосходит соответствующие показатели популяций, обитающих в других участках ареала данного вида [7]. Подобная интенсивность роста, вероятно, связана с благоприятными экологическими условиями водоёмов и достаточной доступностью кормовой базы.

В последние годы средние размерно-весовые показатели рыб несколько снизились: длина особей составляет около 10,8…11,0 см, а масса - 16,6…17,9 г. При этом увеличилась доля молодых рыб, хотя основу популяции по-прежнему составляют особи среднего возраста - до 60 %. Упитанность рыб остаётся достаточно высокой: коэффициент Фултона находится в пределах 1,3…1,5.

Изменения в составе ихтиофауны Среднего Иртыша могут быть связаны с нарушением популяционной структуры рыб под воздействием загрязнения водной среды. В сочетании с другими формами антропогенной нагрузки на водные биотопы данный фактор привёл к сокращению численности четырёх видов. Кроме того, шесть видов оказались под угрозой исчезновения, а два вида полностью выпали из состава ихтиоценоза исследуемого участка реки [11, 12].

Рекомендации по улучшению состояния экосистем бассейна Иртыша.

Снижение антропогенной нагрузки на экосистемы Иртыша во многом зависит от сокращения объёмов загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду в результате деятельности промышленных объектов. Для решения этой задачи необходимо совершенствовать системы очистки, ограничивать использование транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, расширять применение более экологичных видов топлива и устанавливать современные фильтрующие комплексы. В действующих «дорожных картах» предусмотрены мероприятия, направленные на перевод десяти городов из категории высокого атмосферного загрязнения в категорию среднего уровня. Реализация данного комплекса мер должна способствовать не только улучшению состояния атмосферного воздуха, но и сокращению общей антропогенной нагрузки на водные экосистемы Казахстана [1, 2].

Для повышения качества воды необходимо сократить её расход в сельском хозяйстве, в том числе за счёт выращивания культур, менее требовательных к влаге. Важную

роль также играет внедрение капельного орошения и технологий снегозадержания, особенно в районах с непродолжительным снежным периодом (рис. 7). Кроме того, следует уменьшать потери воды из-за испарения и более рационально распределять имеющиеся водные ресурсы, сохраняя их часть для восстановления экосистем бассейна.

До 2025 года в Казахстане предусматривалось строительство восьми водохранилищ для более эффективного управления водными ресурсами, а в период 2025…2030 гг. планировалось создать ещё 31 водохранилище [13]. Реализация подобных проектов требует научного обоснования и предварительной оценки их возможного влияния на окружающую среду. Особенно важно учитывать, что увеличение площади открытой водной поверхности при высоком испарении и небольшом среднегодовом стоке (рис. 8) может привести к дополнительным потерям запасов пресной воды [14, 15].

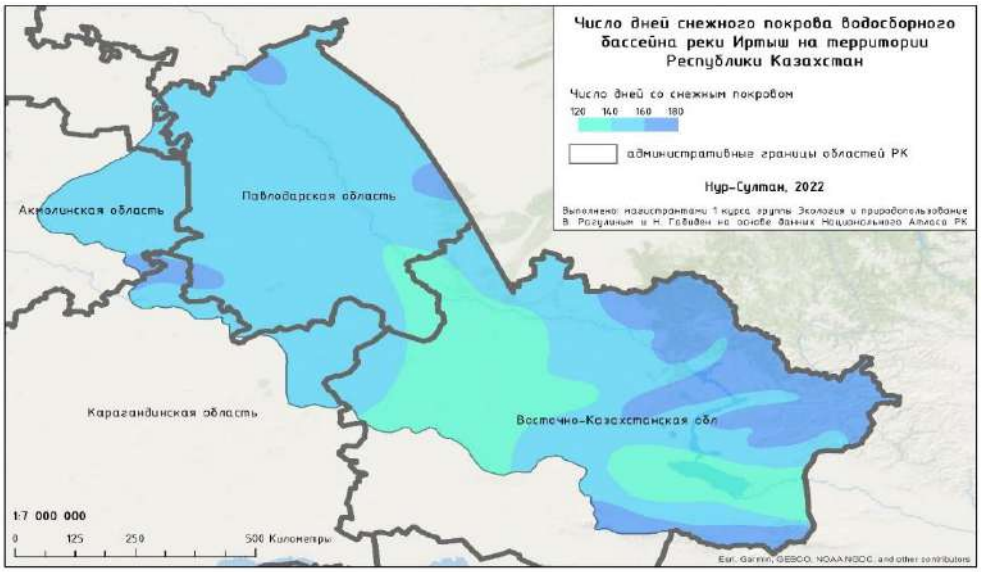


Рисунок 7. *Число дней со снежным покровом водосборного басссейна реки Иртыш на территории РК*

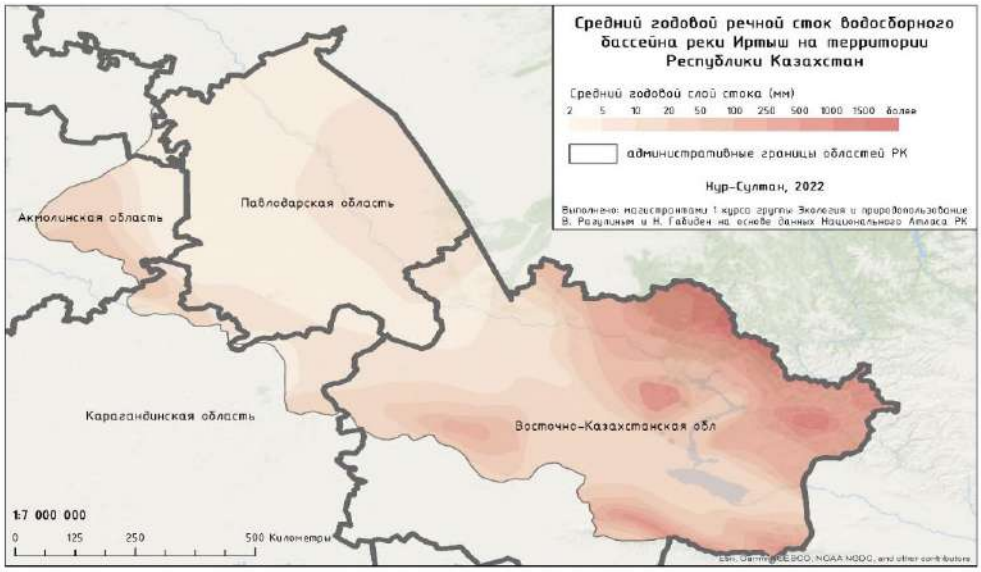


Рисунок 8. *Средний годовой речной сток водосборного бассейна реки Иртыш на территории РК*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для значительной части Казахстана характерны аридные климатические условия, невысокая продуктивность почв и растительности, а также существенный дефицит водных ресурсов. Вместе с тем территория страны располагает уникальными месторождениями полезных ископаемых, отличающимися разнообразием состава и крупными запасами. Интенсивное освоение этих минерально-сырьевых ресурсов создаёт дополнительную нагрузку на природную среду.

Планируемое Китаем увеличение забора воды из верховьев Иртыша может иметь серьёзные последствия для Казахстана. Сокращение речного стока способно нарушить водный баланс озёр Балхаш и Зайсан, ухудшить экологическую и эпидемиологическую ситуацию, а также привести к росту концентрации вредных веществ в воде. Кроме того, ожидается снижение выработки электроэнергии Иртышским каскадом ГЭС, деградация пойменных лугов и уменьшение уровня Бухтарминского водохранилища. Недостаток воды также может осложнить водоснабжение прибрежных населённых пунктов и отрицательно сказаться на урожайности сельскохозяйственных культур.

Интенсивное использование минерально-сырьевого, энергетического и сельскохозяйственного потенциала Казахстана в сочетании с расширением крупных городских и индустриальных центров, включая Карагандинскую, Жезказганскую и Балхашскую агломерации, способствует возрастанию антропогенного воздействия на бассейн Иртыша. Расширение городов и промышленных территорий неизбежно сопровождается заметной трансформацией окружающей природной среды. Под влиянием хозяйственной деятельности изменяются особенности естественного рельефа, состояние почв и растительности, а также характеристики водной и воздушной среды. Совокупность происходящих преобразований оказывает неблагоприятное влияние на устойчивость и общее экологическое состояние геосистем региона.

Территориальное планирование должно предусматривать формирование рациональной системы природопользования с учётом особенностей конкретных территорий. Схемы водопользования необходимо дополнять ландшафтными картами и мерами, направленными на сокращение испарения с поверхности водоёмов и агроландшафтов. Важным направлением водосбережения в бассейне Иртыша также является создание экологического каркаса территории. Кроме того, необходима научная основа для разработки международных соглашений по рациональному использованию водных ресурсов Иртыша на всём протяжении реки.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, полученные в ходе полевых экспедиционных исследований на реке Иртыш в пределах ВКО в 2009...2011 гг. (результаты биологического и морфологического анализа уклеи), а также материалы, собранные в рамках программы 037 «Государственный кадастр и учет рыбных ресурсов и других водных животных», не находятся в открытом доступе, но могут быть предоставлены корреспондирующим автором по обоснованному запросу. Гидрологические данные, данные экологического мониторинга качества вод и статистические сведения о водозаборе и водопотреблении по отраслям экономики и регионам РК, использованные при подготовке рисунков и анализе, получены из открытых источников: материалов РГП «Казгидромет», официальной статистики РК и опубликованных работ, приведённых в списке литературы. Картографические материалы, подготовленные авторами, также могут быть предоставлены по запросу.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – СЕН; управление данными – КАБ; формальный анализ – ТТТ; методология – СЕН; визуализация – КАБ; написание первоначального варианта – ТТТ; написание, рецензирование и редактирование – СЕН.

БЛАГОДАРНОСТЬ

При необходимости указывается информация.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

При наличии источника финансирования исследования (гранты, госбюджетные программы) указывается информация о нем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 270 с.
2. Корытный Л.М. Бассейновая концепция в природопользовании. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2001. – 163 с.
3. Булавко А.Г. Водный баланс речных водосборов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 304 с.
4. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Пищевая промышленность, 1966. – 376 с.
5. Рябцев А.Д. Обеспечение водными ресурсами Республики Казахстан [Электрон. ресурс]. – 2002. – URL: https://www.cawater-info.net/library/rus/almaty/ryabtsev.pdf (дата обращения: 25.06.2026).
6. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан [Электрон. ресурс]. – 2020. – URL: https://ecogosfond.kz/orhusskaja-konvencija/dostup-k-jekologicheskoj-informacii/jekologijaly-zha-daj/r-orsha-an-ortany-zhaj-k-ji-turaly-ltty-bajandamalar/ (дата обращения: 25.06.2026).
7. Волощенко С.М., Шестопалов Г.Г. Хозяйственная деятельность и окружающая среда. – К., 1991. – 44 с.
8. Отрада И. Почему гибнет рыба? // Наша Жизнь. – 2016. – № 28. – 14 июля [Электрон. ресурс]. – URL: https://lifepvl.kz/index.php/component/k2/1399-pochemu-gibnet-ryba (дата обращения: 25.06.2026).
9. Промоторова Е. Ю. Экология карповых рыб бассейна Нижнего Иртыша: монография. – Тамбов: Консалтинговая компания Юком, 2019. – 80 с.
10. Барлыбаева А.Б., Сарсембекова С.Е. Проблема трансграничных рек Казахстана (на примере реки Иртыш и её экологическое состояние на территории Павлодарской области) // Сатпаевские чтения. – 2005. – Т. 10. – С. 19-21.
11. Атепалихин М.С., Кассал Б.Ю., Белим С.В. Выявление взаимосвязи между биологическими видами на основе анализа ассоциативных правил // Математическое и компьютерное моделирование: сб. матер. науч. конф. – М., 2013. – С. 71-74.
12. Атепалихин М.С., Кассал Б.Ю., Белим С.В. Использование ассоциативных правил для выявления взаимосвязи мест обитания биологических видов // Вестник Омского университета. – 2014. – №2(72). – С. 125-129.
13. Прорывным курсом на основе взаимного доверия // Казахстанская правда. – 2011. – 23 февраля. – № 66-67.
14. Константинов В.М., Челидзе Ю.Б. Экологические основы природопользования. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 208 с.
15. Боженко Я. Экологические проблемы Казахстана и пути их решения [Электрон. ресурс]. – NUR.KZ, 2021. – 2 ноября. – URL: https://www.nur.kz/family/school/1666860-ekologicheskie-problemy-kazakhstana/ (дата обращения: 25.06.2026).

REFERENCES

1. Drugov, Yu.S., Rodin, A.A. (2007). Ekologicheskie analizy pri razlivakh nefti i nefteproduktov [Environmental analyses in oil and petroleum product spills]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 270 p. [in Russian].
2. Korytnyi, L.M. (2001). Basseinovaya kontseptsiya v prirodopol'zovanii [The basin concept in nature management]. Irkutsk: Izdatel'stvo Instituta geografii SO RAN, 163 p. [in Russian].
3. Bulavko, A.G. (1971). Vodnyi balans rechnykh vodosborov [Water balance of river catchments]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 304 p. [in Russian].
4. Pravdin, I.F. (1966). Rukovodstvo po izucheniyu ryb (preimushchestvenno presnovodnykh) [Guide to the study of fish (mainly freshwater)]. 4th ed. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 376 p. [in Russian].
5. Ryabtsev, A.D. (2002). Obespechenie vodnymi resursami Respubliki Kazakhstan [Provision of water resources of the Republic of Kazakhstan] URL: https://www.cawater-info.net/library/rus/almaty/ryabtsev.pdf [in Russian].
6. Natsional'nyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy i ob ispol'zovanii prirodnykh resursov Respubliki Kazakhstan [National report on the state of the environment and use of natural resources of the Republic of Kazakhstan]. (2020). URL: https://ecogosfond.kz/orhusskaja-konvencija/dostup-k-jekologicheskoj-informacii/jekologijaly-zha-daj/r-orsha-an-ortany-zhaj-k-ji-turaly-ltty-bajandamalar/ [in Russian].
7. Voloshchenko, S.M., Shestopalov, G.G. (1991). Khozyaistvennaya deyatel'nost' i okruzhayushchaya sreda [Economic activity and the environment]. Kyiv, 44 p. [in Russian].
8. Otrada, I. (2016). Pochemu gibnet ryba? [Why do fish die?]. Nasha Zhizn, no. 28, July 14. URL: https://lifepvl.kz/index.php/component/k2/1399-pochemu-gibnet-ryba. [in Russian].
9. Promotorova, E.Yu. (2019). Ekologiya karpovykh ryb basseina nizhnego Irtysha [Ecology of cyprinid fish of the lower Irtysh basin]: monograph. Tambov: Konsaltingovaya kompaniya Yukom, 80 p. [in Russian].
10. Barlybaeva, A.B., Sarsembekova, S.E. (2005). Problema transgranichnykh rek Kazakhstana (na primere reki Irtysh i ee ekologicheskoe sostoyanie na territorii Pavlodarskoi oblasti) [The problem of transboundary rivers of Kazakhstan (the case of the Irtysh River and its ecological state in the Pavlodar region)]. Satpaevskie chteniya, vol. 10, pp. 19-21 [in Russian].
11. Atepalikhin, M.S., Kassal, B.Yu., Belim, S.V. (2013). Vyyavlenie vzaimosvyazi mezhdu biologicheskimi vidami na osnove analiza assotsiativnykh pravil [Identifying the relationship between biological species based on association rule analysis]. Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie: sbornik materialov nauchnoi konferentsii. Moscow, pp. 71-74 [in Russian].
12. Atepalikhin, M.S., Kassal, B.Yu., Belim, S.V. (2014). Ispol'zovanie assotsiativnykh pravil dlya vyyavleniya vzaimosvyazi mest obitaniya biologicheskikh vidov [Using association rules to identify the relationship of habitats of biological species]. Vestnik Omskogo universiteta, no. 2(72), pp. 125-129 [in Russian].
13. Proryvnym kursom na osnove vzaimnogo doveriya [By a breakthrough course based on mutual trust]. (2011). Kazakhstanskaya pravda, February 23, no. 66-67. [in Russian].
14. Konstantinov, V.M., Chelidze, Yu.B. (2008). Ekologicheskie osnovy prirodopol'zovaniya [Ecological foundations of nature management]. Moscow: Izdatel'skii tsentr "Akademiya", 208 p. [in Russian].
15. Bozhenko, Ya. (2021). Ekologicheskie problemy Kazakhstana i puti ikh resheniya [Ecological problems of Kazakhstan and ways to solve them]. NUR.KZ, November 2. URL: https://www.nur.kz/family/school/1666860-ekologicheskie-problemy-kazakhstana/. [in Russian].

ЕРТІС ӨЗЕНІ АЛАБЫНЫҢ ШЕКАРАЛЫҚ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МӘСЕЛЕЛЕРІН ШЕШУ ҚҰРАЛЫ РЕТІНДЕ АУМАҚТЫҚ ЖОСПАРЛАУ

Ержан Н. Сагатбаев[1], PhD ., Тангал Т. Турсынова[1], PhD ., Айман Б. Карабалаева[2], PhD.

[1] «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана, Қазақстан, sagatbaeve@mail.ru (ЕНС), tangaltt@mail.ru (ТТТ)
[2]«Астана халықаралық университеті», Астана, Қазақстан, karabalayevaa@gmail.com (АБК)
*Автор корреспондент: Айман Б. Карабалаева, karabalayevaa@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Аумақтық жоспарлау, ландшафттық жоспарлау, табиғи ресурстарды тиімді пайдалану, Ертіс өзені бассейні.

Мақала жайында:
Алынды: 03.07.2026
Қайта қаралды: 21.08.2026
Қабылданды: 14.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Мақалада Ертіс өзені алабындағы трансшекаралық экологиялық мәселелерді шешудегі аумақтық жоспарлаудың рөлі қарастырылады. Зерттеу бассейндік және ландшафтық жоспарлау тәсілдеріне негізделіп, табиғи жүйелердің қазіргі экологиялық жағдайын кешенді бағалауға және табиғатты ұтымды пайдалану бағыттарын айқындауға мүмкіндік береді. Қазақстан аумағындағы Ертіс бассейнінің экологиялық жай-күйіне табиғи және антропогендік факторлардың әсері жан-жақты талданған. Су ресурстарының азаюы, трансшекаралық су пайдалану, өнеркәсіптік және ауыл шаруашылығы көздерінен болатын ластану, гидрологиялық режимнің өзгеруі және ихтиофаунаның трансформациясы негізгі экологиялық проблемалар ретінде қарастырылған. Сонымен қатар, шаруашылық қызметтің өзен экожүйелеріне тигізетін әсері бағаланып, өзеннің жоғарғы ағысындағы су алудың артуынан туындайтын қауіптер мен олардың өңірдің тұрақты дамуына ықпалы сипатталған. Зерттеу нәтижесінде аумақтық жоспарлау жүйесін жетілдіру, су үнемдеу технологияларын енгізу, табиғатты ұтымды пайдалану қағидаларын іске асыру және трансшекаралық су ресурстарын бірлесіп басқару бойынша ғылыми негізделген ұсыныстар берілген. Зерттеу қорытындылары тұрақты даму стратегияларын және аумақтық жоспарлау құжаттарын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

TERRITORIAL PLANNING AS A TOOL FOR SOLVING TRANS-BOUNDARY ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF THE IRTYSH RIVER BASIN

Erzhan N. Sagatbaev[1], PhD., Tangal T. Tursynova[1], PhD., Aiman B. Karabalaeva[2], PhD.

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, sagatbaeve@mail.ru (ENS), tangaltt@mail.ru (TTT)
[2]Astana International University, Astana, Kazakhstan, karabalayevaa@gmail.com (ABK)
*Author correspondent: Aiman B. Karabalayeva, karabalayevaa@gmail.com

KEY WORDS

Territorial planning, landscape planning, rational use of natural resources, Irtysh River basin.

About article:
Received: 03.07.2026
Revised: 21.08.2026
Accepted: 14.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

The article examines territorial planning as an effective instrument for addressing transboundary environmental challenges in the Irtysh River basin. The study is based on the basin and landscape planning approaches, which provide a comprehensive assessment of natural systems and support the development of sustainable environmental management strategies. Particular attention is paid to the current ecological condition of the Irtysh basin within Kazakhstan under the influence of both natural and anthropogenic factors. The research analyzes key environmental issues, including decreasing river discharge, transboundary water use, pollution from industrial and agricultural activities, hydrological alterations, and changes in fish biodiversity. The impacts of economic activities on river ecosystems are assessed, while the potential consequences of increasing water withdrawals in the upper reaches of the Irtysh are discussed in the context of regional environmental security and sustainable development. Based on the obtained results, the authors propose recommendations for improving territorial planning, promoting water-saving technologies, implementing environmentally sound water management practices, and strengthening international cooperation in the management of transboundary water resources. The findings may serve as a scientific basis for sustainable development policies and territorial planning strategies aimed at preserving the ecological stability of transboundary river basins.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПЕКТРАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА КОНТУРНЫХ ВАЛОКАНАВ НА СКЛОНОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА

Айнур Д. Каранеева* , Жанат З. Толеубекова к.т.н, ассоц. профессор, Забида Н. Курмангалиева , Толкын К. Қуанышбек

НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина», Астана, Казахстан; ajnurk121@gmail.com (АДК), jtoleubekova@mail.ru (ЖЗТ), zabida_98@mail.ru (ЗНК), www.tolkynj@gmail.com (ТКҚ)
*Автор-корреспондент: Каранеева Айнур, e-mail: ajnurk121@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

контурные валоканавы, БПЛА-фотограмметрия, Structure-from-Motion (SfM), цифровая модель рельефа, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), Sentinel-2, топографический индекс влажности (TWI), противоэрозионные мероприятия, эрозия почв, склоновые агроландшафты, Восточный Казахстан

АБСТРАКТ

В статье рассматривается возможность применения высокодетальных цифровых моделей рельефа и спутниковых данных для проектирования и дистанционного контроля контурных валоканав на склоновых территориях Восточного Казахстана. Морфометрическая основа исследования сформирована по данным БПЛА-съемки с использованием алгоритмов Structure-from-Motion (SfM) и построением цифровой модели рельефа с разрешением 0,1 м. Дополнительно использовались данные ALOS AW3D30 и мультиспектральные снимки Sentinel-2 Level-2A.

В ходе исследования выполнен анализ морфометрических параметров рельефа и топографических индексов, характеризующих условия увлажнения и эрозионную устойчивость склонов. Установлено, что при уклонах свыше 5° возрастает риск концентрации поверхностного стока и локальных размывов, что требует высокоточной трассировки валоканав вдоль горизонталей. Сопоставление топографического индекса влажности (TWI) с распределением растительного покрова по спутниковым данным показало взаимосвязь особенностей рельефа, условий увлажнения и состояния растительности на исследуемой территории.

Показано, что применение данных Sentinel-2 для мониторинга валоканав осложняется эффектом смешения спектрального сигнала, обусловленного несоответствием размеров валоканав пространственному разрешению спутниковых снимков. В связи с этим обоснована перспективность использования методов спектрального анализа смесей и последующего анализа спектральных особенностей почвенно-растительного покрова.

Исследование показывает возможность совместного использования высокодетальных моделей рельефа и спутниковых данных для дистанционной оценки состояния противоэрозионных сооружений в условиях Восточного Казахстана.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водная эрозия остается одной из основных причин деградации почв на склоновых землях Казахстана [1]. Особенно остро эта проблема проявляется в предгорных районах Восточного Казахстана, где сочетание расчлененного рельефа, интенсивного снеготаяния и сезонных осадков способствует формированию значительного поверхностного стока [2]. В таких условиях особое значение приобретают противоэрозионные сооружения, обеспечивающие регулирование поверхностного стока на склоновых территориях.

Одним из распространенных способов регулирования поверхностного стока на склоновых землях являются контурные валоканавы, предназначенные для задержания воды и повышения её инфильтрации в почву [3]. Эффективность подобных сооружений

МРНТИ 36.23.25 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-230-239 УДК 528.7:528.8

По статье:
Получено: 16.02.2026
Пересмотрено:25.06.2026
Принято: 25.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Каранеева А.Д., Толеубекова Ж.З., Курмангалиева З.Н., Куанышбек Т.К., Геодезическое сопровождение и перспективы спектрального мониторинга контурных валоканав на склоновых территориях Восточного Казахстана// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 230–239.

во многом зависит от учета микрорельефа и точности их размещения относительно горизонталей склона. Исследования показывают, что пространственная неоднородность микрорельефа существенно влияет на формирование поверхностного стока и перераспределение влаги [4,5]. В условиях расчлененного рельефа использование топографических материалов низкой детализации может затруднять корректную трассировку противоэрозионных сооружений.

В последние годы методы БПЛА-фотограмметрии активно применяются для мониторинга эрозионных процессов, построения цифровых моделей рельефа и анализа поверхностного стока [6,7]. Одновременно мультиспектральные снимки Sentinel-2 находят применение в задачах оценки состояния растительности, влажности почв и деградации земель [8]. В связи с этим спектральные характеристики почвенно-растительного покрова все чаще рассматриваются как источник информации для дистанционной оценки процессов влагонакопления и состояния противоэрозионных сооружений.

Несмотря на это, для условий Восточного Казахстана вопросы дистанционного контроля состояния валоканав остаются недостаточно изученными. Основная сложность связана с пространственным разрешением открытых спутниковых данных. Ширина контурных валоканав на склоновых территориях обычно составляет несколько метров, тогда как пространственное разрешение данных Sentinel-2 достигает 10 м. В результате спектральный сигнал валоканавы частично смешивается с сигналом окружающей растительности, что затрудняет выделение признаков увлажнения непосредственно вдоль сооружения. В таких условиях возникает необходимость совместного использования высокодетальных цифровых моделей рельефа и спутниковых спектральных данных для более надежной интерпретации распределения влаги и состояния противоэрозионных сооружений.

Научная проблема исследования связана с ограниченными возможностями применения существующих методов дистанционного мониторинга для оценки состояния контурных валоканав в условиях склоновых территорий Восточного Казахстана.

Цель исследования — обоснование возможности применения инженерно-геодезических методов, высокодетальных цифровых моделей рельефа и спутниковых данных при проектировании и дистанционном контроле контурных валоканав в условиях Восточного Казахстана.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

• выполнить сравнительную оценку коэффициентов поверхностного стока и рисков разрушения валоканав в различных природных зонах Казахстана;

• рассмотреть применение высокодетальных цифровых моделей рельефа для трассировки противоэрозионных сооружений на склоновых территориях;

• рассмотреть возможность дистанционной оценки условий увлажнения на основе спутниковых данных Sentinel-2 и спектральных особенностей растительного покрова.

В основе предлагаемого подхода лежит предположение о том, что различия увлажненности вдоль валоканав могут отражаться в состоянии растительного покрова и, соответственно, в его спектральных характеристиках. В дальнейшем анализ спутниковых данных может использоваться для предварительной дистанционной оценки состояния противоэрозионных сооружений в условиях Восточного Казахстана.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Техническое обеспечение и источники данных

Морфометрическую основу исследования составили данные, полученные с беспилотного комплекса DJI Matrice RTK 300 с RGB-камерой высокого разрешения. Первичная обработка снимков и построение цифровой модели рельефа выполнялись в ArcGIS Pro (Orthomapping) с использованием алгоритмов Structure-from-Motion (SfM).

Для повышения качества модели применялись фильтрация шумов и классификация плотного облака точек с выделением поверхности почвы (DTM) с разрешением 0,1 м.

В качестве региональной модели рельефа использовались данные ALOS AW3D30, применявшиеся для расчета морфометрических параметров и оценки потенциальных зон аккумуляции поверхностного стока. Для организации потоковой обработки данных в ArcGIS Pro была спроектирована файловая база геоданных (File Geodatabase). В её структуру интегрированы векторные слои гидрографии, растры ЦМР и тематические карты почв.

Для анализа почвенно-гидрологических условий были использованы топографические индексы TWI, SPI и STI, рассчитанные по данным цифровой модели рельефа. Дополнительно для оценки эрозионной расчлененности территории анализировались LS-фактор и индекс рельефа TRI. Комплексный анализ морфометрических параметров позволил выявить различия в условиях увлажнения и степени эрозионной опасности различных участков исследуемой территории (рис. 1).

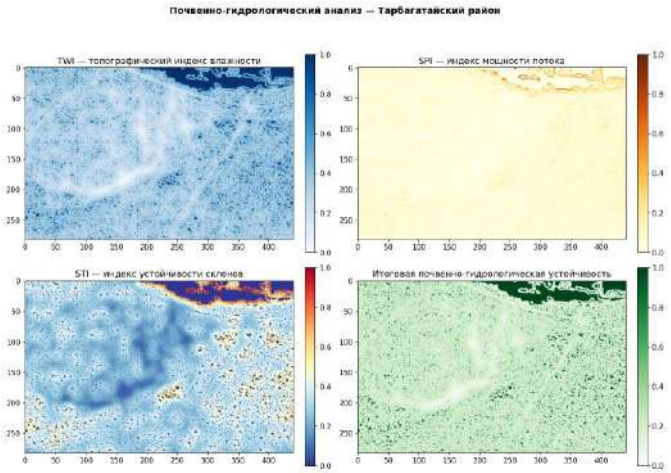


Рисунок 1. *Карты топографических индексов влажности и эрозионной устойчивости исследуемой территории*

Высокие значения TWI соответствуют участкам потенциального накопления влаги и замедленного поверхностного стока. Значения SPI отражают пространственные различия в условиях формирования поверхностного стока и потенциальной интенсивности эрозионных процессов. Комплексный анализ топографических индексов позволил выявить неоднородность почвенно-гидрологических условий на исследуемой территории.

Полученные результаты подтверждают возможность использования морфометрических параметров рельефа при предварительной оценке условий увлажнения склонов и выборе участков для размещения противоэрозионных сооружений.

Морфометрические характеристики также использовались для интерпретации спутниковых данных Sentinel-2, что позволило учитывать неоднородность увлажнения и особенности рельефа при анализе растительного покрова склоновых территорий. Для анализа использовались мультиспектральные данные Sentinel-2 Level-2A с пространственным разрешением 10 м за вегетационный период 2024…2025 гг. Спутниковые данные анализировались совместно с морфометрическими параметрами рельефа для выявления особенностей растительного покрова на различных типах склоновых участков.

2.2 Методика проектирования противоэрозионных систем

Проектирование валоканав базируется на расчете объема задержанного поверхностного стока (WB) по упрощенной инженерно-гидрологической зависимости:

$$WB = 10*P*F*\varphi \quad (1)$$

где:

•P — глубина осадков (мм) за расчетный период (ливень или период снеготаяния);

•F — площадь водосбора (га), приходящаяся на конкретный сегмент валоканавы;

•φ — коэффициент стока.

Для условий Казахстана коэффициент стока φ является одним из ключевых параметров расчета и зависит от механического состава почв и их влажности перед началом стока. В условиях интенсивного снеготаяния коэффициент поверхностного стока может существенно возрастать, что требует точного расчета емкости контурных валоканав [3].

Расстояние между контурными валоканавами определялось исходя из вертикального интервала и среднего уклона поверхности:

$$L = \frac{h_v}{i} \quad (2)$$

где hv — расчетный вертикальный интервал между (вертикальный интервал между валами), а i — средний уклон поверхности в десятичных дробях.

Учитывая протяженность склонов, точность определения уклона имеет важное значение, поскольку ошибки в оценке рельефа могут приводить к локальной концентрации поверхностного стока и снижению эффективности валоканав. Таким образом, оценка состояния валоканав требует совместного учета морфометрических параметров рельефа и дистанционных спектральных данных.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфометрический анализ Тарбагатайского района выявил значительную пространственную неоднородность ландшафта (см. таб. 1).

Таблица 1.

Сводные морфометрические показатели территории

Показатель	Минимум	Максимум	Среднее
Slope (уклон)	0,1	13,3	1,4
LS-фактор	0,1	6,4	2,6
TRI (индекс рельефа)	0,5	25,1	8,2

При уклонах свыше 5° наблюдалось увеличение LS-фактора, указывающее на повышение эрозионной опасности. Дополнительно был выполнен анализ экспозиции склонов и распределения солнечной радиации. Полученные результаты показали различия условий увлажнения между северными и южными склонами, связанные с неодинаковой инсоляцией и интенсивностью испарения (рис. 2). Это позволяет учитывать влияние экспозиции при интерпретации спектральных характеристик поверхности и анализе состояния валоканав.

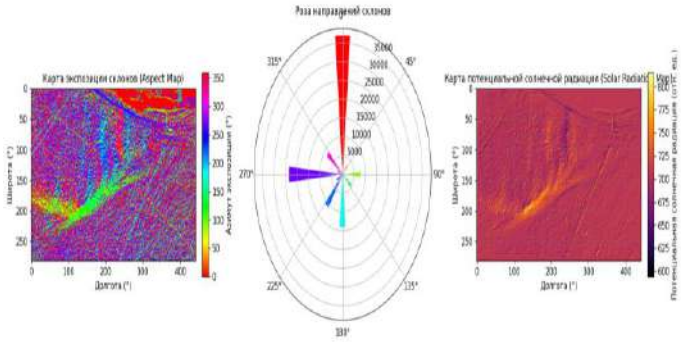


Рисунок 2. *Анализ экспозиции склонов и распределения потенциальной солнечной радиации на опытном участке Тарбагатайского района*

Высокодетальные ЦМР, построенные по материалам БПЛА-съемки, позволяют анализировать различные варианты трассировки валоканав с учетом особенностей микрорельефа и возможного перераспределения поверхностного стока. Анализ крутизны склонов опытного участка в Восточно-Казахстанской области подтвердил значительную расчлененность территории (рис. 3).

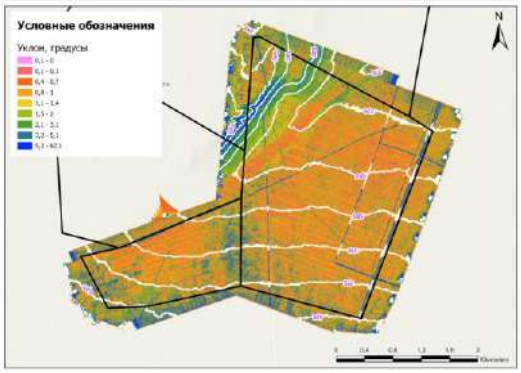


Рисунок 3. *Карта крутизны склонов (Slope Map) опытного участка в Восточно-Казахстанской, построенная на основе ЦМР по данным БПЛА- съемки.*

Большая часть площади характеризуется уклонами свыше 5…8°, что соответствует результатам статистической обработки, приведенным в таблице 1. В таких условиях возрастает риск концентрации поверхностного стока и локальных размывов, что требует особенно точного соблюдения проектного положения валоканав вдоль горизонталей.

Сравнительный анализ параметров поверхностного стока (таб. 2) указывает на более высокие значения коэффициента стока (φ) в предгорных районах Восточного Казахстана в период снеготаяния.

Таблица 2

Сравнительная инженерно-географическая оценка потенциальных рисков повреждения валоканав

Регион/ Зональность	Тип почвы (преобладающий)	Рельеф и уклоны	Коэффициент стока (ϕ) в период снеготаяния*	Риск разрушения вала при геодезической ошибке
Северный Казахстан (степная зона)	Черноземы обыкновенные	Равнинный (уклоны 1…3°)	0,65 …0,75	Средний: локальные размывы без

				разрушения системы.
Центральный Казахстан (полупустынная зона)	Светло-каштановые, солонцы	Мелкосопочник (уклоны 3…5°)	0,55 … 0,65	Средне-высокий: риск образования очаговой эрозии.
Восточный Казахстан (ВКО) (предгорная зона)	Горно-степные черноземы	Сильнорасчлененный (уклоны 5…12°)	0,80 … 0,90	Критический: риск прорыва вала и формирования оврагов.
Южный Казахстан (предгорная зона)	Сероземы	Пологие предгорья (уклоны 2 ... 4°)	0,40 ... 0,50 (ливневый)	Высокий при экстремальных ливневых осадках.

* *Диапазоны коэффициентов поверхностного стока приведены по данным СП РК 3.04-101-2012 [9] с учетом обобщенных инженерно-гидрологических оценок для различных природных зон Казахстана.*

В условиях расчлененного рельефа Восточного Казахстана точность соблюдения проектного положения валоканав имеет важное значение для равномерного распределения поверхностного стока. Одним из перспективных направлений является применение DoD-моделей, построенных по повторным БПЛА-съемкам, для контроля состояния валоканав после проведения земляных работ.

Научная новизна исследования связана с предварительным обоснованием возможности формирования региональной базы спектральных характеристик как основы для дистанционного анализа состояния противоэрозионных сооружений. В отличие от традиционных подходов, основанных на использовании контактных датчиков [10], предлагаемый подход ориентирован на интеграцию геодезических и спутниковых данных.

Также ниже представлена концептуальная схема использования мультиспектральных данных Sentinel-2 для дистанционной оценки особенностей увлажнения вдоль трасс валоканав (рис. 4).

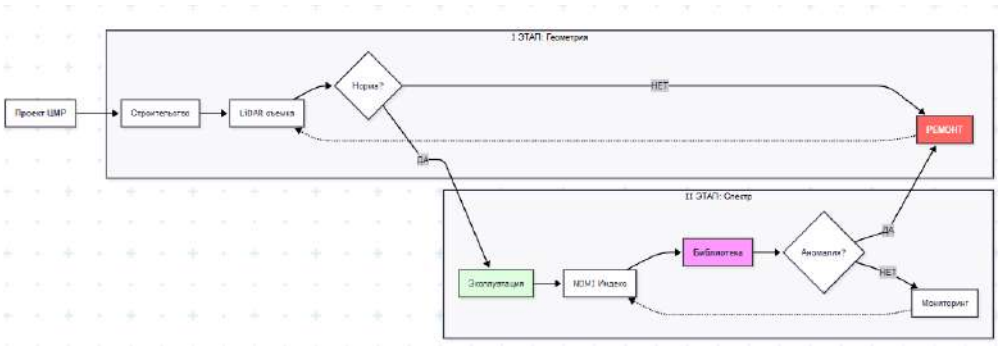


Рисунок 4. *Концептуальная схема автоматизированного геодезического контроля параметров и спектрометрического мониторинга состояния валоканав*

Шаг 1. Радиометрическая и атмосферная коррекция снимков необходима для уменьшения влияния дымки и аэрозолей, а также обеспечения сопоставимости спутниковых данных Sentinel-2 со спектральными характеристиками, формируемыми в региональной библиотеке [11].

Шаг 2. На данном этапе предполагается использование спектральных индексов, чувствительных к изменениям влажности почвенно-растительного покрова, для анализа распределения увлажнения вдоль трасс валоканав [12].

.Шаг 3. Анализ пространственной неоднородности спектрального сигнала. Предполагается, что изменение спектральных характеристик вдоль проектной линии валоканав может указывать на участки с нарушением распределения влаги или локальными изменениями состояния поверхности.

Ширина валоканав обычно составляет около 3 м, тогда как пространственное разрешение данных Sentinel-2 составляет 10 м [13]. Из-за этого спектральный сигнал валоканавы частично смешивается с сигналом окружающей растительности, что затрудняет его выделение на спутниковых снимках.

Для решения этой проблемы предполагается использовать методы спектрального анализа смесей (Spectral Mixture Analysis). Такие методы позволяют разделять смешанный спектральный сигнал на компоненты, связанные с почвой и растительностью [14].

На следующем этапе исследований планируется выделение спектральных компонентов (эндмемберов), соответствующих почве и растительности. Предполагается, что применение методов спектрального анализа смесей позволит частично уменьшить влияние фоновой растительности и повысить устойчивость выявления участков с повышенной влажностью вдоль валоканав [15].

Вместе с тем для условий склоновых ландшафтов Восточного Казахстана одного спектрального разделения может оказаться недостаточно. Растительный покров в таких условиях отличается высокой неоднородностью. На спектральный сигнал могут влиять различия увлажненности, состав растительности, особенности рельефа и типы почв, а не только состояние самих валоканав.

Поэтому на следующем этапе работы планируется рассмотреть применение элементов графовой регуляризации [16]. Такой подход учитывает, что валоканава представляет собой протяженный линейный объект, ориентированный вдоль горизонталей склона. Анализ взаимосвязанных соседних пикселей позволяет уменьшить влияние неоднородности растительного покрова и повысить устойчивость выделения участков с различной увлажненностью.

На текущем этапе работа носит преимущественно концептуальный характер. Основная цель заключается в предварительном обосновании возможности создания региональной спектральной библиотеки для задач дистанционного мониторинга противоэрозионных сооружений. Практическая реализация алгоритма, подбор параметров модели и экспериментальная проверка применимости данных Sentinel-2 планируются на следующих этапах исследования по мере накопления полевых и дистанционных материалов.

Использование спектральных библиотек и данных Sentinel-2 в перспективе может позволить оценивать особенности влагонакопления вдоль валоканав без большого количества наземных измерений. При этом предлагаемый подход требует дальнейшей экспериментальной проверки для условий Восточного Казахстана, включая оценку влияния пространственного разрешения спутниковых данных и неоднородности растительного покрова.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования показано, что использование высокодетальных цифровых моделей рельефа, полученных по данным БПЛА-съемки, позволяет учитывать особенности микрорельефа при проектировании контурных валоканав на склоновых территориях Восточного Казахстана. Морфометрический анализ подтвердил выраженную неоднородность рельефа и необходимость точной трассировки противоэрозионных сооружений вдоль горизонталей для предотвращения концентрации поверхностного стока и локальных размывов.

Анализ топографических индексов показал, что участки с повышенными значениями TWI соответствуют зонам накопления влаги, тогда как высокие значения SPI характерны для более крутых склонов с усиленными эрозионными процессами. Полученные результаты подтверждают возможность использования морфометрических параметров рельефа при предварительной оценке условий увлажнения и анализе потенциально эрозионно-опасных участков.

Сопоставление морфометрических параметров рельефа с данными дистанционного зондирования показало возможность использования спутниковых данных при анализе условий функционирования валоканав. Установлено, что пространственное разрешение Sentinel-2 приводит к смешению спектрального сигнала валоканав и окружающего растительного покрова, что ограничивает возможности прямого дистанционного мониторинга подобных объектов.

На текущем этапе исследование носит преимущественно концептуальный характер. Полученные результаты показывают перспективность дальнейшего изучения возможностей совместного использования геодезических и спутниковых данных для дистанционного мониторинга противоэрозионных сооружений в условиях Восточного Казахстана.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, полученные в ходе исследования, доступны по запросу у автора-корреспондента.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АДК, ЖЗТ; управление данными – АКД, ЖЗТ; формальный анализ – АДК, ЗНК, ТКҚ; методология – АКД, ЖЗТ; программное обеспечение – АКД, ЖЗТ, ; отслеживание - ЖЗТ; визуализация – АКД, ЖЗТ, ЗНК, ТКҚ; написание исходного проекта - ЖЗТ; написание и редактирование обзора – ЖЗТ, ЗНК, АДК, ТКҚ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства сельского хозяйства Республики Казахстан в рамках бюджетной программы 1-25/ГФ26 - ИРН AP26100353 «Цифровая трансформация противоэрозионных практик: от анализа данных к реализации решений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шынбергенов Е.А., Сиханова Н.С. Методические проблемы определения смыва почв в Казахстане // Вестник КазНУ. Серия географическая и экологическая. – 2024. – Т. 73. – № 2. – С. 45–56. – URL: https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/1391
2. Кужинов М., Абдрахманов А., Сарсенова Г. Влияние экспозиции склонов на проявление эрозионных процессов // Вестник Костанайского регионального университета. – 2022. – № 3. – С. 112–119. – URL: https://ojs.ksu.edu.kz/index.php/3i/article/view/397
3. Айкешев Б.М., Айнакулов Ж.Ж., Нурышев М.Ж. Роль валоканав в сельском хозяйстве: мелиорация, борьба с эрозией и сохранение влаги // Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета им. С. Сейфуллина. – 2025. – № 1(124). – С. 13–26. https://doi.org/10.51452/kazatu.2025.1(124).1807
4. Appels W.M., Bogaart P.W., van der Zee S.E.A.T.M. Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity // Advances in Water Resources. – 2011. – Vol. 34. – No. 2. – P. 303–313. – https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.003
5. Liang X., Feng J., Ye Z. et al. The effect of soil surface mounds and depressions on runoff // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – No. 1. – 175. – DOI: https://doi.org/10.3390/su15010175
6. Li P., Li D., Hu J. et al. Improving the application of UAV-LiDAR for erosion monitoring through accounting for uncertainty in DEM of difference // CATENA. – 2024. – Vol. 234. – 107534. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107534
7. Medeiros B.M., Cândido B., Jimenez P.A.J. et al. UAV-Based Soil Water Erosion Monitoring: Current Status and Trends // Drones. – 2025. – Vol. 9. – No. 4. – 305. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107534
8. Varghese D., Radulović M., Stojković S., Crnojević V. Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing the drought // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13. – No. 17. – 3355. – DOI: https://doi.org/10.3390/rs13173355
9. СП РК 3.04-101-2012. Гидротехнические сооружения: основные положения. – Астана, 2012.
10. Hardie M. Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – No. 23. – 6934. – DOI: https://doi.org/10.3390/s20236934
11. Louis J., Debaecker V., Pflug B. et al. Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users // Proceedings of the Living Planet Symposium 2016. – 2016. – URL: http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-740/SP-740_toc.pdf
12. Gao B.-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – No. 3. – P. 257–266. – DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3
13. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 mission overview. – URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (accessed: 18.05.2026).

14. Keshava N., Mustard J.F. Spectral unmixing // IEEE Signal Processing Magazine. – 2002. – Vol. 19. – No. 1. – P. 44–57. – DOI: https://doi.org/10.1109/79.974727
15. Ochoa F., Brodrick P.G., Okin G.S. et al. Soil and vegetation cover estimation for global imaging spectroscopy using spectral mixture analysis // Remote Sensing of Environment. – 2025. – Vol. 324. – 114746. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114746
16. Li Z., Chen J., Rahardja S. Graph construction for hyperspectral data unmixing // Hyperspectral Imaging in Agriculture, Food and Environment. – IntechOpen, 2018. – DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.73158

REFERENCES

1. Shynbergenov, E. A., Sikhanova, N. S., (2024). Metodicheskie problemy opredeleniya smyva pochv v Kazakhstane [Methodological problems of soil erosion assessment in Kazakhstan]. *Journal of Geography and Environmental Management*, *73*(2), 45-56. URL: https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/1391
2. Kuzhinov M., Abdrakhmanov A., Sarsenova G. (2022) .Influence of slope exposure on erosion processes // Bulletin of Kostanay Regional University. — No. 3. – P. 112–119. – URL: https://ojs.ksu.edu.kz/index.php/3i/article/view/397
3. Aikeshev B.M., Ainakulov Zh.Zh., & Nuryshev M.Zh. (2025) The role of contour trenches in agriculture: land reclamation, erosion control and moisture conservation // Bulletin of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University. – No. 1(124). – P. 13–26. DOI: https://doi.org/10.51452/kazatu.2025.1(124).1807
4. Appels W.M., Bogaart P.W., van der Zee S.E.A.T.M. (2011) Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity // Advances in Water Resources. Vol. 34 (2) 303-313. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.12.003
5. Liang X., Feng J., Ye Z. et al. (2023) The effect of soil surface mounds and depressions on runoff // Sustainability. 15(1) 175. DOI: https://doi.org/10.3390/su15010175
6. Li P., Li D., Hu J. et al. (2024) Improving the application of UAV-LiDAR for erosion monitoring through accounting for uncertainty in DEM of difference // CATENA.234. 107534. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107534
7. Medeiros B.M., Cândido B., Jimenez P.A.J. et al (2025). UAV-Based Soil Water Erosion Monitoring: Current Status and Trends // Drones. 9(4), 305. DOI: https://doi.org/10.3390/drones9040305
8. Varghese D., Radulović M., Stojković S., & Crnojević V. ((2021) Reviewing the potential of Sentinel-2 in assessing drought // Remote Sensing. 13 (17). 3355. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13173355
9. SP RK 3.04-101-2012. Hydraulic structures: General provisions. – Astana, 2012.
10. Hardie M. (2020) Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture // Sensors. 20 (23). – 6934. DOI: https://doi.org/10.3390/s20236934
11. Louis J., Debaecker V., Pflug B. et al. (2016) Sentinel-2 Sen2Cor: L2A processor for users // Proceedings of the Living Planet Symposium 2016. URL: http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/SP-740/SP-740_toc.pdf
12. Gao B.-C. (1996) NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 58 (3). 257–266. DOI: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3
13. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 mission overview. – URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (accessed: 18.05.2026).
14. Keshava N., & Mustard J.F. (2002) Spectral unmixing // IEEE Signal Processing Magazine. 19 (1). 44–57. DOI: https://doi.org/10.1109/79.974727
15. Ochoa F., Brodrick P.G., Okin G.S. et al. (2025) Soil and vegetation cover estimation for global imaging spectroscopy using spectral mixture analysis // Remote Sensing of Environment. 324. 114746. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114746
16. Li Z., Chen J., & Rahardja S. (2018) Graph construction for hyperspectral data unmixing // Hyperspectral Imaging in Agriculture, Food and Environment. – IntechOpen. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.73158

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАННЫҢ БЕТКЕЙЛІ АУМАҚТАРЫНДАҒЫ КОНТУРЛЫҚ ВАЛ-АРЫҚТАРДЫ ГЕОДЕЗИЯЛЫҚ СҮЙЕМЕЛДЕУ ЖӘНЕ СПЕКТРАЛДЫ МОНИТОРИНГТІҢ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Айнұр Д. Каранеева*, Жанат З. Төлеубекова т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Забида Н. Құрманғалиева, Толқын К. Қуанышбек

«Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан;
ajnurk121@gmail.com (АДК), jtoleubekova@mail.ru (ЖЗТ), zabida_98@mail.ru (ЗНК), www.tolkynj@gmail.com (ТКҚ)
Корреспондент-автор: Каранеева Айнұр, e-mail: ajnurk121@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Контурлық вал-арықтар, ұшқышсыз ұшу аппараты (БПЛА) фотограмметриясы, Structure-from-Motion (SfM), цифрлық жер бедері моделі, Жерді қашықтықтан зондтау (ЖҚЗ), Sentinel-2, ылғалдылықтың топо-

АБСТРАКТ

Мақалада Шығыс Қазақстанның беткейлі аумақтарындағы контурлық вал-арықтарды жобалау және қашықтықтан бақылау үшін жоғары дәлдіктегі цифрлық жер бедері модельдері мен спутниктік деректерді қолдану мүмкіндігі қарастырылады. Зерттеудің морфометриялық негізі БПЛА-түсірілім деректері бойынша Structure-from-Motion (SfM) алгоритмдерін пайдалану арқылы және кеңістіктік ажыратымдылығы 0,1 м болатын цифрлық жер бедері моделін құру негізінде қалыптастырылды. Қосымша түрде ALOS AW3D30 деректері мен Sentinel-2 Level-2A мультиспектралды суреттері пайдаланылды.

Зерттеу барысында ылғалдану жағдайлары мен беткейлердің эрозиялық тұрақтылығын

графиялық индексі (TWI), эрозияға қарсы шаралар, топырақ эрозиясы, беткейлік агроландшафттар, Шығыс Қазақстан

Мақала жайында:
Алынды: 16.02.2026
Қайта қаралды: 25.06.2026
Қабылданды: 25.08.2026
Жарияланды: 30.09.2026

сипаттайтын жер бедерінің морфометриялық параметрлері мен топографиялық индекстеріне талдау жүргізілді. Беткей еңістігі 5°-тан асқанда жерүсті ағынының шоғырлану және жергілікті шайылу қаупі артатыны анықталды, бұл вал-арықтарды горизонтальдар бойымен жоғары дәлдікпен трассалауды талап етеді. Ылғалдылықтың топографиялық индексін (TWI) спутниктік деректер бойынша өсімдік жамылғысының таралуымен салыстыру зерттелетін аумақта жер бедері ерекшеліктері, ылғалдану жағдайлары және өсімдік жамылғысының күйі арасындағы өзара байланысты көрсетті. Sentinel-2 деректерін вал-арықтарды мониторингтеу үшін қолдану спектралдық сигналдың араласу әсерімен қиындайтыны көрсетілді. Бұл вал-арықтардың өлшемдерінің спутниктік суреттердің кеңістіктік ажыратымдылығына сәйкес келмеуімен байланысты. Осыған байланысты спектралдық қоспаларды талдау әдістерін және топырақ-өсімдік жамылғысының спектралдық ерекшеліктерін кейінгі талдауды қолданудың перспективалылығы негізделді.
Зерттеу нәтижелері Шығыс Қазақстан жағдайында эрозияға қарсы құрылыстардың күйін қашықтықтан бағалау үшін жоғары дәлдіктегі жер бедері модельдері мен спутниктік деректерді бірлесіп қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

GEODETIC SUPPORT AND PROSPECTS FOR SPECTRAL MONITORING OF CONTOUR SWALES ON SLOPING TERRITORIES OF EASTERN KAZAKHSTAN

Ainur D. Karaneeva*, Zhanat Z. Toleubekova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Zabida N. Kurmangalieva, Tolkyn K. Quanyshbek

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; ajnurk121@gmail.com (ADK), jtoleubekova@mail.ru (ZhZT), zabida_98@mail.ru (ZNK), www.tolkynj@gmail.com (TKK)
*Author correspondent: Ainur D. Karaneeva, e-mail:ajnurk121@gmail.com

KEY WORDS

Contour swales, UAV photogrammetry, Structure-from-Motion (SfM), digital elevation model (DEM), remote sensing, Sentinel-2, topographic wetness index (TWI), erosion control, soil erosion, slope terrains, Eastern Kazakhstan.

About article:
Received: 16.02.2026
Revised: 25.06.2026
Accepted: 25.08.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

The article examines the potential application of high-resolution digital elevation models and satellite data for the design and remote monitoring of contour swales on sloping territories of Eastern Kazakhstan. The morphometric basis of the study was developed using UAV survey data processed with Structure-from-Motion (SfM) algorithms and the generation of a digital elevation model with a spatial resolution of 0.1 m. In addition, ALOS AW3D30 data and Sentinel-2 Level-2A multispectral imagery were used.
The study included an analysis of morphometric terrain parameters and topographic indices characterizing moisture conditions and slope erosion susceptibility. It was established that slopes exceeding 5° increase the risk of surface runoff concentration and local erosion, requiring highly accurate alignment of contour swales along contour lines. A comparison of the Topographic Wetness Index (TWI) with the distribution of vegetation cover derived from satellite data revealed relationships between terrain features, moisture conditions, and vegetation patterns within the study area.
The study also demonstrated that the use of Sentinel-2 data for monitoring contour swales is complicated by the mixed-pixel effect caused by the mismatch between swale dimensions and the spatial resolution of satellite imagery. In this regard, the use of spectral mixture analysis methods and further investigation of soil and vegetation spectral characteristics are considered promising.
The research demonstrates the potential for integrated use of high-resolution terrain models and satellite data for the remote assessment of anti-erosion structures under the environmental conditions of Eastern Kazakhstan.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫНЫҢ ЕРЕКШЕ ҚОРҒАУҒА АЛЫНҒАН ТАБИҒИ ЖӘНЕ КИЕЛІ НЫСАН АТАУЛАРЫ

Қуат Т. Сапаров география ғылымдарының докторы, профессор, Акерке М. Нурпеисова, Айгуль Е. Егинбаева PhD., қауымдастырылған профессор, Айгуль М. Сергеева география ғылымдарының кандидаты, профессор

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; saparov_kt@enu.kz (КС), akerke_140285@mail.ru (АН), yeginbayeva_aye@enu.kz (АЕ), sergeyeva_am@enu.kz (АС)
*Автор корреспондент: Айгуль Е. Егинбаева, yeginbayeva_aye@enu.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Қостанай облысы, ерекше қорғалатын табиғи аумақтар, киелі нысандар, топонимика, сакралды география, мәдени мұра, Наурызым қорығы, Алтын Дала резерваты, Торғай геоглифтері, өңірлік туризм.

АБСТРАКТ

Мақалада Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандарының табиғи, тарихи-мәдени және топонимиялық ерекшеліктері қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – өңірдегі ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі нысандардың кеңістіктік таралу заңдылықтарын анықтау, олардың табиғи және мәдени мұраны сақтаудағы маңызын бағалау, сондай-ақ топонимиялық жүйедегі көрінісін талдау. Зерттеудің ақпараттық негізін ғылыми әдебиеттер, архивтік материалдар, картографиялық деректер, далалық бақылау нәтижелері және ерекше қорғалатын табиғи аумақтар жөніндегі ресми мәліметтер құрады. Зерттеу барысында картографиялық, салыстырмалы-географиялық, топонимиялық, тарихи-мәдени және геоақпараттық талдау әдістері қолданылды.

Зерттеу нәтижесінде Қостанай облысындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі нысандардың аумақтық таралу ерекшеліктері анықталды. Олардың орналасуы табиғи ландшафттардың сақталу деңгейімен, тарихи қоныстану үдерістерімен және халықтың мәдени-рухани дәстүрлерімен тығыз байланысты екені дәлелденді. Наурызым мемлекеттік табиғи қорығы, «Алтын Дала» мемлекеттік табиғи резерваты, Аманқарағай мен Арақарағай орман алқаптарының табиғат қорғаудағы рөлі айқындалды. Сонымен қатар Торғай геоглифтері мен Екідің ескерткіштерінің тарихи-мәдени маңызы бағаланды. Топонимиялық талдау өңірдің жер-су атаулары табиғи орта, тарихи оқиғалар және этномәдени үдерістер туралы маңызды ақпарат көзі болып табылатынын көрсетті. Зерттеу нәтижелері табиғи және мәдени мұраны сақтау, өңірлік туризмді дамыту және сакралды географияны зерттеу бағыттарында қолданылуы мүмкін.

1. КІРІСПЕ

Қазіргі кезеңде табиғи және мәдени мұраны сақтау мәселелері тұрақты дамудың маңызды бағыттарының бірі ретінде қарастырылады. Әсіресе ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі нысандар белгілі бір өңірдің экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етумен қатар, тарихи-мәдени бірегейлігін сақтауда маңызды рөл атқарады. Осыған байланысты табиғи және киелі нысандардың кеңістіктік таралуын, олардың қалыптасу ерекшеліктерін, сондай-ақ топонимиялық жүйеде көрініс табуын зерттеу ғылыми және практикалық тұрғыдан өзекті болып табылады [1].

Қазақстан аумағындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтар жүйесі биологиялық әртүрлілікті сақтаудың негізгі тетіктерінің бірі саналады. Сонымен қатар табиғи ландшафттармен тығыз байланысты киелі орындар халықтың тарихи жадысын, этномәдени құндылықтарын және өңірлік сәйкестігін айқындайтын маңызды нысандар қатарына жатады. Алайда көптеген зерттеулерде ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен

Мақала жайында:
Алынды: 03.03.2026
Қайта қаралды: 10.06.2026
Қабылданды: 28.07.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Для цитирования:
Сапаров Қ.Т., Нурпеисова А.М., Егинбаева А.Е., Сергеева А.М., Қостанай облысының ерекше қорғауға алынған табиғи және киелі нысан атаулары // Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 240–253.

киелі нысандар жеке қарастырылып, олардың топонимиялық кеңістіктегі өзара байланысы жеткілікті деңгейде зерттелмеген [2].

Зерттеу нысаны – Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандары. Зерттеу пәні – аталған нысандардың географиялық орналасу ерекшеліктері, табиғатты қорғаудағы рөлі және олардың атауларының тарихи-мәдени әрі топонимиялық мазмұны.

Зерттеу мақсаты – Қостанай облысындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі нысандардың кеңістіктік таралуын, табиғатты қорғау және мәдени мұраны сақтау жүйесіндегі маңызын, сондай-ақ олардың атауларының қалыптасу ерекшеліктерін кешенді түрде талдау.

Осы мақсатқа сәйкес келесі міндеттер қойылды: Қостанай облысындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың қазіргі жағдайын сипаттау; табиғи және киелі нысандардың таралу ерекшеліктерін анықтау; нысан атауларының этимологиялық және семантикалық ерекшеліктерін талдау; табиғи және мәдени мұра нысандарының өңірлік туризмді дамытудағы рөлін бағалау; ерекше қорғалатын табиғи және киелі нысандарды сақтау мен насихаттаудың ғылыми негізделген бағыттарын ұсыну.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы: Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандары кешенді географиялық тұрғыдан зерттелді; табиғи және киелі нысандардың кеңістіктік таралу ерекшеліктері анықталды; өңірдің сакралды географиясының картасы нақтыланды; табиғи және мәдени мұра нысандарының туризмді дамытудағы рөлі бағаланды.

Зерттеу нәтижесінде өңірдегі ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі орындардың кеңістіктік ұйымдасу ерекшеліктері айқындалып, олардың атауларының тарихи-мәдени мазмұны анықталды. Сонымен қатар табиғи және киелі мұра нысандарын сақтау мен туристік-рекреациялық мақсатта пайдаланудың негізгі бағыттары ұсынылды [3, 4].

2. ЗЕРТТЕУ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ӘДІСТЕРІ

Зерттеу жұмысының ақпараттық негізін Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары жөніндегі ресми статистикалық және картографиялық материалдар, ғылыми әдебиеттер, архивтік және тарихи дереккөздер, Қазақстанның киелі нысандары бойынша мемлекеттік бағдарламалар аясында жинақталған мәліметтер, сондай-ақ далалық зерттеу барысында алынған бақылау нәтижелері құрады [5, 6].

Зерттеу барысында табиғи қорғалатын аумақтар мен киелі нысандардың орналасу ерекшеліктерін анықтау үшін географиялық, топонимикалық және тарихи-мәдени зерттеу әдістерін біріктіретін кешенді пәнаралық тәсіл қолданылды.

Картографиялық және геоақпараттық талдау әдісі ерекше қорғалатын табиғи аумақтар мен киелі нысандардың кеңістіктік таралуын зерттеу және олардың орналасу заңдылықтарын анықтау мақсатында пайдаланылды. Геоақпараттық жүйелер (ГАЖ) негізінде зерттеу аумағының тақырыптық карталары әзірленіп, нысандардың таралу ерекшеліктеріне салыстырмалы талдау жүргізілді.

Салыстырмалы-географиялық әдіс Қостанай облысының табиғи және киелі нысандарын Қазақстанның басқа өңірлеріндегі ұқсас нысандармен салыстыру арқылы олардың ерекшеліктерін айқындауға мүмкіндік берді.

Топонимикалық талдау әдісі зерттелген нысандар атауларының этимологиясын, семантикалық құрылымын және тарихи қалыптасу ерекшеліктерін анықтауға бағытталды. Бұл әдіс арқылы табиғи орта мен атаулар жүйесінің өзара байланысы бағаланды.

Тарихи-этнографиялық әдіс тарихи құжаттарды, әдеби деректерді, ауызша тарихи мәліметтерді және өңір тұрғындарының танымдық ақпараттарын талдау арқылы киелі нысандардың мәдени-рухани маңызын анықтау үшін қолданылды.

Контент-талдау әдісі ғылыми жарияланымдарды, нормативтік-құқықтық құжаттарды, ерекше қорғалатын табиғи аумақтарға қатысты ресми есептерді және мәдени

мұра нысандары жөніндегі материалдарды жүйелеу мен талдау барысында пайдаланылды.

Далалық зерттеу жұмыстары барысында жекелеген табиғи және киелі нысандардың қазіргі жағдайына бақылау жүргізіліп, фотофиксация материалдары жинақталды. Сонымен қатар жергілікті тұрғындармен жүргізілген сұхбаттар арқылы нысандардың тарихи маңызы мен қазіргі кездегі пайдалану ерекшеліктері нақтыланды.

Қолданылған әдістер кешені Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандарының табиғи-географиялық, тарихи-мәдени және топонимиялық ерекшеліктерін кешенді бағалауға мүмкіндік берді [7, 8].

3. ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Қазақстан аумағындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың қалыптасу тарихы терең тарихи кезеңдерден бастау алады. Қорықтық аумақтарды ұйымдастырудың алғашқы элементтері көшпелі қоғамдардың табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану тәжірибесімен тығыз байланысты болған. Бұл жөнінде ортағасырлық жазба деректер маңызды мәліметтер береді. XIV ғасырда өмір сүрген тарихшы Рашид ад-Дин өзінің әйгілі «Жамиғ ат-тауарих» («Жылнамалар жинағы») еңбегінде Шыңғыс ханның арнайы қорғалатын аңшылық алқаптары болғанын және оларды мыңдаған жасақшылар күзеткенін атап көрсетеді. Мұндай деректер табиғи ресурстарды қорғау мен реттелген пайдаланудың мемлекеттік деңгейде ұйымдастырылғанын дәлелдейді.

Қазақстан мен Орта Азиядағы ежелгі қорықтарды арнайы зерттеген Р.Сәтімбеков археологиялық және тарихи материалдарды талдау негізінде қорықтық аумақтардың пайда болуы қола дәуірінен бастау алатынын көрсетеді. Ғалымның пікірінше, алғашқы қорықтық аумақтар негізінен өзен аңғарларында, көл маңында және тауалды жазықтарында орналасып, жануарлар дүниесін қорғау мен аңшылық ресурстарын сақтауға бағытталған. Бұл қорытынды табиғатты қорғау идеяларының қазақ жерінде ежелгі кезеңдерден қалыптасқанын көрсетеді [5, 6].

Қорық ұғымының тарихи қалыптасуын зерттеуде ортағасырлық түркі жазба ескерткіштерінің маңызы ерекше. XI ғасырдағы түркі халықтарының тілі мен мәдениетін жан-жақты сипаттаған Махмұд Қашқари өз еңбектерінде «қорық» сөзін «тыйым салынған жер», «қорғалатын аумақ» мағынасында қолданған. Бұл дерек қорық ұғымының түркі халықтарының дүниетанымында ерте кезеңдерден-ақ қалыптасқанын және табиғи ресурстарды реттелген пайдалану тәжірибесімен тығыз байланысты болғанын көрсетеді.

Қазақстан мен Орта Азия аумағындағы тарихи-географиялық деректер табиғаты көркем, аңшылық пен мал шаруашылығына қолайлы өңірлерде арнайы қорғалатын аумақтардың ежелгі дәуірлерден бері болғанын дәлелдейді. Мұндай аумақтар табиғи ресурстарды сақтау, аңшылықты реттеу және шаруашылық тепе-теңдігін қамтамасыз ету мақсатында пайдаланылған.

Топонимиялық материалдар да қорықтық аумақтардың тарихи таралуын анықтауда маңызды дереккөзі болып табылады. А.Е. Егинбаеваның зерттеулерінде Сарыарқа өңіріндегі табиғатты қорғау дәстүрлерінің тарихи негіздері географиялық атаулар арқылы дәлелденген. Атап айтқанда, «Хан қорығы», «Кеңқорық», «Құлан қорық», «Үлкен қорық», «Қорық даласы» сияқты атаулардың кең таралуы қорық ұғымының қазақ халқының кеңістіктік мәдениетінде берік орныққанын көрсетеді. Мұндай топонимдер белгілі бір аумақтардың ерекше қорғауға алынғанын немесе аңшылық пен табиғи ресурстарды пайдалануға қатысты шектеулер болғанын аңғартады. Сондықтан қорықтық сипаттағы географиялық атаулар тарихи табиғат пайдалану жүйесін және қоршаған ортаны қорғаудың дәстүрлі тәжірибесін зерттеудегі маңызды ақпараттық дереккөз ретінде қарастырылуы тиіс.

Қорғалатын табиғи аумақтардың ғылыми негізделген жүйесін қалыптастыру мәселесі қазіргі табиғат қорғау географиясының маңызды бағыттарының бірі болып табылады. Көптеген зерттеушілер қорғалатын аумақтар жүйесінің кеңістіктік ұйымдасуын табиғи ландшафттардың құрылымы, биоалуантүрліліктің таралу

ерекшеліктері және антропогендік жүктеменің деңгейімен байланыстырады. Осы бағыттағы алғашқы ғылыми тұжырымдар Н.Ф. Реймерс, Ф.Р. Штильмарк, Ю.Б. Родоман және Ю.А. Исаков еңбектерінде қарастырылса, Қазақстан жағдайында қорғалатын аумақтар жүйесін ұйымдастырудың теориялық негіздері О.Т. Айдаровтың зерттеулерінде жан-жақты талданған [1].

Соңғы жылдары табиғи-қорықтық нысандардың топонимиялық кеңістіктегі көрінісін зерттеу өзекті ғылыми бағыттардың біріне айналды. Топонимиялық деректер табиғи ландшафттардың тарихи өзгерістерін, жануарлар дүниесінің бұрынғы таралу ареалдарын және қорықтық аумақтардың ежелгі орналасу ерекшеліктерін анықтауға мүмкіндік береді. Қ.Т. Сапаров пен А.Е. Егинбаеваның зерттеулерінде табиғи-қорықтық нысандарға қатысты географиялық атаулар жүйеленіп, олардың кеңістіктік таралу карталары құрастырылған. Геоақпараттық технологияларды пайдалану тарихи топонимиялық деректерді қазіргі табиғи жағдайлармен салыстыруға және болашақта ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың перспективалық желісін қалыптастыруға ғылыми негіз береді.

Тарихи және топонимиялық деректер Дешті Қыпшақ дәуірінде қазіргі Қостанай облысы аумағында орманды және аңшылық ресурстарға бай қорықтық алқаптардың болғанын көрсетеді. Ортағасырлық деректерде бұлан, құлан және басқа да ірі жануарлардың кең таралғаны туралы мәліметтер кездеседі. Бұл жағдайды өңірдегі Бұланды, Құлантау, Құлансу, Құланды, Қасқа-Құлан сияқты көптеген географиялық атаулар да растайды. Мұндай топонимдер тарихи кезеңдердегі табиғи ортаның ерекшеліктері мен жануарлар дүниесінің таралуы жөнінде құнды ақпарат сақтаған табиғи-тарихи дереккөздер болып табылады [7, 8].

Қостанай облысының орман алқаптары, ірі көлдері және Торғай, Қабырға мен Ұлы Жыланшық өзендерінің аңғарлары ежелден жануарлар дүниесінің шоғырланған мекені болған. Сондықтан өңірдегі ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың қалыптасу тарихын және олармен байланысты топонимдерді зерттеу қазіргі ландшафттардың тарихи эволюциясын түсінуге, табиғи мұраны сақтаудың ғылыми негіздерін жетілдіруге және өңірдің табиғи-мәдени әлеуетін бағалауға мүмкіндік береді [5, 6].

Топонимдерді зерттеу арқылы жергілікті жердің флоралық және фауналық түр құрамын, топонимдердің қалыптасуын, олардың аумақ бойынша таралуын анықтауға болады. Жабайы табиғатпен байланысты топонимдер белгілі бір флора, фауна түрінің географиялық таралуын көрсетеді. Реликті немесе жойылып кеткен жануарлар атаулары қатысқан топонимдер көмегімен табиғи ландшафттардың бұрынғы қалпын келтіруге мүмкіндік береді [4].

Зерттеу нәтижелері Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандарының кеңістіктік орналасуында белгілі бір географиялық заңдылықтардың бар екенін көрсетті. Табиғи қорғалатын аумақтардың басым бөлігі облыстың орманды-далалық және көлдік жүйелері жақсы сақталған солтүстік және орталық бөліктерінде шоғырланған. Ал киелі нысандардың таралуы тарихи қоныстану аймақтарымен, көне көші-қон бағыттарымен және дәстүрлі шаруашылық жүргізу аумақтарымен тығыз байланысты екендігі анықталды.

Жасалған картографиялық талдау нәтижесінде табиғи және киелі нысандардың бірқатар жағдайларда бір кеңістікте тоғысатыны байқалды. Бұл құбылыс табиғи ландшафттардың халықтың рухани дүниетанымында маңызды орын алғанын және киелі кеңістіктің қалыптасуына табиғи ортаның тікелей ықпал еткенін көрсетеді.

Топонимиялық талдау барысында өңірдегі көптеген атаулардың табиғи орта ерекшеліктерін бейнелейтіні анықталды. Әсіресе орман, өзен-көл және жануарлар дүниесіне қатысты атаулардың басымдығы тарихи кезеңдерде табиғи ландшафттардың қазіргі жағдаймен салыстырғанда әлдеқайда кең таралғанын көрсетеді. Бұл қорытынды бұрынғы зерттеушілердің еңбектерінде келтірілген деректермен сәйкес келеді және

өңірдің тарихи ландшафттарын қайта қалпына келтіруде топонимдердің маңызды дереккөзі екенін дәлелдейді.

Наурызым мемлекеттік табиғи қорығы Қазақстандағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың ішіндегі экологиялық маңызы жоғары нысандардың бірі болып табылады. Қорық Қостанай облысының Наурызым және Әулиекөл аудандары аумағында орналасқан және далалық, орманды-далалық әрі көлдік экожүйелердің табиғи кешендерін сақтауға бағытталған. Қорық аумағында жоғары сатыдағы өсімдіктердің 700-ге жуық түрі тіркелген, олардың құрамында қарағай, қайың, көктерек, тал, мойыл және басқа да жергілікті флора өкілдері кездеседі. Сонымен қатар сүтқоректілердің 40-тан астам, құстардың шамамен 250, балықтардың 10-ға жуық түрі таралған. Сирек кездесетін және қорғауға алынған аққу, дуадақ, безгелдек, ақ сұңқар секілді құстардың мекен етуі қорықтың биоалуантүрлілікті сақтаудағы ерекше рөлін көрсетеді.

Климаттық жағдайлардың қуаң континенттік сипатта болуы мен көлдік жүйелердің қатар орналасуы көптеген жыл құстары үшін маңызды миграциялық және ұялау ортасын қалыптастырады. Осыған байланысты Наурызым қорығы халықаралық маңызы бар орнитологиялық аумақтардың қатарына жатады. Қорықта жүргізілетін ғылыми зерттеулер негізінен реликті қарағай ормандарының сақталу ерекшеліктерін, тұзды көлдердің экожүйелерін және су құстарының экологиясын зерттеуге бағытталған. Бұл зерттеулер өңірдегі табиғи кешендердің ұзақ мерзімді тұрақтылығын бағалауға мүмкіндік береді.

Наурызым мемлекеттік табиғи қорығына жүргізілген талдау оның Қостанай облысындағы биоалуантүрлілікті сақтаудағы жетекші рөлін көрсетеді. Қорық аумағында орман, көл және дала экожүйелерінің бір мезгілде кездесуі табиғи кешендердің жоғары деңгейде сақталуына мүмкіндік береді. Сонымен қатар қорықтың халықаралық табиғат қорғау маңызы оның өңірлік қана емес, жаһандық экологиялық жүйедегі орнын айқындайды. Бұл нәтижелер қорықтарды дамыту мен олардың аумағын кеңейту мәселесінің өзектілігін растайды [9].

Қостанай облысындағы Арақарағай, Аманқарағай және Наурызым қарағайлы ормандары Қазақстанның жазық бөлігіндегі реликті орман алқаптарының қатарына жатады. Зерттеу барысында қарағайлы ормандарға қатысты топонимдердің кең таралуы қазіргі табиғи ландшафттардың тарихи кезеңдерде әлдеқайда ауқымды болғанын көрсететіні анықталды [10]. Тарихи деректер бойынша XVIII–XIX ғасырларда Аманқарағай мен Арақарағай ормандарының көлемі қазіргі көрсеткіштерден едәуір үлкен болған [11...13].

Аманқарағай атауының этимологиясы орман массивінің тарихи сақталу ерекшеліктерімен байланыстырылады. Яғни бұрын кең аумақты қамтыған орман алқабының белгілі бір бөлігі ғана сақталып қалуына байланысты халық арасында «аман қалған қарағай» ұғымы қалыптасқан деп пайымдауға болады. Ал Арақарағай атауы түркі тілдеріндегі «ара» терминімен байланысты қарастырылып, «солтүстіктегі қарағайлы орман» мағынасын білдіруі мүмкін [14, 15].

Топонимиялық талдау нәтижелері Қостанай облысындағы көптеген орман атаулары тарихи табиғи ортаның маңызды индикаторы болып табылатынын көрсетті. Белқарағай, Майқарағай, Қотанқарағай, Ойқарағай сияқты атаулар қазіргі кезде орман жамылғысы өзгерген аумақтарда да бұрын орман экожүйелерінің болғанын дәлелдейді. Бұл жағдай топонимдердің палеогеографиялық ақпарат көзі ретіндегі маңызын арттырады. [16...18].

Арақарағай орманының рекреациялық әлеуеті. Арақарағай орманы Қостанай облысының Алтынсарин ауданында орналасқан маңызды табиғи кешендердің бірі болып табылады. Орманның жалпы ауданы 616 км² құрайды, оның 271 км² бөлігін ағаш жамылғысы алып жатыр. Орман құрылымында қарағай, қайың және көктерек түрлері басым кездеседі, ал бұталы өсімдіктерден итмұрын, қарақат және тобылғы кең таралған.

Зерттеу нәтижелері Арақарағай орманының табиғат қорғау қызметімен қатар рекреациялық маңызға ие екенін көрсетті. Орман аумағында орналасқан «Сосновый бор» шипажайы өңірдің туристік-рекреациялық инфрақұрылымының маңызды элементі болып табылады. Қолайлы табиғи жағдайлар, минералды су көздерінің болуы және орманды ландшафттардың тартымдылығы өңірлік туризмді дамытуға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар орманның агрометеорологиялық қызметі ерекше назар аудартады. Орман белдеулері жел эрозиясын төмендетуге, жергілікті микроклиматты тұрақтандыруға және топырақтың ылғал сақтау қабілетін арттыруға ықпал етеді. Сондықтан Арақарағай орманын сақтау мәселесі табиғатты қорғау ғана емес, өңірдің экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан да маңызды болып табылады [9].

Аманқарағай қарағайлы орманы Қостанай облысының Жітіқара және Әулиекөл аудандары аумағында орналасқан Қазақстандағы бірегей реликті орман экожүйелерінің қатарына жатады. Орман негізінен табиғи қарағай (Pinus sylvestris) қауымдастықтарынан құралған және олардың басым бөлігінің жасы 80...100 жыл аралығында. Құмды және құмдақ жыныстарда қалыптасқан бұл орман өңірдің қатаң континенттік климат жағдайында табиғи тұрақтылықтың маңызды элементі болып табылады [9].

Жүргізілген талдау нәтижесінде Аманқарағай орманының экожүйелік қызметтері айқындалды. Атап айтқанда, орман алқабы жел эрозиясын әлсіретеді, жергілікті климаттық жағдайларды реттейді және топырақтағы ылғал қорын сақтауға ықпал етеді. Сонымен қатар орман жануарлар дүниесінің көптеген өкілдері үшін тіршілік ету ортасы болып табылады. Сондықтан аталған аумақтың табиғат қорғау маңызы тек өңірлік деңгейде ғана емес, жалпы Солтүстік Қазақстанның экологиялық тұрақтылығы тұрғысынан да жоғары бағаланады [2].

Соңғы жылдары табиғи және антропогендік факторлардың әсерінен орман экожүйесіне түсетін жүктеме артып келеді. Әсіресе орман өрттері, рекреациялық қысым және заңсыз ағаш кесу жағдайлары табиғи кешендердің тұрақтылығына қауіп төндіруде. Осыған байланысты Аманқарағай ормандарын қорғау шараларын күшейту өңірдің табиғи мұрасын сақтаудың маңызды бағыты болып табылады.

Торғай өңірінің табиғи ландшафттары және тарихи-географиялық ерекшеліктері. Торғай өңірі Қазақстандағы антропогендік әсер салыстырмалы түрде аз сақталған табиғи аумақтардың бірі ретінде ерекшеленеді. Мұнда ерекше геологиялық құрылымдар, сирек кездесетін ландшафттық кешендер және табиғи экожүйелер кең таралған. Жүргізілген зерттеулер Торғай даласының табиғи жағдайлары тарихи кезеңдердегі қоныстану үдерістеріне және өңірдің топонимиялық жүйесінің қалыптасуына тікелей ықпал еткенін көрсетті.

Қазақстанның солтүстік-батыс бөлігіндегі орман атауларының таралуын қазіргі орман ареалдарымен салыстыру нәтижесінде топонимиялық ареалдардың қазіргі табиғи шекаралардан әлдеқайда кең болғаны анықталды. Бұл жағдай тарихи кезеңдерде орман ландшафттарының қазіргімен салыстырғанда анағұрлым кең таралғанын көрсетеді. Мұндай қорытынды тарихи картографиялық деректермен және палеогеографиялық зерттеулердің нәтижелерімен де расталады.

Зерттеу барысында XVIII–XIX ғасырлардағы орман ресурстарының қарқынды игерілуі табиғи ландшафттардың құрылымдық өзгерістеріне алып келгені анықталды. Әсіресе бекіністер салу және шаруашылық қажеттіліктер үшін ағаш дайындау жұмыстары қарағайлы ормандардың ауданының қысқаруына әсер еткен. Сондықтан қазіргі кезде сақталған реликті орман алқаптары табиғи мұраның ерекше құнды нысандары ретінде қарастырылуы тиіс [2].

Зерттеу нәтижелері Қостанай облысы аумағында республикалық маңызы бар 5 ерекше қорғалатын табиғи аумақ орналасқанын көрсетті. Олардың құрамына Наурызым мемлекеттік табиғи қорығы, «Алтын Дала» мемлекеттік табиғи резерваты, сондай-ақ Михайлов, Тауынсор және Жарсор-Орқаш мемлекеттік табиғи қорықшалары кіреді.

Жалпы ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың ауданы 818 976,6 гектарды құрайды, оның ішінде 39 106 гектары орман алқаптарына тиесілі.

Бұл көрсеткіштер Қостанай облысының табиғи мұраны сақтау жүйесінде маңызды орын алатынын дәлелдейді. Ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың басым бөлігі көлдік және далалық экожүйелердің биологиялық әртүрлілігін сақтауға бағытталған. Сонымен қатар аталған аумақтар халықаралық маңызы бар құстардың миграциялық жолдарын қорғауда маңызды қызмет атқарады.

Картографиялық талдау ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың облыс аумағында біркелкі таралмағанын көрсетті. Олардың негізгі бөлігі табиғи ландшафттары жақсы сақталған солтүстік және орталық аудандарда орналасқан. Бұл жағдай табиғи ресурстарды ұтымды пайдалану мен қорғау шараларын аумақтық ерекшеліктерді ескере отырып жоспарлау қажеттігін көрсетеді (кесте 1, сурет 1).

Кесте 1

Қостанай облысының облыстық маңызы бар киелі нысандары

Р/с	Киелі орын	Нысанның сипаты	Орналасқан аудан
1	Қазыбай әулие Ақпанұлы жерленген жер	кесене	Жанкелді ауданы
2	Күтан әулие Аталдықұлының кесенесі	кесене	Амангелді ауданы
3	Баймырза әулие Мергенұлының кесенесі	кесене	Жанкелді ауданы
4	Қоянақ әулие Жолшарақызының кесенесі	кесене	Наурызым ауданы
5	Түркібай әулие Ақанұлы жерленген жер	кесене	Наурызым ауданы
6	Сатыбалды ишанның кесенесі (F нұсқасы)	кесене	Амангелді ауданы
7	Ақмешіт мешіті	мешіт	Қостанай қаласы
8	Батыр Мандай Байдәулетұлының жерленген жері	кесене	Меңдіқара ауданы
9	Батыр Жабағы Ипанұлының жерленген жері	кесене	Бейімбет Майлин ауданы
10	Жазы би Жанұлының кесенесі	кесене	Алтынсарин ауданы
11	Шоқай би Балқанұлының жерленген жері	кесене	Алтынсарин ауданы
12	Қобызшы Тілеп Аспантайұлының жерленген жері	кесене	Жангелді ауданы
13	Күнтимес – Шоқан Уәлихановтың туған жері	елді мекен	Сарыкөл ауданы
14	Омар құдығы – Ыбырай Алтынсариннің туған жері	құдық	Алтынсарин ауданы
15	Сарытүбек ауылы – Ахмет Байтұрсынұлының туған жері	елді мекен	Жангелді ауданы
16	Мұхамеджан Сералиннің жерленген жері	кесене	Қарабалық ауданы
17	Албарбөгет (Айса бөгеті) – тарихи маңызы бар орын	елді мекен	Жангелді ауданы
18	Татыр шайқасы болған жер – тарихи оқиға орны	тарихи орын	Жангелді ауданы

Кесте 1 мәліметтерін талдау Қостанай облысының киелі нысандарының басым бөлігінің тарихи тұлғаларға, діни мұраларға және ұлттық тарихтағы маңызды оқиғаларға байланысты екенін көрсетті. Киелі орындардың ішінде кесене типіндегі нысандар басым үлеске ие. Бұл өңір халқының тарихи жады мен рухани құндылықтарының қалыптасуында діни-мәдени мұраның маңызды орын алатынын көрсетеді.

Аумақтық тұрғыдан алғанда киелі нысандардың едәуір бөлігі Жангелді, Амангелді және Наурызым аудандарында шоғырланған. Бұл аудандардың қазақ халқының тарихи-мәдени дамуындағы орны ерекше болғанын көрсетеді. Сонымен қатар Шоқан Уәлиханов, Ыбырай Алтынсарин және Ахмет Байтұрсынұлы сияқты көрнекті тарихи тұлғаларға қатысты нысандардың болуы өңірдің мәдени-тарихи әлеуетін арттыра түседі.

Жалпы алғанда, киелі нысандардың кеңістіктік таралуы тарихи қоныстану жүйесімен, көне көші-қон бағыттарымен және дәстүрлі мәдени ландшафттардың қалыптасу ерекшеліктерімен тығыз байланысты екендігі анықталды.

«Алтын Дала» мемлекеттік табиғи резерваты Қостанай облысындағы ең ірі ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың бірі болып табылады. Резерват 2012 жылы құрылған және Жангелді, Амангелді мен Наурызым аудандары аумағында орналасқан. Жалпы ауданы 489,8 мың гектарды құрайды. Оның құрамына Сарықопа көлдер жүйесі, Тосынқұм құмды алқабы және Ұлы-Жыланшық өзені аңғары сияқты табиғи кешендер енеді.

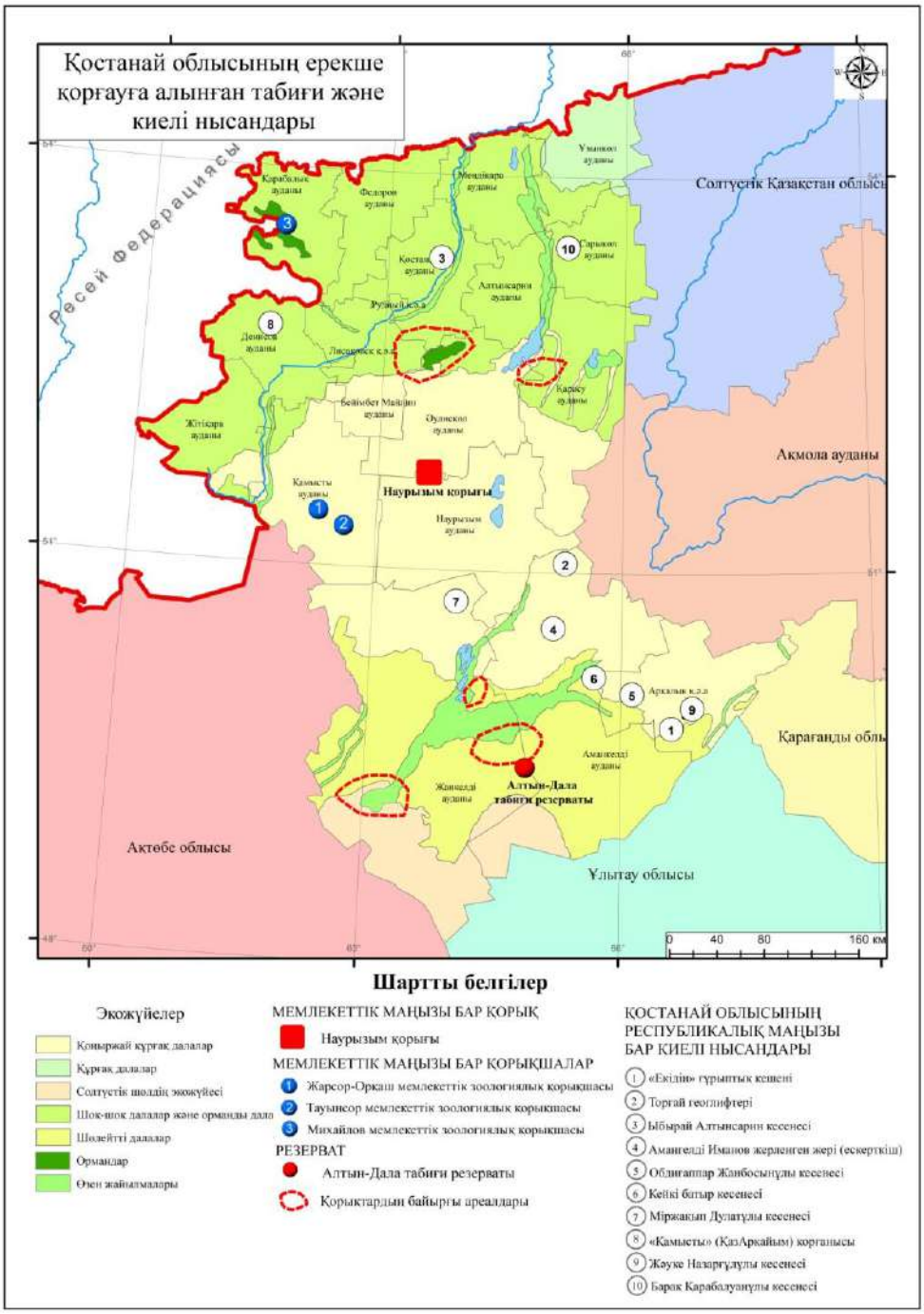
Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, резерват аумағы Торғай өңірінің табиғи ландшафттық әртүрлілігін сақтауда маңызды рөл атқарады. Әсіресе далалық экожүйелердің табиғи күйін сақтау, сирек кездесетін өсімдіктер мен жануарлардың мекен ету ортасын қорғау және экологиялық мониторинг жүргізу тұрғысынан ерекше маңызға ие.

Табиғи кешендердің кең аумақты қамтуы резерваттың экологиялық тұрақтылығын арттырады және өңірдегі табиғи байланыстардың сақталуына мүмкіндік береді. Сондықтан «Алтын Дала» резерватын Қазақстанның далалық экожүйелерін қорғаудағы стратегиялық маңызы бар табиғат қорғау нысандарының бірі ретінде қарастыруға болады.

Зерттеу барысында Қостанай облысының табиғи мұра нысандары мен киелі орындарының кеңістіктік орналасуында белгілі бір байланыстардың бар екендігі анықталды. Киелі нысандардың басым бөлігі тарихи қоныстану аймақтарында, табиғи ресурстарға бай және қолайлы ландшафттық жағдайлар қалыптасқан аумақтарда орналасқан.

Бұл құбылыс табиғи ортаның халықтың дүниетанымына және сакралды кеңістіктің қалыптасуына тікелей ықпал еткенін көрсетеді. Табиғи нысандар мен мәдени мұра нысандарының бір аумақта шоғырлануы өңірдің туристік-рекреациялық әлеуетін арттырып, кешенді мәдени-танымдық маршруттар әзірлеуге мүмкіндік береді.

Алынған нәтижелер табиғи және мәдени мұраны біртұтас географиялық жүйе ретінде қарастырудың ғылыми негізді екенін дәлелдейді. Мұндай тәсіл соңғы жылдары сакралды география және мәдени ландшафттарды зерттеуге арналған халықаралық еңбектердің негізгі бағыттарымен сәйкес келеді.



Сурет 1. *Қостанай облысының ерекше қорғауға алынған табиғи және киелі нысандары*

Қостанай облысының тарихи-мәдени мұра нысандарының ішінде **Торғай геоглифтері** ерекше орын алады. Зерттеу барысында геоглифтердің өңірдің археологиялық және мәдени кеңістігіндегі маңызы анықталды. Геоглифтер жер бедерінде геометриялық пішіндер түрінде қалыптасқан алып құрылымдар болып табылады және олар ежелгі қоғамдардың дүниетанымы мен мәдени тәжірибесі туралы маңызды ақпарат береді.

Торғай геоглифтері алғаш рет ғарыштық түсірілімдерді талдау нәтижесінде анықталып, кейінгі жылдары ғылыми қауымдастықтың назарын аударды. Қазіргі уақытта өңір аумағында төрттағандар, крест тәрізді құрылымдар және Торғай свастикасы сияқты бірнеше геоглиф түрлері белгілі.

Ғылыми әдебиеттерде бұл нысандардың нақты атқарған қызметі жөнінде ортақ пікір қалыптаспағанымен, олардың ежелгі қоғамдардың діни-ғұрыптық немесе астрономиялық қызметімен байланысты болуы мүмкін деген болжамдар басым. Осыған байланысты Торғай геоглифтері Қазақстан аумағындағы археологиялық зерттеулердің маңызды нысандарының бірі болып табылады.

Зерттеу нәтижелері геоглифтердің ғылыми құндылығымен қатар мәдени туризмді дамытудағы әлеуетінің жоғары екенін көрсетті. Алайда мұндай ескерткіштердің сақталуын қамтамасыз ету және оларды халықаралық деңгейде насихаттау бағытындағы жұмыстарды одан әрі жетілдіру қажет [19].

Геоглифтердің кеңістіктік орналасуын талдау олардың Торғай өңірінің тарихи-мәдени ландшафттарының құрамдас бөлігі екенін көрсетті. Әлемдік тәжірибеде Наска шөліндегі геоглифтер сияқты нысандар ғылыми және туристік қызығушылықтың маңызды орталықтарына айналған. Осы тұрғыдан алғанда Торғай геоглифтері де халықаралық деңгейдегі мәдени мұра нысаны ретінде қарастырылуы мүмкін.

Қостанай облысының тарихи-мәдени ресурстарын бағалау нәтижелері Торғай геоглифтерінің өңірлік туризмді дамытуда маңызды рөл атқара алатынын көрсетті. Сонымен бірге олар Қазақстанның көне өркениеттері мен тарихи-мәдени дамуын зерттеуге мүмкіндік беретін құнды археологиялық дереккөз болып табылады (сурет 2) [19].

Сурет 2. *Торғай геоглифтері*

Арқайым және Торғай өңірінің тарихи-мәдени кеңістігі. Торғай өңірінің тарихи-мәдени мұрасын зерттеу барысында ежелгі қоныстар, қорғандар, ғұрыптық құрылыстар мен археологиялық кешендердің кең таралғаны анықталды. Бұл аумақ ежелгі дәуірлерден бастап Еуразия көшпелілерінің мәдени кеңістігінің маңызды бөлігі болған.

Археологиялық және тарихи деректерге сүйенген талдау нәтижелері Торғай өңірі мен оған іргелес аумақтардағы мәдени үдерістердің өзара байланыста дамығанын көрсетеді. Осы тұрғыдан алғанда өңір аумағындағы археологиялық нысандарды жеке-жеке қарастырудан гөрі оларды біртұтас тарихи-географиялық жүйе ретінде зерттеу ғылыми тұрғыдан анағұрлым тиімді болып табылады [1].

Зерттеу барысында анықталған мәдени мұра нысандары өңірдің тарихи қоныстану ерекшеліктерін, көші-қон бағыттарын және этномәдени байланыстарын зерделеуде маңызды дереккөз ретінде бағаланды [19].

Екідің ескерткіштерінің тарихи-географиялық маңызы. Қостанай облысының тарихи-мәдени мұра нысандарының ішінде Екідің ескерткіштері ерекше орын алады. Археологиялық зерттеулер нәтижесінде бұл нысандардың қола дәуірінің соңғы кезеңі мен ерте темір дәуіріне жататыны анықталған. Ескерткіштердің кеңістіктік орналасуы мен сәулеттік құрылымы олардың кездейсоқ тұрғызылмағанын және белгілі бір тарихи-мәдени қызмет атқарғанын көрсетеді.

Екідің кешенінің құрамындағы екі нысан бір-бірінен едәуір қашықтықта орналасқанымен, құрылымдық ұқсастықтары олардың ортақ мәдени дәстүр аясында қалыптасқанын аңғартады. Бірінші нысан Қараторғай өзеніне жақын орналасса, екіншісі айналадағы ландшафтта айқын ерекшеленетін биік жерде орналасқан. Мұндай кеңістіктік ұйымдасу ежелгі қоғамдардың табиғи орта ерекшеліктерін ескере отырып құрылыс жүргізгенін көрсетеді [8].

Археологиялық әдебиеттерде Екідің ескерткіштерінің қызметі жөнінде әртүрлі пікірлер кездеседі. Дегенмен зерттеушілердің басым бөлігі оларды ғұрыптық немесе мемориалдық сипаттағы нысандар қатарына жатқызады. Бұл пікір олардың құрылыс ерекшеліктері мен орналасу заңдылықтарына негізделген.

1959 жылы академик Әлкей Марғұлан жетекшілік еткен археологиялық зерттеулер нәтижесінде Екідің ескерткіштерінің тарихи құндылығы ғылыми тұрғыдан дәлелденіп, мемлекеттік қорғауға алынған. Кейіннен жақын маңдағы елді мекеннің атауы да осы ескерткіштермен байланысты қалыптасқан [20].

Жүргізілген талдау Екідің кешенінің Қостанай облысының ғана емес, жалпы Қазақстанның археологиялық мұра жүйесіндегі маңызды нысандардың бірі екенін көрсетті. Оның ғылыми құндылығы ежелгі көшпелі қоғамдардың мәдени кеңістігін зерттеуге мүмкіндік беруімен айқындалады.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Зерттеу нәтижелері Қостанай облысының ерекше қорғалатын табиғи аумақтары мен киелі нысандары өңірдің табиғи және тарихи-мәдени мұрасының маңызды құрамдас бөлігі болып табылатынын көрсетті. Жүргізілген талдау барысында облыс аумағындағы ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың экологиялық тұрақтылықты сақтауда және биоалуантүрлілікті қорғауда шешуші рөл атқаратыны анықталды.

Картографиялық зерттеу нәтижелері табиғи қорғалатын аумақтар мен киелі нысандардың таралуында белгілі бір кеңістіктік заңдылықтардың қалыптасқанын көрсетті. Олардың басым бөлігі табиғи ландшафттары жақсы сақталған және тарихи тұрғыдан игерілген аудандарда орналасқан.

Топонимикалық талдау нәтижесінде Қостанай облысының жер-су атаулары өңірдің табиғи ерекшеліктері, тарихи оқиғалары және этномәдени құндылықтары туралы маңызды ақпарат сақтайтыны анықталды. Әсіресе жануарлар дүниесіне, өсімдік жамылғысына және табиғи нысандарға қатысты атаулар тарихи ландшафттардың өзгерістерін реконструкциялауда құнды дереккөзі болып табылады.

Зерттеу барысында Наурызым қорығы, Аманқарағай және Арақарағай ормандары, «Алтын Дала» мемлекеттік табиғи резерваты сияқты ерекше қорғалатын табиғи аумақтардың экологиялық маңызы айқындалды. Бұл нысандар биоалуантүрлілікті сақтау мен табиғи экожүйелердің тұрақтылығын қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.

Сонымен қатар өңірдегі киелі нысандар мен археологиялық ескерткіштердің кеңістіктік ұйымдасу ерекшеліктері анықталды. Торғай геоглифтері, Екідің ескерткіштері және басқа да тарихи-мәдени нысандар Қостанай облысының мәдени ландшафттарының маңызды құрамдас бөлігі болып табылады.

Алынған нәтижелер Қазақстанның киелі географиясын зерттеу бағытындағы бұрынғы ғылыми еңбектердің қорытындыларын толықтыра отырып, Қостанай

облысының табиғи және мәдени мұрасын кешенді қарастырудың маңыздылығын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері ерекше қорғалатын табиғи аумақтарды сақтау, тарихи-мәдени мұраны қорғау, өңірлік туристік маршруттарды әзірлеу және топонимиялық мұраны жүйелеу жұмыстарында пайдаланылуы мүмкін.

Практикалық тұрғыдан зерттеу нәтижелері Қостанай облысының табиғи және киелі нысандарының бірыңғай геоақпараттық дерекқорын қалыптастыруға, туристік-рекреациялық инфрақұрылымды жетілдіруге және өңірдің мәдени-танымдық әлеуетін арттыруға ғылыми негіз бола алады [21...23].

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Бұл зерттеуде ұсынылған деректерді жауапты автормен байланысу арқылы сұрату негізінде алуға болады.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – КС, АН; деректерді басқару – КС, АЕ; ресми талдау – КС, АЕ; әдістеме - КС, АЕ; бағдарламалық қамтамасыз ету – КС, АН; қадағалау – КС, АЕ; Визуализация - АС; бастапқы жобаны жазу – КС, АС; шолуды жазу және өңдеу – КС, АН, АЕ, АС.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1.Сапаров К.Т. Павлодар облысының топонимикасы (қазақтардың кеңістікті игеру тәжірибесінің жер-су атауларындағы көрінісі). Монография. – Алматы: Эверо, 2018. – 352 б.
2. Чигаркин А.В. Геоэкология и охрана природы Казахстана. Учебное пособие. – Алматы: Қазақ университеті, 2003. – 338 с.
3. Dmitriyev, P. S., Fomin, I. A., Sabieva, Y. V., Kakimova, M. E., & Sannikova, M. V. (2024). Assessment of the possibilities of using sacred sites and the natural and recreational potential of the North Kazakhstan region for the formation of tourist routes. Geojournal of Tourism and Geosites, 54(2), 821-830. https://doi.org/10.30892/gtg.542spl06-1257
4. Егинбаева А.Е. Сарыарка топонимикасы. Монография. – Алматы: ССК, 2019. – 224 б.
5. Сатимбеков Р.С. Топонимические свидетельства изменения ареалов некоторых млекопитающих Казахстана // Известия АН СССР, Серия географическая. – Алматы, 1982. – № 3. – С. 79-85.
6. Sultangazina, G., & Kuprijanov, A. (2023). Floral composition of the botanical natural monument “Kamenny lake tract” (Kostanay region). Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Bioscience Series, 145(4), 63-70. https://bulbio.enu.kz/index.php/main/article/view/324
7. Рашид ад-Дин. Сборник летописей. – М.; –Л., 1952. – Т. 1. – 315 с.
8. Saule, I., Bibaisha, N., Koshimova, B., et al. (2025). Lexico-semantic aspect of ancient Turkic toponyms of Kazakhstan. Forum for Linguistic Studies, 7(8), 1222-1239. https://doi.org/10.30564/fls.v7i8.9760
9. Dmitriyev, P. S., Fomin, I. A., & Wendt, J. A. (2021). Assessment and zoning of recreational facilities in the North Kazakhstan region for the development of the tourism industry. GeoJournal of Tourism and Geosites, 38(4), 1069-1075. https://doi.org/10.30892/gtg.38411-745
10. Лайсханов Ш.У., Алиаскаров Д.Т., Тобаджанов Р.Т., Исаков Е.Д. Қазақстанның физикалық-географиялық ерекшеліктері мен өзгерістерінің түркі топонимдерінде көрініс табуы // География және су ресурстары. – № 2, 2025. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-121-134.26
11. Левшин А. Описание киргиз-казачьих или киргиз-кайсацких Орд и степей. ч. I: Известия географические. – Спб., 1832. – 264 с.
12. Sadirova, K. K., Zhazykova, R. B., Yessenova, K. U., Sapina, S. M., & Mirov, M. O., Abdirova, Sh. G. (2024). The manifestation of mythical cognition in toponyms: On the material of the Turkic languages. Eurasian Journal of Applied Linguistics, 10(1), 92-103. http://dx.doi.org/10.32601/ejal.10109
13. Семенов П.П. Географическо-статистический словарь Российской империи. – Т. I. – СПб., 1863. – 716 с.
14. Мурзаев Э.М. Словарь народных географических терминов. – Москва: Мысль, 1984. – 653 с.
15. Smatova, A., Tleuberdiev, B., & Omarov, N. (2025). Linguocultural and cognitive features of Kazakh and English toponyms. Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Philology Series, 152(3), 114-132. https://doi.org/10.32523/2616-678X-2025-152-3-114-132
16. Макшеев А. Географические сведения Книги Большого Чертежа о киргизских степях и Туркестанском крае // Записки ИРГО по отд. Этнографии. – т. 6., отдел II. – Спб., 1880. – С. 1-41.
17. Tsyrempilov, N., & Bigozhin, U. (2022). A nation’s holy land: Kazakhstan’s large-scale national project to map its sacred geography. Nationalities Papers, 50(4), 704-721. https://doi.org/10.1017/nps.2021.22
18. Семенов П.П. Географическо-статический словарь Российской империи. – Т. III. – СПб., 1867. – 743 с.
19. Meirbekov, A. K., & Meiirbekov, A. K. (2021). National identity of Kazakh toponyms in the context of multilingualism. In I. Savchenko (Ed.), National interest, national identity and national security (Vol. 102, pp. 613-619). European Publisher. https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.02.02.77
20. Караман А., & Сапашев О. (2025). Система номинаций в региональной сакральной топонимии как национальный код // Bulletin of Shokan Ualikhanov Kokshetau University Philological Series, (2), 159-171. https://doi.org/10.59102/kufil/2025/iss2pp159-171
21. Yeginbayeva, A. Ye., Saparov, K. T., Abdullina, A. G., Zhensikbayeva, N. Zh., Atasoy, E., & Keikin, Ye. K. (2024). Hydrographic names and terms of Saryarka. Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, (3), 93-110.
22. Yeginbayeva, A. Ye., Atasoy, E., & Keikin, E. K. (2023). Geographical bases of the formation of toponyms of Saryarka. Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series, (144), 63-76. https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-144-3-63-76
23. Yeginbayeva, A. Ye., Saparov, K. T., Zhensikbayeva, N. Zh., & Baubekova, G. K. (2025). Geographical names of objects of the Saryarka nature reserve fund. Geography and Water Resources, (1), 153-162.

REFERENCES

1. Saparov, K. T. (2018). Pavlodar oblysynyn toponimikasy (kazaktardyn kenistikti igepy tazhiribesinin zher-su ataularyndagy korinisi) [Toponymy of Pavlodar region (reflection of Kazakh spatial development experience in place names)]. Almaty: Evero, 352 p. [in Kazakh].
2. Chigarkin, A. V. (2003). Geoekologiya i okhrana prirody Kazakhstana [Geoecology and nature protection of Kazakhstan]. Almaty: Kazakh University, 338 p. [in Russian].
3. Dmitriyev, P. S., Fomin, I. A., Sabieva, Y. V., Kakimova, M. E., & Sannikova, M. V. (2024). Assessment of the possibilities of using sacred sites and the natural and recreational potential of the North Kazakhstan region for the formation of tourist routes. *Geojournal of Tourism and Geosites*, *54*(2), 821-830. https://doi.org/10.30892/gtg.542spl06-1257
4. Yeginbayeva, A. Ye. (2019). Saryarka toponimikasy [Toponymy of Saryarka]. Almaty: SSK, 224 p. [in Kazakh].
5. Satimbekov, R. S. (1982). Toponimicheskie svidetelstva izmeneniya arealov nekotorykh mlekopitayushchikh Kazakhstana [Toponymic evidence of changes in the habitats of some mammals of Kazakhstan]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*, (3), 79-85. [in Russian].
6. Sultangazina, G., & Kuprijanov, A. (2023). Floral composition of the botanical natural monument "Kamenny lake tract" (Kostanay region). *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Bioscience Series*, *145*(4), 63-70. https://bulbio.enu.kz/index.php/main/article/view/324
7. Rashid al-Din. (1952). *Sbornik letopisei* [Collection of chronicles]. Moscow-Leningrad, Vol. 1, 315 p. [in Russian].
8. Saule, I., Bibaisha, N., Koshimova, B., et al. (2025). Lexico-semantic aspect of ancient Turkic toponyms of Kazakhstan. *Forum for Linguistic Studies*, *7*(8), 1222-1239. https://doi.org/10.30564/fls.v7i8.9760
9. Dmitriyev, P. S., Fomin, I. A., & Wendt, J. A. (2021). Assessment and zoning of recreational facilities in the North Kazakhstan region for the development of the tourism industry. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, *38*(4), 1069-1075. https://doi.org/10.30892/gtg.38411-745
10. Laiskhanov, Sh. U., Aliaskarov, D. T., Tobajanov, R. T., & Isakov, E. D. (2025). Qazaqstannyn fizikalyk-geografiyalyk erekshelikteri men ozgeristerinin turki toponimderinde korinis tabuy [Reflection of physical-geographical features and changes of Kazakhstan in Turkic toponyms]. *Geography and Water Resources*, (2), 121-134. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-2-121-134.26 [in Kazakh].
11. Levshin, A. (1832). *Opisanie kirgiz-kazachikh ili kirgiz-kaysatskikh ord i stepei. Chast I: Izvestiya geograficheskie* [Description of the Kyrgyz-Kazakh or Kyrgyz-Kaisak hordes and steppes]. St. Petersburg, 264 p. [in Russian].
12. Sadirova, K. K., Zhazykova, R. B., Yessenova, K. U., Sapina, S. M., & Mirov, M. O., Abdirova, Sh. G. (2024). The manifestation of mythical cognition in toponyms: On the material of the Turkic languages. *Eurasian Journal of Applied Linguistics*, *10*(1), 92-103. http://dx.doi.org/10.32601/ejal.10109
13. Semenov, P. P. (1863). *Geograficheskо-statisticheskiy slovar Rossiyskoy imperii* [Geographical-statistical dictionary of the Russian Empire]. Vol. I. St. Petersburg, 716 p. [in Russian].
14. Murzaev, E. M. (1984). *Slovar narodnykh geograficheskikh terminov* [Dictionary of folk geographical terms]. Moscow: Mysl, 653 p. [in Russian].
15. Smatova, A., Tleuberdiev, B., & Omarov, N. (2025). Linguocultural and cognitive features of Kazakh and English toponyms. *Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Philology Series*, *152*(3), 114-132. https://doi.org/10.32523/2616-678X-2025-152-3-114-132
16. Maksheev, A. (1880). Geograficheskie svedeniya Knigi Bolshogo Chertezha o kirgizskikh stepyakh i Turkestanskom krae [Geographical information of the Book of the Great Drawing about the Kyrgyz steppes and Turkestan region]. *Zapiski IRGO po otdeleniyu etnografii*, 6(II), 1-41. [in Russian].
17. Tsyrempilov, N., & Bigozhin, U. (2022). A nation's holy land: Kazakhstan's large-scale national project to map its sacred geography. *Nationalities Papers*, *50*(4), 704-721. https://doi.org/10.1017/nps.2021.22
18. Semenov, P. P. (1867). *Geograficheskо-statisticheskiy slovar Rossiyskoy imperii* [Geographical-statistical dictionary of the Russian Empire]. Vol. III. St. Petersburg, 743 p. [in Russian].
19. Meirbekov, A. K., & Meiirbekov, A. K. (2021). National identity of Kazakh toponyms in the context of multilingualism. In I. Savchenko (Ed.), *National interest, national identity and national security* (Vol. 102, pp. 613-619). European Publisher. https://doi.org/10.15405/epsbs.2021.02.02.77
20. Karman, A., & Sapashev, O. (2025). Sistema nominatsii v regionalnoy sakralnoy toponimii kak natsionalny kod [The system of nominations in regional sacred toponymy as a national code]. *Bulletin of Shokan Ualikhanov Kokshetau University. Philological Series*, (2), 159-171. https://doi.org/10.59102/kufil/2025/iss2pp159-171 [in Russian].
21. Yeginbayeva, A. Ye., Saparov, K. T., Abdullina, A. G., Zhensikbayeva, N. Zh., Atasoy, E., & Keikin, Ye. K. (2024). Hydrographic names and terms of Saryarka. *Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, (3), 93-110.
22. Yeginbayeva, A. Ye., Atasoy, E., & Keikin, E. K. (2023). Geographical bases of the formation of toponyms of Saryarka. *Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Chemistry. Geography. Ecology Series*, *(144)*, 63-76. https://doi.org/10.32523/2616-6771-2023-144-3-63-76
23. Yeginbayeva, A. Ye., Saparov, K. T., Zhensikbayeva, N. Zh., & Baubekova, G. K. (2025). Geographical names of objects of the Saryarka nature reserve fund. *Geography and Water Resources*, (1), 153-162.

ТОПОНИМЫ ОСОБО ОХРАНЯЕМЫХ ПРИРОДНЫХ И САКРАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ

Куат Т. Сапаров доктор географических наук, профессор, Акерке М. Нурпеисова, Айгуль Е. Егинбаева* PhD., ассоциированный профессор, Айгуль М. Сергеева кандидат географических наук, профессор

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; saparov_kt@enu.kz, akerke_140285@mail.ru, yeginbayeva_aye@enu.kz, sergeyeva_am@enu.kz
*Автор корреспондент: Айгуль Е. Егинбаева, yeginbayeva_aye@enu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Костанайская область, особо охраняемые природные территории, сакральные объекты, топонимия, сакральная география, культурное наследие, Наурзумский заповедник, резерват Алтын Дала, Торгайские геоглифы, региональный туризм.

По статье:
Получено: 03.03.2026
Пересмотрено: 10.06.2026
Принято: 23.07.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

В статье рассматриваются особенности размещения особо охраняемых природных территорий и сакральных объектов Костанайской области в контексте сохранения природного и историко-культурного наследия региона. Цель исследования заключается в комплексном анализе особо охраняемых природных территорий, сакральных объектов и связанных с ними топонимов, а также в определении их роли в формировании регионального культурно-географического пространства. Информационную основу исследования составили научные публикации, архивные материалы, картографические источники, данные полевых наблюдений и официальные сведения об особо охраняемых природных территориях. В работе использованы географический, картографический, сравнительно-географический, топонимический и историко-культурный методы исследования.

В результате исследования выявлены особенности пространственного размещения особо охраняемых природных территорий и сакральных объектов Костанайской области. Установлено, что их распространение характеризуется определёнными территориальными закономерностями и тесно связано с историческими процессами освоения территории, природными условиями и культурными традициями населения. Проведённый топонимический анализ показал, что географические названия региона содержат важную информацию о природной среде, исторических событиях и этнокультурных особенностях территории. Определены природоохранное значение Наурзумского государственного природного заповедника, государственного природного резервата «Алтын Дала», реликтовых лесных массивов Аманкарагай и Аракарагай, а также научная и культурная ценность сакральных объектов, включая Торгайские геоглифы и памятники Екідің. Полученные результаты могут быть использованы при разработке программ охраны природного и культурного наследия, совершенствовании региональной туристско-рекреационной политики и развитии исследований сакральной географии Казахстана.

TOPONYMS OF SPECIALLY PROTECTED NATURAL AND SACRED SITES OF THE KOSTANAY REGION

Kuat Saparov Doctor of Geographical Sciences, Professor, Akerke M. Nurpeisova, Aigul Yeginbayeva* PhD., associate professor, Aigul Sergeyeva Candidate of Geographical Sciences, Professor

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; saparov_kt@enu.kz, akerke_140285@mail.ru, yeginbayeva_aye@enu.kz, sergeyeva_am@enu.kz

*Corresponding author: Aigul Ye. Yeginbayeva, yeginbayeva_aye@enu.kz

KEY WORDS

Kostanay Region, protected natural areas, sacred sites, toponymy, sacred geography, cultural heritage, Naurzum State Nature Reserve, Altyn Dala State Nature Reserve, Torgai geoglyphs, regional tourism

About article:
Received: 03.03.2026
Revised: 10.06.2026
Accepted: 23.07.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This article examines the natural, historical, cultural, and toponymic characteristics of protected areas and sacred sites in the Kostanay Region of Kazakhstan. The purpose of the study is to identify the spatial distribution patterns of protected natural areas and sacred heritage sites, assess their role in preserving natural and cultural heritage, and analyze their representation in the regional toponymic system. The research is based on scientific literature, archival sources, cartographic materials, field observations, and official data on protected areas. Cartographic, comparative-geographical, toponymic, historical-cultural, and geoinformation methods were employed to achieve the research objectives.

The findings reveal distinct spatial patterns in the distribution of protected areas and sacred sites across the region. Their location is closely associated with the preservation of natural landscapes, historical settlement processes, and the cultural and spiritual traditions of local communities. The study highlights the environmental significance of the Naurzum State Nature Reserve, the Altyn Dala State Nature Reserve, and the relic forest ecosystems of Amankaragay and Arakaragay. In addition, the historical and cultural value of the Torgai geoglyphs and the Ekiidin archaeological monuments is assessed. The toponymic analysis demonstrates that geographical names preserve valuable information about the natural environment, historical events, and ethnocultural development of the region. The results can be applied in the conservation of natural and cultural heritage, the development of regional tourism strategies, and further research in the field of sacred geography.

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.

Гидрометеорология и экология

Научная статья

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА НАПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ ЛЕСОВ КОСТАНАЙСКОЙ ОБЛАСТИ

Алтын А. Жангужина PhD

Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, Қазақстан; altyn8828@mail.ru (А.А.Ж.)
* Автор корреспондент: Алтын А. Жангужина, altyn8828@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

лесные пожары, напочвенный покров, лесная подстилка, угольные остатки, пепел, постпирогенная сукцессия, индекс регенерации, NDVI

АБСТРАКТ

В статье рассматриваются особенности постпирогенной динамики напочвенного покрова лесных экосистем Костанайской области. Цель исследования – оценка закономерностей восстановления лесной подстилки, листового, травяного и древесного опада, а также динамики угольных остатков и пепла на гаревых участках различной давности с учетом типа условий местопроизрастания. Методологической основой послужили полевые исследования на пробных площадях, включающие учет запасов опада (т/га), измерение мощности лесной подстилки, анализ пирогенных остатков и расчет индекса регенерации на основе данных дистанционного зондирования (NDVI, Sentinel-2, Landsat 8).

Установлено, что на гарях 2022 года мощность подстилки минимальна (1,2...1,3 см), запасы листового и древесного опада снижены (0,2...0,6 и 0,5...0,6 т/га соответственно), а содержание угольных остатков достигает 0,6...1,0 т/га. На участках 2004...2010 гг. наблюдается увеличение толщины подстилки до 4,0...4,5 см, снижение пирогенного углерода до 0,2...0,5 т/га и рост индекса регенерации до 0,60...0,80. Фоновые территории характеризуются стабилизированными значениями (подстилка 5,2...6,2 см; индекс 0,72...0,86). Выявлено, что в ксерофильных условиях восстановление замедлено, тогда как в мезофильных и гигрофильных местообитаниях процессы гумификации и регенерации протекают значительно быстрее.

Полученные результаты подтверждают, что скорость постпирогенной сукцессии определяется годом пожара, интенсивностью огневого воздействия и почвенно-гидрологическими условиями. Напочвенный покров может рассматриваться как интегральный индикатор восстановления лесных экосистем и использоваться при разработке мероприятий по их устойчивому восстановлению.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, влияющих на уровень пожарной опасности лесных участков, является напочвенный покров [1, 2]. Он выступает важным элементом лесной экосистемы под пологом древостоя, отражая особенности микросреды и одновременно оказывая влияние на формирование микроклимата леса и свойства почвы [3...5]. Живой напочвенный покров во многом определяет характер и возможные пути распространения огня на лесной территории [6]. Кроме того, его состояние и свойства во многом обусловливают эффективность восстановления процессов лесообразования на исследуемой территории.

Напочвенный покров включает лесную подстилку, опад, мохово-лишайниковый слой и другие растительные остатки, играющие значимую роль в функционировании лесных ландшафтов. Эти элементы регулируют водно-воздушный режим почвы, создают условия для разложения органического вещества и способствуют образованию гумуса.

МРНТИ 39.01.94; 39.19.31 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2026-123-3-254-272 УДК 910.3 (574.25)

В последние годы проблема лесных пожаров приобрела особую актуальность для Костанайской области. Так, в 2022 году в Аулиекольском районе произошел один из крупнейших лесных пожаров в истории региона, охвативший свыше 43 тыс. га лесных территорий. Масштабы данного события привели к значительной трансформации лесных экосистем и обусловили необходимость изучения процессов их постпирогенного восстановления.

К числу важнейших характеристик напочвенного покрова относятся запасы и типы горючих материалов, видовой состав исходной растительности и ее мозаичная структура, а также степень проективного покрытия живыми компонентами [8...10].

В странах СНГ широко применяется классификация лесных горючих материалов, основанная на их функциональной роли в процессе горения. Вероятность возникновения и дальнейшего распространения пожара по напочвенному покрову определяется не только общим количеством горючих материалов, но и их соотношением. Особое значение имеет соотношение между материалами первой группы по классификации Н.П. Курбатского [11, 12], которые характеризуются низкой влажностью и высокой воспламеняемостью, и растительностью с повышенным содержанием влаги, способной сдерживать распространение огня.

Согласно классификации Н.П. Курбатского, лесные горючие материалы подразделяются на три основные категории:

– проводники горения — мелкие сухие растительные остатки (листья, хвоя, сухая трава), легко воспламеняющиеся и обеспечивающие быстрое распространение огня;

– материалы, поддерживающие горение — более крупные элементы, такие как ветви, кора и лесная подстилка, способствующие продолжительному тлению и развитию пожара;

– материалы, замедляющие горение — влажные мхи, зеленая травянистая растительность и кустарники, препятствующие распространению огня [13].

Распределение горючих материалов на лесных территориях отличается выраженной пространственной неоднородностью. На одних участках преобладают мелкие сухие растительные остатки, способствующие быстрому распространению огня, тогда как в других доминируют более влажные компоненты, ограничивающие развитие процесса горения. Совокупность характерных для определённой территории горючих материалов формирует конкретный тип горючих материалов, который нередко определяется по преобладающим видам растительности. В этой связи выделяют хвойные, лиственные и травянистые типы горючих материалов.

Даже в пределах одного лесного типа различия в составе напочвенного покрова могут существенно влиять на вероятность возникновения пожара, особенности его развития и скорость распространения. Наиболее высокой пожарной опасностью характеризуются сухие сосновые боры брусничного типа, отличающиеся значительным количеством легковоспламеняющихся горючих материалов.

Особенно подвержены пожарам лиственничные и сосновые леса с лишайниковым покровом. Разреженность древесного яруса в таких насаждениях способствует быстрому высыханию горючих материалов под воздействием солнечной радиации и ветра, что значительно увеличивает вероятность возгорания. Пожары в подобных лесах чаще всего имеют характер низовых и отличаются умеренной интенсивностью. Однако наличие развитого кустарникового яруса и кустистых лишайников может усиливать процесс горения, увеличивая высоту пламени и скорость распространения огня.

В светлохвойных лесах с зеленомошным покровом, относящихся к более свежим типам условий местопроизрастания, вероятность возникновения пожаров обычно ниже. Это обусловлено более высокой влажностью напочвенного покрова, связанной с благоприятными условиями роста деревьев и большей полнотой древостоев. В таких условиях горючие материалы высыхают медленнее, однако возникшие пожары могут характеризоваться устойчивым тлением, что значительно усложняет их тушение [13].

Согласно результатам зарубежных исследований, лесные пожары оказывают длительное и комплексное воздействие на почвенный покров и органическое вещество почвы [14, 15]. Как отмечает Certini, высокие температуры, возникающие во время пожара, вызывают термическое разложение гумуса и других органических соединений, что приводит к существенным изменениям химических и физических свойств почвы [14]. Восстановление ее плодородия может занимать длительное время, поскольку для регенерации почвенных микроорганизмов и растительного покрова требуются десятилетия. Особенно уязвимыми являются торфяные и гумусированные почвы, где потери органического углерода могут достигать 40...60 %.

Исследования P. Pereira, E. Brevik, M. Muñoz-Rojas и B. Miller показывают, что эффективность естественного восстановления почв во многом зависит от типа экосистемы, частоты пожаров и климатических условий. По их данным, в условиях аридных средиземноморских ландшафтов восстановление структуры почвы и почвенной биоты после пожара может занимать более 15 лет, тогда как в умеренных лесах этот процесс происходит быстрее благодаря более высокой биологической активности [15].

Кроме того, S. Doerr и C. Santín подчёркивают, что последствия лесных пожаров для почв необходимо рассматривать в контексте глобальных изменений климата и углеродного цикла, поскольку пожары существенно влияют на трансформацию и перераспределение органического углерода в экосистемах [16, 17].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Мақала жайында:
Жіберілді: 08.02.2026
Қайта қаралды: 27.02.2026
Қабылданды: 16.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Дәйексөз үшін:
Жангужина А.А., Оценка влияния лесных пожаров на напочвенный покров лесов Костанайской области// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 254-272.

Для изучения закономерностей постпирогенной трансформации лесных ландшафтов и выявления особенностей восстановления напочвенного покрова были проведены комплексные полевые и дистанционные исследования на гаревых участках различной давности в пределах лесов Костанайской области (рисунок 1).

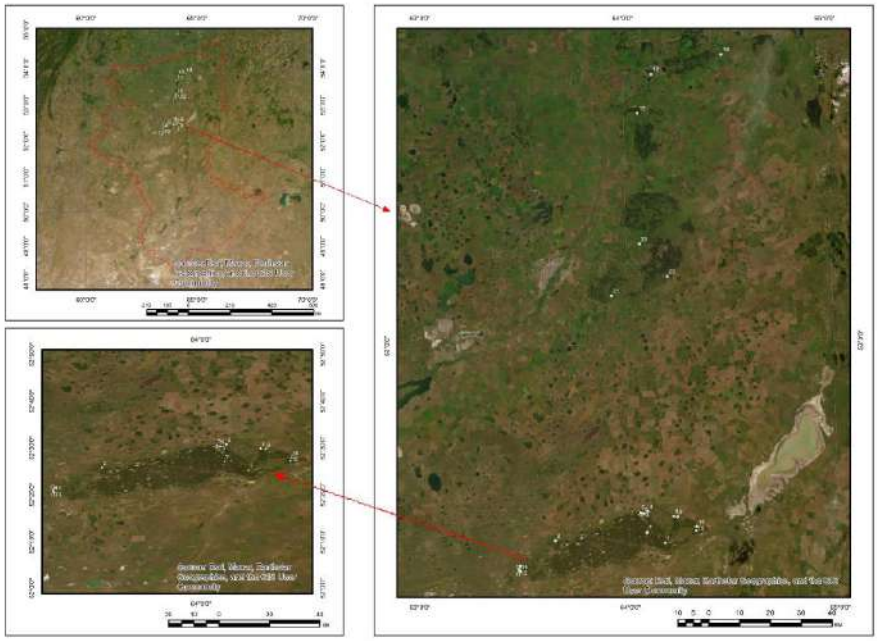


Рисунок 1. *Карта расположения лесных пробных площадей*

Методический подход основывался на сочетании геоботанических наблюдений, количественной оценки компонентов напочвенного покрова и анализа данных дистанционного зондирования Земли.

Подбор пробных площадей осуществлялся с учётом года возникновения пожара, степени огневого воздействия и типа условий местопроизрастания (ксерофильные, мезофильные и гигрофильные экотопы). Такой подход позволил проследить пространственно-временную динамику восстановительных процессов. Для обеспечения

сопоставимости полученных результатов на всех исследуемых участках применялась единая схема отбора проб и проведения измерений.

В ходе исследования определялись запасы листового, травяного и древесного опада, измерялась мощность лесной подстилки, а также оценивалось содержание пепла и углистых остатков, выступающих индикаторами интенсивности горения. Кроме того, на основе спутниковых данных был рассчитан индекс регенерации растительности. Комплексный характер применённой методики позволил получить целостное представление о процессах восстановления лесных экосистем после пожаров и выявить влияние почвенно-гидрологических условий на темпы постпирогенной сукцессии.

Лесной опад представляет собой растительный материал, накапливающийся на поверхности почвы. Он подразделяется на три основных типа: листовой опад (опавшие листья деревьев и кустарников), травяной опад (отмершие части травянистых растений) и древесный опад (опавшие ветви, кора, шишки и фрагменты стволов). Все указанные компоненты оказывают существенное влияние на почву, её структуру, содержание питательных веществ и водный режим, выполняя важную роль в функционировании лесных экосистем [18...20].

Методика оценки листового опада основана на применении стандартных опадомеров площадью 1 м², устанавливаемых на пробных площадях. Опадомер представляет собой металлическую или пластиковую ёмкость с сетчатым дном и боковыми отверстиями, обеспечивающими естественную вентиляцию и предотвращающими застой влаги. Установка опадомеров проводилась равномерно по территории пробных участков на высоте 30...50 см над поверхностью почвы, что позволяло исключить загрязнение образцов частицами грунта и снизить влияние ветрового переноса.

Сбор образцов осуществлялся ежемесячно в течение вегетационного периода. Отобранный материал высушивался при температуре 65 °C в течение 48 часов до достижения постоянной массы, после чего проводилось его взвешивание с точностью до 0,01 г. Расчёт биомассы листового опада выполнялся по формуле [14, 21].

$$Z = M/S \times 104 \quad (1)$$

где, Z – запас листового опада (т/га),

M – масса высушенного опада (г),

S – площадь пробоотбора (м²).

Оценка травяного опада проводилась методом пробных квадратов площадью 1 м², размещённых на поверхности почвы, в пределах которых фиксировались сухие остатки травянистой растительности, опавшие на грунт. Дополнительно применялись опадомеры, позволяющие учитывать мелкие фрагменты травяного опада, переносимые ветром. Сбор образцов осуществлялся в конце вегетационного периода, когда травянистая растительность завершает фазу роста и переходит в состояние отмирания. Отобранные образцы высушивались в лабораторных условиях при температуре 65 °C до достижения постоянной массы, после чего проводилось их взвешивание с точностью до 0,01 г. Расчёт запаса травяного опада выполнялся по соответствующей формуле.

Древесный опад включал опавшие ветви, кору, шишки, фрагменты стволов и другие древесные остатки. Его учёт проводился на постоянных пробных площадях размером 10 × 10 м, в пределах которых регистрировался весь древесный материал, находящийся на поверхности почвы. Для фиксации мелких древесных фракций использовались опадомеры, тогда как более крупные элементы измерялись и взвешивались непосредственно в полевых условиях.

Собранные образцы подвергались предварительной сортировке: крупные фрагменты древесного опада учитывались по длине и диаметру, а мелкие фракции высушивались при температуре 65 °C до постоянной массы. Полученные значения переводились в показатели запаса на гектар с использованием формулы 1.

Пепел и угольные остатки являются важными компонентами постпирогенного напочвенного покрова. Пепел представляет собой минеральный остаток, образующийся после сгорания органического материала. Он отражает содержание минеральных элементов, высвобождающихся в процессе горения, и может служить индикатором степени воздействия пожара на почву и растительность. Угольные остатки формируются в результате неполного сгорания органического вещества и представлены фрагментами обугленной древесины, листьев и лесной подстилки. Их наличие позволяет оценить интенсивность и продолжительность пожара, а также степень трансформации органического вещества в экосистеме [14, 21].

Лесные пожары существенно изменяют состав и структуру напочвенного покрова, приводя к накоплению пепла и углистых остатков. Эти компоненты выступают индикаторами интенсивности огневого воздействия, скорости минерализации органического вещества и последующих изменений почвенных свойств. В частности, в результате поступления минеральных компонентов пепла наблюдается повышение реакции почвенной среды: значение pH может увеличиваться на 1,2...2,0 единицы, что приводит к снижению кислотности почвы и улучшению условий для роста растений [14]. Угольные остатки обладают высокой сорбционной способностью, благодаря чему способны удерживать влагу и питательные вещества, снижая процессы эрозии и вымывания элементов питания из почвы [23].

В то же время чрезмерное накопление пепла (более 7 т/га) может вызывать уплотнение и частичную цементацию поверхностного слоя почвы, что ухудшает её водопроницаемость и замедляет процессы восстановления растительного покрова. Одновременно углистые остатки могут способствовать развитию пионерных видов растений, таких как берёза и осина, создавая благоприятные условия для ранних стадий постпирогенной сукцессии.

Особенности накопления зольных остатков во многом зависят от механического состава почв. На песчаных почвах зола относительно быстро вымывается атмосферными осадками, тогда как на суглинистых почвах она может накапливаться и дольше сохраняться в верхних горизонтах, формируя дополнительный резерв питательных веществ [14]. Таким образом, умеренное содержание пепла способствует восстановлению лесных экосистем после пожаров, тогда как его избыточное накопление может приводить к нарушению почвенных процессов.

Методика отбора проб предусматривала проведение измерений на каждой пробной площади (ПП) в пяти точках. Точки отбора располагались равномерно по территории участка на расстоянии около 10 м друг от друга, что обеспечивало репрезентативность полученных данных.

Отбор образцов осуществлялся следующим образом: на поверхности почвы устанавливалось металлическое кольцо размером 50 × 50 см (площадь 0,25 м²), после чего с поверхности собирались все зольные и углистые остатки до глубины 5 см. В каждой точке выполнялось по три повторных отбора, которые затем объединялись в одну среднюю пробу для последующего анализа [2…4, 21…23].

Лабораторная обработка включала сушку образцов в сушильном шкафу при температуре 105 °C в течение 24 часов до достижения постоянной массы. После этого проводилось измерение массы образцов до и после сушки. Взвешивание выполнялось на электронных аналитических весах с точностью ±0,01 г.

Для разделения фракций использовалось сито с размером ячейки 2 мм: мелкодисперсный пепел проходил через сито, тогда как более крупные угольные частицы задерживались на его поверхности. Полученные значения пересчитывались на единицу площади, а расчёт массы пепла на гектар выполнялся по формуле (2).

$$Z = M : S \times 104 \quad (2)$$

где Z – запас пепла (т/га),

M – масса пепла (г),
S – площадь отбора (м²).

Дополнительно рассчитывается доля угольных остатков в общей массе проб (формула 3):

$$P = M_{уголь} : M_{общ} \times 100\ \% \quad (3)$$

где, M уголь – масса угольных частиц,
M общ – общая масса проб.

Лесная подстилка (см) представляет собой слой органического материала, формирующийся на поверхности почвы и состоящий из опавших листьев, хвои, древесных остатков и продуктов их разложения. Она играет важную роль в функционировании лесных экосистем, участвуя в круговороте питательных веществ, регулировании водного режима и поддержании структуры почвы. Кроме того, мощность лесной подстилки может служить индикатором накопления органического вещества в экосистеме [18…19].

На каждой пробной площади (ПП) измерения проводились в пяти точках: одна точка располагалась в центре участка, а четыре дополнительные — по углам квадрата размером 10 × 10 м. Использование такой схемы размещения точек позволяет учитывать пространственную неоднородность последствий пожара и получать более достоверное среднее значение толщины подстилки для исследуемого участка.

Измерения выполнялись с использованием почвенного щупа. Щуп устанавливался вертикально и погружался в слой подстилки до достижения поверхности минерального горизонта почвы. Глубина проникновения щупа фиксировалась как показатель мощности лесной подстилки. В каждой точке измерение повторялось пять раз, после чего рассчитывалось среднее значение толщины подстилки для участка по формуле (4).

$$H = \sum hi : n \quad (4)$$

где, H– средняя толщина подстилки (см),
hi – измеренные значения в точках,
n – число измерений.

Сильные лесные пожары способны существенно снижать мощность лесной подстилки, уменьшая её толщину на 70...90 %. Это приводит к ослаблению её функций по удержанию влаги и защите почвы от эрозионных процессов. Гаревые участки с минимальной толщиной подстилки (менее 2 см) требуют длительного мониторинга, поскольку в таких условиях возрастает риск эрозии и деградации почвенного покрова [18…23].

Индекс регенерации представляет собой количественный показатель, позволяющий оценить степень восстановления растительного покрова на основе данных дистанционного зондирования Земли [18…23]. Данный индекс учитывает плотность растительности, её видовой состав, а также состояние почвы и её способность к восстановлению после пожара. После пожаров восстановление лесных ландшафтов определяется не только степенью выгорания растительности, но и сохранностью напочвенного покрова, который играет ключевую роль в процессах почвообразования, влагонакопления и минерализации органического вещества.

Для оценки восстановления растительности используется нормализованный вегетационный индекс NDVI, рассчитываемый по спутниковым данным Sentinel-2 и Landsat-8. На основе значений NDVI определяется индекс регенерации (IR), который отражает степень восстановления растительного покрова на гаревых участках. Расчёт индекса NDVI осуществляется по формуле (4), после чего определяется индекс регенерации (IR) на основе полученных значений NDVI.

$$IR=NDVI\ 2024 : NDVI\ pre\text{-}fire \quad (5)$$

где, NDVI (до пожара) – значение NDVI перед пожаром (по архивным снимкам).

$NDVI_{(2024)}$ – значение NDVI на текущий год.

Интерпретация полученных результатов: IR> 0.8 – полное восстановление, 0.5 ≤ IR ≤ 0.7 – умеренное восстановление, IR <0.4 – слабое восстановление.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ запасов напочвенного покрова на гаревых участках Костанайской области показал существенные различия в динамике восстановления лесной растительности. Установлено, что характер и темпы восстановления зависят от времени, прошедшего после пожара, типа почвенного покрова, интенсивности огневого воздействия, а также особенностей ландшафтных условий.

Запасы напочвенного покрова, включающие органическое вещество, сформированное из опада, растительных остатков и углистых фракций, играют важную роль в процессе восстановления лесных экосистем. Их формирование определяется скоростью разложения зольных и угольных остатков, активностью почвенной биоты, а также климатическими факторами, такими как количество атмосферных осадков и температурный режим. На участках с различными типами почв наблюдается неодинаковая интенсивность накопления лесной подстилки и древесного опада, что, в свою очередь, влияет на влагоудерживающую способность почвы и доступность питательных веществ для формирующегося растительного покрова. В песчаных и супесчаных почвах восстановление запасов напочвенного покрова происходит медленнее вследствие их низкой влагоемкости, тогда как в суглинистых и бурых лесных почвах данный процесс протекает более активно.

На пробных площадях, подвергшихся сильным пожарам 2022 года (ПП 1, 2, 5, 7), отмечается значительное снижение запасов напочвенного покрова, что приводит к ухудшению структуры почвы, уменьшению её влагоудерживающей способности и, как следствие, замедлению процессов естественной регенерации растительности. В то же время постепенное накопление органического вещества в напочвенном покрове способствует восстановлению почвенной микрофлоры, улучшению физико-химических свойств почвы и ускорению роста растительности. На противопожарных полосах и более старых гарях, где после пожара прошло более десяти лет, наблюдается постепенное восстановление лесной подстилки и древесного опада, что способствует активизации процессов почвообразования и стабилизации лесных экосистем.

Разработанная нами матрица запасов напочвенного покрова в различных лесорастительных условиях исследуемого региона представлена в таблице 1.

Таблица 1

Матрица запаса напочвенного покрова в различных лесорастительных условиях региона исследования

№	Координаты	Ландшафтное описание	Год пожара	Пепел (т/га)	Угольные остатки (т/га)	Листовой опад (т/га)	Травяной опад (т/га)	Древесный опад (т/га)	Лесная подстилка (см)	Индекс регенерации
1	52°25′14.70′′ N 64°10′11.59′′ E	Сосновый бор на слабовсхолмленных древнеаллювиальных равнинах на серых лесных песчаных почвах	2022	1,2	0,6	0,6	0,1	0,5	1,2	0,4

2	52°25′52.55′′ N 63°38′48.83′′ E	Гаревые участки в сосновом бору на дюнах на песчаных почвах	2022	2,4	0,8	0,27	0,14	0,6	1,3	0,5
3	52°30′21.46′′ N 64°4′16.48′′E	Сосново-берёзовые леса на песчаных холмах на бурых лесных супесчаных почвах		1,5	0,3	1,2	0,4	0,8	5,2	0,7
4	52°30′47.54′′ N 64°5′26.08′′E	Лиственные и сосновые леса с преобладанием черемухи и осины на бурых лесных супесчаных почвах	2004	1,0	0,2	1,0	0,25	0,9	4,0	0,8
5	52°30′38.52′′ N 64°3′21.89′′E	Смешанный сосново-березово-осиновый лес на боровых песках с густым подлеском на песчаных и супесчаных почвах	2022	3,0	1,0	0,2	0,1	0,6	1,2	0,6
6	52°30′24.12′′ N 64°4′0.61′′E	Сосновый лес на слабовсхолмленных равнинах с серыми лесными супесчаными почвами		1,1	0,3	1,3	0,2	0,9	5,3	0,7
7	52°27′9.06′′ N 64°5′3.56′′E	Сосновый бор на всхолмленных равнинах на боровых песках на песчаных и супесчаных почвах	2022	2,8	0,9	0,2	0,3	0,5	1,20	0,6
8	52°29′54.12′′ N 64°12′47.45′′ E	Сосновый лес на всхолмленных равнинах с боровыми песками на песчаных и супесчаных почвах		1,3	0,3	1,4	0,3	1,1	6,2	0,8
9	52°29′47.79′′ N 64°13′52.47′′ E	Сосновый лес на всхолмленных равнинах с боровыми песками на песчаных и супесчаных почвах		1,2	0,3	1,5	0,2	1,0	6,0	0,8
10	52°21′30.18′′ N 63°28′41.52′′ E	Смешанный сосново-березовый лес на боровых песках на песчаных и супесчаных		1,4	0,3	1,6	0,4	1,1	6,2	0,9

		почвах								
11	52°20′53.44′′ N 63°28′20.49′′ E	Сосново-березовый лес на песчаных массивах с дерново-подзолистыми супесчаными почвами		1,3	0,3	1,5	0,3	1,1	5,9	0,8
12	52°20′45.28′′ N 63°28′23.14′′ E	Смешанный сосново-березовый лес на боровых песках на песчаных и супесчаных почвах		1,1	0,2	1,2	0,2	1,1	5,5	0,8
13	52°20′32.27′′ N 63°28′33.71′′ E	Сосновых лес на мелкобугристых всхолмлениях на песчаных почвах		1,5	0,4	1,7	0,3	0,9	5,9	0,8
14	52°20′31.22′′ N 63°28′32.71′′ E	Березовый лес на древнеаллювиальных равнинах на дерново-подзолистых супесчаных почвах		1,2	0,3	1,3	0,2	0,50	5,8	0,8
15	52°27′17.02′′ N 64°19′10.66′′ E	Сосновый лес на слабовсхолмленных равнинах на бурых лесных супесчаных почвах		1,3	0,3	1,4	0,2	0,9	5,2	0,8
16	52°27′59.07′′ N 64°19′20.76′′ E	Сосново-березовый лес на бурых лесных супесчаных почвах		1,2	0,3	1,5	0,2	0,9	5,5	0,7
17	53°40'27.5"N 64°4'3.9"E	Сосновый бор на эоловых массивах с черноземными суглинистыми почвами	2020	2,2	0,6	1,1	0,5	0,5	2,5	0,7
18	53°47'16"N 64°08'19"E	Сосновый бор на эоловых массивах с серыми лесными песчаными почвами		1,4	0,4	1,6	0,3	0,9	5,7	0,8
19	53°50'30"N 64°29'08"E	Лиственные леса на пойменных равнинах на черноземных суглинистых почвах	2010	1,0	0,2	1,1	0,3	0,72	4,5	0,8
20	53°17'27.6"N 64°4'20.6"E	Гаревые участки в бывших сосновых лесах на эоловых песчаных массивах с	2010	0,8	0,5	0,6	1,5	0,60	4,0	0,6

		черноземными супесчаными почвами								
21	53°08'35"N 63°55'42"E	Лиственные леса на пойменных равнинах с преобладанием осины и черемухи на черноземных супесчаных почвах	2009	1	0,3	1,2	0,28	0,59	4,4	0,6
22	53°14'30"N 64°18'22"E	Сосновый лес на эоловых песчаных массивах на песчаных и супесчаных почвах		1,5	0,42	1,6	0,3	0,85	5,5	0,8

В исследуемом регионе лесной опад играет важную роль в восстановлении лесных экосистем после пожаров. Его количество и состав зависят от возраста гаревых участков, породного состава древостоя и почвенно-гидрологических условий. В первые годы после пожара, как правило, наблюдается активное накопление травянистого опада, тогда как доля листового и древесного опада увеличивается по мере восстановления древесной растительности и формирования древостоя.

Лесной опад является одним из информативных показателей динамики постпирогенного восстановления лесных экосистем. Его количественные и качественные характеристики позволяют оценить процессы накопления органического вещества, изменения биологической продуктивности и устойчивость растительного покрова к внешним воздействиям [18…20].

В ходе исследования были проанализированы три основных компонента опада — листовой, травяной и древесный, а также их связь с типом условий местопроизрастания, составом лесных насаждений и давностью пожара. Установлено, что на гаревых участках 2022 года показатели листового и древесного опада остаются низкими, что объясняется отсутствием сформировавшегося древостоя и ограниченным вкладом древесной растительности в формирование напочвенного покрова. Напротив, на участках с давностью пожара более 10 лет наблюдается увеличение доли древесного опада, что свидетельствует о восстановлении структуры леса и постепенном формировании лесной подстилки.

Анализ динамики напочвенного покрова показал, что интенсивность накопления опада определяется не только возрастом насаждений, но и особенностями почвенного субстрата. В условиях песчаных почв и подзолистых супесей процесс накопления органического вещества протекает медленнее, тогда как бурые лесные, чернозёмные супесчаные и суглинистые почвы способствуют более активному накоплению листового и древесного опада.

Диапазон значений травяного опада на гаревых участках исследуемых пробных площадей варьирует от 0,1 до 1,5 т/га. На старых гарях (пробные площади 4, 19, 20, 21), сформировавшихся в период 2004...2010 гг., отмечается более высокое накопление травяного опада (0,25...1,5 т/га) по сравнению с гарями 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7), где значения составляют лишь 0,1...0,15 т/га (рисунок 2).

Рисунок 2. *Травяной опад на ПП 4*

Это свидетельствует о постепенном восстановлении древесного яруса, активном развитии травянистого покрова и формировании более устойчивого лесного сообщества. Максимальное значение травяного опада (1,5 т/га) зафиксировано на гаревых участках пробной площади 20, расположенной в сосновых лесах на эоловых песчаных массивах с чернозёмными супесчаными (мезофильными) почвами. Высокий показатель объясняется благоприятными условиями увлажнения, способствующими интенсивному развитию травянистой растительности, а также высокой сомкнутостью древостоя, формирующей благоприятный микроклимат и поддерживающей высокую биопродуктивность напочвенного покрова.

Сравнение с фоновыми территориями показывает, что уровень травяного опада на гаревых участках 2004...2010 годов приближается к значениям фоновых лесов (0,2...0,6 т/га), однако остаётся несколько выше. Это указывает на продолжающийся процесс зарастания поверхности почвы травянистыми видами и активное накопление органического вещества в напочвенном покрове. В то же время на гарях 2022 года значения травяного опада значительно ниже, что обусловлено отсутствием сформировавшегося древостоя и недостаточным накоплением органической массы на начальных стадиях постпирогенного восстановления экосистем.

Также прослеживается зависимость динамики травяного опада от типа почвенного субстрата. В условиях песчаных и супесчаных почв (пробные площади 1, 2, 5, 7) процессы накопления органического вещества протекают медленнее, тогда как на бурых лесных супесчаных почвах (ПП 4), а также на чернозёмных суглинистых (гигрофильных) и чернозёмных супесчаных (мезофильных) почвах (пробные площади 19, 20, 21) интенсивность накопления опада значительно выше.

Таким образом, пространственно-временная динамика опада выступает важным индикатором восстановительных процессов в лесных экосистемах, пострадавших от пожаров, и может использоваться для оценки эффективности естественной регенерации лесных ландшафтов.

Листовой опад также играет значительную роль в формировании напочвенного покрова, обогащая почву органическим веществом и способствуя восстановлению экосистем после пожаров. На гаревых участках 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7) его значения варьируют в пределах 0,2...0,6 т/га, что существенно ниже по сравнению с фоновыми лесными участками, где показатели составляют 1,2...1,7 т/га. Низкие значения листового опада обусловлены отсутствием сомкнутого древостоя и слабым развитием древесной растительности. На гарях 2004...2010 годов (пробные площади 4, 19, 20, 21) наблюдаются

более высокие значения листового опада — 1,0...1,2 т/га, однако они всё ещё уступают показателям фоновых лесов (рисунок 3).

Рисунок 3. *Листовой опад на ПП 3*

Это свидетельствует о продолжительном восстановлении лесных экосистем, изменении видового состава древесного полога и недостаточной сомкнутости крон, что приводит к сниженной продуктивности листового опада.

Замедленное накопление листового опада может быть связано с типом почвенного субстрата. В песчаных и супесчаных (ксерофильных) условиях (пробные площади 1, 2, 5, 7) процесс протекает медленнее, чем на бурых лесных супесчаных (ПП 4), черноземных суглинистых (гигрофильных) и черноземных супесчаных (мезофильных) почвах (пробные площади 4, 19, 20, 21), что дополнительно объясняет различия в восстановлении напочвенного покрова.

Таким образом, листовой опад на старых гаревых участках постепенно увеличивается, но его уровень по-прежнему ниже фоновых значений, что указывает на неполное восстановление структуры лесного покрова.

Древесный опад включает в себя остатки коры, ветвей и других частей деревьев, и его динамика отражает интенсивность обновления древостоя и формирование устойчивого лесного сообщества. На гарях 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7) его уровень остается низким (0.5...0.6 т/га), что связано с отсутствием сформировавшегося древостоя и преобладанием травянистых видов на начальных стадиях восстановления. Лесные экосистемы этих участков находятся в ранней фазе сукцессионных процессов, когда основной вклад в напочвенный покров вносят листовой и травяной опад, а поступление древесного материала остается минимальным.

В то же время на гарях 2004...2010 годов (пробные площади 4, 19, 20, 21) наблюдается постепенное увеличение древесного опада (0.59...0.9 т/га), что свидетельствует о формировании устойчивого лесного сообщества и приближении показателей к фоновым значениям (0.8...1.1 т/га) (рисунок 4).

Рисунок 4. *Древесный опад на ПП 21*

Дополнительно тип почвенного субстрата влияет на динамику восстановления. В песчаных и супесчаных условиях (пробные площади 1, 2, 5, 7) накопление древесного опада замедлено из-за низкой влагоёмкости и слабого развития древесных видов. На бурых лесных супесчаных, чернозёмных суглинистых (гигрофильных) и чернозёмных супесчаных (мезофильных) почвах (пробные площади 4, 19, 20, 21) его значения выше, что указывает на более благоприятные условия для развития лесных сообществ.

Таким образом, древесный опад является важным индикатором восстановления лесных экосистем. По мере формирования древостоя на гарях 2022 года ожидается его увеличение, что приведёт к стабилизации структуры лесного покрова и завершению ранних этапов восстановления.

Анализ динамики лесной подстилки, листового и древесного опада на гаревых участках различной давности позволяет оценить процессы постпирогенного восстановления лесных экосистем. Формирование этих компонентов определяется совокупностью факторов: климатическими условиями, почвенно-гидрологическими особенностями, интенсивностью пожара и биотическими процессами. Их мощность зависит от возраста пожара, условий местопроизрастания и типа лесных сообществ.

Толщина лесной подстилки на исследуемых участках варьирует от 1.2 до 5.7 см. Минимальные значения (1.2...1.3 см) отмечены на гарях 2020...2022 гг., где сильное горение привело к минерализации органического слоя. Максимальные значения (5.2...6.2 см) зафиксированы на фоновых участках с благоприятными условиями увлажнения и замедленным разложением органики.

Гаревые участки 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7) характеризуются тонким слоем подстилки (1.2...1.3 см). Высокая концентрация угольных остатков (0.6...1.0 т/га) указывает на интенсивное выгорание органического горизонта. Древесный опад здесь находится на начальной стадии восстановления (около 0.5 т/га), что связано с отсутствием сомкнутого древостоя и преобладанием травянистой растительности. Листовой опад составляет 0.2...0.6 т/га, что значительно ниже фоновых значений (1.2...1.7 т/га) и свидетельствует о замедленной регенерации древесных пород.

На гарях 2004...2010 гг. (пробные площади 4, 19, 20, 21) мощность подстилки увеличивается до 4.0...5.1 см. Средняя толщина подстилки на участках 2009...2010 гг. достигает 4.5 см, а на участке 2004 г. составляет около 4.0 см, что указывает на постепенное восстановление биологической продуктивности. Здесь наблюдается снижение содержания угольных остатков (0.5...0.8 т/га) и стабилизация поступления детрита. Древесный опад

составляет 0.5...0.8 т/га, а листовой — 1.0...1.3 т/га, однако эти значения всё ещё ниже фоновых.

Фоновые участки (например, пробные площади 3, 14, 18) характеризуются максимальной мощностью подстилки (5.2...5.7 см), что связано с благоприятными условиями увлажнения и интенсивным поступлением органического материала. В зрелых лесных сообществах уровень древесного опада стабилен (0.5...0.6 т/га), а листовой достигает 1.3...1.7 т/га.

Процесс восстановления лесной подстилки после пожара проходит несколько стадий [2, 14, 23].:

– ранняя стадия (0...5 лет) — интенсивное разложение угольных остатков и минимальная мощность подстилки (1.2...1.3 см);

– средняя стадия (10...20 лет) — формирование устойчивого органического слоя (2.5...5.1 см) и увеличение биопродуктивности;

– поздняя стадия (>30 лет) — максимальная мощность подстилки (5.2...5.7 см), характерная для зрелых лесных сообществ.

Таким образом, восстановление подстилки определяется комплексом климатических, почвенных и биотических факторов. Гаревые участки 2022 года демонстрируют начальную стадию восстановления, тогда как на гарях 2004...2010 годов наблюдается постепенная стабилизация экосистемных процессов.

Изучение пепла и угольных остатков на участках различной давности позволяет оценить интенсивность огневого воздействия и динамику постпирогенных изменений.

На гарях 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7) зафиксированы максимальные концентрации пепла (1.2...3.0 т/га) и угольных остатков (0.6...1.0 т/га), что свидетельствует о высокой интенсивности пожара.

На гарях возрастом 10...20 лет (пробные площади 4, 19, 20, 21) содержание пепла снижается до ~1.0 т/га, а угольных остатков — до 0.2...0.5 т/га вследствие их минерализации и вымывания.

На фоновых территориях содержание угольных остатков составляет около 0.3 т/га, что указывает на стабилизацию органического горизонта.

Динамика пирогенных остатков подтверждает постепенное уменьшение их концентрации с увеличением давности пожара. В ксероморфных песчаных почвах разложение углеродных остатков происходит медленнее, тогда как в увлажнённых почвах процессы деградации и вымывания протекают интенсивнее.

Анализ индекса регенерации также выявил различия в скорости восстановления растительного покрова. На гарях 2022 года индекс составляет 0.40...0.61, на участках 2004...2010 гг. — 0.60...0.80, а на фоновых территориях достигает 0.72...0.86. Это свидетельствует о постепенном восстановлении лесных сообществ и стабилизации экосистемных процессов.

Таким образом, восстановление лесных экосистем зависит от давности пожара и условий местопроизрастания. В ксерофильных условиях процессы регенерации протекают медленнее, тогда как в мезофильных и гигрофильных экотопах восстановление происходит значительно быстрее. Эти различия необходимо учитывать при разработке мероприятий по восстановлению лесных ландшафтов.

Полученные результаты согласуются с выводами зарубежных и отечественных исследователей, изучавших динамику напочвенного покрова после пожаров и его роль в процессах постпирогенной сукцессии. По данным Certini [24], пожары приводят к значительным изменениям химических и физических свойств лесной подстилки и органического вещества почвы. В первые годы после пожара наблюдается резкое снижение запасов опада вследствие его полного или частичного выгорания. Восстановление напочвенного покрова зависит от типа растительности, климатических условий и интенсивности пожара. Аналогичные выводы получены и отечественными исследователями. Так, Софронов и Волокитина [25] отмечают, что пирогенное воздействие приводит к

разрушению органического горизонта почвы и изменению структуры напочвенного покрова, а Иванова [26] указывает на важную роль лесной подстилки в процессах восстановления лесных экосистем после пожаров.

Исследования DeBano [27] показали, что восстановление лесной подстилки тесно связано с динамикой регенерации растительности. В первые годы после пожара зольные отложения и угольные остатки оказывают значительное влияние на химический состав почвы, изменяя доступность питательных элементов и водный режим, что в дальнейшем определяет скорость разложения вновь формирующегося опада. Knicker [30] отмечает, что пирогенный углерод, образующийся в процессе горения, может накапливаться в составе подстилки и почвы, влияя на микробиологическую активность и процессы гумификации.

Исследования Santín [2] показывают, что скорость разложения углеродных остатков во многом зависит от условий увлажнения. В условиях повышенной влажности активность микроорганизмов возрастает, что ускоряет процессы минерализации органического вещества. В более засушливых регионах пирогенный углерод отличается высокой устойчивостью к микробной деградации и может сохраняться в составе лесной подстилки в течение длительного времени.

По данным Preston и Schmidt [29], скорость восстановления лесного покрова после пожара во многом определяется динамикой накопления лесного опада и формированием нового органического горизонта. В экосистемах с активным восстановлением древесных пород наблюдается более быстрое накопление опада и формирование устойчивой лесной подстилки. Pereira и соавторы [15] отмечают, что пирогенный углерод и зольные остатки могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на рост молодых растений в зависимости от их концентрации и химического состава.

Согласно исследованиям González-Pérez [30], углеродные остатки, образующиеся при горении органического вещества, могут сохраняться в почвах на протяжении 15...20 лет, особенно в песчаных почвах с низкой биологической активностью.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что интенсивность постпирогенных изменений лесных экосистем определяется сочетанием климатических факторов, почвенных условий, химического состава пирогенных остатков и структуры растительного покрова.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа влияния пожаров на напочвенный покров показали, что выявленные закономерности динамики лесного опада, формирования лесной подстилки и влияния углеродных остатков на восстановление растительности в целом соответствуют данным зарубежных исследований. Они подтверждают, что интенсивность постпирогенных трансформаций определяется совокупностью факторов, включая климатические условия, химический состав пирогенных остатков и особенности растительных сообществ.

На основе проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

– Установлено, что постпирогенная динамика лесов Костанайской области определяется временем, прошедшим после пожара, интенсивностью огневого воздействия и условиями местообитания. На гарях 2022 года (пробные площади 1, 2, 5, 7) мощность лесной подстилки остаётся минимальной (1,2...1,3 см), тогда как на участках, пройденных пожарами 2004...2010 гг., органический слой стабилизируется до 4,0...4,5 см, что сопровождается увеличением индекса регенерации.

– Значения листового и травяного опада минимальны на молодых гарях и увеличиваются по мере формирования древостоя. Древесный опад возрастает с 0,5...0,6 т/га в первые годы после пожара до 0,8...1,1 т/га в более зрелых сообществах. Одновременно содержание угольных остатков снижается с 0,6...1,0 т/га до 0,2...0,5 т/га через 10...20 лет, что отражает постепенное восстановление биогеохимических процессов.

– Индекс регенерации варьирует от 0,40...0,61 на гарях 2022 года до 0,60...0,80 на участках после пожаров 2004...2020 гг., однако остаётся ниже фоновых значений (0,72...0,86).

В мезофильных условиях восстановление происходит быстрее (индекс до 0,8), тогда как в ксерофильных местообитаниях значения остаются на уровне 0,40...0,70, что связано с более низкой продуктивностью древесного яруса.

– Восстановление лесных экосистем сопровождается постепенным накоплением органического вещества и улучшением свойств почвы. В благоприятных условиях этот процесс занимает около 20...30 лет, тогда как на бедных и аридных почвах может продолжаться более 50 лет.

Почвенно-грунтовые условия исследованных пробных площадей в целом благоприятны для произрастания древесной растительности и поддержания биологической активности почв, что способствует постепенному восстановлению лесных экосистем после пожаров.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

В данном исследовании использованные данные были получены авторами из открытых источников.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ААЖ; управление данными – ААЖ; формальный анализ – ААЖ; методология – ААЖ; программное обеспечение – ААЖ; руководство исследованием – ААЖ; визуализация – ААЖ; написание первоначального варианта рукописи – ААЖ; рецензирование и редактирование – ААЖ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pereira P., Brevik E.C., Muñoz-Rojas M., Miller B.A. Soil and fire: impacts of wildfires on soil properties and ecosystem functioning // Land Degradation & Development. – 2018. – Vol. 29. – P. 405–421.
2. Santín C., Doerr S.H. Fire effects on soils: the human dimension // Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2016. – Vol. 371.
3. Doerr S.H., Santín C. Global trends in wildfire and its impacts on soil // Nature Reviews Earth & Environment. – 2021. – Vol. 2. – P. 398–413.
4. Pellegrini A.F.A., Jackson R.B.The long-term impacts of fire on ecosystems and soil carbon // Nature Geoscience. – 2020. – Vol. 13. – P. 728–735.
5. Holden Z.A., Jolly W.M., Parsons R.A. Influence of fuel moisture and vegetation structure on wildfire activity // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10.
6. Smith A.M.S., Kolden C.A., Bowman D.M.J.S.
Biophysical controls of fire regimes and vegetation response // Global Ecology and Biogeography. – 2021.
7. Yebra M., Dennison P.E., Chuvieco E., Riaño D. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 215. – P. 1–14.
8. Keane R.E. Wildland Fuel Fundamentals and Applications. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2023.
9. Scott J.H., Burgan R.E. Standard fire behavior fuel models and their applications in fire danger assessment // USDA Forest Service Research. – 2017.
10. Chuvieco E., Pettinari M.L., Yebra M. et al. Advances in global fire danger estimation using satellite data // Remote Sensing of Environment. – 2020.
11. Курбатский Н.П. Лесные горючие материалы и их роль в распространении лесных пожаров. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
12. Курбатский Н.П. Исследование лесных горючих материалов. – Новосибирск: Наука, 1970. – 312 с.
13. Иванова Г.А., Конард С.Г. Лесные горючие материалы и пожары в лесах Сибири. – Красноярск: Институт леса СО РАН, 2019.
14. Certini G., Moya D., Lucas-Borja M.E., Mastrolonardo G. The impact of fire on soil organic matter and soil functions: a review // Forest Ecology and Management. – 2021. – Vol. 488.
15. Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E. et al. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity // Nature. – 2018. – Vol. 553. – P. 194–198.
16. Moody J.A., Shakesby R.A., Robichaud P.R. et al. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes // Earth-Science Reviews. – 2013. – Vol. 122. – P. 10–37.
17. Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G. Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle // Global Change Biology. – 2016. – Vol. 22. – P. 1621–1633.
18. Berg B., McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. – 3rd ed. – Berlin: Springer, 2020.
19. Prescott C.E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling // Tree Physiology. – 2018. – Vol. 38. – P. 1641–1655.
20. Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // Journal of Plant Ecology. – 2018. – Vol. 11. – P. 1–14.
21. Harmon M.E., Fasth B., Woodall C., Sexton J. Carbon concentration of standing and downed dead wood and litter in forest ecosystems // Forest Ecology and Management. – 2019. – Vol. 432. – P. 770–780.
22. Pettorelli N. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // Satellite Remote Sensing for Conservation. – Oxford: Oxford University Press, 2016.
23. Veraverbeke S., Hook S., Hulley G. An alternative spectral index for rapid fire severity assessment // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 205. – P. 108–117.
24. Jones M.W., Santín C., van der Werf G.R., Doerr S.H. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon // Nature Geoscience. – 2019.
25. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирология леса. – Красноярск: Институт леса СО РАН, 2007.
26. Иванова Г.А.Лесные пожары и их влияние на лесные экосистемы Сибири. – Красноярск: СО РАН, 2014.
27. Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J. et al. Fire on Earth: An Introduction. – Wiley-Blackwell, 2014.

28. Knicker H.How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? // Biogeochemistry. – 2007. – Vol. 85. – P. 91–118.
29. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. – 2015.
30. González-Pérez J.A., González-Vila F.J., Almendros G., Knicker H. The effect of fire on soil organic matter: a review // Environment International. – 2004. – Vol. 30. – P. 855–870.

REFERENCES

1 Pereira P., Brevik E.C., Muñoz-Rojas M., Miller B.A. Soil and fire: impacts of wildfires on soil properties and ecosystem functioning // Land Degradation & Development. – 2018. – Vol. 29. – P. 405–421.
2 Santín C., Doerr S.H. Fire effects on soils: the human dimension // Philosophical Transactions of the Royal Society B. – 2016. – Vol. 371.
3 Doerr S.H., Santín C.Global trends in wildfire and its impacts on soil // Nature Reviews Earth & Environment. – 2021. – Vol. 2. – P. 398–413.
4 Pellegrini A.F.A., Jackson R.B.The long-term impacts of fire on ecosystems and soil carbon // Nature Geoscience. – 2020. – Vol. 13. – P. 728–735.
5 Holden Z.A., Jolly W.M., Parsons R.A. Influence of fuel moisture and vegetation structure on wildfire activity // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10.
6 Smith A.M.S., Kolden C.A., Bowman D.M.J.S. Biophysical controls of fire regimes and vegetation response // Global Ecology and Biogeography. – 2021.
7 Yebra M., Dennison P.E., Chuvieco E., Riaño D. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 215. – P. 1–14.
8 Keane R.E. Wildland Fuel Fundamentals and Applications. – 2nd ed. – Berlin: Springer, 2023.
9 Scott J.H., Burgan R.E. Standard fire behavior fuel models and their applications in fire danger assessment // USDA Forest Service Research. – 2017.
10 Chuvieco E., Pettinari M.L., Yebra M. et al. Advances in global fire danger estimation using satellite data // Remote Sensing of Environment. – 2020.
11 Kurbatskii N.P. Lesnye goryuchie materialy i ikh rol' v rasprostranenii lesnykh pozharov. – M.: Nauka, 1975. – 256 s.
12 Kurbatskii N.P. Issledovanie lesnykh goryuchikh materialov. – Novosibirsk: Nauka, 1970. – 312 s.
13 Ivanova G.A., Konard S.G. Lesnye goryuchie materialy i pozhary v lesakh Sibiri. – Krasnoyarsk: Institut lesa SO RAN, 2019.
14 Certini G., Moya D., Lucas-Borja M.E., Mastrolonardo G. The impact of fire on soil organic matter and soil functions: a review // Forest Ecology and Management. – 2021. – Vol. 488.
15 Pellegrini A.F.A., Ahlström A., Hobbie S.E. et al. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity // Nature. – 2018. – Vol. 553. – P. 194–198.
16 Moody J.A., Shakesby R.A., Robichaud P.R. et al. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes // Earth-Science Reviews. – 2013. – Vol. 122. – P. 10–37.
17 Santín C., Doerr S.H., Preston C.M., González-Rodríguez G. Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle // Global Change Biology. – 2016. – Vol. 22. – P. 1621–1633.
18 Berg B., McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. – 3rd ed. – Berlin: Springer, 2020.
19 Prescott C.E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling // Tree Physiology. – 2018. – Vol. 38. – P. 1641–1655.
20 Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // Journal of Plant Ecology. – 2018. – Vol. 11. – P. 1–14.
21 Harmon M.E., Fasth B., Woodall C., Sexton J. Carbon concentration of standing and downed dead wood and litter in forest ecosystems // Forest Ecology and Management. – 2019. – Vol. 432. – P. 770–780.
22 Pettorelli N.Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) // Satellite Remote Sensing for Conservation. – Oxford: Oxford University Press, 2016.
23 Veraverbeke S., Hook S., Hulley G. An alternative spectral index for rapid fire severity assessment // Remote Sensing of Environment. – 2018. – Vol. 205. – P. 108–117.
24 Jones M.W., Santín C., van der Werf G.R., Doerr S.H. Global fire emissions buffered by the production of pyrogenic carbon // Nature Geoscience. – 2019.
25 Sofronov M.A., Volokitina A.V. Pirologiya lesa. – Krasnoyarsk: Institut lesa SO RAN, 2007.
26 Ivanova G.A.Lesnye pozhary i ikh vliyanie na lesnye ekosistemy Sibiri. – Krasnoyarsk: SO RAN, 2014.
27 Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J. et al. Fire on Earth: An Introduction. – Wiley-Blackwell, 2014.
28 Knicker H.How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? // Biogeochemistry. – 2007. – Vol. 85. – P. 91–118.
29 Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // Nature. – 2015.
30 González-Pérez J.A., González-Vila F.J., Almendros G., Knicker H. The effect of fire on soil organic matter: a review // Environment International. – 2004. – Vol. 30. – P. 855–870.

ҚОСТАНАЙ ОБЛЫСЫ ОРМАНДАРЫНЫҢ ЖЕРҮСТІ ЖАМЫЛҒЫСЫНА ОРМАН ӨРТТЕРІНІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Алтын А. Жангужина PhD

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; altyn8828@mail.ru (А.А.Ж.)
*Автор корреспондент: Алтын Жангужина, altyn8828@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

орман өрттері, жерүсті жамылғысы, орман төсеніші, көмір қалдықтары, күл, өрттен кейінгі сукцессия, қалпына келу индексі, NDVI индексі

По статье:
Получено: 11.03.2026
Пересмотрено: 30.03.2026
Принято: 06.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АҢДАТПА

Мақалада Қостанай облысының орман экожүйелерінде өрттен кейін қалыптасатын жерүсті жамылғысының өзгеру барысы қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – әртүрлі жылдары өртенген аумақтарда орман төсенішінің, жапырақ, шөптесін және сүрек қалдықтарының қайта қалыптасу заңдылықтарын, сондай-ақ көмір қалдықтары мен күлдің өзгерісін өсу ортасының ерекшеліктеріне байланысты бағалау.

Зерттеу жұмысы далалық бақылауларға негізделді. Сынақ алаңдарында өсімдік қалдықтарының қоры (т/га) есептеліп, орман төсенішінің қалыңдығы өлшенді, өрттен қалған қалдықтарға талдау жүргізілді. Сонымен қатар, қашықтан зондтау деректері (NDVI, Sentinel-2, Landsat 8) пайдаланылып, қалпына келу деңгейі бағаланды.

Нәтижесінде 2022 жылы өртенген аумақтарда орман төсенішінің өте жұқа екені (1,2...1,3 см), жапырақ пен сүрек қалдықтарының азайғаны (тиісінше 0,2...0,6 және 0,5...0,6 т/га), ал көмір қалдықтарының мөлшері жоғары (0,6...1,0 т/га) екені анықталды. 2004...2010 жылдары өртенген учаскелерде төсеніш қалыңдығы 4,0...4,5 см-ге дейін жетіп, көмір қалдықтары азайған (0,2...0,5 т/га), ал өсімдіктің қайта қалпына келу көрсеткіші артқаны байқалды (0,60...0,80). Табиғи (фондық) аумақтарда көрсеткіштер тұрақты деңгейде қалыптасқан (төсеніш 5,2...6,2 см; көрсеткіш 0,72...0,86). Зерттеу көрсеткендей, қуаң (ксерофильді) жағдайларда қалпына келу баяу жүреді, ал ылғалы жеткілікті (мезофильді және гигрофильді) ортада бұл үдерістер жылдамырақ жүзеге асады. Жалпы алғанда, өрттен кейінгі өзгерістердің қарқыны өрттің болған уақытына, оның күшіне және топырақ пен ылғал жағдайына байланысты. Жерүсті жамылғысы орман экожүйесінің қалпына келу деңгейін сипаттайтын маңызды көрсеткіш ретінде қарастырылып, оларды тиімді қалпына келтіру шараларын жоспарлауда қолдануға болады.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF FOREST FIRES ON THE FOREST FLOOR COVER OF THE FORESTS OF KOSTANAY REGION

Altyn Zhanguzhina PhD

L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; altyn8828@mail.ru (A.A.Zh.)
Corresponding author: Altyn Zhanguzhina, altyn8828@mail.ru

KEY WORDS

forest fires, forest floor cover, forest litter, charcoal residues, ash, post-fire succession, regeneration index, NDVI vegetation index.

ABSTRACT

The article examines the features of post-fire (post-pyrogenic) dynamics of the forest floor cover in forest ecosystems of the Kostanay region. The aim of the study is to assess the patterns of recovery of forest litter, leaf, herbaceous, and woody litterfall, as well as the dynamics of charcoal residues and ash on burned sites of different ages, taking into account site conditions. The methodological basis consisted of field studies conducted on sample plots, including the assessment of litter reserves (t/ha), measurement of forest litter thickness, analysis of pyrogenic residues, and calculation of the regeneration index using remote sensing data (NDVI, Sentinel-2, Landsat-8).

The results show that on burned areas of 2022 the forest litter layer is minimal (1.2...1.3 cm), while the stocks of leaf and woody litter are reduced (0.2...0.6 and 0.5...0.6 t/ha, respectively), and the content of charcoal residues reaches 0.6...1.0 t/ha. On sites affected by fires in 2004...2010, the litter thickness increases to 4.0...4.5 cm, pyrogenic carbon decreases to 0.2...0.5 t/ha, and the regeneration index rises to

По статье:
Получено:11.03.2026
Пересмотрено: 30.03.2026
Принято:06.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

0.60...0.80. Background areas are characterized by stabilized values (litter thickness 5.2...6.2 cm; regeneration index 0.72...0.86). It was revealed that recovery processes are slower under xerophilic conditions, whereas in mesophilic and hygrophilic habitats humification and regeneration processes occur significantly faster.
The obtained results confirm that the rate of post-fire succession is determined by the year of the fire, fire intensity, and soil-hydrological conditions. The forest floor cover can be considered an integral indicator of forest ecosystem recovery and may be used in developing measures for their sustainable restoration.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

ШӨЛЕЙТТІ АУМАҚ ЛАНДШАФТТАРЫНЫҢ КЕҢІСТІКТІК - УАҚЫТТЫҚ ДИНАМИКАСЫНЫҢ ГЕОЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГІ

Баян С. Керімбай* PhD., Нұржан Н. Керімбай г.ғ.к., асс.проф., Қуат М. Баймырзаев г.ғ.д., Лаура С. Байбатырова

І.Жансүгіров атындағы Жетісу университеті, Талдықорған қ., Қазақстан; kbs.zhetysu@gmail.com (Б.С.К.), n.kerimbay1964@gmail.com (Н.Н.К.), niibiotech.research@zu.edu.kz (Қ.М.Б.), baybatyrova1989@gmail.com (Л.С.Б.)
*Автор корреспондент: Баян С.Керімбай, kbs.zhetysu@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

ландшафт динамикасы; Сарытоғай қонысы; реликті Соғды ерені тоғайы; геокеңістіктік талдау; орнықты ландшафттық басқару

АБСТРАКТ

Бұл зерттеу Алматы облысының Шарын мемлекеттік ұлттық табиғи паркінің аумағында орналасқан реликті Соғды ерені (Fraxinus sogdiana) тоғайы ландшафттарының кеңістіктік-уақыттық динамикасын қарастырады және олардың орнықты басқару мен геожүйелерді сақтаудағы маңызын бағалайды. 2016...2024 жылдар аралығындағы өзгерістер өсімдік жамылғысы негізінде Sentinel-2 спутниктік деректері мен геоақпараттық талдау әдістері арқылы зерттелді. Әдістемеге NDVI уақыттық қатарларын талдау, картографиялық визуализация, беткей-экспозиция корреляциясы, биоалуандық пен экологиялық тәуекелдің кеңістіктік үлгілерін анықтау кірді. Бұл тәсілдер ландшафтарды қалпына келтіру мен қорғау шаралары үшін басым аймақтарды айқындауға мүмкіндік берді. Нәтижелер өсімдік жамылғысының айқын ауытқуларын көрсетті. Олар антропогендік қысымдармен (мал жайылымы, рекреациялық қызмет), климаттың өзгергіштігімен және өзен аңғарларындағы жасыл аумақтардың азаюымен байланысты. Зерттеу экологиялық деградацияның ерте белгілерін анықтауда үздіксіз геокеңістіктік мониторингтің маңызын дәлелдейді және реликті орман геожүйелерінің тұтастығын сақтауға арналған ғылыми негізделген ұсыныстар жасайды. Бұл тұжырымдар шөлейтті аумақтарда биоалуандықты сақтау мен орнықты ландшафттық басқару үшін кең ауқымды мәнге ие.

1. КІРІСПЕ

Табиғи ландшафттар экологиялық тұрақтылық үшін негіз болып табылады. Олар маңызды геожүйелік қызметтерді қамтамасыз етеді, сондай-ақ аймақтарды дамытуда, орнықты туризмде және экологиялық білім беруде әлеуетке ие. Ғаламдық климаттың өзгеруі, жердің деградациясы сондай-ақ антропогендік қысымның күшеюі жағдайында

ландшафттарды сақтаудың маңыздылығы артуда [1,2]. Қазақстан ландшафттары жоғары биологиялық алуан түрлілігімен, айқын геоморфологиялық құрылымдарымен ерекшеленеді. Олар елеулі экологиялық және мәдени құндылықтарды біріктіретін күрделі табиғи геожүйелерден тұрады.

Мақала жайында:
Жіберілді: 08.05.2026
Қайта қаралды: 25.05.2026
Қабылданды: 24.08.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Дәйексөз үшін:
Керімбай Б.С., Керімбай Н.Н., Баймырзаев Қ.М., Байбатырова Л.С., Шөлейтті аумақ ландшафттарының кеңістіктік-уақыттық динамикасының геоэкологиялық мониторингі // Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 273-288.

Ландшафт динамикасының мониторингі қазіргі географиялық зерттеулердің негізгі бағыттарының бірі ретінде, зерттеушілер үшін деградация үрдістерін анықтауға, табиғи және антропогендік қызметтің әсерін бағалауға және геожүйелердің қалпына келу қабілетін айқындауға мүмкіндік береді. Бұл әсіресе биоалуандыққа бай аймақтар – Шарын мемлететтік ұлттық табиғи паркі (МҰТП) мен Сарытоғай қонысы үшін аса маңызды. Зерттеу жұмысында ландшафттардың динамикасы өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін талдау негізінде қарастырылды. Бұл көрсеткіш экологиялық үдерістердің, ландшафттардың тұрақтылығы мен қоршаған ортаның орнықтылығының сезімтал индикаторы ретінде қызмет етеді [3,4].

Зерттеудің мақсаты – Жерді қашықтықтан зондтау (RS) технологиясы негізіндегі деректер мен NDVI мәндерін пайдалана отырып, Сарытоғай қонысы ландшафттарының динамикасына кешенді географиялық талдау жүргізу. Зерттеу міндеттері: 1). Сарытоғай қонысы ландшафттарының өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық динамикасын бағалау (2016...2024 жылдар аралығы). 2). NDVI талдауына негізделген биоалуандық және экологиялық тәуекел аумақтарын анықтау.

RS технологиялары кең әрі әртекті аумақтардағы өсімдік үлгілерін зерттеуге қуатты құралдар ұсынады. Sentinel-2 спутниктік суреттері мен өсімдік индекстері, әсіресе NDVI, өсімдіктің өнімділігі, маусымдық ауытқулары және ұзақ мерзімді экологиялық үрдістер туралы нақты әрі қайталанатын деректер береді [5,6]. Бұл әдістер далалық зерттеулердің шектеулерін еңсеріп, өзен аңғарлары, каньондар және шөлейт зонасының құрғақшылық жағдайларында ерекше тиімді болып табылады.

Орталық Азияда NDVI және EVI сияқты RS негізіндегі индекстер өсімдік динамикасын таулы аңғарларда, өзен алаптары ландшафттарында бағалау үшін кеңінен қолданылып келеді. Бұл зерттеулер аймақтық геожүйелердің климаттық өзгергіштікке сезімталдығын айқындады [7,8,9]. Осындай индекстер жерді басқаруда ғылыми негізделген тәсілдерді дамыту үшін ықпал ете алады, биоалуантүрліліктің, топырақ ылғалдылығының сондай-ақ геожүйе өнімділігінің жанама көрсеткіштері ретінде қызмет етеді.

Қазақстанда реликті геожүйелердің ұзақ мерзімді өсімдік динамикасына байланысты зерттеулер әлі де аз. Дегенмен, RS қолданбаларында едәуір ілгерілеушілік пайда болды. Сарытоғай қонысы ерекше биогеожүйе ретінде танылады. Онда эндемикалық ағаш түрлері қамтылған. Онда реликтілі ағаш түрлері (Fraxinus sogdiana, Populus diversifolia) де қамтылған. Бұл түрлер экологиялық тұрақтылықтың көрсеткіштері болып табылады және биоалуантүрлілік үшін табиғи қорық ретінде әрекет етеді. Мұндай ортада өсімдік жамылғысының кеңістіктік құрылымын түсіну үшін, сондай-ақ динамикасын білу үшін қажет. Бұл табиғатты қорғау стратегияларын жасау үшін және орнықты туризм үлгілерін іске асыру үшін өте маңызды.

Осы зерттеуде қолданылған әдістемелік негіз ландшафтық-экологиялық тәсілге негізделеді. Ол табиғи аумақтардың орнықтылығын жан-жақты бағалауға жол ашады [10] және Сарытоғай қонысы іспетті аумақтардың дамуындағы экологиялық бағытталған рөлін көрсетеді. Орман жамылғысының қолайлы экологиялық жағдайларды сақтаудағы рөлі өте шешуші болып табылады. Реликтілі Соғды ерені тоғайы биоалуандылықты қолдауда маңызды рөл атқарады, сондықтан тұрақты мониторинг пен қорғауды жоспарлауды қажет етеді [11,12].

Рефугиум популяциялардың жойылуын болдырмайтын, яғни оқшау тіршілік етіп, артынан қайта таралуына септігін тигізетін климаттық, геоморфологиялық яғни антропогендік өзгерістер кезеңіндегі аумақ саналады. Таулы шатқалдармен өзен аңғарларындағы ылғалды орман массивтері сирек. Олар эндемик түрлер үшін рефугиум қызметін атқара алады. Сарытоғай қонысындағы Соғды ерені (Fraxinus sogdiana) тоғайын зерттеудің маңыздылығы айқын көрінеді. Зерттеу табиғи ортаны сақтау үшін өзен алабы ландшафттарына тән бейімделулерді көрсетеді.

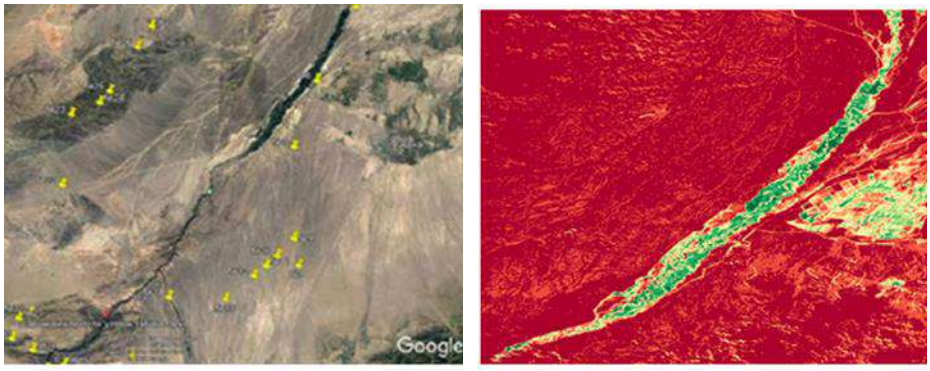
Дүниежүзілік деңгейде табиғи рефугиум тұжырымдамасы биоалуантүрлілікті сақтау құралы ретінде танылған. Ол климаттық бейімделуге қоса орнықты ландшафттық басқарудың стратегиялық құралы болып табылады. АҚШ, Еуропа және Жерорта теңізі аймақтарындағы ізденістер тұрақты өсімдік жамылғысы бар жерлердің биоалуантүрлілікті сақтайтынын, экологиялық процестерге көмектесетінін әрі экотуризм мен экологиялық ағартуды жетілдіретінін дәлелдейді [13,14,15].

Осы халықаралық тәсілдерді Орталық Азияның экологиялық сондай-ақ әлеуметтік-экономикалық жағдайына икемдеу қорғалатын аумақтардың тұрақтылығын көтеру үшін аса маңызды. Жалпы алғанда, бұл зерттеу табиғи ортаның тұрақты дамуы үшін, табиғатты қорғауды жоспарлау үшін және экологиялық білім беру үшін табиғи рефугиумнің маңызын айқындайды.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу аумағының географиялық сипаттамасы. Сарытоғай қонысы Қазақстанның оңтүстік - шығысында, Солтүстік Тянь-Шань тауларының етегінде, Шарын өзенінің ағындының транзиттік зонасы аумағында, Алматы облысы, Үйғыр ауданында орналасқан. Іле ойпатының орталық бөлігіндегі бірегей биогеожүйе болып табылады және 2004 жылдан бастап Шарын МҰТП-нің құрамына кіреді. Табиғи парк – бірегей, ерекше экологиялық, тарихи және эстетикалық құндылыққа ие табиғи тау ландшафттарын және оған іргелес жазықтарды сақтап, сондай-ақ табиғатты ұтымды пайдалану мен орнықты әлеуметтік-экономикалық дамуды қамтамасыз етіп отыр [16,17].

2018 жылы “Шарын биосфералық резерваты” құрылуымен, бұл аумақ “ЮНЕСКО биосфералық резерваттарының” халықаралық желісіне енгізілді. Оның қамтитын жалпы аумағы 239,7 мың гектарды құрайды (координаттары: 43°57'59"N, 80°4'30"E). Қорықтың негізгі функционалдық аймақтары бар. Олар Шарын МҰТП аумағымен сәйкес келеді. Сарытоғай қонысының ұзындығы шамамен 25 км, ені 2 км-ге дейін жетеді. Ол Шарын аңғарының ең кең бөлігін құрайды, (сурет 1).



A B

Сурет 1. *Сарытоғай қонысының ғарыштық суреттері: А – бақылау нүктелерінің координаттары көрсетілген бейнесі (Google Earth, 2016 ж.); В – спутниктік суреті (Sentinel-2, 2024 ж.)*

Бұл аумақ күрделі жер бедерімен сипатталады, сондай-ақ ол шөлді-континенттік климатымен және жоғары биоалуандығымен ерекшеленеді. Ол Шарын өзенінің каньон іспетті аңғарын, реликтілі Соғды еренінің тоғайын және Үлкен-Бұғты жотасының шөлді және тау-далалық ландшафттарын ішіне алады. Ең маңызды табиғи ерекшеліктердің бірі болып табылады мемлекеттік табиғи ескерткіш секілді қорғалатын реликтілі жалпақ жапырақты Соғды ерені тоғайы (Fraxinus sogdiana). Бұл орман аймағы флораның сирек

түрлері үшін табиғи қорық болып, ерекше биогеоценоздардың сақталуына өз септігін тигізеді.

Шарын ерені тоғай өсімдіктерінің арасындағы ең құнды түрлерінің бірі болып табылады. Ол Қазақстанның дәл осы бөлігінде эндемик болып табылатын байырғы Соғды ерінің реликтілі шоқ тоғайларын қамтиды. Аталған орман реликтілі түрлердің гендік қорын сақтауда және экологиялық тұрақтылықты қамтамасыз етуде елеулі рөлді атқарып отыр [18]. Оның халықаралық маңызы ЮНЕСКО биосфералық қорықтар желісіне енгізілуі арқылы айқындалады. Бұл оның жаһандық табиғи мұра үшін құндылығын көрсетеді.

Соңғы ғасырда Соғды ерені тоғайының аумағында айтарлықтай өзгерістер орын алды, әрі бұл кесте 1-де көрсетілген. Fraxinus sogdiana сияқты, тоғайда геожүйенің тұрақтылығына және экологиялық орнықтылыққа үлес қосатын басқа да сирек түрлер, атап айтқанда, тораңғы терегі (Populus diversifolia Schrenk) бар [17,19].

Кесте 1

Сарытоғай қонысындағы Соғды ерені (Fraxinus sogdiana Rupr.) тоғайы аумағының соңғы 100 жылдағы өзгерістері

жыл	1926	1943	1990	2023
аумағы, га	1100	410	812	5000

Климат және гидрология. Климат айқын континенттілік сипатында, орташа жылдық температура шамамен +5 °C шамасында (қаңтардағы минимум −6 °C-қа дейін, шілдедегі максимум +27 °C-қа дейін). Аязсыз кезең 180 күнге жуық уақытты алады, сонымен қатар құрғақ кезеңдер 40 күнге дейін созылуы ықтимал. Қар жамылғысы жұқа (10…20 см) әрі ол шамамен 60 күндей сақталады (желтоқсан, ақпан). Орташа есеппен жылдық жауын-шашын мөлшері 150 мм-ге дейін жетеді.

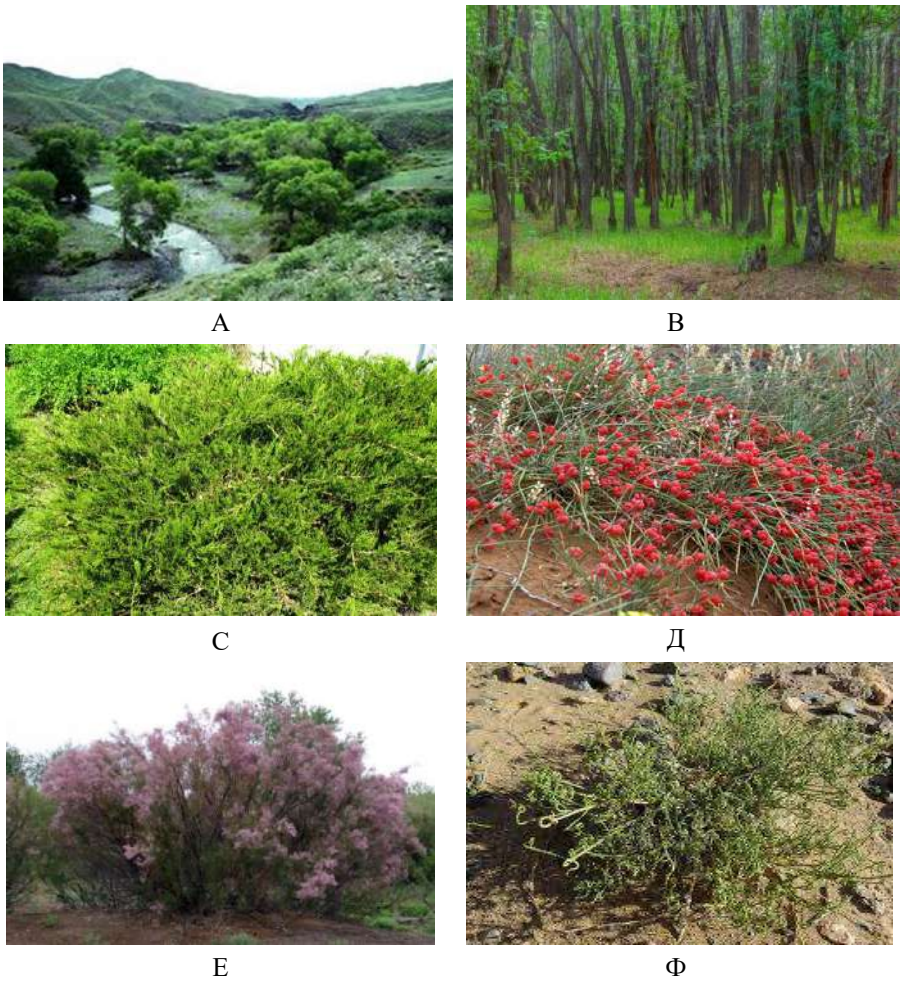
Шарын өзені Іле өзені үшін сол жақтағы ең үлкен сала болып табылады әрі ол негізгі су арнасы болып саналады. Оның бастаулары Қетмен жотасының (Ұзынқара) оңтүстік беткейлерінде орналасқан және қар сызығынан жоғары көтеріледі. Ол әртүрлі биіктік белдеулерін кесіп өтеді. Өзен үшін жоғары су шығыны тән. Оған қоса айқын маусымдық тасқындары бар [20].

Биоалуандық және геожүйелер. Биоалуандыққа қатысты деректер табиғатты қорғаудың ресми көздерінен алынды. Бұл ақпарат [17] арқылы берілген. Өсімдік жамылғысы Сахара, Гоби аймағына, Иран, Тұран кіші аймағына және Жоңғар провинциясына тән, ол ойпатты-шөлді ландшафттарға лайық. Шарын МҰТП аумағындағы негізгі өсімдік типтеріне дала, шөл, бұталы жамылғы кіреді. Сондай-ақ, шабындық, батпақты әрі тоғай жамылғысы да кіреді. Геоморфологиялық күрделілік пен өзен алабының орналасуы өсімдік жамылғысының кеңістіктік өзгермелілігін анықтайды деп айтуға болады [19].

Реликтілі өсімдік қауымдастықтарының, (әсіресе *Fraxinus sogdiana Bunge*) сақталуына аймақтың геологиялық және климаттық жағдайлары себеп болды. Бұл палеоген, неоген кезеңінің реликтілі түрі 20…25 м биіктікке жетеді, сондай-ақ діңінің диаметрі 1,5 м-ге дейін, сирек әрі кең тәжі, ашық сұр қабығы, қызғылт немесе сұрғылт бұтақтары бар [21,22].

Жергілікті жерлерде бұл ағаш «Түркістан ерені», «Сырдария ерені» немесе «Өзен ерені» деп аталады. Осы ағаш Қазақстан мен Орталық Азиядағы Сарытоғай қонысын құрайды әрі Қазақстанның Қызыл кітабына енгізілген, жалғыз реликтілі тоғай болып табылады. Тоғай Шарын өзенінің жайылмасын басым қамтиды, сондай-ақ террасаларын қамтиды. *Fraxinus sogdiana Tamarix spp., Haloxylon spp., Krascheninnikovia ceratoides, Ephedra distachya* және *Ephedra przewalski* түрлерімен қатар өседі. Өзен жайылмасы бойында арша *(Juniperus sabina)*, теңіз шырғаны *(Hippophae rhamnoides)* және тал *(Salix spp.)* өседі, ал биік террасаларда жиде *(Elaeagnus spp.)* мен аралас шөпті қауымдастықтар кең таралған. Таза ерен ормандары жалпы орманды жердің шамамен 35%-ын көрсетеді,

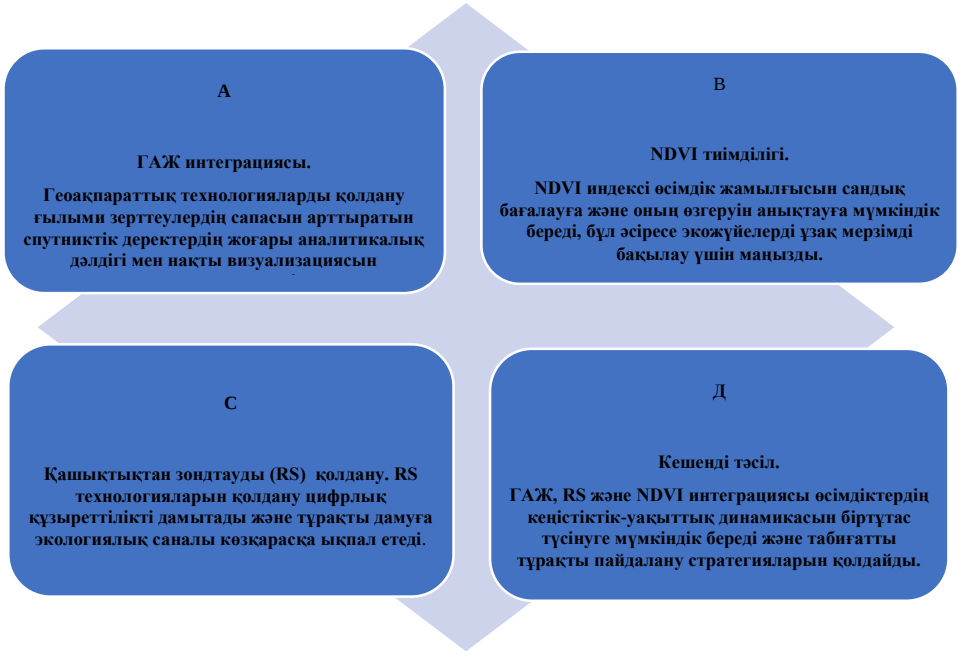
сонымен қатар онда басқа популяциялар мен қарағай-ерен бірлестіктері де кездеседі [19,20] (2-сурет).



Сурет 2. *Сарытоғай қонысының өсімдік жамылғысы (А – өзен жайылмасы бедерінің құрылымы; В – Fraxinus sogdiana Bunge, Соғды ерені; С – Juniperus sabina L., арша; Д – Ephedra distachya L., эфедра; Е – Tamarix spp., жыңғыл; Ф – Ephedra przewalskii Stapf, Пржевальский эфедрасы)*

Populus diversifolia Schrenk (торанғы терегі), жоғарғы террасаларда өсетін сирек кездесетін түр. Сонымен қатар жоғарғы террасаларда жиде *(Elaeagnus angustifolia L.)*, жыңғыл *(Tamarix spp.)* және талдың *(Salix spp.)* әр алуан бұталары өседі. Каньон беткейлерінде сексеуіл *(Haloxylon spp.)* әрі эфедра *(Ephedra spp.)* басым таралған екен. Шөптесін қабатқа бетеге *(Stipa spp.)*, ферула *(Ferula L.)*, қамыс *(Phragmites australis)* және қияқ *(Carex spp.)* кіреді, алайда тығыз Ерен тоғайларында ол некен-саяқ немесе тіпті кездеспейді.

Зерттеудің әдіснамалық негіздемесі (сурет 3) өзара байланысты тәсілдерді де қамтиды ішіне. ГАЖ интеграциясы арқылы деректерді дәл талдау мүмкін болады, NDVI индексі көмегімен өсімдік жамылғысының өзгерістерін сандық бағалау жүзеге асады, ал қашықтан зондтау әдістері арқылы экожүйелерді бақылау қолдау табады. Осы амалдардың толық үйлесімі ландшафтық динамиканы терең түсінуге әрі орнықты басқару стратегияларын жасауға негіз жасайды.



Сурет 3. *Зерттеудің әдістемелік негіздемесі (А – ГАЖ интеграциясы; В – NDVI тиімділігі; С – Қашықтан зондтау әдістерін қолдану; Д – Кешенді тәсіл)*

Спутниктік деректерді талдау әдісі. Мәліметтерді өңдеу мен NDVI есептеуі ГАЖ бағдарламалық жасақтамасы, атап айтқанда QGIS пен Google Earth Engine арқылы іске асырылды. NDVI өсімдік жамылғысының тығыздығын сандық тұрғыдан бағалауға сондай-ақ әртүрлі биомассасы бар аймақтарды айқындауға мүмкіндік береді делік.

NDVI стандартты формула бойынша есептелді. Осылайша есептеу жүргізілді.

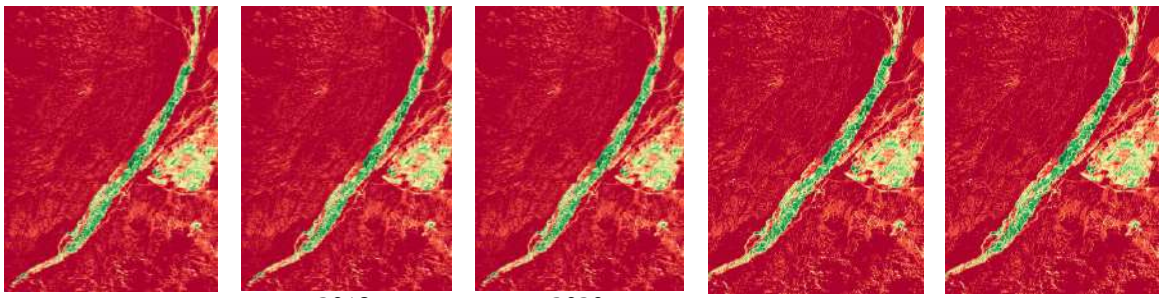
NDVI=(NIR−Red)(NIR+R) болып табылады және ол (1) формуласымен көрсетіледі.

NIR , жақын инфрақызыл диапазоны, әсіресе 8-арна; Red , қызыл диапазоны, яғни 4-арна. NDVI мәндері −1-ден +1-ге дейін өзгереді, себебі жоғары мәндер тығыз өсімдік жамылғысын көрсетеді. Нөлге жақын мәндер сирек немесе күйзелген өсімдікті көрсетеді, сондай-ақ теріс мәндер су айдындары немесе жалаңаш топырақты білдіреді. Алынған NDVI деректері векторлық маска қабаттары арқылы және жер жамылғысы карталарын пайдалана отырып визуализацияланды әрі интерпретацияланды. Жоғары NDVI мәндері Fraxinus sogdiana Bunge және Populus diversifolia Schrenk секілді реликтілі өсімдіктер үшін сәйкес келеді.

Кешенді әдістемелік тәсіл Геоақпараттық жүйе (GIS) негізіндегі кеңістіктік талдауды біріктіреді. Ол сондай-ақ өсімдік жамылғысының жағдайын сандық бағалауға арналған NDVI көрсеткішін және геожүйелерді мониторингтеуге арналған RS технологияларын біріктіреді. Осы үйлесім өсімдік жамылғысының динамикасын толық түсінуге жол ашып, табиғи ресурстарды тұрақты басқару, биоалуандылықты сақтау, сонымен қатар рекреациялық және қорғалатын аймақтарды дамыту жайында ұсыныстар жасауға мықты ғылыми негіз орнатады.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Ландшафттардың өсімдік жамылғысының негізі зерттелген динамикаға ие; ол климаттық өзгергіштік пен антропогендік қысымның әсерін көрсетеді. Sentinel-2 ғарыштық түсірілімдері арқылы өсімдік тығыздығының уақыттық әрі кеңістіктік өзгерістерін көрсетеді. Сандық өзгерістер 2-кестеде жинақталған, әрі олардың кеңістіктік таралуы 4-суретте бейнеленген.



Түс	NDVI диапазоны	Өсімдік жамылғысының санаты
	−1,00–0,00	Өсімдіксіз аумақ
	0,00–0,20	Ашық топырақ және өте сирек өсімдік
	0,20–0,40	Сирек өсімдік жамылғысы
	0,40–0,60	Орташа тығыз өсімдік жамылғысы
	0,60–1,00	Тығыз әрі жақсы дамыған өсімдік жамылғысы

Сурет 4. *Шарын өзені алабы, Сарытоғай қонысы ландшафттарының NDVI динамикасы, 2016…2024 жж., Sentinel-2 спутниктік деректері бойынша*

2016…2024 жылдардағы Сарытоғай қонысы аумағындағы өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін сандық бағалау үшін талдау жасалды. Вегетациялық кезеңнің басындағы (орташа a) жанында және соңындағы (орташа b) NDVI көрсеткіштерінің ең төменгі, ең жоғары және орташа мәндері 2-кестеде жинақталған. Осы индикаторлар геожүйенің жалпы тұрақтылығын әрі өсімдік жамылғысының кеңістіктік әркелкілігін сипаттайтыны туралы.

Кесте 2

2016–2024 жылдар аралығында Сарытоғай шатқалындағы вегетациялық NDVI көрсеткіштерінің ең төменгі, ең жоғары және орташа мәндері (Дереккөз: EOS Data Analytics; деректерді авторлар өңдеген)

жылдар	NDVI			
	mean a	mean b	min	max
2016	0.47	0.56	-0.35	0.81
2018	0.46	0.53	-0.27	0.81
2020	0.27	0.21	-0.28	0.77
2022	0.45	0.52	-1.00	0.81
2024	0.46	0.53	-0.47	0.85

Талдау нәтижелеріне сәйкес орташа NDVI мәндері (mean a және mean b) зерттеу кезеңінде салыстырмалы түрде тұрақты күйінде болып, геожүйенің жалпы тұрақтылығын көрсетеді. Дегенмен 2022 жылы тіркелген ең төменгі шектік NDVI мәні (-1,00) жергілікті жердің нашарлауын я болмаса экстремалды климаттық құбылыстардың әсерін білдіреді. Дегенмен, ең жоғары NDVI көрсеткіштері жағымды тенденцияны көрсетеді: 2024 жылы 0,85 деңгейіне жетуі шатқалдың кейбір бөліктерінде өсімдік жамылғысының жағдайы жақсарғанын білдіреді. NDVI диапазондарына сүйенген өсімдік жамылғысы сыныптарының кеңістіктік динамикасы 3-кестеде қорытылған. Зерттеу кезеңі барысында қалың өсімдік жамылғысы бар аумақтарда ауытқулар байқалды. Аса қалың өсімдік жамылғысының ең елеулі артуы 2022…2024 жылдары тіркелді. Орташа және сирек өсімдікті аумақтарда аздаған қысқару байқалды. Жалаңаш топырақ пен өсімдік жамылғысы жоқ жерлердің үлесінде құбылмалы сипат болды. Бұл өзгерістер маусымдық ерекшеліктерге, антропогендік қысымға және жергілікті бұзылуларға байланысты болуы мүмкін.

Кесте 3

2016...2024 жылдар аралығында Сарытоғай шатқалындағы ландшафт аумақтарының Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) мәндері бойынша динамикасы (км²) (Дереккөз: EOS Data Analytics негізінде; авторлардың деректерді өңдеуі)

NDVI мәндері	Өсімдік жамылғысының түрлері	Жылдар бойынша аумақ (км²)				
		2016	2018	2020	2022	2024
0,8 to-1	Өте тығыз өсімдік жамылғысы	0,001	0,028	0,00	7,51	7,74
0,6-0,8	Тығыз өсімдік жамылғысы	39,56	39,04	31,59	34,69	34,52
0,4-0,6	Қоғыржай өсімдік жамылғысы	15,37	15,05	15,51	12,67	12,60
0,2-0,4	Сирек өсімдік жамылғысы	3,11	3,35	4,45	2,37	2,37
0,1-0,2	Ашық топырақ	3,22	3,29	5,28	2,14	1,98
-1 to- 0.1	Өсімдік жамылғысы жоқ	1,24	1,75	5,65	3,12	3,26

2016 мен 2024 жылдардың аралығында Сарытоғай қонысы жөніндегі ең төменгі, ең жоғары әрі орташа NDVI мәндерін талдау вегетациялық кезең басында және аяғындағы (mean a және mean b) орташа көрсеткіштердің біршама тұрақты болғанын, тек қана шағын ауытқулардың байқалғанын көрсетті. Бұл геожүйелік деңгейдегі өсімдік жамылғысы құрылымының жалпы сақталуының дәлелі болып табылады.

NDVI-дің ең төменгі мәнінің 2022 жылы күрт төмендеуі (−1,00-ге дейін) экстремалды климаттық құбылыстардың немесе жергілікті экологиялық стресс факторларының әсерімен байланысты болуы мүмкін шығар. Ең жоғары NDVI мәндері оң үрдіс көрсетті және 2024 жылы ол 0,85-ке жетті. Бұл шатқалдың жекелеген бөліктерінде өсімдік жамылғысы жағдайының жақсарғанын білдіреді. Мұндай өзгерістер табиғи қалпына келу үдерістері арқылы немесе табиғатты қорғау шараларының нәтижелері арқылы түсіндірілуі мүмкін. Ең жоғары NDVI мәндерінің жоғарылауы мен қалың өсімдік жамылғысы аумағының ұлғаюы қолайлы климаттық жағдайлармен, гидрологиялық режимнің қайта қалпына келуімен және жерді қалпына келтіруге арналған мақсатты антропогендік іс-шаралармен байланысты болуы мүмкін. Жалаңаш топырақ әрі өсімдік жамылғысы жоқ аумақтардың қысқаруы экологиялық тепе-теңдіктің біртіндеп қалпына келуін көрсетеді.

Кеңістіктік-уақыттық талдау аса қалың өсімдік жамылғысы аумағының 2016 ж. 0,001 км²-ден бастап 2024 ж. 7,74 км²-ге дейін айтарлықтай артқанын байқатты, әрі бұл геожүйенің қалпына келуіндегі оң үрдістерді растайды. Сонымен қатар қалың өсімдікті аумақтар 39,56 км²-ден 34,52 км²-ге дейін қысқарды; бұл өсімдік қауымдастықтарының қайта бөлінуін және сукцессиялық сатылардағы өзгерістерді білдіреді. Орташа әрі сирек өсімдікті типтер де 2020 ж. кейін азайған болатын. Жалаңаш топырақ аумақтарының қысқаруы арқылы жалпы өсімдік жамылғысының ұлғайғаны көрінеді.

Зерттеудің алғашқы кезеңінде (2016…2018 жылдары) өсімдік жамылғысы, оның ішінде жайылмалы аймақтар мен каньон беткейлерінде үзік-үзік сипатта болды. 2020-2022 жылдардың ішінде өзен жайылмалары мен террасаларында өсімдік жамылғысының айқын қалпына келуі байқалды. Бұл аралықта қалпына келу анық болды. NDVI жоғары мәндері арқылы аталған аумақтардың геожүйелік қызметтерді сақтаудағы елеулі рөлі дәлелденді. Бұл жағдай су теңгерімінің жақсаруымен, сондай-ақ антропогендік қысымның кемуімен байланысты болуы мүмкін. Дегенмен, каньон беткейлерінде өсімдік тығыздығы климаттық әсерлер себебінен төмен күйінде қалып отыр және эрозиялық үдерістер салдарынан әсер етеді. Осыған байланысты нысаналы табиғат қорғау шараларын жүргізу қажеттігі туындайды. Сол себепті тиісті шараларды қолға алу керек.

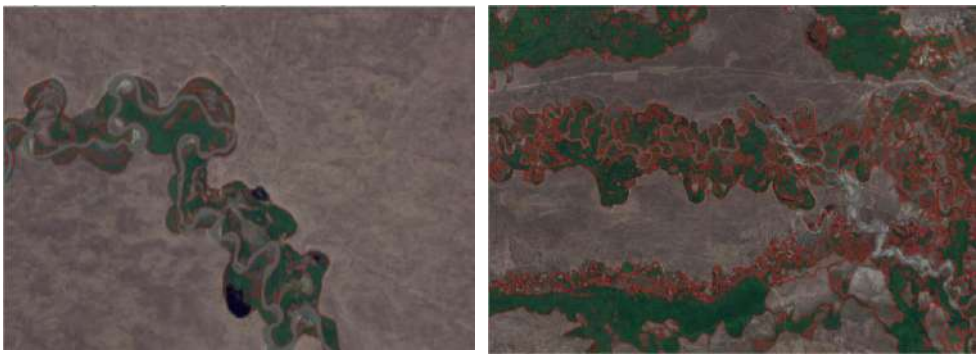
NDVI талдауымен биоалуандық аймақтарын анықтауға болады. Бұған қоса экологиялық қауіп аумақтарын анықтауға мүмкіндік бар. Сонымен қатар оларды да айқындауға болады. NDVI талдауына сәйкес, Сарытоғай қонысында өсімдік жамылғысының қалпына келуінде айтарлықтай оң үрдіс байқалады. Осы жағдай көңіл қуантады. Өсімдік жамылғысы аса тығыз аймақтар 2016 ж. 0,001 км²-ден 2024 ж. 7,74

км²-ге дейін көбейді, әрі тығыз өсімдігі бар аймақтар 39,56 км²-ден 34,52 км²-ге дейін азайды, осы жағдай өсімдік тығыздығының қайта бөлінуін көрсетеді. Орташа әрі сирек өсімдікті аймақтар да 2020 жылдан кейін кеміген еді. Атап айтқанда, бұл олардың тығыз өсімдік кластарына қарай ауысу ықтималдығын паш етеді.

Ашық жерлердің қысқаруы жалпы өсімдік тығыздығының артқанын айғақтайды. Өсімдік жамылғысы жоқ аумақтардың қысқаруы да жалпы өсімдік тығыздығының артқанын айғақтайды. Бұл процесс Шарын ҰТПП-ның және «Алматы облысы орман шаруашылығы» МКК-ның жерді қалпына келтіру және ағаштың төзімді түрлерін отырғызуды қосқандағы қалпына келтіру әрекеттерімен, сондай-ақ табиғи жаңарумен ұштасады.

NDVI негізіндегі бағалау арқылы өсімдік жамылғысының қалпына келуіндегі тұрақты үрдістер расталды және биоалуандық аймақтарды шектеуде, сондай-ақ экологиялық тұрғыдан осал аумақтарды анықтауда жоғары тиімділік көрсетті. Өсімдік жамылғысының кеңістіктік құрылымы Шарын өзенінің арнасымен, оның жайылмаларымен және күрделі жер бедері бар террасаларымен өте тығыз байланысты. Sentinel-2 деректері әрі NDVI негізінде жасалған карталар жер бедерінің дифференциациясы биоалуандықтың таралуына елеулі әсер ететінін көрсетті. Негізгі биоалуандық аймақтары жайылмалар мен биік террасаларда шоғырланғандықтан, олар геожүйе тұрақтылығының өзегі болып табылады және басым қорғауды қажет етеді (5-сурет).

Негізінде, NDVI картографиясы жоғары биоалуантүрлілікке ие аумақтарды әрі экологиялық қауіп аймақтарын дәл анықтауға жағдай жасады. Реликті геожүйелер Шарын МҰТП аумағында маңызды рефугиум қызметін атқарады. Әсіресе, Fraxinus sogdiana тоғайлары ерекше рөлге ие. Экологиялық күйзеліске бейім аймақтар бар, әсіресе өзен маңы белдеулерінде өсімдік жамылғысының айқын төмендеуі байқалады. Геожүйе тұрақтылығы мен биоалуандықтың тұтастығын сақтау үшін нысаналы мониторинг пен қорғау шаралары да керек (сурет 5).



A B

Түс	NDVI диапазоны	Өсімдік жамылғысының санаты
	< 0,00	Су, терең көлеңке немесе өсімдіксіз аумақ
	0,00...0,20	Өсімдік жамылғысы жоқ немесе өте сирек
	0,20…0,40	Сирек өсімдік жамылғысы
	0,40...0,60	Орташа тығыз өсімдік жамылғысы
	0,60...1,00	Тығыз және жақсы дамыған өсімдік жамылғысы
	Қызыл контур	Картада анықталған өсімдік жамылғысы аумақтарының шекарасы

Сурет 5. *Шарын өзені алабы: А – өзен жайылмалары; В – биік террасалар, Sentinel-2*

2016 мен 2024 жылдардың аралығында деректерді талдау Сарытоғай қонысындағы негізгі биоалуандық аймақтарын және экологиялық тұрғыдан осал аумақтарды анықтау үшін мүмкіндік берді. NDVI мәндері өсімдік жамылғысының құрылымын көрсетеді, сондай-ақ оның жер бедері мен климаттық факторларға қатысты тәуелділігін көрсетеді. Жайылмалар мен өзен террасалары тұрақты ландшафт элементтері ретінде ерекшеленеді. Осыған байланысты олардың экологиялық маңыздылығы мен үнемі мониторинг жүргізудің қажеттілігі айқындалады.

Жайылмалар мен террасаларда тығыз өсімдік жамылғысы байқалады, әрі олар Fraxinus sogdiana groves және Populus diversifolia секілді реликті түрлер үшін тіршілік ету ортасы болып табылады. Өсімдік жамылғысының әркелкілігі жер бедері пішінімен тығыз байланысты: жайылмалар үшін экологиялық тұрақтылығы жоғары болғандықтан, каньон беткейлері эрозия мен климаттық күйзеліске сезімтал.

NDVI талдауы жер бедерімен климат арасындағы байланысты нақтылады. Ол тығыз өсімдік жамылғысымен де байланысты нақтылады. Жайылмалы жерлердегі өсімдіктердің қалың болуы геожүйенің беріктігін білдіреді, бірақ террасалар мен каньон беткейлері экологиялық қатерлі аймақтар болып, басқарудың ерекше әдістерін керек етеді. Жоғары NDVI мәндері бар аумақтарда реликті өсімдік қауымдастықтары шоғырланған; бұл жағдай биоалуандықты сақтау мен геожүйе тұрақтылығын қамтамасыз етудегі олардың маңызды рөлін көрсетеді.

Сарытоғай қонысы ландшафт мозаикасына ие және оның орналасуы қорғалған. Сонымен қатар, Сарытоғай қонысы Оңтүстік-Шығыс Қазақстандағы табиғи рефугиум, себебі оның өсімдік жамылғысы салыстырмалы тұрақты. Жайылмалар, өзен террасалары секілді және қоршалған каньон беткейлеріндегі жоғары тығыздықтағы тұрақты аймақтар минималды қорғау шаралары арқылы да қалпына келу үрдісін көрсетеді. Бұл ерекшеліктер шатқалдың тұрақты рекреациялық жоспарлау стратегияларында негізгі элемент болу мүмкіндігін көрсетеді. Осының арқасында ерекшеліктер табиғатты қорғау жоспарлау стратегияларында да негізгі элемент бола алады.

Халықаралық тәжірибе арқылы табиғи рефугиумдарды қорғалатын немесе реттелетін аумақтарға енгізу биоалуандықты сақтауға, геожүйелік қызметтерді қолдауға және тұрақты дамуды қамтамасыз етуге әкелетінін көрсетеді [15]. Айталық, Yosemite National Park зерттеулері тұрақты өсімдік жамылғысы бар аудандардың биоалуантүрлілікті қалпына келтіруге көмектесетінін, әрі экотуризм мен экологиялық білім беру үшін маңызды орындар ролін атқаратынын дәлелдеді [13]. Дәл осылайша, Жерорта теңізі аймағындағы зерттеулер табиғи рефугийлердің сирек кездесетін түрлер үшін тіршілік ортасын қамтамасыз ететінін көрсетті. Осылайша геожүйені сақтаудың негізін құрайды [14].

Табиғи рефугиум идеясын кеңістіктік жоспарлау мен экологиялық оқытуға қосу табиғат мұрасын сақтауды жақтайтын құндылықтық бағытты жасайды. UNESCO биосфералық қорықтары секілді және IUCN бастамалары тәрізді ұлттық әрі халықаралық тұрақты даму бағдарламалары рефугиумдерді ландшафтты басқару стратегияларының ажырамас бөлігі есебінде мойындауда [23,24]. Бұл әдістер өңірлік жоспарлау құжаттарында да көрініс алады, сол жерде экологиялық қорғау және әлеуметтік-экономикалық дамуды теңестіру маңызды мәселе болып саналады [25].

Сарытоғай шатқалы тек табиғи рефугиум емес-ақ, ғылымға негізделген тұрақты басқару үшін, экотуризм үшін экологиялық білім беру үшін үлгі алаңы, әлеуметтік-мәдени құндылықтарды біріктіретін тұрақты өңірлік даму орталығы болып табылады. Оның сақталуы және басқарылуы биоалуандықты қорғау үшін тұрақты ландшафт пайдалануымен біріктіру үлгісін ұсынады.

Өсімдік динамикасы бойынша ғаламдық зерттеулермен салыстырмалы талдау үшін. 2016…2024 жж. аралығында Sentinel-2 NDVI деректері негізінде жүргізілген Сарытоғай қонысындағы өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық мониторингі әлемдегі басқа жартылай шөлейт және өзен бойы геожүйелеріндегі үрдістермен салыстыруға мүмкіндік

береді. Жерорта теңізі бассейніндегі зерттеулерде реликті өзен бойы ормандарының маусымдық NDVI ауытқуларында ұқсас заңдылықтар байқалды. Осы зерттеулер жайылмалар биік террасалар мен беткейлерге қарағанда өсімдік тығыздығы жағынан және экологиялық тұрақтылық бойынша жоғары екенін дәлелдеді [14]. Сол сияқты, Yosemite National Park тұрақты өсімдік жамылғысы бар аумақтар биоалуандықтың рефугийлары ретінде қызмет етеді. Олар өзгермелі климаттық жағдайларға қарамастан жоғары NDVI мәндерін сақтайды [13].

Сарытоғай қонысының орташа NDVI мәндерінің тұрақтылығы 2022 жылы әлемдік үрдістерге сай болып келеді, өйткені өзен бойындағы жайылмалы геожүйелер климаттық экстремалды жағдайларға төтеп бере алады. NDVI ең төменгі мәнінің күрт төмендеуі (-1,00) жергілікті табиғи құбылыстың орын алғанын көрсетеді, әрі ол Орталық Азияның тоғай ормандары және Иран мен Моңғолиядағы шөлейт зонасының өзен алабы геожүйелерінде тіркелген эпизодтық құрғақшылық яки антропогендік бұзылулармен салыстырылуы мүмкін [7,5]. Осы салыстырмалы мәліметтер бар, сондай-ақ ол NDVI негізіндегі мониторинг экологиялық шектерді анықтау және өсімдік төзімділігін бағалау үшін сенімді құрал екенін көрсетеді.

Осал және тұрақты аймақтарды айқындау. Сарытоғай қонысы үшін NDVI мәндері экологиялық тұрақтылық аймақтарын, сонымен қатар осал аймақтарын нақты көрсетті. Жайылмалар мен өзен террасалары негізгі биоалуандылық аймақтары болып ерекшеленеді. Олар *Fraxinus sogdiana* тоғайлары мен *Populus diversifolia* секілді реликті түрлердің арқасында геожүйелік қызметке айтарлықтай үлес қосады. Бұл нәтижелер әлемдік зерттеулермен үндеседі. Олар өзен бойы дәліздерінің экологиялық тірек ретінде қызмет ететінін көрсетеді [15].

Керісінше, каньон беткейлері жер бедеріне, топырақ эрозиясына және климаттық экстремумдарға байланысты экологиялық тұрғыдан осал аймақтар болып есептеледі. Бұл заңдылық беткей бағыты, экспозиция және топырақ қалыңдығы өсімдік жамылғысы мен биоалуандыққа айтарлықтай әсер етеді. Ол АҚШ-тың оңтүстік-батыс шөлейт зонасының каньондары мен Жерорта теңізі тау аймақтарындағы бақылаулармен ұқсас [4,14] болып табылады. Сол себептен, қоршауды басқару стратегиялары осал беткейлерді мониторингке алуға басымдық беруі керек. Олар қайта орман отырғызуға, эрозияны тежеуге және тіршілік ортасын қалпына келтіру шараларын қолдануға тиіс.

Биоалуандықты сақтау жағынан және тұрақты даму жағынан салдарлары. Зерттеу нәтижелері табиғи рефугиумдардың биоалуандықты сақтауда әрі ландшафт тұрақтылығы үшін шешуші рөл атқаратынын көрсетеді. Сарытоғайдағы реликті тоғай генетикалық әртүрліліктің қоры болып табылады, микроклиматты тұрақтандыра түседі және геожүйелік функцияларды қолдауға мүмкіндік береді, яғни экологиялық тепе-теңдікті сақтау үшін керек. Халықаралық тәжірибе дәлелдеді, табиғи рефугиумдарды өңірлік жоспарлауға енгізу арқылы қоршауды сақтау нәтижелері артады, сондай-ақ экотуризм және экологиялық білім беру арқылы әлеуметтік-экономикалық тиімділік те артады [23,24].

Қазақстанда осы қағидаларды пайдалану Сарытоғай мекені, Соғды ерені тоғайын сақтау, тұрақты туризм мен білім беру жобаларын біріктіретін эталонды орынға түрлендіре алады. Қорғалатын аймақтарды жоспарлау үшін және климаттық және антропогендік қысымдарға бейімделген басқару стратегияларын жүзеге асыру үшін сандық негізді ұсынады. Мониторинг деректері мен салыстырмалы талдаулар негізінде Сарытоғай қонысы үшін төмендегі ұсыныстар қарастырылды:

-тұрақты мониторинг – өсімдік жамылғысының деградация белгілерін ерте анықтауға мүмкіндік береді, бұл уақтылы араласуды қамтамасыз етеді;

- осал аумақтарда мақсатты қорғау – каньон беткейлері мен сирек өсімдікті террасаларда қайта орман отырғызу, топырақты тұрақтандыру және эрозияны тежеу шараларына басымдық берілуі керек;

- биоалуандық «ыстық нүктелерін» қорғау – жайылмалар мен қалың ерен ағаштары бар аумақтар олардың жоғары экологиялық және білім беру маңыздылығына байланысты тұрақты қорғауды қажет етеді;

- өңірлік жоспарлауға интеграциялау –тұрақты туризм және экологиялық білім беру бағдарламаларына енгізіліп, табиғатты қорғаудың әлеуметтік-экономикалық пайдасын арттыруы керек.

Сарытоғай қонысының ландшафттарын зерттеу шөлейт зонасы үшін реликті геожүйелерді ғаламдық деңгейде түсінуге үлес қосады. Солтүстік Америкада, Еуропада және Азиядағы өзен алабы геожүйелерінде өсімдік төзімділігі тіркелген. Осалдық пен экологиялық стресс әсеріне ұқсас заңдылықтар да тіркелген [13,14,15].

Сонымен қатар, Соғды ерені тоғайы жергілікті және RS деректері бойынша негізделген, тұрақты әлеуметтік-экономикалық дамуды жақтай алатынын көрсетеді. Бұл сабақтар Орталық Азияның басқа да шөлейт аймақтарында қолданылуы мүмкін. Сонымен қатар, олар әлемнің түкпір-түкпіріндегі ландшафтты басқару стратегияларына да қолданылады.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Кеңейтілген талдау нәтижелері ГАЖ негізіндегі мониторинг, сондай-ақ кеңістіктік талдау арқылы өсімдік жамылғысының динамикасын бағалау, биоалуандық пен осал аймақтарды анықтау, және геожүйені басқару үшін тиімді әдіс екенін көрсетеді. Бұл зерттеудің әлеуметтік маңызы анықталған үрдістер арқылы экологиялық қауіп аймақтарының жергілікті қауымдастықтардың өмір сүру сапасына тікелей әсер етуінде тұжырымдалады. Талдау табиғи климаттық өзгергіштікті анықтады. Ол өсімдік динамикасына әсер етті. Сонымен қатар антропогендік қысымдардың бірлескен әсерімен, негізгі үрдістер үшін және мақсатты қорғау үшін экологиялық қауіп аймақтарын анықтады.

Зерттеуге ГАЖ негізіндегі кеңістіктік талдауды біріктіру арқылы өсімдік тығыздығы, кеңістіктік таралу және геожүйелік тұрақтылықты дәл бағалауға қол жеткізілді. Биоалуандық пен жайылмалар ерекше функционалды элементтер болып табылады. Террасалар мен каньон беткейлері де ерекше функционалды ландшафт элементтері ретінде анықталды. Бұл реликті және жоғары биоалуандықты аймақтардың экологиялық тұрақтылыққа қызмет ететінін көрсетті. Сонымен қатар, олар эндемикалық түрлердің генетикалық сақталуына табиғи рефугиумдар ретінде қызмет етеді. Зерттеу нәтижелері тек қана жалаң ғылыми және табиғатты қорғаудың маңыздылығын көрсетіп қана қоймай, сонымен қатар өңірдің әлеуметтік-экономикалық дамуы үшін де негіз болып табылады және қоғам мен табиғат арасындағы байланысты нығайтып, жұрттың экологиялық білімін көтереді.

Зерттеудің негізгі нәтижелері:

1. NDVI мәндерін талдау жоғары өсімдік тығыздығы бар экологиялық маңызды аудандарды анық көрсетті. Жайылмалар және биік террасалар геожүйе тұрақтылығы үшін маңызды болып табылады, Fraxinus sogdiana мен Populus diversifolia сияқты реликті түрлерге керекті мекен ортасын береді. Берілген нәтижелер ландшафтты басқару стратегияларына геоақпараттық мониторингті енгізудің маңыздылығын көрсетеді де, сондай-ақ оның қажеттігін дәлелдейді.

2. Экологиялық қауіп аймақтары анықталды. Каньонның беткейлері мен өсімдігі аз жерлері эрозияға, климаттың құбылмалылығына және антропогендік факторлардың ықпалына тәуелді деп есептелді. Осы аймақтарды үнемі бақылау керек, сондай-ақ қалпына келтіру әрекеттерін орындау қажет. Икемді басқару арқылы экологиялық тозуды болдырмау керек де.

3. Тұрақты даму маңыздылығы. Зерттеу табиғи рефугиумдардың орнықты ландшафтты пайдалану үшін, экотуризмнің дамуы үшін және экологиялық білім беру үшін негіз болатынын көрсетеді. Геоақпараттық деректерді өңірлік жоспарлауға

кіріктірудің арқасында шешім қабылдаушылар геожүйелік қызметтерді арттырып, биоалуандықты сақтауға әрі жергілікті қауымдастықтарда экологиялық сана-сезімді дамытуға мүмкіндік алады.

4. Әдістемелік маңыздылығы. Sentinel-2 суреттерін, NDVI талдауын және ГАЖ қолдануды біріктіру ұзақ экологиялық мониторинг үшін тұрақты негіз қалыптастырады. Бұл әдістемелік тәсіл Орталық Азияның шөлейт зонасы мен таулы аймақтары үшін ерекше маңызды, өйткені жерде жүргізілетін бақылаулар шектеулі, әрі NDVI ерте деградация белгілерін анықтау мен қалпына келтіру нәтижелерін бағалау үшін тиімді құрал болып табылады.

5. Халықаралық және салыстырмалы маңыздылығы. Нәтижелер табиғи рефугиумдардың биоалуандықты сақтауы, геожүйелік қызметті қолдауы әрі тұрақты туризмді дамытудағы тиімділігін көрсететін әлемдік тәжірибемен сәйкес келеді. Атап айтқанда, Yosemite National Park пен Жерорта теңізі ландшафттарындағы тұрақты өсімдік жамылғысы бар аумақтар қорғау және білім беру бастамалары үшін тірек нүктелер ретінде қызмет етуі мүмкін. Сарытоғай шатқалы Орталық Азиядағы баламалы үлгі болып табылады және ұқсас стратегияларды жергілікті экологиялық және әлеуметтік-экономикалық жағдайларға бейімдеуге болады. Осылайша, жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік беріледі.

Қорытындылай келе, бұл зерттеу геоақпараттық мониторингтің тиімді тәсіл екенін көрсетеді. Ол ландшафттардың өсімдік жамылғысының динамикасын бағалау, экологиялық қауіптерді анықтау және тұрақты ландшафтты басқаруды қолдау үшін керек. Сарытоғай елді мекені экологиялық зерттеулер, әлеуметтік-экономикалық жоспарлау және қашықтықтан зондтауды біріктіру жолымен тұрақты рекреациялық даму мен мониторинг пен ғылыми зерттеулердің тоғысқан жеріндегі эталондық аумақ болып табылады. Бұл тұжырымдарды өңірлік даму стратегияларына енгізу арқылы Қазақстан биоалуандықты сақтауды күшейтуге, экологиялық білім беруді дамытуға және ерекше табиғи ландшафттарды тұрақты пайдалануды қамтамасыз етуге мүмкіндік алады.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар EOS Data Analytics дереккөздерден алды. Мәтінді редакциялау барысында жасанды интеллект (Microsoft Copilot) қолданылды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау - БСК; деректерді басқару – БСК, ННК; Ресми талдау - БСК; Әдістеме - ННК; Бағдарламалық қамтамасыз ету - ННК; Қадағалау – БСК, ҚМБ; Визуализация - ЛСБ; Бастапқы жобаны жазу - БСК; Шолу жазу және редакциялау – БСК, ЛСБ.

АЛҒЫ СӨЗ

Авторлар Нұржан Нұрбергенұлы Керімбайға (ННК) осы жұмыстың әдістемесіне, бағдарламалық қамтамасыз етуге, әзірлеуге және бастапқы дайындауға қосқан баға жетпес үлесі үшін шын жүректен алғыс білдіреді. Өкінішке орай, ол мақала аяқталғанға дейін қайтыс болды. Оның ғылыми мұрасы осы зерттеудің ажырамас бөлігі болып қала береді.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Nepal, S. K. (2003). Tourism and sustainable development in mountain areas. Annals of Tourism Research. 30(1), 1–21 https://doi.org/10.1016/S0160-7383(02)00039-0
2. Price, M., Byers, A., & Sukhdev, P. (2013). Conservation and sustainable use of mountain biodiversity. Mountain Research and Development. 33(3), 234–245 https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00028.1
3. Panizza, M. (2001). Remote sensing for geomorphology and landscape ecology. Progress in Physical Geography. 25(3), 381–391 https://doi.org/10.1177/030913330102500307
4. Reynard, E. (2009). Geomorphology and ecosystem functioning. Geomorphology. 107(1–2), 1–11 https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.010
5. Sari, D., Alimov, A., & Beketayev, N. (2023). Sentinel-2 NDVI monitoring of riparian vegetation in Central Asia. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 31, 101992 https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101992
6. Cui, H., Zhang, J., & Wang, Y. (2022). Spatio-temporal vegetation analysis using Sentinel-2 data. Remote Sensing, 14(4), 876 https://doi.org/10.3390/rs14040876
7. Fang, J., Chen, A., & Yu, G. (2014). Vegetation index dynamics and climate variability in arid regions. Environmental Monitoring and Assessment. 186, 8351–8366 https://doi.org/10.1007/s10661-014-3928-2

8. Bao, W., Li, X., & Liu, Y. (2014) Remote sensing of arid and semi-arid vegetation: Methods and applications. Journal of Arid Environments. 103, 37–45. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.004
9. Bao, W., Li, X., & Liu, Y. (2015). NDVI time series for monitoring ecosystem changes in Central Asia. Remote Sensing of Environment. 162, 123–134 https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.001
10. Atasoy, B., Demir, B., & Kaya, C. (2022). Landscape-ecological approaches for sustainable land use planning. Ecological Indicators. 140, 109028 https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109028
11. Korunchikova, E., Petrova, A., & Ivanov, V. (2018). Forest ecosystems and landscape stability: Insights from relict ash groves. Ecology and Evolution. 8(14), 7156–7168 https://doi.org/10.1002/ece3.4167
12. Ozgeldinova, A., Ismagulova, D., & Bekzhanova, L. (2024). Relict forest ecosystems as indicators of landscape sustainability. Environmental Monitoring and Assessment. 196, 45 https://doi.org/10.1007/s10661-024-11234-7
13. Hannah, L., Roehrdanz, P. R., & Marquet, P. (2014). Climate change, refugia, and the conservation of biodiversity. Nature Climate Change. 4, 121–128 https://doi.org/10.1038/nclimate2095
14. Moreira, F., Viedma, O., & Arianoutsou, M. (2020). Natural refugia and forest resilience in Mediterranean ecosystems. Forest Ecology and Management. 473, 118291 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118291
15. Watson, J. E. M., Dudley, N., & Segan, D. B. (2014). The performance and potential of protected areas. Nature. 515, 67–73. https://doi.org/10.1038/nature13947
16. Ogar, G., Babayeva, N., & Isabayeva, D. (1997). Protected areas and natural heritage conservation in Kazakhstan. Environmental Geography Studies 3(1), 12–25.
17. План управления на 2015-2019 годы (2015). РГУ «Чарынский государственный национальный природный парк». – Шонжы: Программа Научного отдела ЧГНПП, 2015. – 198 с.
18. Aldibekova, A., Sultanova, B., Aksoy, A., Kurmanbayeva, M., & Nurmukhametov, Z. (2021) Comparative study of root, stem, and leaf anatomy of young Sogdian ash trees (Fraxinus sogdiana Bunge) growing in river valleys of the Sharyn State National Park. International Journal of Biology and Chemistry. 14(1), 80–89 DOI: https://doi.org/10.26577/ijbch.2021.v14.i1.08
19. Kerimbay, B.S., Kerimbay, N.N., Mazbaev, O.B., Dunets, A.N. (2020). Sharyn state national natural park. Evero, Almaty. -116 p.
20. Kerimbay, B.S., Baimyrzaev, K.M., Kerimbay, N.N., & Kaliaskarova, Z.K. (2024). Possibilities of creating tourist and recreational complexes based on the landscape conditions of the mountainous districts of the Almaty region, Kazakhstan. Geojournal of Tourism and Geosites. 55(3), 1392–1401 https://doi.org/10.30892/gtg.55339-1311
21. Ekebaev, R., Yessimbekov, B., & Iskakova, M. (2020). Relict ash forests as indicators of landscape resilience in Central Asia. Central Asian Environmental Studies. 18(2), 87–101.
22. Vintergoller, M. (1984). Flora of Central Asia: Relict species in river valleys. Botanical Journal of the USSR. 69(6), 923–934
23. Krause, F., & Haaland, H. (2017). Integrating natural refugia into sustainable landscape management. Journal of Environmental Planning and Management. 60(8), 1351–1365 https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1251876
24. Eagles, P. F. J., McCool, S. F., & Haynes, C. D. (2002). Sustainable tourism in protected areas: Guidelines for planning and management. IUCN. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-008.pdf?utm_source=copilot.com
25. Worboys, G. L., Lockwood, M., & Kothari, A. (2015). Protected area governance and management. ANU Press.

REFERENCES

1. Nepal, S. K. (2003). Tourism and sustainable development in mountain areas. Annals of Tourism Research. 30(1), 1–21 https://doi.org/10.1016/S0160-7383(02)00039-0
2. Price, M., Byers, A., & Sukhdev, P. (2013). Conservation and sustainable use of mountain biodiversity. Mountain Research and Development. 33(3), 234–245 https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-13-00028.1
3. Panizza, M. (2001). Remote sensing for geomorphology and landscape ecology. Progress in Physical Geography. 25(3), 381–391 https://doi.org/10.1177/030913330102500307
4. Reynard, E. (2009). Geomorphology and ecosystem functioning. Geomorphology. 107(1–2), 1–11 https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.010
5. Sari, D., Alimov, A., & Beketayev, N. (2023). Sentinel-2 NDVI monitoring of riparian vegetation in Central Asia. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 31, 101992 https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101992
6. Cui, H., Zhang, J., & Wang, Y. (2022). Spatio-temporal vegetation analysis using Sentinel-2 data. Remote Sensing, 14(4), 876 https://doi.org/10.3390/rs14040876
7. Fang, J., Chen, A., & Yu, G. (2014). Vegetation index dynamics and climate variability in arid regions. Environmental Monitoring and Assessment. 186, 8351–8366 https://doi.org/10.1007/s10661-014-3928-2
8. Bao, W., Li, X., & Liu, Y. (2014) Remote sensing of arid and semi-arid vegetation: Methods and applications. Journal of Arid Environments. 103, 37–45. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.004
9. Bao, W., Li, X., & Liu, Y. (2015). NDVI time series for monitoring ecosystem changes in Central Asia. Remote Sensing of Environment. 162, 123–134 https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.001
10. Atasoy, B., Demir, B., & Kaya, C. (2022). Landscape-ecological approaches for sustainable land use planning. Ecological Indicators. 140, 109028 https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109028
11. Korunchikova, E., Petrova, A., & Ivanov, V. (2018). Forest ecosystems and landscape stability: Insights from relict ash groves. Ecology and Evolution. 8(14), 7156–7168 https://doi.org/10.1002/ece3.4167
12. Ozgeldinova, A., Ismagulova, D., & Bekzhanova, L. (2024). Relict forest ecosystems as indicators of landscape sustainability. Environmental Monitoring and Assessment. 196, 45 https://doi.org/10.1007/s10661-024-11234-7
13. Hannah, L., Roehrdanz, P. R., & Marquet, P. (2014). Climate change, refugia, and the conservation of biodiversity. Nature Climate Change. 4, 121–128 https://doi.org/10.1038/nclimate2095
14. Moreira, F., Viedma, O., & Arianoutsou, M. (2020). Natural refugia and forest resilience in Mediterranean ecosystems. Forest Ecology and Management. 473, 118291 https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118291
15. Watson, J. E. M., Dudley, N., & Segan, D. B. (2014). The performance and potential of protected areas. Nature. 515, 67–73. https://doi.org/10.1038/nature13947
16. Ogar, G., Babayeva, N., & Isabayeva, D. (1997). Protected areas and natural heritage conservation in Kazakhstan. Environmental Geography Studies 3(1), 12–25.

17. Plan upravleniya na 2015-2019 gody [2015]. RGU «Charynskii gosudarstvennyi natsionalnyi prirodnyi park» [Management Plan for 2015-2019 / RGU Charyn State National Nature Park] – Shonzhi: The program of the Scientific Department of the CHGNPP, 2015. – 198 p.
18. Aldibekova, A., Sultanova, B., Aksoy, A., Kurmanbayeva, M., & Nurmukhametov, Z. (2021) Comparative study of root, stem, and leaf anatomy of young Sogdian ash trees (Fraxinus sogdiana Bunge) growing in river valleys of the Sharyn State National Park. International Journal of Biology and Chemistry. 14(1), 80–89 DOI: https://doi.org/10.26577/ijbch.2021.v14.i1.08
19. Kerimbay, B.S., Kerimbay, N.N., Mazbaev, O.B., Dunets, A.N. (2020). Sharyn state national natural park. Evero, Almaty. -116 p.
20. Kerimbay, B.S., Baimyrzaev, K.M., Kerimbay, N.N., & Kaliaskarova, Z.K. (2024). Possibilities of creating tourist and recreational complexes based on the landscape conditions of the mountainous districts of the Almaty region, Kazakhstan. Geojournal of Tourism and Geosites. 55(3), 1392–1401 https://doi.org/10.30892/gtg.55339-1311
21. Ekebaev, R., Yessimbekov, B., & Iskakova, M. (2020). Relict ash forests as indicators of landscape resilience in Central Asia. Central Asian Environmental Studies. 18(2), 87–101.
22. Vintergoller, M. (1984). Flora of Central Asia: Relict species in river valleys. Botanical Journal of the USSR. 69(6), 923–934
23. Krause, F., & Haaland, H. (2017). Integrating natural refugia into sustainable landscape management. Journal of Environmental Planning and Management. 60(8), 1351–1365 https://doi.org/10.1080/09640568.2016.1251876
24. Eagles, P. F. J., McCool, S. F., & Haynes, C. D. (2002). Sustainable tourism in protected areas: Guidelines for planning and management. IUCN. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/PAG-008.pdf?utm_source=copilot.com
25. Worboys, G. L., Lockwood, M., & Kothari, A. (2015). Protected area governance and management. ANU Press.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРОСТРАНСТВЕННО - ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ЛАНДШАФТОВ ПОЛУПУСТЫННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Баян С. Керімбай* PhD., Нұржан Н. Керімбай к.г.н. ассоциированный профессор, Қуат М. Баймырзаев д.г.н., Лаура С. Байбатырова

«Жетысуский университет имени И.Жансүгірова», г. Талдыкорган, Қазахстан; kbs.zhetysu@gmail.com (Б.С.К.), n.kerimbay1964@gmail.com (Н.Н.К.), niibiotech.research@zu.edu.kz (Қ.М.Б.), baybatyrova1989@gmail.com (Л.С.Б.)
*Автор корреспондент: Баян С. Керімбай, e-mai l kbs.zhetysu@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

динамика ландшафтов, урочище Сарытугай, реликтовая Согдийская Ясеневая роща, геопространственный анализ, устойчивое управление ландшафтами

По статье:
Получено: 08.05.2026
Пересмотрено: 25.05.2026
Принято: 24.08.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Данное исследование рассматривает пространственно-временную динамику ландшафтов реликтовой рощи Согдийского ясеня (Fraxinus sogdiana), расположенного на территории Чарынского государственного национального природного парка в Алматинской области, и оценивает их значение для устойчивого управления и сохранения геосистем. Изменения в период 2016...2024 гг. были изучены на основе растительного покрова с использованием спутниковых данных Sentinel-2 и методов геоинформационного анализа. Методология включала анализ временных рядов NDVI, картографическую визуализацию, корреляцию склонов и экспозиций, выявление пространственных моделей биоразнообразия и экологического риска. Эти подходы позволили определить приоритетные зоны для восстановления и охраны ландшафтов. Результаты показали выраженные колебания растительного покрова, связанные с антропогенными нагрузками (выпас скота, рекреационная деятельность), климатической изменчивостью и сокращением зеленых территорий в речных долинах. Исследование подтверждает важность непрерывного геопространственного мониторинга для выявления ранних признаков экологической деградации и формулирует научно обоснованные рекомендации по сохранению целостности реликтовых лесных геосистем. Эти выводы имеют широкое значение для сохранения биоразнообразия и устойчивого ландшафтного управления в условиях полупустынных территорий.

GEOECOLOGICAL MONITORING OF THE SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF SEMI-ARID TERRITORY LANDSCAPES

Bayan S. Kerimbay* PhD, Nurzhan N. Kerimbay Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Kuat M. Baimyrzayev Doctor of Geographical Sciences, Laura S. Baibatyrova

"Zhetysu University named after I. Zhansugurov", Taldykorgan, Kazakhstan; kbs.zhetysu@gmail.com (B.S.K.), n.kerimbay1964@gmail.com (N.N.K.), niibiotech.research@zu.edu.kz (K.M.B.), baybatyrova1989@gmail.com (L.S.B.)
*Author correspondent: Bayan C. Kerimbay, kbs.zhetysu@gmail.com

KEY WORDS

Landscape dynamics; Sarytugai tract; Relict Sogdian Ash Grove; Geospatial analysis; Sustainable landscape management

About article:
Received: 08.05.2026
Revised: 25.05.2026
Accepted: 24.08.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

This study examines the spatio-temporal dynamics of the landscapes of the relict grove of Sogdian ash *(Fraxinus sogdiana)*, located within the Charyn State National Nature Park in Almaty Region, and assesses their significance for sustainable management and geosystem conservation. Changes during the period 2016...2024 were analyzed based on vegetation cover using Sentinel-2 satellite data and geoinformation methods. The methodology included NDVI time-series analysis, cartographic visualization, slope–aspect correlation, and identification of spatial patterns of biodiversity and ecological risk. These approaches made it possible to determine priority areas for landscape restoration and protection.

The results revealed pronounced fluctuations in vegetation cover associated with anthropogenic pressures (livestock grazing, recreational activities), climatic variability, and the reduction of green areas in river valleys. The study confirms the importance of continuous geospatial monitoring for detecting early signs of ecological degradation and formulates scientifically grounded recommendations for preserving the integrity of relict forest geosystems. These findings have broad implications for biodiversity conservation and sustainable landscape management in semi-arid regions.

Баспагердің ескертпесі: барлық жарияланымдардағы мәлімдемелер, пікірлер мен деректер «Гидрометеорология и экология» журналына және/немесе редакторға(ларға) емес, тек авторға(ларға) тиесілі.

Гидрометеорология и экология

Ғылыми мақала

НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІЛІК МОДЕЛЬДЕРДІ ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, PLANETSCOPE КЕСКІНДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН ЖЕРЛЕРДІҢ МҰНАЙМЕН ЛАСТАНУЫН СЕМАНТИКАЛЫҚ СЕГМЕНТТЕУ

Ғалымжан С. Әбдіманап*, Татьяна В. Дедова техника ғылымдарының кандидаты, Лариса А. Балакай техника ғылымдарының кандидаты, Данияр Б. Нурсеитов физика-математика ғылымдарының кандидаты, Серик М. Нуракынов[1] PhD

ЖШС «Ионосфера институты», Алматы қ., Қазақстан; g.s.abdimanap@gmail.com (Ғ.С.Ә.), dedova3007@gmail.com (Т.В.Д.), larissabalakay@gmail.com (Л.А.Б.), nurseitovdb@gmail.com (Д.Б.Н.)
*Автор корреспондент: Ғалымжан С. Әбдіманап, g.s.abdimanap@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

мұнаймен ластанған аумақтар, қашықтықтан зондтау, PlanetScope, терең оқыту, семантикалық сегментация

АБСТРАКТ

Жерлердің мұнаймен ластануын бақылау Қазақстан үшін өзекті мәселе болып табылады. Кеңестік кезеңде кейбір кен орындарында мұнай өндіру «амбарлық» әдіспен жүргізілді: бұрғылау қалдықтары, технологиялық сұйықтықтар және ілеспе ағынды сулар өндіру орнының жанында арнайы қазылған амбарларға жинақталды, нәтижесінде рекультивация мен бақылауды қажет ететін мұнаймен ластанған аумақтар едәуір жинақталып қалды. Қашықтан зондтау әдістері терең оқыту алгоритмдерімен бірлесіп қолданғанда ластанған аумақтарды дәлірек сегменттеуге және бақылауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста шағын ауданды мұнай ластануларын сегменттеуге арналған, PlanetScope мультиспектрлік түсірілімдері негізінде қалыптастырылған ROSID-HR деректер жиыны ұсынылады. ROSID-HR жасау кезінде бұрын әзірленген ROSID деректер жиынындағы мұнаймен ластанған учаскелер эталондық белгілеу ретінде пайдаланылды, бұл екі деректер жиыны арасындағы аннотация дәйектілігін қамтамасыз етті. Эксперименттер арқылы мұнаймен ластанған аумақтарды көлеңкелер мен техногендік нысандардан тиімдірек ажырату үшін PlanetScope арналарының оңтайлы конфигурациясы Blue-Red-NIR (2-6-8) айқындалды. Деректер жиынының жұмысқа қабілеттілігін тексеру үшін классикалық DeepLabv3+ және трансформерлік Mask2Former модельдері арқылы семантикалық сегментация жүргізілді. Mask2Former архитектурасы тестілік жиында «мұнай» класы үшін IoU мәнін 69,73%-ке жеткізді, бұл DeepLabv3+ моделінің нәтижесінен (21,63%) үш еседен астам жоғары. Нәтижелер шағын ауданды мұнаймен ластанған учаскелерді анықтауда PlanetScope деректері мен Mask2Former архитектурасын бірлесіп қолданудың қарастырылған тәсілдер шеңберіндегі тиімділігі мен артықшылығын растайды.

1. КІРІСПЕ

Мұнай өндіру, сақтау немесе тасымалдау барысында құрлықта мұнайдың төгілуі мен мұнаймен ластанған жерлердің пайда болуы топырақтың табиғи химиялық тепе-теңдігінің бұзылуына әкелетін ауыр экологиялық салдарларға соқтырады. Мұнайдың топырақтың үстіңгі қабатында жинақталуы оның биологиялық белсенділігінің төмендеуіне, су-ауа режимінің нашарлауына, өсімдіктердің қалыпты өсуінің тежелуіне, сондай-ақ биоценоздардағы өзгерістерге, яғни түрлер арасында қалыптасқан байланыстардың бұзылуына әкеледі. Топырақ экожүйесінің тұтастай тұрақтылығы айтарлықтай төмендейді, сонымен қатар топырақтың өздігінен қалпына келу қабілеті де кемиді [1].

Мақала жайында:
Алынды: 10.06.2026
Қайта қаралды: 16.07.2026
Қабылданды: 17.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

Для цитирования:
Әбдіманап Ғ.С., Дедова Т.В., Балакай Л.А., Нурсеитов Д.Б., Нуракынов С.М., Нейрондық желілік модельдерді пайдалана отырып, PlanetScope кескіндеріне негізделген жерлердің мұнаймен ластануын семантикалық сегменттеу // Гидрометеорология және экология, 123 (3), 2026, 289–303.

Қазақстан үшін мұнай төгінділері мәселесі ерекше өткір тұр. Мұнаймен ластанған топырақтардың едәуір бөлігі кеңестік кезеңнен бастап мұнай өндірудің негізгі аймағы болып келе жатқан Каспий өңірінде шоғырланған [2]. Ең көп зардап шеккен аудандарда мұнай өнімдерінің концентрациясы 172 480 мг/кг-ға жетеді, бұл Қазақстанда белгіленген 100 мг/кг рұқсат етілген шекті концентрациядан бірнеше есе асып түседі [3]. Мұндай учаскелердің көп бөлігі кеңестік кезеңнің тарихи ластануларына жатады, ол кезде қалдықтар тиісінше сақталмай, ашық полигондарға үйілген немесе тікелей топыраққа, су айдындарына не арнайы ұйымдастырылған резервуарларға төгілген. Соңғы жылдары Қазақстанның мұнай өндіруші компаниялары мұнаймен ластанған аумақтарды рекультивациялау бойынша жұмыстар жүргізіп жатқанымен, мұндай учаскелерді анықтаудың тиімді әдістерін әзірлеу қажеттілігі сақталуда. Бұл рекультивация процесінің өзін де, оны кейіннен бақылауды жоспарлау үшін қажет.

Жерді қашықтан зондтау (ЖҚЗ) әдістері, оның ішінде спутниктік бақылаулар мен аэрофототүсірілім, топырақтың мұнаймен ластануын картографиялаудың тиімді құралдары болып табылады [4]. Мұнаймен ластанған аумақтарды дешифрлеудің бірнеше әдісі бар. [5] жұмыста топырақ температурасын бағалау үшін интерполяция мен градиенттік талдау әдістері қолданылды, бұл мұнай ластануларымен байланысты термиялық ауытқуларды анықтауға мүмкіндік береді. Бірқатар жұмыстарда топырақтың мұнаймен ластануын анықтау үшін спектрлік индекстер мен машиналық оқыту әдістері пайдаланылды [6]. Кувейттің аудандарындағы мұнай төгінділерін бақылауға арналған [7] зерттеуде мультиспектрлік деректерді жіктеу үшін тірек векторлар әдісі (SVM) мен кездейсоқ ормандар (RF) әдістері қолданылды. Зерттеу нәтижелері анықтау сапасына әдістерді таңдаудан гөрі пайдаланылған спутниктік деректердің спектрлік ажыратымдылығы көбірек әсер ететінін көрсетті.

Конволюциялық нейрондық желілердің (CNN) пайда болуы спутниктік түсірілімдерді дешифрлеу тәсілдерін айтарлықтай өзгертті. CNN мұнайды танып-білуді өзі үйренеді; ол оқыту жинағында жинақталған мысалдардан ақпаратты автоматты түрде бөліп алады [8, 9]. Сондықтан мұндай деректер жинақтарының көлемі мен дәлдігіне қойылатын талап арта түседі. Алайда құрлықтағы мұнай төгінділері саласында сапалы белгіленген деректер әлі де аз [10].

Біздің алдыңғы зерттеуімізде Landsat спутниктік түсірілімдері негізінде ROSID деректер жинағы әзірленіп, жарияланған болатын [11]. ROSID 9 класс бойынша аннотацияларды ұсынып, PSPNet, DeepLabv3, DeepLabv3+, UNet және Mask2Former сияқты архитектуралар үшін базалық дәлдік көрсеткіштерін (benchmarks) белгіледі. Жүргізілген эксперименттердің нәтижелері бойынша конволюциялық нейрондық желілер арасындағы ең жоғары көрсеткіштерді DeepLabv3 + архитектурасы көрсетті, ал Mask2Former трансформаторлық архитектурасы ең жақсы жалпы нәтижені көрсетті. Алайда орташа ажыратымдылықтағы түсірілімдерді пайдалану ауданы шағын мұнаймен ластанған аумақтарды анықтауға белгілі бір шектеулер қояды. Бұл Кеңістіктік ажыратымдылығы жоғары деректерде терең оқыту әдістерін сынақтан өткізуді қажет етеді. Сонымен қатар, орташа ажыратымдылық деректерінен алынған нәтижелер конволюциялық немесе трансформаторлық тәсілдердің артықшылықтары қаншалықты тиімді екенін нақты бағалауға мүмкіндік бермейді. Осыған байланысты, бұл жұмыс зерттеудің келесі кезеңін ұсынады, оның шеңберінде әртүрлі модельдер отбасыларына жататын ең тиімді екі архитектура, конволюциялық (DeepLabv3+) және трансформаторлық (Mask2Former), PlanetScope 3-5 м кеңістіктік ажыратымдылықтағы суреттерінен құрылған жаңа ROSID-HR деректер жиынтығында оқытылады және сыналады. Жоғары кеңістіктік ажыратымдылықтағы қашықтықтан зондтау деректеріндегі осы салыстырмалы талдаудың нәтижелері ластанған аумақтарды тануға арналған жасанды нейрондық желінің мамандандырылған моделін кейіннен әзірлеу үшін ең перспективалы архитектуралық тәсілді анықтау үшін негіз болады.

2. МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ӘДІСТЕР

Зерттеу ауданын таңдау авторлардың алдыңғы жұмысының нәтижелерімен негізделеді. Ол жұмыста орташа кеңістіктік ажыратымдылықтағы (30 м) Landsat спутниктік деректері негізінде Маңғыстау облысының мұнай кен орындары аумағындағы мұнаймен ластанған жерлер анықталған еді. Бұл кен орындарында бұрғылаудың «амбарлық» әдісі кеңінен қолданылды; яғни бұрғылау қалдықтары мен ағынды сулар ұңғымалардың жанында арнайы қазылған амбарларға жинақталды.

Осы зерттеу шеңберінде PlanetScope тобының жоғары кеңістіктік ажыратымдылықтағы оптикалық спутниктік түсірілімдері негізінде жаңа оқыту деректер жинағы (ROSID-HR) қалыптастырылды. Алдыңғы зерттеуде анықталған мұнай ластануының учаскелері (ROSID деректер жинағы) аннотацияланған кескіндерді қалыптастыру кезінде эталондық белгілеу ретінде пайдаланылды, бұл ластанған аумақтардың кеңістіктік шекараларын нақтылауға және жоғары ажыратымдылықтағы жаңа оқыту деректерін жасауға мүмкіндік берді.

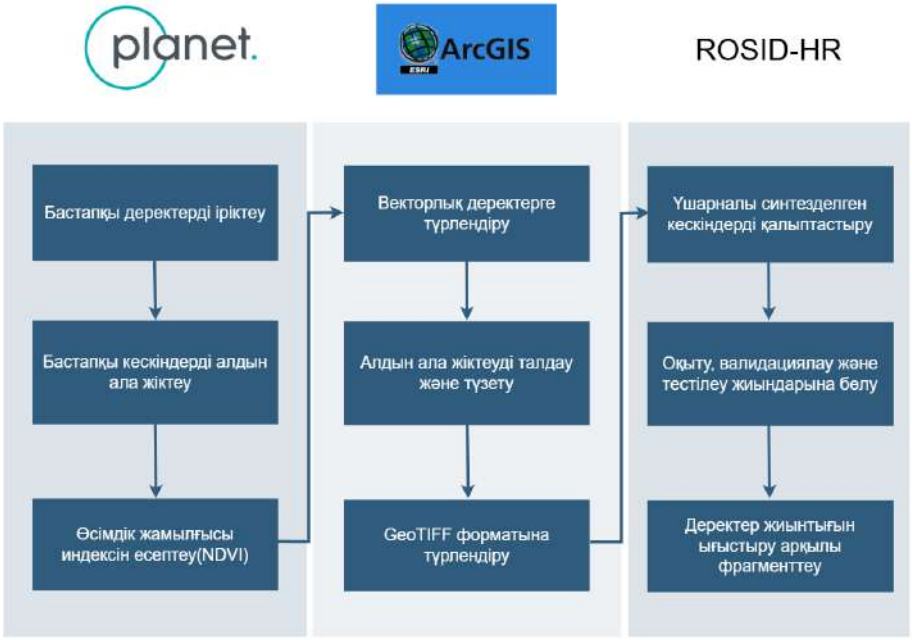
PlanetScope оптикалық түсірілімдерінің кеңістіктік ажыратымдылығы 3…5 м, бұл бұрын пайдаланылған Landsat деректерінен (30 м) едәуір жоғары. 2022 жылдан бастап PlanetScope спутниктік тобын жаңғырту шеңберінде жетілдірілген SuperDove сенсорлары қолданылады; олар 8 спектрлік арнада мультиспектрлік кескіндер алуды қамтамасыз етеді: coastal blue (жағалаулық көк), blue (көк), green I, green (жасыл), yellow (сары), red (қызыл), red-edge (қызыл шекара) және near-infrared (NIR, жақын инфрақызыл). PlanetScope түсірілімдерінің 3…5 м кеңістіктік ажыратымдылығы шағын нысандар мен бет біркелкісіздіктерін егжей-тегжейлі талдауға жеткілікті. Бұған қоса, SuperDove сенсорларының red-edge және NIR арналарын қамтитын кеңейтілген спектрлік жиынтығы жер беті түрлерін, өсімдік жамылғысының күй-жайын және мұнаймен ластанған учаскелерді дәлірек ажыратуға мүмкіндік береді.

Жоғары ажыратымдылықтағы спутниктік түсірілімдерді өңдеу процесі келесі кезеңдерден тұрды (1-сурет):

- Бастапқы деректерді іріктеу. Зерттеу ауданы үшін PlanetScope спутниктерінің 2017…2024 жж. аралығындағы бұлттылығы ең төмен түсірілімдері жылына үш мозаика жиілігімен іріктелді. Нәтижесінде ауданы шамамен 540 км² кен орнының аумағын қамтитын 24 мозаика және ауданы шамамен 550 км² кен орнының аумағын қамтитын 8 мозаикадан тұратын деректер жиынтығы қалыптастырылды.
- Бастапқы түсірілімдерді алдын ала жіктеу EM Cluster Analysis әдісі арқылы жүргізілді: мұнай, бұлттылық, бұлт көлеңкесі, су, урбандалған аумақ, топырақ, өсімдік жамылғысы, мұнай төгінділеріне спектрлік тұрғыдан ұқсас нысандар класы (егіздер), жол және фон. «Көлеңке» класы «мұнай» класының ықтимал спектрлік антагонисі ретінде осы кезеңде арнайы бөлініп алынды, өйткені екі нысан да кескінде қараңғы тонмен көрінеді және оларды ажырату мұнай ластануын дұрыс анықтау үшін маңызды. Бұл ретте көлеңкелер тек бұлт көлеңкесінен ғана емес, сонымен қатар ғимараттар, өндірістік құрылыстар мен басқа да биік нысандардың түсіруінен де пайда болуы мүмкін, сондықтан класс осындай жағдайлардың барлығын қамту үшін жалпылама сипатта белгіленген. «Бұлттылық» класы, керісінше, ашық реңкімен ерекшеленеді және мұнаймен спектрлік тұрғыдан шатаспайды; ол жеке мозаикаларда кездесетін болмашы фрагменттерді жіктеу схемасының толықтығы үшін дұрыс белгілеу мақсатында сақталды.
- Өсімдік жамылғысы индексін (NDVI) [12] есептеу, өсімдік жамылғысы мен су нысандары класын бөліп алу мақсатында жасалды.
- Векторлық деректерге түрлендіру. Нәтижелерді нақтылау және түзету мақсатында жіктеу растрлары векторлық форматқа түрлендірілді.
- Алдын ала жіктеуді талдау және түзету ArcGIS бағдарламасында жүргізілді. Мұнаймен ластанған аймақтардың векторланған деректерін қолмен нақтылауға ерекше назар аударылды. Олар алдыңғы зерттеулер деректері (ROSID), экологиялық

мониторингтің тарихи деректері және спутниктік кескіндерді сараптамалық дешифрлеу негізінде түзетілді.

- Аннотацияланған кескіндерді қалыптастыру үшін түзетілген векторлық деректерді GeoTIFF форматына түрлендіру.
- PlanetScope түсірілімдері негізінде үшарналы синтезделген кескіндерді қалыптастыру мұнай қабыршақтары мен мұнаймен ластанған топырақтың максималды визуалды және тоналды контрастын қамтамасыз ететін спектрлік арналардың оңтайлы үйлесімі негізінде жүзеге асырылды.
- Оқыту, валидациялау және тестілеу жиындарына бөлу. Кеңістіктік деректердің өтуін болдырмау үшін бастапқы толық мөлшерлі мозаикалар (кескіндер) патчтарға кесілгенге дейін географиялық/кеңістіктік тұрғыдан оқыту, валидациялау және тестілеу жиындарына бөлінді. Бұл бір аумақтың көршілес немесе қабаттасатын фрагменттерінің әртүрлі жиындарға түсу қаупін толығымен жойды.
- Деректер жиынтығын ығыстыру арқылы фрагменттеу. Түзетілген растрлық маскалар мен оларға сәйкес түсірілімдер 512×512 пиксель өлшемді патчтарға 256 пиксель ығысумен фрагменттелді.



Сурет 1. *Жоғары ажыратымдылықтағы спутниктік түсірілімдерді өңдеу тізбегі*

Қалыптастырылған ROSID-HR деректер жинағы семантикалық сегментация модельдерін оқыту және бағалау үшін негіз ретінде пайдаланылды. Құрлықтағы мұнай төгінділерін автоматты картографиялау есебі ластанған учаскелерді дәл идентификациялап, сегменттей алатын кескіндерді өңдеу әдістерін қолдануды талап етеді. Осы зерттеуде семантикалық сегментация жүргізу үшін екі түрлі нейрожелілік архитектура таңдалды; бұл классикалық конволюциялық және трансформерлік тәсілдердің тиімділігіне ортақ оқыту деректерінде салыстырмалы талдау жүргізуге мүмкіндік берді.

Конволюциялық нейрондық желілер (CNN) кескіндерден қарапайым жиектер мен текстуралардан бастап күрделі нысандық сипаттамаларға дейінгі кеңістіктік белгілерді автоматты түрде үйрену қабілетінің арқасында компьютерлік көру саласында кеңінен қолданылады [13]. Математикалық тұрғыдан $\boldsymbol{I}$ кескінінің $\boldsymbol{K}$ ядросымен дискретті конволюциясы (1) теңдеуімен анықталады:

$$S(i,j) = (I \cdot K)(i,j) = \sum_m \sum_n I(i-m, j-n) K(m,n) \quad (1)$$

мұндағы $S(i,j)$ - шығыс белгілер картасы (feature map), ал m мен n - конволюциялық ядроның кеңістіктік индекстері.

Кескіндерді жіктеуде бүкіл кескін үшін бір класс анықталса, семантикалық сегментацияда әрбір пиксель жеке жіктеледі. Бұл шығыс қабатында кеңістіктік ақпараттың сақталуын талап етеді, сондықтан толық байланысқан қабаттардың орнына 1×1 конволюциясы қолданылады.

DeepLabv3+ архитектурасы [14] параметрлер санын көбейтпестен нейронның қабылдау өрісін кеңейтуге мүмкіндік беретін кеңейтілген (атрозды) конволюцияларға негізделеді. Атрозды конволюцияның шығыс сигналы y, сүзгі w арқылы өңделген кезде әрбір i пикселі үшін (2) теңдеуімен сипатталады:

$$y[i] = \sum_{k=1}^{K} x[i + r \cdot k] w[k] \quad (2)$$

мұндағы x - кіріс сигналы, $w[k]$ - сүзгі коэффициенті, r - сүзгі элементтері арасындағы арақашықтықты анықтайтын дилатация коэффициенті. Көпмасштабты белгілерді бөліп алу үшін модель атрозды кеңістіктік пирамидалық пулинг модулін (Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP) пайдаланады. ASPP модулінде әртүрлі r мәндерімен бірнеше параллель конволюция орындалады, олардың нәтижелері кейіннен біріктіріліп, ортақ белгілер көрінісін қалыптастырады.

Сегментация шекараларының жоғары дәлдігі энкодер-декодер архитектурасы арқылы қамтамасыз етіледі: энкодер кескіннің семантикалық ерекшеліктерін бөліп алса, декодер жоғалған кеңістіктік ақпаратты қалпына келтіреді. Сонымен қатар, DeepLabv3+ архитектурасында стандартты конволюциялық қабаттардың орнына тереңдік бойынша бөлінетін конволюциялар (depthwise separable convolutions) қолданылады. Бұл тәсіл мұнаймен ластанған учаскелерді анықтау дәлдігін сақтай отырып, модельдің есептеу күрделілігі мен параметрлер санын едәуір азайтуға мүмкіндік береді.

Mask2Former - әмбебап сегментация тапсырмаларын орындауға арналған заманауи мета-архитектура [15]. Әдіс трансформер негізіндегі декодер арқылы маскаларды жіктеу принципіне негізделген. Оның негізгі компоненті - назар аудару аймағын нақты сегменттермен шектейтін бүркемеленген назар механизмі (3):

$$X_l = Softmax\left(M_{l-1} + Q_l K_l^T\right) V_l + X_{l-1} \quad (3)$$

мұндағы X_l – l қабатының кіріс белгілері, l, Ql, Kl, Vl - сәйкесінше сұраулар, кілттер және мәндер матрицалары.

(3) теңдеудегі M_{l-1} маскасы назар аудару матрицасын басқарып, назардың тек болжанған маска ішіндегі белгілерге бағытталуын қамтамасыз етеді (4):

$$M_{l-1}(x,y) = \begin{cases} 0, & \text{if } M_{l-1}(x,y) = 1 \\ -\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Мұндағы $m_{l-1} \in \{0,1\}$ декодердің ағымдағы қабатындағы белгілер карталарының масштабына келтірілген мақсатты класстың екілік маскасы.

Эксперименттерді жүргізу шарттары. Жұмыста PyTorch ашық бастапқы бағдарламалық кітапханасы қолданылды [16]. Барлық есептеу эксперименттері NVIDIA Quadro RTX 5000 графикалық процессорларында жүргізілді. Кіріс кескіндер 512×512 пиксель өлшеміне келтірілді, әрі әрбір арна бойынша орташа мәндері [123.675; 116.28; 103.53] және стандартты ауытқулары [58.395; 57.12; 57.375] болатындай нормаланды. Бұл алдын ала өңдеу қадамы оқыту процесінің жинақталуын жеделдетуге және модельдің тұрақты оқытылуын қамтамасыз етуге бағытталған.

Модельдердің тұрақтылығы мен жалпылау қабілетін арттыру үшін деректерді аугментациялау әдістері қолданылды: кескіндерді 50…200% диапазонында кездейсоқ масштабтау; фондық кластардың басымдығын азайту үшін фрагменттерді ең үлкен коэффициенті 0.75 болатын кездейсоқ кесіп алу (random cropping); әртүрлі

жарықтандыру және сыртқы орта жағдайларына ұқсас кескін алу үшін көлденең шағылыстыру, сондай-ақ жарықтық пен түсті өзгерту.

1-кестеде әр класс үшін пиксельдер саны көрсетілген. «Мұнай» класы элементтердің жалпы санының 2.45%-ын құрайды (фон класын есепке алмағанда). Деректер жинағында кластардың елеулі теңгерімсіздігі байқалады: «мұнай» класында 70 682 248 пиксель бар, ал «топырақ» класында 1 218 895 998 пиксель бар (1-кесте).

Кесте 1

ROSID-HR деректер жинағындағы әрбір класс пиксельдерінің саны

Реті	Класс атауы	Пиксельдер саны
1	Мұнай	70 682 248
2	Бұлттылық	435 260
3	Көлеңке	730 402
4	Су	2 046 640
5	Урбандалған аумақ	22 534 446
6	Топырақ	1 218 895 998
7	Өсімдік жамылғысы	7 525 947
8	Егіздер	412 174
9	Жол	5 188 482
10	Фон	1 554 964 723

Бұл теңгерімсіздік деректердің табиғи біркелкі еместігімен түсіндіріледі, өйткені ластанған учаскелердің ауданы фондық топырақ жамылғысымен салыстырғанда айтарлықтай аз. Деректерді жасанды түрде теңгерімдеуден бас тарту деректердің шынайы таралуын сақтау және модельдің жалпылау қабілетін төмендетпеу мақсатында жүзеге асырылды. Қазіргі теңгерімсіздік өңірдің нақты жағдайын дәл бейнелейді.

Оқыту конфигурациясы. Батч өлшемі 4-ке тең етіп белгіленді. Қайта оқыту әсерлерінің алдын алу үшін InfiniteSampler құралы қолданылды, ол деректердің үздіксіз кездейсоқ араластырылуын қамтамасыз етті. Алдын ала өңдеу процесі тікелей DataLoader деректер жүктеушісіне біріктірілді, бұл есептеу тізбегіндегі кідірістерді барынша азайтуға мүмкіндік берді.

Модельдерді оптимизациялау Adam алгоритмі негізінде, бастапқы оқыту жылдамдығы 0.001 мәнінде жүзеге асырылды. Шығын функциясы ретінде кластар теңгерімсіздігіне төзімді кросс энтропия қолданылды. Модельдердің архитектуралық ерекшеліктеріне байланысты итерациялар саны жекешелендірілді: конволюциялық DeepLabv3+ моделі үшін 40 000 итерация белгіленді, бұл оның индуктивті ауытқуының (inductive bias) жоғары болуына байланысты толық конвергенцияға жетуіне жеткілікті болды. Ал трансформерлік Mask2Former моделі үшін итерация саны 60 000-ға дейін арттырылды, бұл оның назар аудару механизмінің (attention mechanism) күрделілігімен және маскаларды венгерлік сәйкестендіру (bipartite matching) процедурасының баяу тұрақтануымен түсіндіріледі. Осылайша, екі модель де өзінің максималды потенциалды мүмкіндігіне жеткен сәтте өзара салыстырылды.

Валидация және тестілеу конфигурациясы.Объективті бағалауды қамтамасыз ету үшін батч өлшемі 1 мәніне тең етіп белгіленді. Кескіндер геометриялық бұрмаланусыз 512×512 пиксель өлшеміне дейін масштабталды. DefaultSampler араластырусыз қолданылды, бұл нәтижелердің қайталанымдылығын қамтамасыз етті.

Бағалау метрикалары. Кластардың айқын теңгерімсіздігі жағдайында сегментация сапасын сандық талдау үшін компьютерлік көрудің стандартты метрикалар жиынтығы пайдаланылды [17...19]:

- IoU (қиылысудың бірігуге қатынасы) болжанған маска мен эталондық белгілеу арасындағы сәйкестік өлшемі болып табылады және олардың кеңістіктік қабаттасу дәрежесін көрсетеді.
- Accuracy (жалпы дәлдік) кескіндегі пиксельдердің жалпы санынан дұрыс жіктелген пиксельдердің үлесі.
- Precision (нақтылық) модельдің фондық немесе ұқсас нысандарды (мысалы, көлеңкелер немесе ылғалды учаскелер) қате жатқызу жиілігін төмендету қабілетін сипаттайды.
- Recall (толықтық) модельдің барлық нақты ластану учаскелерін өткізіп алмай анықтау қабілетінің сипаттамасы.
- F1-өлшемі Precision және Recall көрсеткіштерінің гармониялық орташа мәні ретінде жалған позитивтер мен жалған негативтер арасындағы теңгерімді бағалайтын метрика.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Арналардың оңтайлы конфигурациясын таңдау. Зерттеудің негізгі кезеңдерінің бірі – мұнай ластануларын анықтау үшін PlanetScope түсірілімдерінің спектрлік арналарының ең тиімді үйлесімін айқындау болды. Әртүрлі арна композиттері сыналып, мынадай нәтижелер алынды:

Композит 8-4-3 (NIR, Green, Green I). Бұл үйлесім өсімдік жамылғысын мониторингілеу үшін стандартты түрде қолданылғанымен, құрлықтағы мұнайды сегменттеу есебінде өте төмен сезімталдық көрсетті. Метрикалардың мәндері (IoU: 2.09%, Recall: 2.17%) осы арналар жиынтығының мұнай мен топырақ арасында жеткілікті контраст бермейтінін және мақсатты нысандардың жаппай өткізіп алынуына әкелетінін көрсетеді.

Композит 8-7-5 (NIR, Red-Edge, Yellow). Бұл комбинация жоғары нақтылық көрсетті (Precision: 68.1%), алайда төмен толықтыққа ие болды, яғни модель мұнаймен ластанған аумақтардың едәуір бөлігін елемейді.

Композит 6-4-8 (Red, Green, NIR). Бұл арналар үйлесімі негізгі көрсеткіштердің жақсаруына әкелді әрі бастапқыда ең оңтайлы ретінде қарастырылды. Көрінетін диапазон арналары (Red, Green) мен жақын инфрақызыл (NIR) арнасының бірлескен қолданылуы кластарды спектрлік тұрғыдан тиімді ажыратуды қамтамасыз етті. NIR арнасы ылғал ұстайтын құрылымдар мен мұнай өнімдерін бөліп алу үшін маңызды болып шықты, ал Red және Green арналары қоршаған топырақ пен жол желісімен қажетті контраст жасады. Бұл композит дәлдік (62.28%) пен толықтық (34.09%) арасында жақсы тепе-теңдікке қол жеткізуге мүмкіндік берді әрі «мұнай» класы үшін IoU мәнін (28.26%) көрсетті. Осы композит пен алынған бағалаулар қорытынды конфигурацияны іздеудегі маңызды кезең болды.

Композит 2-6-8 (Blue, Red, NIR). Көк арнаны (Blue) қызыл (Red) және жақын инфрақызыл (NIR) арналармен үйлестіру мұнаймен ластанған аумақтарды жер беті мен табиғи көлеңкелерден тиімді ажыратуды қамтамасыз етті. Бұл композит «мұнай» класы үшін ең жоғары көрсеткіштерге қол жеткізуге мүмкіндік берді. Нақтылық (Precision) 63.29% болды, толықтық (Recall) 46.13%-ке дейін өсті, ал қорытынды IoU мәні 36.4%-бен ең жоғары деңгейге жетті. Осылайша, бұл композит модельдерді оқыту және қорытынды валидациялау үшін оңтайлы ретінде таңдалды.

DeepLabv3+ архитектурасының нәтижелері. ASPP механизмін пайдалана отырып көпмасштабты контекстті қамтитын DeepLabv3+ архитектурасының тиімділігі валидация және финалдық тестілеу кезеңдерінде бағаланды. «Мұнай» класы үшін валидациядағы IoU мәні 30.08% болды, бұл ретте дәлдік (Precision: 44.19%) мен толықтық (Recall: 48.5%) арасындағы тепе-теңдік жалған оң дабылдардың орташа үлесін көрсетеді (2-кестені қараңыз).

Кесте 2

DeepLabv3+ архитектурасының валидациялық деректердегі метрикалары

Класс	IoU (%)	F1-өлшемі (%)	Precision (%)	Recall (%)
Мұнай	30.08	46.25	44.19	48.50
Бұлттылық	0.00	nan	nan	0.00
Көлеңке	0.00	nan	nan	0.00
Су	0.00	nan	nan	0.00
Урбандалған аумақ	0.00	nan	nan	0.00
Топырақ	96.61	98.28	96.88	99.72
Өсімдік жамылғысы	0.00	nan	nan	0.00
Егіздер	0.00	nan	nan	0.00
Жол	0.00	nan	nan	0.00
Фон	99.48	99.74	99.71	99.77

«Топырақ» (IoU: 96.61%) және «фон» (IoU: 99.48%) кластары үшін жоғары дәлдік модельдің фондық беттерді жіктеудегі тұрақтылығын растайды. Алайда «урбандалған аумақ», «жол» және «өсімдік жамылғысы» кластары үшін нөлге ұмтылатын тым төмен метрика мәндері архитектураның шағын өлшемді немесе спектрлік тұрғыдан күрделі нысандардың белгілерін дұрыс бөліп ала алмайтынын көрсетеді. Бұл DeepLabv3+ конволюциялық негізінің айқын кластар теңгерімсіздігі жағдайында сирек кездесетін класстарды басым «топырақ» класы есебінен басып тастау (class collapse / dominance) тенденциясына бейім екенін көрсетеді.

Тестілік деректер жиынына көшкен кезде сапа көрсеткіштерінде айқын өзгеріс байқалады. Нәтижелерге сәйкес (3-кестені қараңыз), «мұнай» класы үшін толықтық (Recall) көрсеткіші 58.73%-ке дейін өсті, бұл модельдің ластанудың үлкен ауданын анықтай алу қабілетін көрсетеді.

Кесте 3

DeepLabv3+ архитектурасының тестілік деректердегі метрикалары

Класс	IoU (%)	F1-өлшемі (%)	Precision (%)	Recall (%)
Мұнай	21.63	35.57	25.51	58.73
Бұлттылық	nan	nan	nan	nan
Көлеңке	nan	nan	nan	nan
Су	0.00	nan	nan	0.00
Урбандалған аумақ	0.00	nan	nan	0.00
Топырақ	96.89	98.42	97.16	99.71
Өсімдік жамылғысы	0.00	nan	nan	0.00
Егіздер	0.00	nan	nan	0.00
Жол	0.00	nan	nan	0.00
Фон	99.53	99.76	99.83	99.7

Екінші жағынан, бұл дәлдіктің (Precision) 25.51%-ке дейін күрт төмендеуімен қатар жүріп, IoU көрсеткішінің 21.63%-ға дейін азаюына әкелді. Мұндай алшақтық, жол желісін тану сапасының төмендігімен бірге, модельдің спектрлік шуылдарға жоғары сезімталдығы туралы болжамды растайды. Басқаша айтқанда, жол элементтері мен көлеңкелер қате түрде мұнай дақтары ретінде жіктеледі.

Mask2Former архитектурасының нәтижелері. Әмбебап маска сегментациясы механизмі мен назар (attention) стратегияларын пайдаланатын Mask2Former архитектурасын қолдану нысандарды анықтау дәлдігінің айтарлықтай артуына әкелді.

Валидация кезеңінде (4-кестені қараңыз) Mask2Former моделі DeepLabv3+-пен салыстырғанда жақсы нәтижелер көрсетті. IoU мәні «мұнай» класы үшін 64.6%-ке дейін өсті. Дәлдік (Precision: 73.42%) пен толықтықтың (Recall: 84.33%) жоғары көрсеткіштері мұнай ластануларының белгілерін бөліп алу үшін пайдаланудың тиімділігін растайды.

Кесте 4

Mask2Former архитектурасының валидациялық деректердегі метрикалары

Класс	IoU (%)	F1-өлшемі (%)	Precision (%)	Recall (%)
Мұнай	64.6	78.49	73.42	84.33
Бұлттылық	1.64	3.23	81.96	1.65
Көлеңке	39.69	56.82	48.68	68.25
Су	50.98	67.54	65.25	69.99
Урбандалған аумақ	84.85	91.81	92.03	91.59
Топырақ	98.5	99.24	99.1	99.39
Өсімдік жамылғысы	23.68	38.29	53.97	29.67
Егіздер	4.68	8.94	12.17	7.07
Жол	38.11	55.18	58.76	52.02
Фон	99.91	99.95	99.96	99.95

DeepLabv3+-пен салыстырғанда Mask2Former архитектурасы кластарды сегменттеуде жоғары ажырату қабілетін көрсетті. «Урбандалған аумақ» (IoU: 84.85%) және «су» (IoU: 50.98 %) кластарын сәтті анықтау трансформерлік архитектураның фондық шуылдың әсерін басу қабілетін көрсетеді. «Жол» класы сегментациясының жақсаруы маңызды жетістік болды (IoU: 38.11%), өйткені модель жол төсемі мен мұнаймен ластанған аумақтарды сәтті ажырата бастады, бұл бұрын жалған дабылдардың себебі болатын.

Тестілік деректер жиынындағы нәтижелер (5-кестені қараңыз) архитектураның тұрақтылығын растады: «мұнай» класы үшін IoU көрсеткіші 69.73%-ке дейін өсті, ал толықтық (Recall) 93.78%-ке жетті. Дәлдік (Precision: 73.12%) мәнінің тұрақтылығы модельдің фрагменттелген және төмен контрастты мұнаймен ластанған аумақтарды сенімді түрде анықтай алатынын айғақтайды, бұл жоғары Recall көрсеткішімен қатар байқалады. «Топырақ» (IoU: 98.95%) және «урбандалған аумақ» (IoU: 87.18%) кластары бойынша тұрақты жоғары нәтижелер модельдің әртүрлі ландшафт сценарийлерінде сенімді жұмыс істейтінін көрсетеді.

Кесте 5

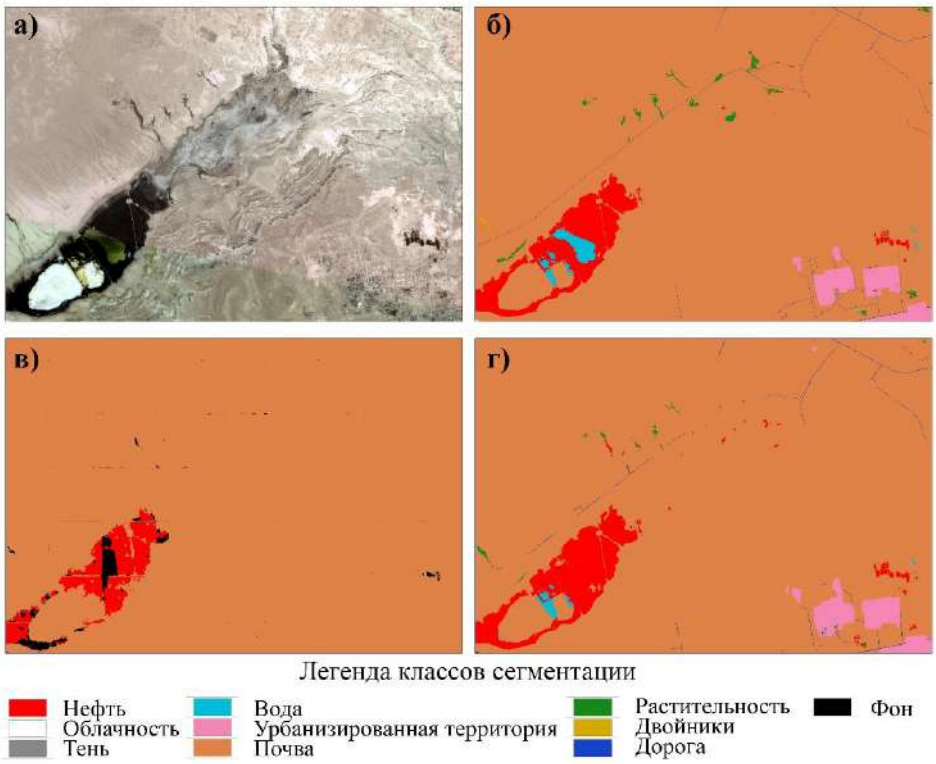
Mask2Former архитектурасының тестілік деректердегі метрикалары

Класс	IoU (%)	F1-өлшемі (%)	Precision (%)	Recall (%)
Мұнай	69.73	82.17	73.12	93.78
Бұлттылық	0.00	nan	0.00	nan
Көлеңке	0.00	nan	0.00	nan
Су	41.77	58.92	80.53	46.46
Урбандалған аумақ	87.18	93.15	93.36	92.94
Топырақ	98.95	99.47	99.36	99.58
Өсімдік жамылғысы	12.46	22.16	52.64	14.03
Егіздер	3.09	5.99	11.19	4.09
Жол	38.07	55.14	60.93	50.36
Фон	99.95	99.97	99.97	99.98

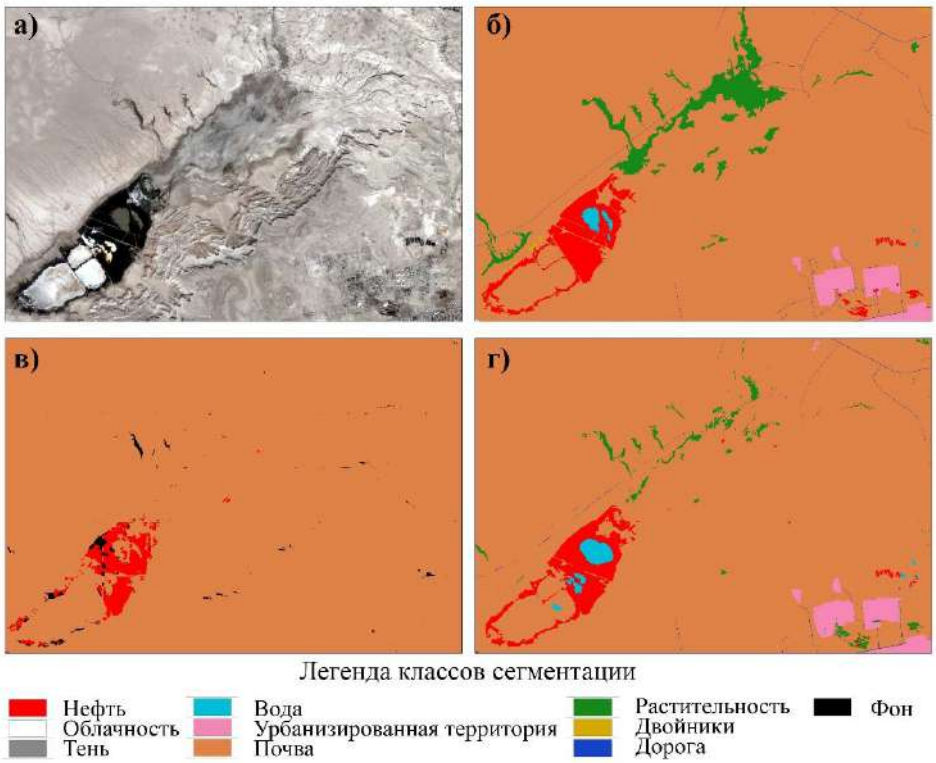
Сегментация нәтижелерін визуалды салыстыру. Planet спутниктік деректері бойынша сегментация нәтижелерінің 2020 жылғы маусым мен 2024 жылғы қыркүйек айларындағы визуалды салыстыруы 2 және 3-суреттерде келтірілген.

Бастапқы жазғы мозаикада (2а-сурет) мұнай ластануына сәйкес келетін, «мұнай көлі» деп аталатын ірі қою түсті аймақ ерекшеленеді. Бұдан басқа, 2а-суретте су, инфрақұрылым элементтері және топырақ аймақтары да айқын көрінеді. 2б-суретте эталондық белгілеу ретінде қолданылған және негізгі сегментация кластарын қамтитын аннотацияланған кескін көрсетілген. Конволюциялық DeepLabv3+ моделі мұнай ластануының негізгі аймағын тұтастай дұрыс бөліп көрсетеді (2в-сурет), алайда жекелеген кластарды қате жіктеу жағдайлары байқалады. Нақты айтқанда, жалған мұнай белгілері бар, ал «урбандалған аумақ» және «су» кластарымен сәйкес келетін объектілер анықталмаған. Mask2Former моделі DeepLabv3+-пен салыстырғанда мұнай ластануы шекараларын дәлірек сәйкестендіреді, сондай-ақ урбандалған аймақ, су беттерін және жол желісін дұрысырақ ажыратады.

Дешифрлеудің ұқсас нәтижелері 2024 жылға арналған деректерде де тіркелді (3-сурет). Осы екі суретті визуалды талдау екі модельдің де мұнай ластануының негізгі аймақтарын анықтай алатынын көрсетеді. Алайда DeepLabv3+ моделі бойынша сегментация нәтижелерін егжей-тегжейлі қарастыру (2в-сурет, 3в-сурет) «мұнай» класы контурларының бұлыңғырлығын және мұнай аймағының өз ішіндегі «фон» класы артефактілерінің болуын анықтайды. Ал Mask2Former моделі (2г-сурет, 3г-сурет) кластарды анағұрлым айқын әрі нақты шекаралармен сегментациялайды. Бұған қоса, кескіннің ғаламдық контекстін ескеру қабілетінің арқасында Mask2Former архитектурасы ластану аймақтарын тұтас нысандар ретінде қабылдайды, бұл мұнай ластануын өсімдік жамылғысы, инфрақұрылым элементтері және көлеңкелер сияқты спектрлік тұрғыдан ұқсас кластардан барынша жақсы ажыратуға мүмкіндік береді әрі жалған детекциялар санын барынша азайтады.



Сурет 2. *2020 жылғы маусымдағы сегментация нәтижелерін салыстыру: а) бастапқы кескін, б) аннотацияланған кескін, в) DeepLabv3+ моделі бойынша сегментация, г) Mask2Former моделі бойынша сегментация*



Сурет 3. *2024 жылғы қыркүйектегі сегментация нәтижелерін салыстыру: а) бастапқы кескін, б) аннотацияланған кескін, в) DeepLabv3+ моделі бойынша сегментация, г) Mask2Former моделі бойынша сегментация*

Талқылау. Жүргізілген зерттеуде алынған нәтижелер трансформерлік Mask2Former архитектурасының классикалық конволюциялық DeepLabv3+ желісінен сандық метрикалар бойынша да, нысан шекараларын бөліп алу сапасы бойынша да тұрақты түрде басым екенін растады. «Мұнай» мақсатты класы үшін тестілеуде Mask2Former моделі 69,73%-ке тең IoU көрсетті, ал DeepLabv3+ үшін бұл көрсеткіш небәрі 21,63% болды. Мұндай айырмашылық практикалық тұрғыдан маңызды, өйткені анықтау дәлдігі кейінгі рекультивацияның көлемі мен құнын есептеуге тікелей әсер етеді. Сонымен қатар, бұл зерттеуде байқалған трансформерлік тәсілдердің мақсатты кластарды сегментациялаудағы жоғары тиімділігі Чэн және әріптестерінің [14] компьютерлік көру есептеріндегі трансформер архитектураларының артықшылықтары туралы тұжырымдарымен сәйкес келеді.

Mask2Former архитектурасының қосымша артықшылығы спектрлік тұрғыдан ұқсас кластарға -жолдарға, көлеңкелерге және урбандалған нысандарға - жоғары төзімділігі болып табылады, бұл DeepLabv3+ моделінде жалған дабылдардың негізгі себебі болып табылды. Асфальт, ылғалды топырақ және ғимараттардың көлеңкелері жекелеген арналарда ұқсас жарықтық мәндеріне ие болуы мүмкін, сондықтан DeepLabv3+ моделі жағдайындағыдай жергілікті спектрлік контрастылыққа сүйенсе, қателік ықтималдығы күрт артады. Mask2Former-дегі ғаламдық контекстті пайдалану нысандардың пішінін, олардың қоршауын кеңістіктік құрылымын ескеруге мүмкіндік береді. Осылайша, Mask2Former моделінің барлық кластар бойынша жиынтық көрсеткіштердегі басымдығы кездейсоқ емес: ол дәл осы ең күрделі және практикалық маңызы зор кіші тапсырманы - «мұнай» класын спектрлік тұрғыдан жақын «топырақ» және «көлеңке» кластарынан ажыратуды - едәуір жақсы шешуінен туындайды.

Спектрлік сипаттамаларды талдау сегментация тиімділігінің PlanetScope арналарының үйлесіміне тікелей тәуелді екенін көрсетті. Атап айтқанда, эксперименттер Blue, Red, NIR (2, 6, 8 арналары) үйлесімінің ең жақсы нәтиже беретінін көрсетті. Бұл, бәлкім, көк арнаның топырақ пен мұнай арасындағы айырмашылыққа сезімталдығымен, сондай-ақ қызыл және жақын инфрақызыл арналардың органикалық заттардың болуына

реакциясымен байланысты түсіндіріледі. Олардың үйлесімі анағұрлым тұрақты және дискриминативті спектрлік белгілерді қалыптастырады.

Жұмыстың практикалық құндылығы мұнай кәсіпшілігі аумақтарын жүйелі бақылау мүмкіндігінде. Бұл әсіресе қол жеткізуі қиын немесе кең байтақ аудандар үшін өзекті.

Сонымен бірге, ұсынылған зерттеудің кейбір шектеулері бар. Біріншіден, модель белгілі бір кен орындарының деректерінде оқытылды, сондықтан оны өзге климаттық және ландшафттық жағдайдағы аумақтарға қолдану қосымша валидацияны талап етеді. Екіншіден, модель сапасы оқыту жинағын қолмен белгілеу дәлдігіне қатты тәуелді, бұл сараптамалық дешифрлеу сатысының маңыздылығын арттырады.

Алдағы уақытта оқыту жиынын әртүрлі мұнай кен орындарының деректері есебінен кеңейту, сондай-ақ төрттен астам спектрлік арнаны тікелей пайдаланатын архитектураларды әзірлеу жоспарланып отыр. Бұл мұнаймен ластанған аумақтардың тозу және кейіннен қалпына келу процестерін егжей-тегжейлі қадағалауға мүмкіндік береді.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Осы зерттеу шеңберінде PlanetScope жоғары ажыратымдылықтағы спутниктік түсірілімдері негізінде мұнаймен ластанған аумақтарды анықтауға арналған терең оқыту архитектураларына салыстырмалы талдау жүргізілді.

Зерттеудің маңызды кезеңі бастапқы түсірілімдердің спектрлік арналарының ең оңтайлы конфигурациясын таңдау болды. Эксперимент жүзінде Blue, Red, NIR композитін (2-6-8 арналары) пайдалану топырақ бетіндегі мұнай өнімдерін басқа техногендік нысандар мен көлеңкелерден жақсы бөліп алуды қамтамасыз ететіні дәлелденді, бұл басқа арна үйлесімдерімен салыстырғанда анықтау дәлдігін арттыруға мүмкіндік берді.

Ұсынылған тәсілдің тиімділігін бағалау үшін екі заманауи терең оқыту архитектурасы сыналды: классикалық конволюциялық DeepLabv3+ моделі мен трансформерлік Mask2Former архитектурасы. Салыстырмалы талдау нәтижелері Mask2Former моделінің артықшылығын анықтады. Ол қорытынды тестілеу кезеңінде «мұнай» мақсатты класы үшін IoU мәнінің 69.73%-ке жетуін қамтамасыз етті, бұл DeepLabv3+ моделінің көрсеткішінен (21.63%) үш еседен астам жоғары. Анықтаудың жоғары толықтығы (Recall 93.78%) мен басым «топырақ» класына төзімділігі трансформерлік архитектура механизмдерінің морфологиясы күрделі нысандарды идентификациялау есептеріндегі артықшылығын растайды. Басқаша айтқанда, трансформерлерге негізделген архитектура шекаралары күрделі әрі масштабтары әртүрлі нысандарды сегменттеуді жақсырақ атқарады.

Mask2Former моделінің сегментация дәлдігі мен тұрақтылығы оны мұнаймен ластанған аумақтарды экологиялық мониторингілеу және жер бетін мұнайдан тазарту жөніндегі рекультивациялық жұмыстарды бақылау кезінде қолдануға жарамды етеді. Сонымен қатар спектрлік арналардың ең оңтайлы үйлесімін пайдалану модельдің күрделі ландшафттық жағдайларға төзімділігін арттыруға және «мұнай төгінділеріне спектрлік тұрғыдан ұқсас нысандар(Егіздер)» класын жіктеу қателерін барынша азайтуға мүмкіндік берді, бұл мұнаймен ластанған аумақтарды бақылау үшін дәл осы спектрлік конфигурацияны пайдаланудың орындылығын растайды.

Алдағы зерттеулер төрттен астам спектрлік арнасы бар ғарыштық көпарналы кескіндерді тануға арналған жасанды нейрондық желі моделінің жаңа архитектурасын әзірлеуге, әрбір арнаның өзіндік сипаттамалары мен ерекшеліктерін ескере отырып, тану дәлдігін арттыру мақсатында бағытталатын болады.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Зерттеуде пайдаланылған деректер авторлар жүргізген эксперименттік зерттеулер нәтижесінде алынған. Зерттеу нәтижелерін растайтын деректер тиісті авторға негізді сұрау салу арқылы қолжетімді.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдаманы әзірлеу – Ғ.С.Ә., Д.Б.Н.; Әдіснама – Ғ.С.Ә., Л.А.Б., С.М.Н.; Деректерді дайындау – Т.В.Д.; Ресурстар – Т.В.Д., С.М.Н.; Формалды талдау – Д.Б.Н.; Валидация – Л.А.Б.; Визуализация – Т.В.Д.; Қолжазбаның бастапқы нұсқасын дайындау – Л.А.Б.; Қолжазбаны жазу, рецензиялау және редакциялау – Ғ.С.Ә.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің қаржыландыруымен жүргізілді (ЖТН AP26102621 «Жоғары ажыратымдылықтағы қашықтан зондтау деректері бойынша мұнаймен ластанған аумақтарды тануға арналған жасанды нейрондық желі моделін әзірлеу»).

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Андерсон Р.К., Мукатанов А.Х., Бойко Т.Ф. Экологические последствия загрязнения почв нефтью // Экология. 1980. № 6. С. 21–25.
2. Досбергенов С.Н. Экологические проблемы нефтезагрязненных почв в районах добычи нефти Западного Казахстана и пути их решения // Гидрометеорология и экология. 2010. № 3. С. 111–122.
3. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов Республики Казахстан за 2022 год [Электронный ресурс]. Астана, 2023. С. 71. URL: https://ecogosfond.kz/wp-content/uploads/2023/12/NDSOS-2022-RUS-gotov1-1.pdf (дата обращения: 29.09.2025).
4. Lassalle G., Fabre S., Credoz A., Dubucq D., Elger A. Monitoring oil contamination in vegetated areas with optical remote sensing: a comprehensive review // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 393. Art. 122427. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122427.
5. Abbas D.U.K., George L.E. The detection of oil spill onshore using the thermal band of Landsat-8 // TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control). 2022. Vol. 20. No. 2. P. 383–391. DOI: 10.12928/telkomnika.v20i2.22462.
6. Ozigis M.S., Kaduk J.D., Jarvis C.H. Mapping terrestrial oil spill impact using machine learning random forest and Landsat-8 OLI imagery // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. P. 3621–3635. DOI: 10.1007/s11356-018-3824-y.
7. Kaplan G., Aydinli H., Pietrelli A., Mieyeville F., Ferrara V. Oil-contaminated soil modeling and remediation monitoring in arid areas using remote sensing // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 10. Art. 2500. DOI: 10.3390/rs14102500.
8. Zhu X.X., Tuia D., Mou L., Xia G.S., Zhang L., Xu F., Fraundorfer F. Deep learning in remote sensing: a comprehensive review and list of resources // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2017. Vol. 5. P. 8–36. DOI: 10.1109/MGRS.2017.2762307.
9. Zheng A., Casari A. Feature engineering for machine learning: principles and techniques for data scientists. Sebastopol: O'Reilly Media, 2018. 218 c.
10. Bengio Y., Courville A., Vincent P. Representation learning: a review and new perspectives // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2013. Vol. 35. No. 8. P. 1798–1828. DOI: 10.1109/TPAMI.2013.50.
11. Nurseitov D.B., Abdimanap G., Abdallah A., Sagatdinova G., Balakay L., Dedova T., Rametov N., Alimova A. ROSID: Remote sensing satellite data for oil spill detection on land // Engineering Sciences. 2024. Vol. 32. Art. 1348. DOI: 10.30919/es1348.
12. EOS Data Analytics. NDVI: Нормализованный разностный вегетационный индекс [Электронный ресурс]. URL: https://eos.com/blog/normalized-difference-vegetation-index-or-ndvi/ (дата обращения: 29.09.2025).
13. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Communications of the ACM. 2017. Vol. 60. No. 6. P. 84–90. DOI: 10.1145/3065386.
14. Chen L.-C., Zhu Y., Papandreou G., Schroff F., Adam H. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). 2018. P. 801–818. DOI: 10.1007/978-3-030-01234-2_49.
15. Cheng B., Misra I., Schwing A.G., Kirillov A., Girdhar R. Masked-attention mask transformer for universal image segmentation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 1290–1299. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00135.
16. Rousso R., Katz N., Sharon G., Glizerin Y., Kosman E., Shuster A. Automatic recognition of oil spills using neural networks and classic image processing // Water. 2022. Vol. 14. No. 7. Art. 1127. DOI: 10.3390/w14071127.
17. Everingham M., Van Gool L., Williams C.K.I., Winn J., Zisserman A. The Pascal visual object classes (VOC) challenge // International Journal of Computer Vision. 2010. Vol. 88. P. 303–338. DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.
18. Hossin M., Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations // International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process. 2015. Vol. 5. No. 2. P. 1–11. DOI: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
19. Rahman M.A., Wang Y. Optimizing Intersection-over-Union in deep neural networks for image segmentation // Proceedings of the International Symposium on Visual Computing (ISVC). 2016. P. 234–244. DOI: 10.1007/978-3-319-50307-3_11.

REFERENCES

1. Anderson, R. K., Mukatanov, A. Kh., & Boyko, T. F. (1980). Ekologicheskie posledstviya zagryazneniya pochv neftyu [Environmental consequences of oil contamination of soils]. Ekologiya, (6), 21–25. (in Russian).
2. Dosbergenov, S. N. (2010). Ekologicheskie problemy neftezagryaznennykh pochv v rayonakh dobychi nefti Zapadnogo Kazakhstana i puti ikh resheniya [Environmental problems of oil-contaminated soils in the oil production regions of Western Kazakhstan and ways to solve them]. Gidrometeorologiya i ekologiya, (3), 111–122. (in Russian).
3. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Kazakhstan. (2023). Natsionalnyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy i ob ispolzovanii prirodnykh resursov Respubliki Kazakhstan za 2022 god [National report on the state of the environment and the use of natural resources of the Republic of Kazakhstan for 2022] (p. 71). https://ecogosfond.kz/wp-content/uploads/2023/12/NDSOS-2022-RUS-gotov1-1.pdf (in Russian).
4. Lassalle, G., Fabre, S., Credoz, A., Dubucq, D., & Elger, A. (2020). Monitoring oil contamination in vegetated areas with optical remote sensing: A comprehensive review. Journal of Hazardous Materials, 393, Article 122427. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122427

5. Abbas, D. U. K., & George, L. E. (2022). The detection of oil spill onshore using the thermal band of Landsat-8. TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), 20(2), 383–391. https://doi.org/10.12928/telkomnika.v20i2.22462
6. Ozigis, M. S., Kaduk, J. D., & Jarvis, C. H. (2019). Mapping terrestrial oil spill impact using machine learning random forest and Landsat-8 OLI imagery. Environmental Science and Pollution Research, 26, 3621–3635. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3824-y
7. Kaplan, G., Aydinli, H., Pietrelli, A., Mieyeville, F., & Ferrara, V. (2022). Oil-contaminated soil modeling and remediation monitoring in arid areas using remote sensing. Remote Sensing, 14(10), Article 2500. https://doi.org/10.3390/rs14102500
8. Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5, 8–36. https://doi.org/10.1109/MGRS.2017.2762307
9. Zheng, A., & Casari, A. (2018). Feature engineering for machine learning: Principles and techniques for data scientists. O'Reilly Media.
10. Bengio, Y., Courville, A., & Vincent, P. (2013). Representation learning: A review and new perspectives. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 35(8), 1798–1828. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2013.50
11. Nurseitov, D. B., Abdimanap, G., Abdallah, A., Sagatdinova, G., Balakay, L., Dedova, T., Rametov, N., & Alimova, A. (2024). ROSID: Remote sensing satellite data for oil spill detection on land. Engineering Sciences, 32, Article 1348. https://doi.org/10.30919/es1348
12. EOS Data Analytics. (n.d.). NDVI: Normalized difference vegetation index. Retrieved September 29, 2025, from https://eos.com/blog/normalized-difference-vegetation-index-or-ndvi/
13. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM, 60(6), 84–90. https://doi.org/10.1145/3065386
14. Chen, L.-C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., & Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In V. Ferrari, M. Hebert, C. Sminchisescu, & Y. Weiss (Eds.), Computer vision – ECCV 2018 (pp. 801–818). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01234-2_49
15. Cheng, B., Misra, I., Schwing, A. G., Kirillov, A., & Girdhar, R. (2022). Masked-attention mask transformer for universal image segmentation. In 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 1290–1299). IEEE. https://doi.org/10.1109/CVPR52688.2022.00135
16. Rousso, R., Katz, N., Sharon, G., Glizerin, Y., Kosman, E., & Shuster, A. (2022). Automatic recognition of oil spills using neural networks and classic image processing. Water, 14(7), Article 1127. https://doi.org/10.3390/w14071127
17. Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The Pascal visual object classes (VOC) challenge. International Journal of Computer Vision, 88, 303–338. https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4
18. Hossin, M., & Sulaiman, M. N. (2015). A review on evaluation metrics for data classification evaluations. International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process, 5(2), 1–11. https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201
19. Rahman, M. A., & Wang, Y. (2016). Optimizing Intersection-over-Union in deep neural networks for image segmentation. In Advances in visual computing: 12th International Symposium, ISVC 2016 (pp. 234–244). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50307-3_11

СЕМАНТИЧЕСКАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПО СНИМКАМ PLANETSCOPE С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

Ғалымжан С. Әбдіманап*, Татьяна В. Дедова кандидат технических наук, Лариса А. Балакай кандидат технических наук, Данияр Б. Нурсеитов кандидат физико-математических наук, Серик М. Нуракынов PhD.

ТОО «Институт Ионосферы», г. Алматы, Казахстан; g.s.abdimanap@gmail.com (Ғ.С.Ә.), dedova3007@gmail.com (Т.В.Д.), larissabalakay@gmail.com (Л.А.Б.), nurseitovdb@gmail.com (Д.Б.Н.)
*Автор корреспондент: Ғалымжан С. Әбдіманап, g.s.abdimanap@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

замазученные территории, дистанционное зондирование, PlanetScope, глубокое обучение, семантическая сегментация

По статье:
Получено: 10.06.2026
Пересмотрено: 16.07.2026
Принято: 17.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

АННОТАЦИЯ

Мониторинг нефтяного загрязнения земель является актуальной задачей для Казахстана. В советское время добыча нефти на некоторых месторождениях осуществлялась амбарным способом, при котором буровые отходы, технологические жидкости и сопутствующие сточные воды собирались в специально вырытых земляных амбарах в непосредственной близости от места добычи, поэтому накопилось большое количество замазученных территорий, требующих рекультивации с сопутствующим мониторингом. Дистанционное зондирование вкупе с обработкой снимков методами глубокого обучения, позволяющими более точно сегментировать замазученные территории, облегчает проведение мониторинга таких территорий. В данной работе представлен датасет ROSID-HR, построенный на основе мультиспектральных снимков PlanetScope, что позволяет сегментировать нефтяное загрязнение малой площади. При создании ROSID-HR в качестве опорной разметки использовались замазученные участки, входящие в разработанный нами ранее набор данных ROSID, что позволило сохранить согласованность аннотаций между двумя датасетами. Экспериментальным путем установлена оптимальная

композиция каналов PlanetScope (Blue-Red-NIR) для лучшего отделения нефтезагрязненных территорий от теней и техногенных объектов. Для проверки работоспособности датасета была проведена семантическая сегментация с использованием классической модели DeepLabv3+ и трансформерной модели Mask2Former. При использовании архитектуры Mask2Former показатель IoU для класса «нефть» на тестовой выборке составил 69,73%, что в три раза превышает результат модели DeepLabv3+, показавшей 21,63%. Результаты подтверждают эффективность и преимущества совместного использования данных PlanetScope и архитектуры Mask2Former в рамках рассмотренных подходов к выявлению небольших участков, загрязненных нефтью.

SEMANTIC SEGMENTATION OF OIL-CONTAMINATED LAND FROM PLANETSCOPE IMAGERY USING NEURAL NETWORK MODELS

Galymzhan S. Abdimanap*, Tatyana V. Candidate of technical sciences, Dedova PhD, Larissa A. Balakay Candidate of technical sciences, Daniyar B. Nurseitov Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Serik M. Nurakynov PhD.

Ionosphere Institute LLP, Almaty, Kazakhstan; g.s.abdimanap@gmail.com (G.S.A.), dedova3007@gmail.com (T.V.D.), larissabalakay@gmail.com (L.A.B.), nurseitovdb@gmail.com (D.B.N.)
*Corresponding author: Galymzhan S. Abdimanap, g.s.abdimanap@gmail.com

KEY WORDS

oil-contaminated lands, remote sensing, PlanetScope, deep learning, semantic segmentation

About article:
Received: 10.06.2026
Revised: 16.07.2026
Accepted: 17.09.2026
Published: 30.09.2026

ABSTRACT

Monitoring of oil-contaminated land is a pressing challenge for Kazakhstan. During the Soviet era, oil production at a number of fields relied on the so-called pit method, whereby drilling waste, process fluids, and associated wastewater were collected in purpose-dug earthen pits adjacent to extraction sites, leaving a substantial legacy of oil-contaminated areas requiring remediation and systematic monitoring. Remote sensing combined with deep learning-based image processing enables more accurate segmentation of such territories and facilitates their ongoing monitoring. This paper presents ROSID-HR, a dataset constructed from PlanetScope multispectral imagery designed for the segmentation of small-area oil contamination. In developing ROSID-HR, oil-contaminated sites from our previously published ROSID dataset were used as reference annotations, ensuring consistency between the two datasets. Through systematic experimentation, the optimal PlanetScope channel configuration for separating oil-contaminated areas from shadows and anthropogenic objects was identified as Blue-Red-NIR (bands 2-6-8). To validate the dataset, semantic segmentation was performed using the convolutional DeepLabv3+ model and the transformer-based Mask2Former architecture. Mask2Former achieved an IoU of 69.73% for the oil class on the test set, exceeding the DeepLabv3+ result of 21.63% by a factor of more than three. The results confirm the effectiveness and advantages of using PlanetScope data and the Mask2Former architecture together as part of the considered approaches to detecting small areas contaminated with oil.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Гидрометеорология и экология

Обзорная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К СЦЕНАРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Leman Max[1,2]*, Айнура Е. Алдиярова[1] PhD, ассоциированный профессор, Ерболат Т. Кайпбаев[1] PhD, ассоциированный профессор, Айнур Н. Калмашова[1] PhD, ассоциированный профессор

[1]НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет», Алматы, Казахстан. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (А.Е.А.), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (Е.Т.К.), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (А.Н.К.)
[2]АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; maxleman131@gmail.com (L.M.)
*Автор корреспондент: Leman M., maxleman131@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водные ресурсы, сценарный анализ, моделирование, речной бассейн, водная безопасность

АБСТРАКТ

Современное управление водными, роста водопотребления и трансграничных ограничений проблема водных кризисов в речных бассейнах приобретает системный характер. Наряду с увеличением нагрузок на водные ресурсы растёт необходимость в научно обоснованных методах прогнозирования и оценки рисков, что делает разработку и применение современных моделей водного менеджмента особенно актуальной задачей.

Цель работы заключается в сравнительном анализе существующих подходов к сценарному моделированию водных ресурсов, включая подходы, ориентированные на формирование и анализ альтернативных сценариев развития водохозяйственных систем на основе результатов модельных расчётов, отражающих различные комбинации климатических, социально-экономических и управленческих факторов.

В статье представлен обзор современных методов моделирования водных ресурсов, применяемых для анализа сценариев развития водных кризисов в речных бассейнах. Рассмотрены гидрологические, интегрированные, системно-динамические и стохастические модели, а также подходы к формированию сценариев с учётом климатических, антропогенных и управленческих факторов. Проведён сравнительный анализ преимуществ и ограничений различных методов с точки зрения оценки рисков водной безопасности и устойчивости водообеспечения.

Особое внимание уделено методологическим аспектам сценарного моделирования, позволяющим учитывать неопределённость природных и социально-экономических факторов. Показано, что сценарный анализ является ключевым инструментом для обоснования управленческих решений в условиях высокой неопределённости. Полученные выводы формируют методологическую основу для дальнейших исследований, направленных на анализ развития водных кризисов и планирование устойчивого водопользования в крупных речных бассейнах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы речных бассейнов являются ключевым фактором социально-экономического развития, экологической устойчивости и обеспечения водной безопасности территорий [1]. В условиях глобального изменения климата, роста водопотребления, деградации водохозяйственной инфраструктуры и усиления антропогенной нагрузки проблема устойчивого управления водными ресурсами приобретает особую актуальность [2]. Во многих регионах мира, особенно в аридных и полуаридных зонах, данные процессы приводят к формированию хронического дефицита воды и повышению риска развития водных кризисов [3].

Современные системы водообеспечения речных бассейнов функционируют в условиях высокой неопределённости, обусловленной климатической изменчивостью, социально-экономическими трансформациями, изменениями структуры

По статье:
Получено: 11.03.2026
Пересмотрено: 25.08.2026
Принято: 09.09.2026
Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:
Max Leman, Алдиярова А.Е., Кайпбаев Е.Т., Калмашова А.Н., Сравнительный анализ подходов к сценарному моделированию водных ресурсов// Гидрометеорология и экология, 123 (3), 2026, 304–318.

водопользования и управленческими решениями [4]. Неопределённость и риск являются неотъемлемой частью любого процесса принятия решений в реальных условиях, особенно в системах управления водными ресурсами [5]. Проблема неопределённости имеет первостепенное значение при оценке рисков [6]. В данной работе представлен обзор основных методов моделирования и сценарного анализа водных ресурсов, применяемых в мировой практике.

Традиционные детерминированные подходы к планированию водных ресурсов во многих случаях оказываются недостаточными для оценки долгосрочных последствий климатической изменчивости, изменений водопотребления и других неопределённых факторов, влияющих на функционирование водохозяйственных систем [7]. Сегодня в международной научной практике всё большее значение приобретают методы моделирования водных ресурсов, ориентированные на анализ альтернативных сценариев развития водохозяйственных систем [8, 9]. В современной практике наблюдается переход от анализа отдельных детерминированных сценариев к интегрированным и ансамблевым подходам, позволяющим исследовать широкий диапазон климатических, гидрологических и социально-экономических неопределённостей. Вместе с тем выбор методологической структуры, показателей робастности и набора сценариев существенно влияет на получаемые оценки и остаётся самостоятельной методологической задачей [10, 11].

Актуальность работы определяется тем, что в условиях усиливающегося воздействия климатических изменений, демографического роста и интенсификации хозяйственной деятельности водные ресурсы речных бассейнов переходят в категорию систем с высокой степенью неопределённости и уязвимости. В этих условиях возрастает значимость сценарного моделирования как инструмента, позволяющего учитывать множественность возможных траекторий развития водохозяйственных систем, включая вариации климатических, социально-экономических и институциональных факторов.

Особое значение в условиях глубокой неопределённости приобретают адаптивные сценарные подходы, позволяющие корректировать управленческие решения по мере изменения внешних условий и поступления новой информации [12]. Они широко применяются при прогнозировании водного дефицита, оценке рисков водной безопасности и разработке стратегий управления спросом и водными ресурсами [13]. Ключевую роль в реализации сценарного анализа играют модели водных ресурсов, которые служат инструментом формализации сложных гидрологических, экологических и социально-экономических процессов, протекающих в речных бассейнах [14]. На рисунке 1 представлена блок-схема процесса разработки сценариев водохозяйственного планирования.

Рисунок 1. *Итеративная концептуальная схема разработки и уточнения сценариев развития водохозяйственных систем.*

В настоящее время в мировой практике используется широкий спектр моделей, включая концептуальные и физически обоснованные гидрологические модели, интегрированные модели управления водными ресурсами, методы системной динамики, а также стохастические и вероятностные подходы [15, 16]. Каждая из этих групп моделей обладает определёнными преимуществами и ограничениями, связанными с требованиями к входным данным, уровнем детализации процессов и возможностями учёта неопределённости. Эти подходы и вычислительные методы, хотя и разрабатывались для различных целей, оказались ценными для разработки адаптивных политик [12, 13].

Вопросы сценарного анализа и оценки устойчивости водообеспечения особенно актуальны для трансграничных речных бассейнов, где управление водными ресурсами осложняется различиями в национальных приоритетах, институциональных механизмах и водохозяйственной политике [17]. Исследования, выполненные для трансграничных бассейнов Центральной Азии, показывают, что сочетание климатических изменений и антропогенных воздействий существенно повышает риски водного дефицита и экологической деградации [18].

Отдельные исследования также рассматривают применение сценарных и динамико-стохастических подходов к анализу водохозяйственных систем аридных и трансграничных регионов Центральной Азии [18, 19]. Однако систематизированное сопоставление международных методологических подходов к моделированию водных кризисов остаётся актуальной задачей. В связи с этим целью настоящей статьи является обзор и сравнительный анализ современных методов моделирования водных ресурсов речных бассейнов, применяемых в сценарных исследованиях развития систем водообеспечения и водных кризисов. Полученные результаты формируют методологическую основу для дальнейших прикладных исследований, направленных на анализ и прогнозирование развития водных кризисов в крупных речных бассейнах.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современное управление водными ресурсами требует инструментов, способных учитывать сложные взаимодействия между гидрологическими, климатическими, социально-экономическими и институциональными факторами. Для сценарного анализа водохозяйственных систем применяются различные методологические подходы, отличающиеся уровнем формализации, требованиями к данным и практической интерпретируемостью результатов. В данной работе для сравнительного обзора ото-

браны системная динамика (SD), стохастические методы, интегрированные модели водопользования и методологический фреймворк Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP), широко применяемые в международной практике сценарного анализа водных ресурсов. Их сопоставление проводится по уровню учёта неопределённости, возможностям количественной оценки, применимости к трансграничным речным бассейнам и управленческой интерпретируемости результатов.

2.1. Обзор моделей и подходов к сценарному анализу водных ресурсов

Гидрологические модели. Гидрологические модели остаются основным инструментом для изучения речных бассейнов, водного баланса и прогнозирования речного стока. В зависимости от целей исследования, уровня детализации процессов и доступности исходных данных модели классифицируются по различным критериям: детерминированные и стохастические, распределённые и полу-распределённые, концептуальные и физически обоснованные, имитационные и оптимизационные [20]. В современной практике широко применяются как концептуальные, так и физически обоснованные модели, включая SWAT, HBV, VIC и MIKE SHE [20…23]. Сравнительная характеристика рассматриваемых моделей и методологических подходов с учётом характера сценариев, способов представления неопределённости, аналитических преимуществ и ограничений представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Сравнительная характеристика моделей и методов сценарного анализа водных ресурсов

Подход/примеры моделей	Основной объект анализа	Характер сценариев	Учет неопределенности	Основное преимущество	Ограничение
Гидрологические (SWAT, HBV, MIKE SHE)	Сток, водный баланс, поверхностные и подземные воды	Климатические и землепользовательские	через внешние климатические сценарии, ансамбли и вариацию параметров	Детальное воспроизведение гидрологических процессов и физических реакций	Ограниченное представление различных факторов
Интегрированные модели управления водными ресурсами (WEAP)	Водный баланс, спрос, распределение воды между секторами	Климатические, социально-экономические и управленческие	Комбинация нескольких источников неопределенности	Связывают ресурсы, водопотребление и управление в системе	Упрощение отдельных гидрологических процессов
System Dynamics (SD)	Обратные связи между ресурсами, спросом, экономикой и управлением	Долгосрочные стратегические, управленческие	Через альтернативные предположения, чувствительность параметров и структуры	Позволяет исследовать нелинейные связи, накопленные и отложенные эффекты	Высокая зависимость результатов от концептуализации модели и предположений
Стохастические и вероятностные методы	Риск дефицита, изменчивость водных ресурсов, надёжность водообеспечения	Вероятностные ансамбли и Monte Carlo	Непосредственное описание статистической неопределённости распределениями вероятностей	Количественная оценка вероятностей, диапазонов, чувствительности и риска	Требуется достаточная информация; слабее работают при глубокой неопределённости
Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)	Адаптивные управленческие решения и последовательности действий	Множество правдоподобных будущих состояний	Ориентирован на глубокую неопределённость без обязательного задания вероятностей	Позволяет менять стратегию при достижении заранее заданных порогов и триггеров	Не является самостоятельной вычислительной моделью и требует внешнего моделирования
Динамико-стохастически/ комбинированные подходы	Совместная динамика ресурсов, спроса и риска	Многофакторные сценарии развития водохозяйственной системы	Совмещают динамическую, статистическую и сценарную неопределённость	Одновременная оценка состояния системы, диапазонов возможных исходов и риска	Высокие требования к данным, вычислениям и интерпретации результатов

Сравнение, представленное в таблице 2.1, показывает, что различия между рассматриваемыми подходами определяются не только набором моделируемых процессов, но и способом представления неопределённости и характером решаемой задачи. Гидрологические модели преимущественно ориентированы на количественное воспроизведение физических процессов и оценку реакции водных ресурсов на изменение внешних факторов, тогда как интегрированные и системно-динамические подходы расширяют анализ за счёт включения водопотребления, управленческих решений и социально-экономических взаимодействий [22]. Стохастические методы обеспечивают количественное представление статистической неопределённости и риска, в то время как DAPP ориентирован на формирование адаптивных решений в условиях глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены. Следовательно, выбор подхода должен определяться не универсальным преимуществом конкретной модели, а соответствием её аналитических возможностей типу неопределённости, доступности данных и цели сценарного исследования. Современное развитие сценарного гидрологического моделирования связано с использованием ансамблей климатических моделей CMIP6 и сценариев Shared Socioeconomic Pathways (SSP), а также с сопоставлением физически обоснованных и data-driven моделей. В частности, сравнительное применение SWAT и NARX демонстрирует возможности использования различных модельных структур для оценки будущих изменений речного стока при нескольких климатических сценариях [24]. Одновременно развивается использование многокомпонентных открытых данных для моделирования бассейнов с ограниченной наблюдательной сетью. Совместное применение спутниковых и других открытых источников данных может улучшать воспроизведение отдельных компонентов водного баланса и повышать надёжность валидации моделей в интенсивно регулируемых и недостаточно обеспеченных наблюдениями бассейнах [25]. Это частично снижает традиционное ограничение физически обоснованных моделей, связанное с высокими требованиями к исходной информации.

Концептуальная модель HBV удобна для регионов с ограниченной наблюдательной сетью, позволяет моделировать водный баланс и динамику стока с относительно простой калибровкой. Однако для детального анализа водохозяйственного управления её возможностей недостаточно [22].

Физически распределённые модели, такие как MIKE SHE, обеспечивают точное описание взаимодействия поверхностных и подземных вод, что делает их полезными для крупных бассейнов. При этом высокая вычислительная сложность и требования к данным ограничивают их применение для долгосрочных сценарных исследований [23]. Сравнение современных водных моделей показывает, что различия между их структурами могут существенно влиять на результаты гидрологических оценок. Межмодельные сопоставления свидетельствуют, что отдельные модели неодинаково воспроизводят речной сток, запасы воды и их сезонную динамику в различных климатических и антропогенных условиях [26]. Поэтому при сценарном анализе выбор модели должен учитывать не только её функциональные возможности, но и соответствие структуры модели исследуемым процессам, пространственному масштабу и характеру антропогенного воздействия.

Интегрированные модели управления водными ресурсами

Для анализа сценариев устойчивого водообеспечения применяются интегрированные модели, которые объединяют гидрологические, социально-экономические и управленческие аспекты.

Одной из таких моделей является WEAP (Water Evaluation and Planning System) [8, 27]. WEAP позволяет моделировать распределение ресурсов между различными секторами водопользования, анализировать влияние изменения спроса и управления ресурсом, а также строить сценарии изменения климата. Этот инструмент часто используется для

оценки водного дефицита и разработки стратегий управления водохозяйственными системами. Ограничением является упрощённое описание гидрологических процессов, что требует интеграции с другими моделями при более детальном анализе [5].

Интегрированные модели особенно ценны для трансграничных бассейнов, где необходимо учитывать институциональные и управленческие факторы наряду с природными условиями. Современное развитие интегрированного моделирования связано с расширением границ анализа за пределы собственно водного баланса и включением взаимосвязей между водными, энергетическими и продовольственными ресурсами. Для трансграничных бассейнов такие модели позволяют одновременно учитывать пространственное распределение ресурсов, социально-экономическое развитие и различные условия межгосударственного сотрудничества [28]. Более широкая тенденция интегрированного моделирования заключается в переходе от преимущественно гидрологического представления системы к совместному анализу природных и социальных процессов в human–water systems. При таком подходе количественные модели рассматриваются не только как средства прогнозирования, но и как инструменты исследования взаимодействий между водными ресурсами, поведением водопользователей, институтами и управленческими решениями [29].

Системная динамика в сценарном анализе

Методы системной динамики (System Dynamics) широко применяются для анализа сложных, нелинейных взаимодействий между водными ресурсами, водопотреблением, социально-экономическими процессами и управленческими решениями [30]. Данный подход ориентирован на выявление причинно-следственных связей, накопленных эффектов и обратных связей, формирующих долгосрочную динамику водохозяйственных систем. Применение системной динамики в полуаридных условиях также показывает её возможности для сопоставления долгосрочных сценариев климатических изменений и адаптационных мер [31]. В частности, моделирование изменений водозабора на орошение позволяет оценивать эффективность повышения эффективности ирригации, изменения структуры посевных площадей и их сочетания в качестве мер адаптации к климатическим изменениям [32].

Системно-динамические модели позволяют оценивать устойчивость водных ресурсов во временной перспективе, анализировать последствия альтернативных управленческих стратегий и формировать адаптационные меры в условиях изменения климата и роста водопотребления [33]. Особое значение данный подход имеет для стратегического планирования, где необходимо учитывать инерционность гидрологических процессов и отложенные эффекты управленческих решений.

В то же время ключевым ограничением системной динамики остаётся высокая зависимость результатов моделирования от качества концептуализации системы, структуры обратных связей и экспертных оценок параметров, что может снижать воспроизводимость и точность количественных прогнозов [30, 31].

Стохастические и вероятностные подходы

Для учёта высокой неопределённости климатических, гидрологических и антропогенных факторов в сценарном анализе водных ресурсов широко применяются стохастические и вероятностные методы [4, 32]. Эти подходы позволяют формировать ансамбли сценариев, отражающие широкий спектр возможных будущих состояний системы, и проводить количественную оценку рисков водного дефицита. Одним из направлений развития вероятностного моделирования является совместное применение Monte Carlo simulation и анализа чувствительности для количественной оценки неопределённости параметров водохозяйственных моделей. Такой подход позволяет не только получать диапазон возможных состояний системы, но и определять параметры, вносящие наибольший вклад в неопределённость результатов [33]. Для непосредственной оценки риска дефицита воды развиваются вероятностные методы, ориентированные на описание совместного распределения факторов риска. В частности, сочетание непараметрической

оценки плотности распределения и copula-функций позволяет оценивать вероятность дефицита воды при ограниченности исходных данных и неопределённой форме распределений [34].

Преимущества метода: Стохастическое моделирование особенно актуально для аридных и полуаридных речных бассейнов, характеризующихся высокой межгодовой и внутригодовой изменчивостью стока, а также нестабильностью водопотребления [4]. Вероятностные методы позволяют оценивать надёжность водообеспечения, вероятность превышения критических порогов и чувствительность системы к различным источникам неопределённости. При выборе вероятностного инструментария необходимо различать статистическую и глубокую неопределённость. Статистическая неопределённость может быть представлена вероятностными распределениями и исследована методами Monte Carlo, тогда как для факторов, вероятности будущих состояний которых невозможно надёжно определить, более обоснованным является использование множества дискретных сценариев. Современные подходы поэтому всё чаще объединяют вероятностное моделирование и сценарный анализ в единой структуре принятия решений [7, 35]. Наряду с неопределённостью будущих сценариев существенное значение имеет структурная неопределённость самих моделей. Современные исследования глобального моделирования водных ресурсов выделяют среди её основных источников неоднородность качества и доступности исходных данных, неполное представление антропогенного воздействия на водный цикл и различия в воспроизведении гидрологических процессов для различных природных условий [36]. Следовательно, неопределённость результатов сценарного анализа определяется не только выбранными внешними сценариями, но и структурой, параметризацией и информационным обеспечением используемой модели [37].

Ограничения: основным ограничением данных подходов является сложность интерпретации вероятностных результатов для практического управления, что часто требует их комбинирования с детерминированными и интегрированными моделями водохозяйственных систем [16, 38].

2.2 Сценарные методы в управлении водными ресурсами

В международной практике управления водными ресурсами применяются различные сценарные подходы, включая системную динамику (SD) [39], стохастическое моделирование, интегрированные модели водопользования и методологический фреймворк Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP) [40]. Современное развитие сценарного анализа связано с переходом от предположения о возможности определения наиболее вероятного будущего состояния системы к исследованию множества правдоподобных будущих условий. При глубокой неопределённости такой подход позволяет оценивать устойчивость управленческих решений без необходимости присваивать достоверные вероятности отдельным сценариям будущего [41]. При этом неопределённость в гидрологическом и водохозяйственном моделировании возникает на нескольких этапах анализа - от климатических проекций и исходных данных до структуры гидрологической модели и выбора управленческих предпосылок [36, 41]. Поэтому сравнительная оценка сценарных методов должна учитывать не только способность модели воспроизводить водный баланс, но и способы представления, анализа и передачи неопределённости в процессе принятия решений.

Выбор именно этих методов для сравнительного анализа обусловлен следующими критериями:

1. Учёт неопределённости - способность метода включать климатические, гидрологические, социально-экономические и институциональные неопределённости.
2. Уровень количественной формализации - возможность получения численных оценок водного баланса, рисков дефицита и устойчивости водохозяйственной системы.
3. Применимость для трансграничных бассейнов - способность учитывать регулирование стока несколькими странами, разную инфраструктуру и институциональные ограничения.

4. Управленческая интерпретируемость - насколько результаты метода могут быть использованы для принятия практических решений, включая краткосрочные меры и долгосрочные стратегии.

Выбор этих методов обусловлен тем, что они представляют разные подходы к сценарию будущего: SD и интегрированные модели предоставляют количественные прогнозы и сценарные оценки; стохастические методы позволяют моделировать вероятностные диапазоны водных ресурсов; DAPP обеспечивает методологическую структуру для гибкого управления в условиях глубокой неопределённости.

Динамические адаптивные траектории Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP)

DAPP рассматривается не как вычислительная модель, а как методологический фреймворк, направленный на построение адаптивных стратегий управления водными ресурсами. Основная идея метода - формирование адаптационных траекторий, то есть последовательностей управленческих решений, которые корректируются при достижении заранее определённых пороговых значений (триггеров) [39]. Современное развитие DAPP характеризуется его интеграцией с exploratory modelling, robust decision-making и количественным определением сигналов, триггеров и порогов адаптации. Такая комбинация позволяет проводить стресс-тестирование альтернативных траекторий и оценивать их устойчивость относительно множества возможных будущих условий [40].

Примеры применения DAPP включают:

- дельтовую программу Нидерландов (управление стоком Рейна и Мааса);
- стратегии управления бассейном р.Темза (Великобритания);
- региональные проекты в США и Австралии.

Преимущества метода: поддержка принятия решений в условиях глубокой неопределённости, связь краткосрочных управленческих мер с долгосрочными стратегиями, визуализация альтернативных сценариев развития водохозяйственной системы, гибкость корректировки стратегии по мере появления новой информации [39…41].

Ограничения: не является самостоятельной вычислительной моделью - требует внешних данных, пороговые значения часто определяются экспертными оценками, высокая сложность при большом числе альтернатив, ограниченная применимость в регионах с дефицитом данных и слабой институциональной средой [40, 41].

2.3 Динамико-стохастические подходы и интегрированные модели

Динамико-стохастические подходы основаны на количественном моделировании сценариев водного кризиса с учётом вероятностных распределений ключевых факторов.

Основные компоненты метода - динамическое моделирование, стохастическое описание неопределённостей, сценарный анализ как количественная оценка рисков водного дефицита и устойчивости водообеспечения [32, 33]. Интегрированные модели объединяют гидрологические расчёты, водопотребление и управленческие решения в единой вычислительной системе, позволяя оценивать последствия разных стратегий на устойчивость водохозяйственной системы [28, 29]. Новейшие исследования показывают дальнейшее развитие таких подходов в направлении одновременной оптимизации эксплуатационных решений, инфраструктурной адаптации и устойчивости системы при глубокой неопределённости. В современных моделях водохранилищ рассматриваются не только альтернативные будущие условия водообеспечения и спроса, но и компромиссы между несколькими управленческими целями, а критерием выбора решений становится устойчивость их эффективности в широком диапазоне возможных будущих состояний.

Примеры применения динамико-стохастических подходов и интегрированных моделей:

- Бассейн реки Дунай (Европа) – интегрированные модели используются для оценки последствий изменения климата, управления водохозяйственными сооружениями и трансграничного распределения воды между 19 странами бассейна [42].

• Международный бассейн реки Нил (Африка) – динамико-стохастические модели применяются для анализа водопотребления, прогнозирования водного дефицита и оценки риска конфликта между странами, особенно при эксплуатации Большой Эфиопской плотины на Голубом Ниле [43].

• Река Колорадо (США, Мексика) – интегрированные модели с элементами стохастики используются для оценки устойчивости водообеспечения с учётом изменения климата, популяции и водопотребления, а также для планирования распределения воды между штатами и соседней страной [44, 45].

Преимущества: возможность количественной оценки рисков и вероятностей наступления критических состояний, обеспечение воспроизводимости и формализации сценариев, учет взаимодействия гидрологических, климатических и социально-экономических факторов, применимость для трансграничных бассейнов с высокой климатической и институциональной неопределённостью.

Ограничения: требует значительного объёма данных, модели могут быть сложны для интерпретации непрофессионалами, высокие вычислительные ресурсы при моделировании большого числа сценариев.

2.4 Сравнительная характеристика методов анализа водных сценариев по ключевым методологическим критериям

Проведен сравнительный анализ основных методологических подходов, применяемых для исследования сценариев развития водных ресурсов в условиях высокой неопределенности. Рассматриваются методы Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP), системной динамики, стохастического моделирования и интегрированных моделей.

Проведённый анализ показывает, что выбор метода сценарного моделирования определяется не только исследовательской задачей, но и характером рассматриваемой неопределённости. Статистическая неопределённость допускает вероятностное описание, тогда как при глубокой неопределённости вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены [45]. Отдельное значение имеют структурная неопределённость модели и сложность взаимодействий между природными, социально-экономическими и управленческими компонентами водохозяйственной системы [43, 45, 46]. На этой основе сформированы критерии выбора методов сценарного анализа, представленные в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Критерии выбора методов сценарного анализа водных ресурсов в зависимости от типа неопределенности [7, 29, 35…37].

№	Тип неопределенности/ задача	Предпочтительный подход	Основной критерий выбора	Ограничение
1	Статистическая неопределенность	Стохастические и вероятностные методы	Неопределённость может быть представлена вероятностными распределениями; требуется количественная оценка вероятностей, диапазонов и рисков	Требуются достаточные данные для определения распределений и параметров
2	Глубокая неопределенность	DAPP и сценарные подходы	Вероятности будущих состояний невозможно надёжно определить; требуется оценить устойчивость решений для множества правдоподобных будущих условий	Необходимы критерии адаптации, пороговые значения и мониторинг изменений
3	Структурная и системная неопределенность	Системная динамика (SD)	Существенную роль играют обратные связи, временная динамика и взаимодействие факторов	Результаты зависят от структуры модели и принятых предположений
4	Комплексная (многофакторная) неопределеность	Интегрированные модели	Требуется совместное представление гидрологических, водохозяйственных и социально-экономических процессов	Высокие требования к данным и сложности построения модели

5	Сочетание нескольких типов неопределености	Комбинированный подход	Один метод не охватывает одновременно количественную неопределённость, системные взаимодействия и адаптацию решений	Возрастают требования к данным, вычислениям и интерпретации результатов

Таким образом, выбор метода определяется прежде всего характером неопределённости и целью анализа. При наличии нескольких взаимосвязанных источников неопределённости целесообразно комбинирование методов, поскольку отдельные подходы решают различные аналитические и управленческие задачи [47]. Данный анализ демонстрирует, что ни один метод не является универсальным. На практике оптимальной стратегией является комбинация подходов. В целом, интеграция качественных и количественных методов создаёт научно обоснованную основу для разработки устойчивых стратегий управления водными ресурсами, учитывающих сложность и неопределенность современных водных систем.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый сравнительный анализ выявил несколько взаимосвязанных тенденций в развитии сценарного моделирования водных ресурсов. Во-первых, наблюдается переход от использования отдельных детерминированных моделей к ансамблевым и комбинированным подходам, позволяющим учитывать несколько источников неопределённости. Современные исследования расширяют сценарный анализ за счёт использования ансамблей климатических моделей и сценариев SSP, вероятностного и стохастического моделирования, интегрированных моделей природно-социальных систем, а также адаптивных подходов к принятию решений в условиях глубокой неопределённости [24, 28, 29, 37, 40]. Это свидетельствует о смещении методологического акцента от получения единственного прогнозного состояния водохозяйственной системы к исследованию диапазона возможных будущих состояний и устойчивости решений при различных сценарных предпосылках.

Во-вторых, сопоставление методов показывает, что характер неопределённости является одним из ключевых критериев выбора методологического инструментария. Стохастические и вероятностные методы наиболее применимы в случаях, когда неопределённость может быть количественно представлена вероятностными распределениями и исследована посредством ансамблевого моделирования или Monte Carlo simulation [33…35]. При глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний невозможно надёжно определить, более обоснованным является рассмотрение множества правдоподобных сценариев и применение адаптивных траекторий принятия решений [40…42]. Одновременно результаты современных исследований показывают, что неопределённость сценарных оценок связана не только с внешними климатическими и социально-экономическими предпосылками, но также со структурой модели, параметризацией, качеством и доступностью исходных данных [36…41].

В-третьих, рассмотренные методы различаются по характеру получаемой информации и её использованию в процессе принятия решений. Гидрологические модели обеспечивают преимущественно количественное представление физических процессов и реакции бассейна на изменение внешних воздействий; системная динамика позволяет исследовать обратные связи и долгосрочное поведение водохозяйственной системы; интегрированные модели расширяют анализ за счёт совместного представления гидрологических, социально-экономических и управленческих процессов; стохастические методы обеспечивают количественную оценку риска и диапазона возможных состояний; DAPP ориентирован на построение последовательности адаптивных решений при изменении внешних условий. Следовательно, различия между подходами определяются не только их вычислительными возможностями, но и типом исследовательской и управленческой задачи.

Полученные результаты также показывают ограничения использования единственного методологического подхода в системах, где одновременно присутствуют климатическая, гидрологическая, социально-экономическая, институциональная и структурная неопределённость. В таких условиях применение только вероятностного моделирования не позволяет полностью представить глубокую неопределённость, тогда как исключительно адаптивные подходы не обеспечивают самостоятельной количественной оценки водного баланса и риска. Поэтому методологически обоснованным является сочетание взаимодополняющих инструментов: количественные и интегрированные модели могут использоваться для оценки состояния системы и последствий альтернативных сценариев, стохастические методы - для характеристики вероятностной неопределённости и риска, а адаптивные подходы - для формирования последовательности управленческих действий при изменении внешних условий [28, 37, 40].

Такое сопоставление позволяет перейти от простого перечисления функциональных возможностей моделей к критериальному выбору методологии. Основными критериями выступают тип неопределённости, требуемая степень количественной формализации, доступность исходных данных, необходимость представления взаимодействий между природными и социально-экономическими компонентами и возможность использования результатов для принятия управленческих решений. Тем самым выбор метода сценарного анализа определяется соответствием его аналитических возможностей конкретной постановке задачи, а при сочетании нескольких типов неопределённости - обоснованностью интеграции нескольких взаимодополняющих подходов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый обзор и сравнительный анализ современных подходов к сценарному моделированию водных ресурсов показал, что выбор методологического инструментария определяется характером рассматриваемой неопределённости, целью исследования, доступностью исходных данных и требуемым уровнем количественной формализации. Универсального метода, одинаково применимого ко всему спектру задач управления водными ресурсами, не выявлено.

Основным методологическим результатом обзора является систематизация рассматриваемых подходов в соответствии с типами неопределённости. Стохастические и вероятностные методы наиболее обоснованы при статистически описываемой неопределённости; системная динамика - при необходимости анализа структурных взаимосвязей, обратных связей и долгосрочной динамики системы; интегрированные модели - при совместном рассмотрении гидрологических, социально-экономических и управленческих процессов; адаптивные подходы, включая DAPP, - в условиях глубокой неопределённости, когда вероятности будущих состояний не могут быть надёжно определены.

Современная тенденция сценарного моделирования заключается в переходе от изолированного применения отдельных моделей к комбинированию количественных, интегрированных и адаптивных подходов. Такое сочетание особенно актуально для сложных водохозяйственных систем, в которых одновременно проявляются климатическая, гидрологическая, социально-экономическая, институциональная и структурная неопределённость.

Практическая значимость проведённого обзора заключается в формировании критериев выбора методологического подхода в зависимости от исследовательской и управленческой задачи. Сформированная методологическая база может использоваться при выборе инструментов сценарного анализа, оценке устойчивости водообеспечения, обосновании стратегий водной безопасности и разработке адаптационных мер. Дальнейшее развитие сценарного анализа целесообразно связывать с интеграцией ансамблевого и вероятностного моделирования, комплексных моделей природно-социальных систем и адаптивных механизмов принятия решений, позволяющих корректировать стратегии по мере изменения внешних условий и поступления новой информации.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

В рамках данной обзорной статьи не создавались и не анализировались первичные данные. Все использованные материалы основаны на ранее опубликованных научных исследованиях и открытых источниках, ссылки на которые приведены в списке литературы.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация, методология, написание первоначального проекта и визуализация – ML; научное руководство – AEA; написание обзора и редактирование – AEA, ETK, AHK.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. UNESCO World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. - UNESCO, 2023. - URL: https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023.
2. Vörösmarty C.J., McIntyre P.B., Gessner M.O., Dudgeon D., Prusevich A., Green P., Glidden S., Bunn S.E., Sullivan C.A., Liermann C.R., Davies P.M. Global threats to human water security and river biodiversity // Nature. - 2010. - Vol. 467. - P. 555-561. - DOI: 10.1038/nature09440.
3. Falkenmark M., Rockström J. Balancing Water for Humans and Nature. - Earthscan, 2004.
4. Loucks D.P., van Beek E. Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. - UNESCO, 2017.
5. Arunraj N.S., Mandal S., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: A review // Safety Science. - 2013. - Vol. 55. - P. 15-28. - DOI: 10.1016/j.ssci.2012.12.004.
6. Beven K.J. Facets of uncertainty: Epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication // Hydrological Sciences Journal. - 2016. - Vol. 61, No. 9. - P. 1652-1665. - DOI: 10.1080/02626667.2015.1031761.
7. Walker W.E., Lempert R.J., Kwakkel J.H. Deep uncertainty // Encyclopedia of Operations Research and Management Science. - 3rd ed. - Springer, 2013. - P. 395-402. - DOI: 10.1007/978-1-4419-1153-7_1140.
8. Yates D., Sieber J., Purkey D., Huber-Lee A. WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model // Water International. - 2005. - Vol. 30, No. 4. - P. 487-500. - DOI: 10.1080/02508060508691893.
9. Raskin P., Gleick P., Kirshen P., Pontius G., Strzepek K. Water futures: Assessment of long-range patterns and problems // Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. - Stockholm Environment Institute, 1997. - P. 1-54.
10. Muñoz R., Vaghefi S.A., Drenkhan F., Santos M.J., Viviroli D., Muccione V., Huggel C. Assessing Water Management Strategies in Data-Scarce Mountain Regions under Uncertain Climate and Socio-Economic Changes // Water Resources Management. - 2024. - Vol. 38, No. 11. - P. 4083-4100. - DOI: 10.1007/s11269-024-03853-5.
11. Huang J., Sangiorgio M., Wu W., Maier H.R., Wang Q.J., Hughes J., Castelletti A. Solving the robustness puzzle: The joint impact of optimization approach, robustness metrics, and scenarios on water resources management under deep uncertainty // Journal of Environmental Management. - 2025. - Vol. 373. - Art. 123540. - DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123540.
12. Haasnoot M., Kwakkel J.H., Walker W.E., ter Maat J. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world // Global Environmental Change. - 2013. - Vol. 23. - P. 485-498. - DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006.
13. Klijn F., Kreibich H., de Moel H., Penning-Rowsell E. Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. - 2015. - Vol. 20, No. 6. - P. 845-864. - DOI: 10.1007/s11027-015-9638-z.
14. Dong C., Schoups G., van de Giesen N. Scenario development for water resource planning and management: A review // Technological Forecasting and Social Change. - 2013. - Vol. 80, No. 4. - P. 749-761. - DOI: 10.1016/j.techfore.2012.09.015.
15. Loucks D.P., van Beek E., Stedinger J.R., Dijkman J.P.M., Villars M.T. Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications. - UNESCO Publishing; Deltares, 2005.
16. Refsgaard J.C., van der Sluijs J.P., Højberg A.L., Vanrolleghem P.A. Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance // Environmental Modelling & Software. - 2012. - Vol. 39. - P. 154-174. - DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.02.004.
17. Zeitoun M., Mirumachi N. Transboundary water interaction // International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics. - 2008. - Vol. 8. - P. 297-316. - DOI: 10.1007/s10784-008-9089-7.
18. Dolbeshkin M.V., Puzikov E.M., Povetkin R.D. Modeling of transboundary Ile-Balkhash river basin in Central Asia // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. - 2017. - No. 5(425). - P. 171-180.
19. Leman M., Tairov A., Malkovskiy I., Toleubaeva L., Aldiyarova A. Dynamic stochastic model of sustainable water resources management in Kazakhstan // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. - 2025. - No. 6(474). - P. 151-167. - DOI: 10.32014/2025.2518-170X.577
20. Beven K.J. Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. - 2nd ed. - Wiley-Blackwell, 2012.
21. Purdue University, Department of Agronomy; Department of Agricultural and Biological Engineering. SWAT Modeling [Электронный ресурс]. - URL: https://www.agry.purdue.edu/hydrology/projects/nexus-swm/en/SWAT.html (дата обращения: 04.03.2026).
22. Lindström G., Pers C., Rosberg J., Strömqvist J., Arheimer B. Development and test of the HBV light hydrological model. - SMHI Reports Hydrology, No. RH 07. - Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2010. - 35 p. - URL: https://www.smhi.se/polopoly_fs/1.2233!/Menu/general/column-content/attachment/HBV_light.pdf (дата обращения: 12.02.2026).
23. DHI Group. MIKE SHE: Integrated Hydrological Modeling System [Электронный ресурс]. - 2025. - URL: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she (дата обращения: 18.01.2026).
24. Balcha Y.A., Kaveh K., Alamirew T., Malcherek A. Comparability of NARX model to SWAT model in simulating future water resources scenarios using CMIP6 climate model outputs over UASB, Ethiopia // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. - 2025. - Vol. 39. - P. 2095-2115. - DOI: 10.1007/s00477-025-02959-5.
25. Zhang J., Liu Z., Li Y., Dou Y., Wang M., Zhou H., Xu B. Enhancing hydrological model performance through multi-source open-data utilization in the highly managed, data-scarce basin // Journal of Hydrology. - 2025. - Vol. 654. - Art. 132860. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132860.

26. Tiwari A.D., Pokhrel Y., Boulange J. et al. Similarities and divergent patterns in hydrologic fluxes and storages simulated by global water models // Nature Water. - 2025. - Vol. 3. - P. 550-560. - DOI: 10.1038/s44221-025-00435-6.
27. Stockholm Environment Institute. WEAP (Water Evaluation and Adaptation Planning) Model: A Comprehensive Approach to Water Resources Planning and Policy Analysis [Электронный ресурс]. - 2023. - URL: https://www.sei.org/publications/weap-sustainable-water-analysis/ (дата обращения: 04.03.2026).
28. Lodge J.W., Dansie A.P., Dang N.M., Johnson F. Modelling the availability of water, energy, and food resources in transboundary river basins to achieve Sustainable Development Goals 2, 6, and 7 // Science of the Total Environment. - 2024. - Vol. 949. - Art. 175186. - DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175186.
29. Razavi S. et al. Convergent and Transdisciplinary Integration: On the Future of Integrated Modeling of Human-Water Systems // Water Resources Research. - 2025. - DOI: 10.1029/2024WR038088.
30. Ahmad S., Simonovic S.P. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management // Computers & Environmental Systems. - 2021. - Vol. 100. - Art. 100031. - DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100031.
31. Mashaly A.F., Fernald A.G., Geli H.M.E., Bawazir A.S., Steiner R.L. Dynamic simulation modeling for sustainable water management with climate change in a semi-arid environment // Journal of Hydrology. - 2024. - Vol. 644. - Art. 132126. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132126.
32. Salas J.D., Delleur J.W., Yevjevich V., Lane W.L. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. - Water Resources Publications, 1980.
33. Maia A.G., Camargo-Valero M.A., Trigg M.A., Khan A. et al. Uncertainty and Sensitivity Analysis in Reservoir Modeling: A Monte Carlo Simulation Approach // Water Resources Management. - 2024. - Vol. 38. - P. 2835-2850. - DOI: 10.1007/s11269-024-03794-z.
34. Qian T., Shi Z., Gu S., Xi W., Chen J., Chen J., Bai S., Wu L. A Water Shortage Risk Assessment Model Based on Kernel Density Estimation and Copulas // Water. - 2024. - Vol. 16, No. 11. - Art. 1465. - DOI: 10.3390/w16111465.
35. Wilby R.L., Darch G. Uncertainty in Hydrologic and Water Resources Modelling // Uncertainty in Climate Change Research / eds. L.O. Mearns, C.E. Forest, H.J. Fowler, R. Lempert, R.L. Wilby. - Cham: Springer, 2025. - DOI: 10.1007/978-3-031-85542-9_9.
36. Reinecke R., Stein L., Gnann S., Andersson J.C.M., Arheimer B., Bierkens M., Bonetti S., Güntner A., Kollet S., Mishra S., Moosdorf N., Nazari S., Pokhrel Y., Prudhomme C., Schewe J., Shen C., Wagener T. Uncertainties as a Guide for Global Water Model Advancement // Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. - 2025. - Vol. 12, No. 3. - Art. e70025. - DOI: 10.1002/wat2.70025.
37. Wu W., Eamen L., Dandy G., Maier H.R., Razavi S., Kwakkel J., Huang J., Kuczera G. Beyond the traditional paradigm of water resources management: Scenario thinking to address deep uncertainty // Journal of Hydrology. - 2025. - Vol. 661. - Art. 133547. - DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.133547.
38. Rezazadeh H., Bruckmann L., Fernandes Marques G., Tilmant A. Water Resources Planning Under Deep Uncertainty and Multiple Criteria - An Example in the Senegal River Basin // Water Resources Research. - 2025. - Vol. 61, No. 12. - Art. e2025WR041058. - DOI: 10.1029/2025WR041058.
39. Lawrence J., Haasnoot M., McKim L., Atapattu D., Campbell G., Stroombergen A. Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP): From theory to practice // Decision Making under Deep Uncertainty. - Springer, 2019. - P. 187-199. - DOI: 10.1007/978-3-030-05252-2_9.
40. Allison A.E.F., Lawrence J.H., Stephens S.A., Kwakkel J.H., Singh S.K., Blackett P., Stroombergen A. Planning for wastewater infrastructure adaptation under deep uncertainty // Frontiers in Climate. - 2024. - Vol. 6. - Art. 1355446. - DOI: 10.3389/fclim.2024.1355446.
41. Comprehensive framework for long-term reservoir management under deep uncertainty // Environmental Modelling & Software. - 2026. - Vol. 195. - Art. 106740. - DOI: 10.1016/j.envsoft.2025.106740.
42. International Commission for the Protection of the Danube River. Danube River Basin Management Plan - Update 2021 [Электронный ресурс]. - 2021. - URL: https://www.icpdr.org (дата обращения: 17.03.2026).
43. Wheeler K.G., Jeuland M., Hall J.W., Zagona E., Whittington D. Cooperative filling approaches for the Grand Ethiopian Renaissance Dam // Nature Climate Change. - 2016. - Vol. 6. - P. 867-871. - DOI: 10.1038/nclimate3069.
44. U.S. Bureau of Reclamation. Colorado River Simulation System (CRSS): Overview and Documentation [Электронный ресурс]. - 2012. - URL: https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/crss/ (дата обращения: 17.03.2026).
45. Christensen N.S., Lettenmaier D.P. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin // Hydrology and Earth System Sciences. - 2007. - Vol. 11. - P. 1417-1434. - DOI: 10.5194/hess-11-1417-2007
46. Starodubtsev V., Leman M. New trends in watering the Chu River Delta (Kazakhstan) under climate change // Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference “New Horizons in Scientific Research: Challenges and Solutions”. – Marseille, France: European Open Science Space, 2025. – P. 69–74. – DOI: DOI 10.70286/EOSS-03.11.2025.002
47. Toonen W.H.J., Macklin M.G., Dawkes G., Durcan J.A., Leman M., Nikolayev Y., Yegorov A. A hydromorphic reevaluation of the forgotten river civilizations of Central Asia // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2020. – Vol. 117, No. 52. – P. 32982–32988. – DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2009553117

СУ РЕСУРСТАРЫН СЦЕНАРИЙЛІК МОДЕЛЬДЕУ ТӘСІЛДЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

Leman Max[12]*, Айнура Е. Алдиярова[1] PhD, қауымдастырылған профессор, Ерболат Т. Кайпбаев[1] PhD, қауымдастырылған профессор, Айнур Н. Калмашова[1] – PhD, қауымдастырылған профессор

[1] «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы, Қазақстан. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (A.E.A), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (E.T.K.), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (A.H.K)
[2]«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; maxleman131@gmail.com (L.M.)
*Автор корреспондент: Leman M., maxleman131@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

су ресурстарын басқару, сценарийлік талдау, өзен алабын модельдеу, су қауіпсіздігі.

Мақала жайында:
Алынды: 11.03.2026
Қайта қаралды: 25.08.2026
Қабылданды: 09.09.2026
Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Қазіргі заманғы су ресурстарын басқару жағдайында су тұтынудың өсуі мен трансшекаралық шектеулерге байланысты өзен бассейндеріндегі су дағдарыстары мәселесі жүйелі сипат алуда. Су ресурстарына түсетін жүктеменің артуымен қатар тәуекелдерді болжау мен бағалаудың ғылыми негізделген әдістеріне деген қажеттілік те өсуде, бұл су менеджментінің заманауи модельдерін әзірлеу мен қолдануды ерекше өзекті міндетке айналдырады.
Жұмыстың мақсаты модельдік есептеулер нәтижелері негізінде су шаруашылығы жүйелерінің дамуының баламалы сценарийлерін қалыптастыруға және талдауға бағытталған тәсілдерді қоса алғанда, су ресурстарын сценарийлік модельдеудің қолданыстағы тәсілдеріне салыстырмалы талдау жүргізу болып табылады. Бұл модельдік есептеулер климаттық, әлеуметтік-экономикалық және басқарушылық факторлардың әртүрлі комбинацияларын көрсетеді.
Мақалада өзен бассейндеріндегі су дағдарыстарының даму сценарийлерін талдау үшін қолданылатын су ресурстарын модельдеудің заманауи әдістеріне шолу ұсынылған. Гидрологиялық, интеграцияланған, жүйелік-динамикалық және стохастикалық модельдер, сондай-ақ климаттық, антропогендік және басқарушылық факторларды ескере отырып сценарийлерді қалыптастыру тәсілдері қарастырылған. Су қауіпсіздігі тәуекелдерін және сумен қамтамасыз етудің тұрақтылығын бағалау тұрғысынан әртүрлі әдістердің артықшылықтары мен шектеулеріне салыстырмалы талдау жүргізілген.
Табиғи және әлеуметтік-экономикалық факторлардың белгісіздігін ескеруге мүмкіндік беретін сценарийлік модельдеудің әдіснамалық аспектілеріне ерекше назар аударылған. Сценарийлік талдаудың жоғары белгісіздік жағдайында басқарушылық шешімдерді негіздеудің негізгі құралы болып табылатыны көрсетілген. Алынған қорытындылар су дағдарыстарының дамуын талдауға және ірі өзен бассейндерінде суды тұрақты пайдалануды жоспарлауға бағытталған кейінгі зерттеулер үшін әдіснамалық негіз қалыптастырады.

COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO SCENARIO MODELLING OF WATER RESOURCES

Leman Max[12]*, Ainura E. Aldiyarova[1] PhD, Associate Professor, Yerbolat T. Kaipbayev[1] PhD, Associate Professor, Ainur N. Kalmashova[1] PhD, Associate Professor

[1]NJSC «Kazakh National Agrarian Research University», Almaty, Kazakhstan. ainura.aldiarova@kaznaru.edu.kz (A.E.A.), yerbolat.kaipbayev@kaznaru.edu.kz (Ye.T.K.), Kalmashova.Ainur@kaznaru.edu.kz (A.N.K.)
[2] JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; maxleman131@gmail.com (L.M.)
*Corresponding author correspondent:: Leman M., maxleman131@gmail.com

KEY WORDS

water resources management, scenario analysis, river basin modelling, water security.

ABSTRACT

Modern water resources management is increasingly challenged by rising water demand and transboundary constraints, with water crises in river basins becoming increasingly systemic in nature. Alongside growing pressures on water resources, there is an increasing need for scientifically robust methods of forecasting and risk assessment, making the development and application of contemporary water management models particularly relevant.
The aim of this study is to provide a comparative analysis of existing approaches to scenario modelling of water resources, including approaches focused on the development and analysis of alternative scenarios for the evolution of water management systems based on model simulations representing different combinations of climatic, socio-economic and management factors.

About article:
Received: 11.03.2026
Revised: 25.08.2026
Accepted: 09.09.2026
Published: 30.09.2026

The article reviews contemporary water resources modelling methods used to analyse scenarios of water crisis development in river basins. Hydrological, integrated, system dynamics and stochastic models are considered, together with approaches to scenario development that account for climatic, anthropogenic and management factors. The advantages and limitations of the different methods are comparatively analysed in terms of their suitability for assessing water security risks and the resilience of water supply systems.

Particular attention is given to the methodological aspects of scenario modelling that allow uncertainty in natural and socio-economic factors to be considered. Scenario analysis is shown to be a key tool for supporting management decisions under conditions of high uncertainty. The findings provide a methodological basis for further research aimed at analysing the development of water crises and planning sustainable water use in large river basins.

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).

Хроника

Северский Игорь Васильевич (к 90-летнему юбилею)

Игорь Васильевич Северский - выдающийся казахстанский учёный, академик Национальной Академии Наук Республики Казахстан, доктор географических наук, профессор, один из основателей гляциологической школы Казахстана. Его многолетняя деятельность связана с исследованием снега, лавин, ледников и горных рек, оценкой природных опасностей и обеспечением водной безопасности Центральной Азии. Сегодня Игорь Васильевич - научный руководитель Центрально-Азиатского регионального гляциологического центра категории 2 под эгидой ЮНЕСКО и национальный корреспондент Всемирной Службы Мониторинга Ледников.

Игорь Васильевич родился 9 августа 1936 года в Алматинской области в семье служащих. Окончив с отличием естественно-географический факультет КазПИ, он начал трудовую деятельность учителем средней школы. В 1960 году поступил на работу в Сектор географии Академии Наук Казахской ССР, где под руководством известного гидролога Игоря Святославовича Соседова начал исследования в области горной гидрологии и гидрофизики горных ландшафтов. Материалы первых экспедиций и полевых наблюдений легли в основу его научных работ, посвящённых снежному покрову и условиям формирования лавин.

Более сорока полевых сезонов И.В. Северский посвятил исследованию высокогорных районов. Экспедиционные маршруты учёного проходили по Иле и Жетысу Алатау, Алтаю, Памиру, Гиссаро-Алаю и Кавказу, а также по другим горным системам Евразии. Работа в сложных природных условиях требовала не только глубоких знаний, но и исключительной выдержки, организованности и личной ответственности. Накопленные наблюдения позволили сформировать уникальный фактический материал о закономерностях распределения снежного покрова, лавинообразовании и гидрологическом режиме горных территорий.

В 1970 году на учёном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова Игорь Васильевич защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую снежным лавинам Заилийского Алатау, их формированию, распространению, прогнозированию и влиянию на гидрологический режим. В том же году им была создана снеголавинная лаборатория и организованы круглогодичные исследования в бассейне реки Тургень. С 1973 года он руководил работами по оценке лавинной опасности горных приграничных районов Казахстана и Средней Азии. Результаты этих исследований, проводившихся в интересах государственных ведомств, получили высокую оценку и были отмечены премией Совета Министров СССР.

В 1982 году И.В. Северский защитил докторскую диссертацию «Проблема оценки заснеженности и лавинной опасности горных территорий». Им разработана система расчётных методов оценки распределения снежного покрова в условиях сложного горного рельефа, предложены методики определения высоты климатической снеговой границы и характеристик лавинной опасности. В научный оборот введены новые понятия и показатели, в том числе модуль лавинного сноса, лавинный бассейн и коэффициент лавинной активности площади. На основе

разработанных подходов впервые была составлена серия карт снежности и лавинной опасности горных районов Казахстана.

Значительное место в научном наследии академика занимают картографические исследования. Подготовленные при его участии карты снежности и лавинной опасности Алтая, Жетысу Алатау, Тянь-Шаня, Памира, Гиссаро-Алая, Гиндукуша, Каракорума, Кунь-Луня, Тибетского нагорья, Гималаев и Монгольского Алтая вошли в Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. Результаты исследований также представлены в Национальном атласе Республики Казахстан. Эти материалы получили широкое научное и прикладное значение для оценки природных рисков и планирования хозяйственной деятельности в горных районах.

По инициативе Игоря Васильевича выполнялось составление последовательных унифицированных каталогов ледников Юго-Восточного Казахстана. Особенно подробно исследовано оледенение Балкаш-Алакольского бассейна, включающее ледники северного склона Иле Алатау, Жетысу Алатау, бассейна реки Шелек и китайской части бассейна реки Иле. Каталоги, охватывающие несколько временных срезов второй половины XX - начала XXI века, сформировали надёжную основу для мониторинга изменений площади и состояния ледников, а также оценки вклада талых ледниковых вод в речной сток.

Трудовой путь учёного неразрывно связан с Институтом географии. Здесь он прошёл путь от лаборанта и научного сотрудника до заведующего лабораторией гляциологии, заместителя директора и директора института. С 2001 года являлся его почётным директором. В 1989 году И.В. Северский был избран членом-корреспондентом Национальной Академии Наук Республики Казахстан, а в 2003 году - академиком. В 2007-2021 годах он возглавлял редакционную работу научного журнала «Вопросы географии и геоэкологии», способствуя развитию отечественных исследований и распространению их результатов.

Большой вклад Игорь Васильевич внёс в международное научное сотрудничество. В 1996-2006 годах он возглавлял Национальный комитет Республики Казахстан по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера», в 2006-2017 годах - Национальный комитет по Международной гидрологической программе ЮНЕСКО. Он представлял результаты исследований на конференциях и научных форумах во многих странах мира, укрепляя связи казахстанской науки с ведущими зарубежными центрами гляциологии, гидрологии и изучения горных территорий.

Особое значение имеет участие И.В. Северского в становлении Центрально-Азиатского регионального гляциологического центра категории 2 под эгидой ЮНЕСКО, созданного в 2020 году на основании соглашения между Правительством Республики Казахстан и ЮНЕСКО.

Под его руководством успешно выполнены десятки научных программ и проектов, включая международные исследования. Он является автором более 200 научных публикаций, в том числе 14 монографий. За цикл работ по снегу и лавинам И.В. Северскому присуждена премия имени Чокана Валиханова в области географии; результаты международных гляциологических исследований также получили признание зарубежного научного сообщества. Учёный подготовил плеяду докторов и кандидатов наук, которые продолжают развивать заложенные им научные направления.

Выдающийся вклад Игоря Васильевича в науку и развитие страны отмечен Государственной премией Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби, орденами «Құрмет» и «Парасат», почётным званием «Қазақстанның еңбек сіңірген қайраткері», а также другими государственными и ведомственными наградами. Его имя внесено в Золотую книгу почёта Казахской ССР.

Научная биография Игоря Васильевича Северского - пример преданности избранному делу, соединения фундаментальной науки с практическими задачами и ответственного служения обществу. Широта научных интересов, богатейший

экспедиционный опыт, требовательность к достоверности результатов и неизменное внимание к молодым исследователям снискали ему глубокое уважение коллег и учеников. Его труды продолжают служить основой для изучения криосферы и водных ресурсов горных регионов в условиях меняющегося климата.

Уважаемый Игорь Васильевич!

Сердечно поздравляем Вас с 90-летним юбилеем! Ваш жизненный и профессиональный путь является ярким примером беззаветного служения науке, Родине и людям. Благодаря Вашему труду в Казахстане сформировалась авторитетная гляциологическая школа, а исследования снега, лавин, ледников и горных рек получили международное признание.

Ваши знания, научная принципиальность, неиссякаемая энергия и готовность делиться опытом вдохновляют коллег и молодых исследователей. Созданный Вами научный задел имеет особое значение сегодня, когда сохранение водных ресурсов и изучение изменений горной криосферы становятся важнейшими задачами для Казахстана и всей Центральной Азии.

От всей души желаем Вам крепкого здоровья, благополучия, бодрости духа, новых идей и дальнейших творческих свершений. Пусть рядом всегда будут родные, друзья, коллеги и благодарные ученики, а Ваши знания и мудрость ещё долгие годы служат развитию отечественной и мировой науки!

С уважением и благодарностью,
коллектив Центрально-Азиатского регионального гляциологического центра,
коллеги с АО «Институт географии и водной безопасности»,
РГП «Казгидромет» и редакция журнала «Гидрометеорология и экологии».

Хроника

Мальковский Игорь Михайлович (1936-2026 гг.)

7 сентября 2026 года на 90-м году ушел из жизни выдающийся ученый-гидролог, доктор географических наук, кандидат технических наук, профессор, академик Казахстанской национальной академии естественных наук и Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, дважды лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники Игорь Михайлович Мальковский.

Игорь Михайлович родился 8 февраля 1936 года в Алма-Ате. В 1962 году окончил Казахский государственный сельскохозяйственный институт, получив квалификацию инженера-гидротехника по специальности «гидромелиорация». Трудовую деятельность начал в проектных институтах «Казгипрозем» и «Казгидропроект». С 1965 года его профессиональный путь был неразрывно связан с научными исследованиями – он начал работу в лаборатории регулирования речного стока Казахского НИИ энергетики. В 1975 году защитил кандидатскую диссертацию. С 1982 года И.М. Мальковский работал доцентом кафедры гидрологии суши географического факультета Казахского государственного университета имени С.М. Кирова. Преподавательскую деятельность он успешно сочетал с научной работой, участвовал в выполнении хозяйственных договоров с Министерством мелиорации и водного хозяйства КазССР, а также в реализации крупной научно-технической программы по Или-Балхашской проблематике.

В 1986 году Игорь Михайлович пришел в Институт географии, где возглавил группу математического моделирования водохозяйственных систем. В 1991-1992 годах, наряду с работой в Институте географии, он руководил деятельностью Временного творческого коллектива «Арал», занимавшегося выполнением научно-технических программ по проблемам бассейна Аральского моря. При его непосредственном участии был создан Приаральский экологический центр Института географии и организована система гидрологического мониторинга в экологически дестабилизированных районах Казахстанского Приаралья.

С 1994 по 2009 год И.М. Мальковский занимал должность заместителя директора Института географии по науке, одновременно руководя тематической группой лаборатории гидроэкологии. В 2010 году был назначен заместителем директора по управлению проектами.

Значительная часть научной деятельности Игоря Михайловича была посвящена вопросам управления водными ресурсами и водообеспечения природно-хозяйственных систем. В 2003 году он защитил докторскую диссертацию, в которой получило развитие конструктивное направление географии в области управления водными ресурсами с учетом факторов неопределенности и конфликтности. Им была разработана концепция водной безопасности Республики Казахстан как одного из факторов устойчивого развития страны.

Особое место в научном наследии ученого занимали исследования Аральского и Балхашского бассейнов. В области аральской проблематики И.М. Мальковский принимал участие в разработке концепции сохранения и восстановления

Аральского моря и нормализации экологической и социально-экономической ситуации в Приаралье. В рамках балхашской проблематики им были проведены фундаментальные исследования внутриводоемных процессов озера Балхаш и разработаны модельные подходы к прогнозированию водообеспечения Иле-Балхашского бассейна при различных водохозяйственных стратегиях.

Важным результатом многолетних исследований стало развитие научного направления «водообеспечение природно-хозяйственных систем». На его основе была создана специализированная лаборатория, а под научным руководством И.М. Мальковского подготовлены и защищены докторские и кандидатские диссертации.

Игорь Михайлович внес значительный вклад также в развитие атласного картографирования. В составе авторского коллектива он участвовал в разработке концепции атласного картографирования Республики Казахстан, реализованной в трехтомном Национальном атласе Республики Казахстан.

Научные достижения ученого получили широкое государственное признание. В 2013 году И.М. Мальковский в составе авторского коллектива стал лауреатом Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники за цикл работ в области атласного картографирования. В 2019 году он вошел в состав авторского коллектива, удостоенного Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби за цикл научных работ в области устойчивого водообеспечения природно-хозяйственных систем Республики Казахстан в контексте национальной безопасности.

Игорь Михайлович был автором многочисленных научных трудов, в том числе монографий и географических атласов. Его исследования внесли существенный вклад в развитие отечественной гидрологии, географии и науки о водных ресурсах. Для нескольких поколений ученых он был наставником и руководителем, передавая свой научный опыт и формируя специалистов, продолживших исследования в области водообеспечения и водной безопасности.

Научное наследие Игоря Михайловича Мальковского является значимой частью отечественной гидрологической и географической науки. Его исследования, посвященные водным ресурсам Казахстана, проблемам Арала и

Балхаша, водообеспечению и водной безопасности, сохраняют научную и практическую значимость и сегодня.

Светлая память об Игоре Михайловиче Мальковском – выдающемся ученом, наставнике и человеке, посвятившем многие десятилетия служению отечественной науке, – навсегда останется в сердцах его коллег, учеников и соратников.

Редакция журнала «Гидрометеорология и экология»
РГП «Казгидромет».