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

КАЗГИДРОМЕТ





30 ЛЕТ
Гидрометеорология
и экология

Гидрометеорология және экология

журналының
Сәкен Қаламқалиұлы Дәулетғалиевтің
90 жылдық мерейтойына арналған
арнайы шығарылымы

АСТАНА

ISSN 2079-6161
eISSN 2789-6323

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯ

«Қазгидромет» РМК

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

РГП «Казгидромет»

HYDROMETEOROLOGY AND ECOLOGY

RSE «Kazhydromet»

2025

№4 (119) шығарылым

Выпуск №4 (119)

Issue №4 (119)

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

Саиров С.Б., г.ғ.к., Бас директордың бірінші орынбасары

РЕДАКЦИЯ

Базарбай Л.Б., жетекші ғылыми қызметкер

Елтай А.Ғ., Ph.D, басқарма бастығы

Жаксыбаева А.Е., жетекші ғылыми қызметкер

Кукенова Б.Т., жетекші инженер

Нұрхан М.Қ., жетекші ғылыми қызметкер

РЕДАКЦИЯ АЛҚАСЫ

Абдрахимов Р.Г. (Алматы, Қазақстан)

Волчек А.А. (Брест, Беларусь)

Гафуров А. (Потсдам, Германия)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Қазақстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Қазақстан)

Опп К. (Марбург, Германия)

Островская Е.В. (Астрахань, Ресей)

Полякова С.Е. (Алматы, 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

Саиров С.Б., к.г.н., Первый заместитель генерального директора

РЕДАКЦИЯ

Базарбай Л.Б., ведущий научный сотрудник

Елтай А.Ғ., Ph.D, начальник управления

Жаксыбаева А.Е., ведущий научный сотрудник

Кукенова Б.Т., ведущий инженер

Нұрхан М.Қ., ведущий научный сотрудник

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Абдрахимов Р.Г. (Алматы, Казахстан)

Волчек А.А. (Брест, Беларусь)

Гафуров А. (Потсдам, Германия)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Казахстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Казахстан)

Опп К. (Марбург, ФРГ)

Островская Е.В. (Астрахань, Россия)

Полякова С.Е. (Алматы, 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

Sairov S., Candidate of Geological Sciences, First Deputy Director General

EDITORIAL STAFF

Bazarbay L., Leading Researcher

Yeltay A., Ph.D, head of unit

Zhaksybayeva A., Leading Researcher

Kukenova B., Leading Engineer

Nurkhan M., Leading Researcher

EDITORIAL BOARD

Abdrakhimov R. (Almaty, Kazakhstan)

Volchek A. (Брест, Беларусь)

Gafurov A. (Potsdam, Germany)

Murtazin E. (Almaty, Kazakhstan)

Mustafayev Zh. (Almaty, Kazakhstan)

Opp C. (Marburg, Germany)

Ostrovskaya E. (Astrakhan, Russia)

Polyakova S. (Almaty, Kazakhstan)

Salnikov V. (Almaty, Kazakhstan)

Stepanov B. (Almaty, Kazakhstan)

Terekhov A. (Almaty, Kazakhstan)

Tillakarin 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: «Kazhydromet» RSE

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

«Гидрометеорология және экология» журналының бұл арнайы шығарылымы көрнекті ғалым, география ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-дың метеорология және гидрология кафедрасының профессоры Сәкен Қаламқалиұлы Дәулетғалиевке арналған. Бұл – әріптестері мен шәкірттерінің оның көп жылдық еңбегі мен ғылымның дамуына қосқан зор үлесіне деген терең құрметі мен ризашылығының көрінісі.

– –

Данный специальный выпуск журнала «Гидрометеорология и экология» посвящен Сакену Каламкалиевичу Давлетгалиеву – выдающемуся ученому, доктору географических наук, профессору кафедры метеорологии и гидрологии КазНУ имени аль-Фараби. Он является выражением глубокого уважения и признательности со стороны коллег и учеников за многолетний труд и вклад в развитие науки.

– –

This special issue of the «Hydrometeorology and Ecology» journal is dedicated to Saken Davletgaliev, an eminent scientist, Doctor of Geographical Sciences, and professor in the Department of Meteorology and Hydrology at Al-Farabi Kazakh National University. It is an expression of deep respect and appreciation from his colleagues and students for his many years of hard work and contribution to scientific development.

«90 лет труда, вдохновения и мудрости»



к юбилею

САКЕНА КАЛАМКАЛИЕВИЧА ДАВЛЕТГАЛИЕВА

Биография

Давлетгалиев Сакен Каламкалиевич родился 18 июня 1935 г. в п. 1-я Чижа Каменского района (ныне совхоз Амангельды Таскалинского района) Западно-Казахстанской области.

1947 г. – окончил неполную среднюю школу в п. 1-я Чижа.

1953 г. – окончил казахскую среднюю мужскую школу №18 им. Жамбула в г. Алма-Ате.

1953-1958 гг. – обучение на гидрологическом факультете Ленинградского Гидрометеорологического института.

1958-1963 гг. – лаборант, инженер Института Энергетики АН КазССР.

1964-1966 гг. – учеба в аспирантуре Института Энергетики АН КазССР

1967-1971 гг. – инженер, младший научный сотрудник КазНИИ Энергетики.

1970 г. – защитил кандидатскую диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Гидроэлектростанции и гидроэнергетические установки».

1972-1984 гг. – старший преподаватель, доцент кафедры гидрологии суши КазГУ им. С.М. Кирова.

1977 г. – присвоено звание доцента по кафедре гидрологии суши.

1977 г. – окончил Университет марксизма-ленинизма при КазГУ им. С.М. Кирова.

1985-1992 гг. – заведующий кафедрой гидрологии суши.

1993-1997 гг. – доцент кафедры гидрологии суши.

1996 г. – защитил докторскую диссертацию в Российском государственном гидрометеорологическом институте.

1997 г. – присуждена степень доктора географических наук Российской Федерации.

1998 г. – присуждено ученое звание профессора по специальности «География».

С 1998 г. по настоящее время – профессор кафедры гидрологии суши КазНУ им. аль-Фараби.

Награды:

1985 г. – награжден дипломом Минвуза СССР и ЦК ВЛКСМ.

1988 г. – награжден медалью «Ветеран труда»

1988 г. – стажировка в Одесском гидрометеорологическом институте.

1995 г. – награжден грудным значком «Отличник образовании РК».

2021 г. – награжден грудным значком «Гидрометеорология саласының үздігі».

Құрметті Сәкен Қаламқалиұлы!

«Қазгидромет» РМК ұжымы мен «Гидрометеорология және экология» ғылыми-техникалық журналының редакциялық алқасы атынан Сізді 90 жылдық мерейтойыңызбен шын жүректен құттықтаймыз!

Сіздің өмірлік жолыңыз Қазақстандағы гидрология мен гидрометеорология ғылымының дамуы-мен тығыз байланысты. Сіз — елімізде және одан тыс жерлерде еңбегі лайықты бағаланған, отандық ғылым мен білімнің дамуына зор үлес қосқан танымал ғалым және ұстазсыз.

Ғалым және ұйымдастырушы ретіндегі қабілетіңіз, жоғары еңбекқорлығыңыз бен өз ісіңізге адалдығыңыздың арқасында бүгінгі таңда Сіздің дәстүріңізді лайықты жалғастырып келе жатқан мамандардың тұтас буыны қалыптасты. Олар Сіздің шәкірттеріңіз екенін зор мақтанышпен айтады.

Сіздің ғылыми еңбектеріңіз бен педагогикалық қызметіңіз гидрологиялық зерттеулердің әрі қарай дамуына мықты негіз болды.

Осы мерейлі күні Сізге мықты денсаулық, сарқылмас жігер мен күш-қуат, бақыт пен амандық тілейміз. Даналығыңыз бен мол тәжірибеңіз ғылымның, елдің және болашақ ұрпақтың игілігіне қызмет ете берсін!

Ізгі құрметпен,
«Қазгидромет» РМК Бас директоры,
«Гидрометеорология және экология» журналының
Бас редакторы
Данара АЛИМБАЕВА

Құрметті Сәкен Қаламқалиұлы!

Сізді мерейлі белес – 90 жылдық мерейтойыңызбен шын жүректен құттықтау мен үшін үлкен мәртебе!

Сіздің өмір жолыңыз – ғылымға, Отанға және халыққа адал қызмет етудің жарқын үлгісі. Ондаған жылдар бойы Сіз біз, шәкірттеріңіз үшін еңбексүйгіштіктің, іске адалдықтың, сонымен қатар адами қасиеттің, айналаңыздағы адамдарға деген шынайы ықыластың айқын өнегесі болып келесіз.

Сіз ғылым мен тәжірибенің әртүрлі салаларында лайықты орын алған тұтас бір мамандар шоғырын тәрбиелеп шығардыңыз.

Сіздің отандық гидрология ғылымын дамытуға қосқан үлесіңізді асыра бағалау мүмкін емес. Жүзден астам ғылыми еңбектеріңіз, гидрологиялық процестерді модельдеу жөніндегі іргелі зерттеулеріңіз, Балқаш көлі мен Іле, Ертіс трансшекаралық өзендерінің мәселелері бойынша жүргізген еңбектеріңіз, бірегей оқу құралдарыңыз, мемлекеттік білім беру стандарттарын әзірлеуге қосқан үлесіңіз – мұның бәрі ғылым тарихында мәңгілікке қалды. Дегенмен, Сіздің ең басты жетістігіңіз – идеяларыңызды ризашылықпен жалғастырып келе жатқан шәкірттеріңіз.

Сіздің қарапайымдылығыңыз, зиялылығыңыз, әділдігіңіз бен мейірімділігіңіз әріптестеріңіздің, студенттердің және достарыңыздың шынайы құрметі мен сүйіспеншілігіне бөледі. Дәл осы қасиеттеріңіздің арқасында Сіз әрқашан ғылыми ізденістеріңізде Сізді қолдайтын сенімді әріптестеріңізбен және серіктестеріңізбен бірге болдыңыз.

Сізге мықты денсаулық, жақындарыңыздың қамқорлығы мен жылулығын тілеймін. Әрбір жаңа күніңіз қуанышқа толы болсын, ал Сіздің еңбектеріңіз бен есіміңіз жаңа буын ғалымдары мен мамандары үшін әрдайым үлгі болып қала берсін.

Ізгі алғыспен,
«Қазгидромет» РМК
Бас директорының бірінші орынбасары
Серік САИРОВ

Қадірлі Сәкен Қаламқалиұлы!

Сізді 90 жылдық мерейтойыңызбен шын жүректен құттықтаймыз!

Көптеген ұрпақ үшін Сіз жай ғана оқытушы емес, нағыз ұстаз, ғылым мен өз ісіне адалдықтың үлгісі болдыңыз. Сіздің дәрістеріңіз бен баға жетпес біліміңіздің арқасында біз гидрологияның қызықты да жауапты әлемін танып, табиғи үдерістердің өзара байланысын түсінуді және ең күрделі жағдайларда да шешім табуды үйрендік.

Сіздің отандық гидрологиялық болжамдар мектебінің дамуына қосқан үлесіңіз баға жетпес: Сіз ғылыми бағыттардың негізін қалап, еліміздің әр өңірінде өз ісіңізді жалғастырып жүрген мамандардың тұтас буынын тәрбиеледіңіз.

Біз Сіздің даналығыңызға, ізгі ниетіңіз бен әрбір студентке деген қамқорлығыңызға шексіз ризашылығымызды білдіреміз. Сіздің айтқан сөздеріңіз бен кеңестеріңіз біз үшін тек кәсіби өмірде ғана емес, жалпы өмір жолында да бағыт-бағдар болып қала береді.

Осы айтулы күні Сізге зор денсаулық, көңіл тыныштығын, қуаныш пен шаттық тілейміз. Әрбір жаңа күніңіз тек жарқын сәттерге толы болсын, ал жаныңызда әрдайым шәкірттеріңіздің, әріптестеріңіздің және жақындарыңыздың құрметі мен сүйіспеншілігі сезілсін.

Шынайы құрметпен және ризашылықпен,
шәкірттеріңіз

МАЗМҰНЫ

ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

Жумахан С. Мустафаев, Канат Ж. Мұстафаев
ХАРРИНГТОННЫҢ ЖАЛПЫ ҚАЛАУЛЫҚ ФУНКЦИЯСЫН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӨЗЕННІҢ СУЖИНАУ АЛАБЫНЫҢ ЖАНАМА ТЕХНОГЕНДІК ЖҮКТЕМЕЛЕРІН БАҒАЛАУ ӘДІСІ 14

Турсун Т. Ибраев , Марина А. Ли, Нурлан Н. Бакбергенов, Талгат К. Иманалиев, Нурлан Н. Балгабаев ШУ ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ ЖЕРЛЕРІНДЕГІ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ЖӘНЕ ТАБИҒИ КЕШЕНДЕРДІҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ 22

Татьяна С. Гричаная, Павел А. Калашников, Алихан С. Кали, Гульнаурыз С. Отеберген
АРАЛ-СЫРДАРИЯ СУ ШАРУАШЫЛЫҚ БАССЕЙНІНДЕ СУАРМАЛЫ ЕГІНШІЛІКТЕ ЖАҢАРТЫЛАТЫН СУ РЕСУРСТАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ 35

Әлима А. Амангелді, Гульнара М. Искалиева, Айбек А. Мерекеев, Мәдина С. Сағат
ТҮРГЕН ӨЗЕНІ БАССЕЙНІНДЕГІ МҰЗДЫҚТАР МЕН МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕР АУДАНЫНЫҢ ӨЗГЕРУІН ТАЛДАУ 47

Лаура Т. Исмуханова, Ботакоз М. Султанбекова, Айнұр Мұсақұлқызы, Азамат С. Мадибеков
БҰҚТЫРМА СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН КӨПЖЫЛДЫҚ БАҚЫЛАУЛАР НЕГІЗІНДЕ КЕШЕНДІ СИПАТТАМАСЫ (2014...2025 ЖЖ.) 58

Серик Б. Саиров, Айзат Ғ. Елтай, Галина М. Шишкина, Айгерім Қ. Құрманғалиева, Лаура Б. Базарбай, Нұрғаным Н. Жағпарова
КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ БОЛАШАҚ ТОЛҚЫН БИІКТІГІНІҢ ДИНАМИКАСЫ 70

Айгерим К. Калыбаева, Саним Б. Бисенбаева
ЖАЙЫҚ ӨЗЕНІНДЕГІ СУ ТАСҚЫНЫ КЕЗІНДЕ СУ БАСУ АЙМАҚТАРЫН МОДЕЛЬДЕУДІ БАҒАЛАУ 84

Саят К. Алимкулов, Ляззат К. Махмудова, Эльмира К. Талипова, Жанибек Ж. Смагулов, Ақгүлім М. Сайлаубек
ЖАЙЫҚ-КАСПИЙ СУ ШАРУАШЫЛЫҒЫ АЛАБЫНДАҒЫ КӨКТЕМГІ СУ ТАСҚЫНЫ АҒЫНДЫСЫН БАҒАЛАУ: ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ СЦЕНАРЛЫҚ БОЛЖАМЫ 95

Саят К. Алимкулов, Альфия Р. Загидуллина, Гаухар Р. Баспакова
ЖАЙЫҚ-КАСПИЙ СУШАРУАШЫЛЫҚ АЛАБЫНДАҒЫ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ АҒЫНДЫНЫҢ МЕМЛЕКЕТАРАЛЫҚ ҮЛЕСТІРІМІ 110

Айнур К. Мусина, Маржан С. Оспанова, Әсел С. Абдуллаева, Гүлжанат Ж. Байдашева
БАДАМ ӨЗЕНІ АҒЫНДЫСЫНЫҢ СОҢҒЫ 10-ЖЫЛДЫҚТАРДАҒЫ ӨЗГЕРІСІН БАҒАЛАУ 121

Серик Б. Саиров, Турсын А. Тілләкәрім, Бота Б. Айтымова, Мариям Қ. Нұрхан
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКЕ СЫРДАРЬЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА 133

Сабир Б. Асадов, Гасан И. Мусаев
КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ ӘЗЕРБАЙЖАН СЕКТОРЫНДАҒЫ КЛИМАТТЫҚ СИПАТТАМАЛАРДЫҢ ӨЗГЕРУІ: НЕФТЯНЫЕ КАМНИ АУДАНЫ 150

Жанар К. Наурозбаева, Александр В. Холопцев, Жулдыз Х. Кенжина, Нурканат Е. Рахматулла
КАСПИЙ МАҢЫНЫҢ СОЛТҮСТІК БӨЛІГІНДЕГІ НАЙЗАҒАЙЛАРДЫҢ ЖАЛПЫ ҰЗАҚТЫҒЫНЫҢ ЖЫЛДАР АРАСЫНДАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫН ВАРИАЦИЯЛАРЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП МОДЕЛЬДЕУ 159

Бакыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Акмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жаксыбаева
ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЖЕР БЕТІ ЖЕЛІНІҢ РЕЖИМІ 177

Арай Е. Темиржанова, Жанат А. Байгазинов, Нурлан Ж. Мухамедияров, Медет Р. Актаев , Касым К. Дускаев
ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ЛАСТАНҒАН УЧАСКЕСІНДЕГІ ТҮП ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР 190

Жанар К. Наурозбаева, Гульсара Е. Монкаева, Макпал А. Жунисова, Еркебулан Е. Белдеубаев, Нурканат Е. Рахматулла, Жулдыз Х. Кенжина
ШУ–ТАЛАС (ҚАЗАҚСТАН) БАССЕЙНІНДЕГІ АУА ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ БОЛАШАҚТАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН ТАЛДАУ 205

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Жумахан С. Мустафаев, Канат Ж. Мұстафаев
ХАРРИНГТОННЫҢ ЖАЛПЫ ҚАЛАУЛЫҚ ФУНКЦИЯСЫН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӨЗЕННІҢ СУЖИНАУ АЛАБЫНЫҢ ЖАНАМА ТЕХНОГЕНДІК ЖҮКТЕМЕЛЕРІН БАҒАЛАУ ӘДІСІ 14

Турсун Т. Ибраев , Марина А. Ли, Нурлан Н. Бакбергенов, Талгат К. Иманалиев, Нурлан Н. Балгабаев СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ НИЗОВИЙ РЕКИ ШУ 22

Татьяна С. Гричаная, Павел А. Калашников, Алихан С. Кали, Гульнаурыз С. Отеберген
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ ПО АРАЛО-СЫРДАРЬИНСКОМУ ВХБ 35

Әлима А. Амангелді, Гульнара М. Искалиева, Айбек А. Мерекеев, Мәдина С. Сағат
АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ЛЕДНИКОВ И МОРЕННЫХ ОЗЕР В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТУРГЕН 47

Лаура Т. Исмуханова, Ботакоз М. Султанбекова, Айнұр Мұсақұлқызы, Азамат С. Мадибеков
КОМПЛЕКСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ БУКТЫРМИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ (2014...2025 ГГ.) 58

Серик Б. Саиров, Айзат Ғ. Елтай, Галина М. Шишкина, Айгерім Қ. Құрманғалиева, Лаура Б. Базарбай, Нұрғаным Н. Жағпарова
ДИНАМИКА ВЫСОТЫ ВОЛН В БУДУЩЕМ В КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ 70

Айгерим К. Калыбаева, Саним Б. Бисенбаева
ОЦЕНКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИ ПАВОДКАХ НА РЕКЕ ЖАЙЫК (УРАЛ) 84

Саят К. Алимкулов, Ляззат К. Махмудова, Эльмира К. Талипова, Жанибек Ж. Смагулов, Ақгүлім М. Сайлаубек
ОЦЕНКА ВЕСЕННЕГО СТОКА ПОЛОВОДЬЯ В ЖАЙЫК-КАСПИЙСКОМ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ БАССЕЙНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И СЦЕНАРНЫЙ ПРОГНОЗ 95

Саят К. Алимкулов, Альфия Р. Загидуллина, Гаухар Р. Баспакова 110
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСГРАНИЧНОГО СТОКА В ЖАЙЫК-КАСПИЙСКОМ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ БАССЕЙНЕ

Айнур К. Мусина, Маржан С. Оспанова, Әсел С. Абдуллаева, Гүлжанат Ж. Байдашева
ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА РЕКИ БАДАМ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ 121

Серик Б. Саиров, Турсын А. Тілләкәрім, Бота Б. Айтымова, Мариям Қ. Нұрхан
КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІ ЖАҒДАЙЫНДА СЫРДАРИЯ ӨЗЕНІНДЕГІ МҰЗДЫҚ ҚҰБЫЛЫСТАРДЫҢ МЕРЗІМДЕРІН БОЛЖАУ ӘДІСТЕМЕСІН ЖЕТІЛДІРУ 133

Сабир Б. Асадов, Гасан И. Мусаев
ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО СЕКТОРА КАСПИЙСКОГО МОРЯ: РАЙОН НЕФТЯНЫХ КАМНЕЙ 150

Жанар К. Наурозбаева, Александр В. Холопцев, Жулдыз Х. Кенжина, Нурканат Е. Рахматулла
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СУММАРНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГРОЗ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИКАСПИЯ, С УЧЕТОМ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ 159

Бакыт Т. Жездибаева, Аружан Ә. Әбілқади, Акмарал Б. Смагулова, Айзат Е. Жаксыбаева
РЕЖИМ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА В КАЗАХСТАНЕ 177

Арай Е. Темиржанова, Жанат А. Байгазинов, Нурлан Ж. Мухамедияров, Медет Р. Актаев , Касым К. Дускаев 190
ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАГРЯЗНЕННОГО УЧАСТКА РЕКИ ШАГАН

Жанар К. Наурозбаева, Гульсара Е. Монкаева, Макпал А. Жунисова, Еркебулан Е. Белдеубаев, Нурканат Е. Рахматулла, Жулдыз Х. Кенжина
АНАЛИЗ БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ В ШУ-ТАЛАССКОМ БАССЕЙНЕ (КАЗАХСТАН) 205

CONTENT

SCIENTIFIC ARTICLE

Zhumakhan Mustafayev1, Kanat Mustafayev
METHOD OF ASSESSING INDIRECT ANTHROPOGENIC LOADS IN RIVER BASIN CATCHMENT AREAS USING THE GENERALIZED HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION 14

Tursun Ibrayev, Marina Li, Nurlan Bakbergenov, Talgat Imanaliyev, Nurlan Balgabayev
THE CURRENT STATE OF AGRICULTURAL AND NATURAL COMPLEXES OF THE LOWER RIVER SHU 22

Tatyana Grichanaya, Pavel Kalashnikov, Alikhan Kali, Gulnauryz Otebergen
ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USE OF RENEWABLE WATER RE-SOURCES IN IRRIGATED AGRICULTURE IN THE ARAL-SYRDARYA WATER ECONOMY BASIN 35

Alima Amangeldi, Gulnara Iskaliyeva, Aibek Merekeyev, Madina Sagat
ANALYSIS OF GLACIER AND MORAINE LAKE AREA CHANGES IN THE TURGEN RIVER BASIN 47

Laura Ismukhanova, Botakoz Sultanbekova, Ainur Musakulkyzy, Azamat Madibekov
COMPREHENSIVE CHARACTERIZATION OF THE STATE OF THE BUKHTARMA RESERVOIR BASED ON MULTI-YEAR OBSERVATIONS (2014...2025) 58

Serik Sairov, Aizat Yeltay, Galina Shishkina, Aigerim Kurmangalieva, Laura Bazarbay, Nurganym Zhagparova
FUTURE WAVE HEIGHT DYNAMICS IN THE KAZAKH PART OF THE CASPIAN SEA 70

Aigerim Kalybayeva, Sanim Bissenbayeva
ASSESSMENT OF FLOOD INUNDATION MODELING ON THE ZHAYIK RIVER 84

Sayat Alimkulov, Lyazzat Makhmudova, Elmira Talipova, Zhanybek Smagulov, Akgulim Sailaube
ASSESSMENT OF SPRING FLOOD RUNOFF IN THE ZHAIYK-CASPIAN WATER MANAGEMENT BASIN: CURRENT STATE AND SCENARIO FORECAST 95

Sayat Alimkulov, Alfiya Zagidullina, Gaukhar Baspakova
INTERSTATE DISTRIBUTION OF TRANSBOUNDARY RUNOFF IN THE ZHAYIK-CASPIAN WATER BASIN 110

Ainur Mussina, Marzhan Ospanova, Assel Abdullayeva, Gulzhanat Baydasheva
ASSESSMENT OF CHANGES IN THE BADAM RIVER RUNOFF OVER THE LAST DECADES 121

Serik Sairov, Tursyn Tillakarim, Bota Aitymova, Mariyam Nurkhan
IMPROVEMENT OF METHODS FORECASTING THE TIMING FOR OF ICE PHENOMENA ON THE SYRDARYA RIVER UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS 133

Sabir Asadov, Hasan Musayev
CLIMATE CHANGE CHARACTERISTICS OF THE AZERBAIJANI SECTOR OF THE CASPIAN SEA: THE OIL ROCKS AREA 150

Zhanar Naurozbayeva, Alexander Kholoptsev, Zhuldyz Kenzhina, Nurkanat Rakhmatulla
MODELING OF INTERANNUAL VARIATIONS IN THE TOTAL DURATION OF THUNDERSTORMS IN THE NORTHERN CASPIAN REGION, CONSIDERING ATMOSPHERIC PRECIPITATION VARIABILITY 159

Bakhyt Zhezdibayeva, Aruzhan Abilkadi, Akmaral Smagulova, Aizat Zhaxybayeva
SURFACE WIND REGIME IN KAZAKHSTAN 177

Aray Temirzhanova, Janat Baigazinov, Nurlan Mukhamediyarov, Medet Aktayev, Kasym Duskayev
CHEMICAL ELEMENTS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE POLLUTED SECTION OF THE SHAGAN RIVER 190

Zhanar Naurozbayeva, Gulsara. Monkayeva, Makpal Zhunissova, Erkebulan Beldeubayev, Nurkanat Rakhmatulla, Zhuldyz Kenzhina
ANALYSIS OF FUTURE CHANGES IN TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE SHU-TALAS BASIN (KAZAKHSTAN) 205

Гидрометеорология и экология

Scientific article

METHOD OF ASSESSING INDIRECT ANTHROPOGENIC LOADS IN RIVER BASIN CATCHMENT AREAS USING THE GENERALIZED HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION

Zhumakhan Mustafayev[1]* Doctor of Technical Sciences, professor, Kanat Mustafayev[2] Candidate of Economic Sciences

[1] «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; z-mustafa@rambler.ru (ZhM)
[2] LLP «GENC KZ CONSTRUCTION», Almaty, Kazakhstan; kmustafaev@gmail.com (KM)
*Corresponding author: Zhumakhan Mustafayev, z-mustafa@rambler.ru

KEY WORDS

river basin catchment, assessment of indirect anthropogenic loads, generalization of the Harrington function, assessment scale

ABSTRACT

The subject of the study is the processes of assessing indirect anthropogenic loads in the catchment area of river basins by applying a point scale of desirability using the method of constructing a generalized indicator. The purpose of the article is to develop a methodological approach to assessing indirect anthropogenic loads in the catchment area of river basins based on the generalized Harrington desirability function. The objective of the article is to analyze existing approaches to assessing indirect anthropogenic loads in the catchment area of river basins, methodological aspects of using the generalized desirability index and justification for using the generalized Harrington function. The developed method for assessing indirect anthropogenic loads on the territory of the catchment area of river basins makes it possible to avoid an additive integral assessment indicator and can be used to solve many problems, and is also applicable for territorial organization and management of water use.

About article:
Received: 22.06.2025
Revised: 24.09.2025
Accepted: 29.09.2025
Published: 08.10.2025

For citation :
Mustafayev Zh., Mustafayev K. Method of assessing indirect anthropogenic loads in river basin catchment areas using the generalized Harrington desirability function // Гидрометеорология и экология, №4 (119), 2025, 14-21.

1. INTRODUCTION

In the natural system, the activity of the catchment area of river basins is defined as a spatial basis for population and nature management, performing environment-forming and ecological functions. However, over several millennia, with the emergence and formation of populations in the catchment areas of river basins with different conditions and directions of economic and political development, their attitude to water has changed. In modern conditions, river basins perform not only a runoff-forming function, but also a function of recycling return waters formed in the process of municipal and domestic water supply, industrial and agricultural water consumption, which has become the reason for manifestations of anthropogenic load, the danger of which has led to irreversible changes in the ecosystem of the watershed.

In this regard, in modern water management studies there are various approaches to assessing anthropogenic impacts on the catchment area of river basins, where the entire set of anthropogenic impacts is conventionally divided into direct (organized), caused by water intake and wastewater discharge, and indirect (mediated), associated with economic activity on the catchment area of river basins.

There are a large number of works on the assessment of direct anthropogenic impact within the catchment areas of river basins using integral criteria, among which the works of should be highlighted M. Falkenmark [1], P. Raskin, P. Gleick, G. Pontius, K. Strzepek [2], V.I. Danilov-Danilyan , K.S. Losev [3], I.A. Shiklomanova [4], A. Boulay, J. Bare, L. Benini, M. Berger, I. Klemmayer, M. Lathulliere, P. Loubet, A. Manzardo, M. Margni and B. Ridoutt [5], Zh.S. Mustafayev [6], in which an attempt is made to assess the water availability of the territory and the population using the Falkenmark indexer ($\boldsymbol{CMF}$),

sustainability index ($\boldsymbol{SI}$), water resources utilization coefficient ($\boldsymbol{WRUF}$), indicator of specific water availability of the population ($\boldsymbol{SWSP}$), indicator of specific water availability of the territory ($\boldsymbol{SWST}$), indicator of «water stress» ($\boldsymbol{IWS}$) and complex indicator of specific water availability of the catchment area of river basins ($\boldsymbol{CISWS}$).

One of the fundamental directions for assessing direct anthropogenic impact within the catchment areas of river basins is the direction developed in the works of J. Hernández-Bedolla, A. Solera, J. Paredes - Arquiola, M. Pedro-Monzonís, J. Andreu , S. T. Sánchez - Quispe [7], Simon Damkjaer, Richard Taylor [8], M. Karamouz, P. Mohammadpour, D. Mahmoodzadeh [9], R. L. Oxley, L.W. Mays [10], N. N. Kourgialas, G. P. Karatzas, Z. Dokou, A. Kokorogiannis [11], Felipe I. Arreguin-Cortes, J. Raul Saavedra-Horita, J. Manuel Rodriguez-Varela, Velitchko G. Tzatchkov, Petronilo E. Cortez-Mejia, Oscar J. Llaguno-Guilberto, Arizabeth Sainos-Candelario [12], B. D. Moyle, D. B. Weaver, S. Gössling, C. L. McLennan, A. Hadinejad [13], O. Salehie, T. B. Ismail, S. Shahid, M. M. Hamed, P. Chinnasamy & X. Wang [14], G. Sabia, D. Mattioli, M. Langone, L. Petta [15], M. Jiang, Z. Wu, X. Guo, H. Wang, Y. Zhou [16], Zh. Mustafayev, A. Medeu, I. Skorintseva, T. Bassova, G. Aldazhanova [17], Zh. Mustafayev, I. Skorintseva, A. Toletayev, G. Aldazhanova, A. Kuderin [18] related to improving the modification of sustainability indicators for integrated water resources management based on the ecological, environmental and hydrological integrity of river basins swimming pools.

When solving multi-criteria problems, indirect anthropogenic impacts on the catchment areas of river basins associated with the economic activities of the population, industry and agricultural enterprises, including agriculture and livestock farming, which have become an integral part of water resource assessments using various methods for constructing a generalized indicator, are also taken into account.

For the first time, the basic principles of assessing the indirect anthropogenic load on landscapes, based on environmental geography, were formulated by A. G. Isachenko [19], where the quantitative measure of impact on them is determined in natural absolute or relative (specific) indicators, within the framework of the density of industrial production, emissions of harmful substances into the atmosphere, public roads, arable land, livestock per unit area of agricultural land and population, and for each of the indicators an eight-point conditional scale of intensity of anthropogenic load was adopted.

One of the fundamental directions for assessing the level of total anthropogenic load on the catchment areas of river basins is the direction developed in the works of I. D. Rybkin, N. V. Stoyashchev, N. Yu. Kurepin [20] of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the conditions of Siberian regions for two groups of indicators of direct (immediate) and indirect (mediated) impact, based on the methodology of A. G. Isachenko [19], using such indicators as population density in the catchment area, industrial production density (according to S. V. Odesser [21]), that is, the volume of industrial output in thousands of dollars per 1 km^2 of production, as well as agricultural development, including plowing (%) and livestock load (the number of conventional heads of cattle (cattle) per 1 km^2), which were tested in the basins of the Ob, Irtysh, Yenisei and Angara rivers.

The total indirect anthropogenic load was defined as the arithmetic mean of the demographic, industrial and agricultural points, with a distinction made between agricultural (plowing) and livestock loads [20], where the intensity of the load for each of the indicators was adopted as an eight-point conditional scale based on the methodology of A. G. Isachenko [19]:

- population density (people/km^2): low or absent (1 point) - 0.00, very low (2 points) - <0.10, low (3 points) - 0.20...1.00, low (4 points) - 1.10...5.00, average (5 points) - 5.51...10.00, high (6 points) - 10.10...25.00, high (7 points) - 25.10...50.00 and very high (8 points) - >50.00;

- industrial production density (thousand dollars/km^2): insignificant or absent (1 point) - 0.00, very low (2 points) - <0.35, low (3 points) - 0.36...3.50, low (4 points) - 3.60...35.00, average (5 points) - 36.00...105.00, high (6 points) - 106.00...140.00, high (7 points) - 141.00...170.00 and very high (8 points) - >170.00;

- ploughing (%): low or absent (1 point) - 0.00, very low (2 points) - <0.10, low (3 points) - 0.20...1.00, reduced (4 points) - 1.10...5.00, average (5 points) - 5.10...15.00, increased (6 points) - 15.10...40.00, high (7 points) - 40.10...60.00 and very high (8 points) - >60.00;

- livestock load (conventional heads of cattle/km^2): insignificant or absent (1 point) - 0.00, very low (2 points) - <0.10, low (3 points) - 0.20...1.00, reduced (4 points) - 1.10...2.00, average (5 points) - 2.10...3.00, increased (6 points) - 3.10...6.00, high (7 points) - 6.10...10.00 and very high (8 points) - >10.00.

Thus, when assessing the anthropogenic load on the catchment areas of river basins, A. G. Isachenko [19], I. D. Rybkina, N. V. Stoyashcheva [20] mainly used a linear point scale of varying length, and as a function of the generalized indicator they used an additive convolution, which allows comparing different alternatives based on objective data and taking into account their interaction with each other.

Based on the development and deepening of natural scientific ideas about mathematical modeling of multifactorial technological processes, which include the assessment of indirect anthropogenic loads on the catchment area of river basins, Zh.S. Mustafayev [22; 23] developed a mathematical model that allows aggregating many factors into a single indicator, based on the geometric mean equation, which is one of the classical Pythagorean means, and has the following form:

$$AIAI_i = AII_i = \sqrt{\Pi_{i=1}^{n} AAC_i} = \sqrt{\Pi_{i=1}^{n}[1 - exp(-AIDC_i)]}, \qquad (1)$$

where $\boldsymbol{AIAI_i}$is the indicator of aggregation of types of anthropogenic loads or $\boldsymbol{AII_i}$is the indicator of total anthropogenic loads; $\boldsymbol{AAC_i = 1 - exp(-AIDC_i)}$ - relative values of the level of anthropogenic loads or the coefficient of anthropogenic activity.

Application of the geometric mean equation, which is one of the modifications of the desirability function Harrington, for solving multi-criteria problems in the context of assessing indirect anthropogenic loads on the territory of the catchment area of river basins, makes it possible to theoretically substantiate the path of modernization of this methodological approach.

Thus, the conducted comprehensive studies show that one of the tools for creating a mathematical model for assessing indirect anthropogenic loads on the territory of the catchment area of river basins is the so-called desirability function proposed by E. Harrington [24], which allows for bringing the real values of their parameters into a single dimensionless numerical scale with fixed boundaries from 0 to 1 and the subsequent mapping of private quantitative scales into generalized scales of quality criteria.

The **aim of the study** is to improve the methods for assessing the types of indirect anthropogenic loads on the territory of the catchment area of river basins based on the multidimensional Harrington desirability function, based on multiparameter data on economic activity in spatial and temporal aspects.

2. MATERIALS AND METHODS

The methodological basis of the research is the materialistic theory of scientific knowledge, which is the basis modeling, analysis and synthesis based on long-term information and analytical materials on economic activities in the catchment area of river basins.

The methodological basis of the study is the generalized desirability function of Harrington [24], which has become a useful tool in the field of nature management [22, 23],

engineering [25], chemistry [26], ecology [27], geography [28], economics [29], management [30], and, where various methods of constructing a generalized indicator are used to solve multi-criteria problems, that is, the Euclidean concept, linear and nonlinear objective function in optimization problems.

To solve this problematic task, a technique of qualimetric evaluation of optimization indicators can be used, using the mathematical apparatus of the generalized Harrington desirability function, where each parameter has its own physical meaning and its own dimension. The construction of this function is based on the transformation of abstract values of particular indicators of various physical nature into a single dimensionless numerical desirability scale with fixed boundaries from 0 to 1, allowing them to be presented in the form of a generalized scale of quality criteria in a strict interval range: from 0 to 0.20 («very bad»); from 0.20 to 0.37 («bad»); from 0.37 to 0.63 («satisfactory»); from 0.63 to 0.80 («good»); from 0.80 to 1.00 («excellent») [7].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Quantitative assessment of indirect anthropogenic load on the territory of river basin catchment areas, as a spatial basis for population and nature management, is a necessary element in the development of a monitoring system and territorial organization of water use.

To assess the indirect anthropogenic load on the catchment area of river basins, one can use the properties of the Harrington desirability function, which to some extent models the activity of river basins as a spatial basis for population and nature management.

Based on the proposed methodological approach, based on the generalized desirability function of E. Harrington [24], where average geometric desirabilities were used to assess indirect anthropogenic loads on the catchment area of river basins, according to the following mathematical expression:

$$AIAI_i = AII_i = \sqrt[n]{\Pi_{i=1}^{n} AAC_i^{\alpha}}, \quad (2)$$

where $\boldsymbol{AIAI_i}$ is a generalized indicator of a comprehensive assessment of anthropogenic load or impact in the catchment areas of river basins; $\boldsymbol{AAC_i}$is the desirability function for types of anthropogenic load in the catchment areas of river basins; $\boldsymbol{\alpha}$ is the significance or weighting coefficient of types of indirect anthropogenic loads; $\boldsymbol{n}$is the number of types of indirect anthropogenic loads.

The generalized indicator of the integrated assessment of anthropogenic load or impact on the catchment areas of river basins ($\boldsymbol{AIAI_i}$) is defined as the geometric mean desirability indicator ($\boldsymbol{AAC_i}$), for each assessment indicator, within the framework of population size, volume of industrial production, area of agricultural land and number of domestic animals.

The totality of anthropogenic load and impact on the catchment area of river basins ($\boldsymbol{AIAI_i}$), obtained on the basis of aggregation of many factors into a single indicator in relative values ($\boldsymbol{AAC_i}$), which is based on the desirability function, where, with one-sided or two-sided restrictions, is determined by the following exponential equation:

$$AAC_i = 1 - \exp(-MDCIAL_i), \quad (3)$$

$$AAC_i = 1 - [exp - \exp(-MDCIAL_i)], \quad (4)$$

where $\boldsymbol{MDCIAL_i}$ – coded value of the density of types of indirect anthropogenic loads.

Basically, the tendency of changes in indirect anthropogenic loads in the catchment area of river basins occurs with a unidirectional change in the indicator, that is, the limitation is one-sided, and then it is advisable to use unilateral restrictions.

The density of demographic ($\boldsymbol{PD_i}$), industrial ($\boldsymbol{ID_i}$) and agricultural, with a distinction made between agricultural (plowed) ($\boldsymbol{DAI_i}$) and livestock ($\boldsymbol{DIF_i}$) loads, is determined by the following expression:

$$PD_i = PS_i/AAD_i;\ ID_i = IPV_i/AAD_i; \quad (5)$$

$$DAL_i = AAI_i/AAD_i;\ DIF_i = CNI_{i_i}/AAD_i, \quad (6)$$

where $\boldsymbol{PS}$ is the population size, people; $\boldsymbol{IPV_i}$ - volume of industrial production, thousand dollars; $\boldsymbol{AAI}$- area of agricultural land (plowed area), km^2; $\boldsymbol{CNI_i}$- conditional number of domestic animals, converted to the number of cattle in administrative divisions, conventional heads; $\boldsymbol{AAD_i}$- area of administrative divisions, km^2;

The coded value of the density of types of indirect anthropogenic loads ($\boldsymbol{MDCIAL_i}$), characterizing the relationship of the time-varying density of population ($\boldsymbol{PD_i}$), industrial ($\boldsymbol{ID_i}$) and agricultural, with a distinction made between agricultural (plowing) ($\boldsymbol{DAL_i}$) and livestock ($\boldsymbol{DIF_i}$) loads to its optimal value, is determined by the following expression:

$$MCPD_i = PD_i/ODDA_i;\ MCPD_i = ID_i/ODI_i; \quad (7)$$

$$MCALD_i = DAL_i/ODAL_i;\ MCDDA_i = DIF_i/ODDA_i, \quad (8)$$

where $\boldsymbol{MCPD_i}$ is the modular coefficient of population density; $\boldsymbol{ODDA_i}$ - optimal population density; $\boldsymbol{MCPD_i}$ - modular density coefficient of industry; $\boldsymbol{ODI_i}$ - optimal industrial density; $\boldsymbol{MCALD_i}$ - modular coefficient of agricultural land density; $\boldsymbol{ODAL_i}$ - optimal density of agricultural land; $\boldsymbol{MCDDA_i}$ - modular density coefficient of domestic animals; $\boldsymbol{ODDA_i}$ - optimal density of domestic animals.

At the same time, the scientific substantiation of the optimal density by types of anthropogenic load in the system «population - industry - agricultural land – livestock» is one of the important environmental indicators, in which the catchment area of river basins retains the ability to function almost indefinitely without abrupt changes in their structure. If we consider the scale of intensity of anthropogenic load on catchment areas of river basins proposed by I. D. Rybkina and N. V. Stoyashcheva [31], within the framework of the criteria «insignificant (absent) - very low - low - reduced - average - increased - high - very high», we can see that the permissible measure of deviation from the normal state is within the limits of «reduced-average», which enables the system to exist stably in these conditions and which can be eliminated by the system itself over time:

$$ODDA_i = (PD_{mini} + PD_{maxi})/2; ODI_i = (ID_{mini} + IDmax_i)/2; \quad (9)$$

$$ODAL_i = (\ DAL_{mini} + DAL_{maxi})/2;\ ODDA_i = (DIF_{mini} + DIF_{maxi})/2, \quad (10)$$

where $\boldsymbol{PD_{mini}}$ - is the minimum population density, people/km^2; $\boldsymbol{PD_{maxi}}$- is the maximum population density, people/km^2; $\boldsymbol{PD_{mini}}$- is the minimum density of industrial production, thousand dollars/km^2; $\boldsymbol{PD_{maxi}}$ - is the maximum density of industrial production, thousand dollars/km^2; $\boldsymbol{DAL_{mini}}$- minimum density of agricultural land, %; $\boldsymbol{DAL_{maxi}}$ - maximum density of agricultural land, %; $\boldsymbol{DIF_{mini}}$- minimum density of

domestic animals, conventional heads/ km^2; $\boldsymbol{DIF_{maxi}}$ - domestic animals, conventional heads/ km^2.

Harrington desirability function is based on the idea of transforming natural values of particular responses into a dimensionless scale of desirability or preference for assessing indirect anthropogenic loads on the catchment area of river basins (Table 1).

The proposed methodological approach to assessing indirect anthropogenic loads on the catchment area of river basins, based on the generalized desirability function of E. Harrington, allows assessing and comparing anthropogenic loads from linear-area sources of indirect anthropogenic loads in spatial and temporal aspects using digital technology.

Table 1

Number of intervals of the Harrington desirability scale for assessing indirect anthropogenic loads in the catchment area of river basins

Desirability	Intervals of values of the desirability function	Desirability	Intervals of values of the desirability function
Minor	0	Average	0.475...0.743
Very low	<0.024	Increased	0.744...0.941
Low	0.025...0.095	Tall	0.942...0.988
Reduced	0.096...0.474	Very high	0.989...1.00

4. CONCLUSION

The application of the generalized Harrington desirability function as an integral indicator for assessing indirect anthropogenic loads on the catchment area of river basins is considered, which makes it possible to avoid an additive integral assessment indicator.

The proposed methodological aspects of assessing indirect anthropogenic loads on the territory of the catchment area of river basins, based on the Harrington desirability function, make it possible to take into account the multifactorial nature of the controlled parameters, without being tied to specific units of measurement, and to reflect the result in the form of a single numerical value with a linguistic assessment.

The model for assessing indirect anthropogenic loads on the territory of river basin catchments, firstly, reflects general trend modeling of a technological process based on digital technology, secondly, the adaptability of the model to specific task scenarios is becoming a key area of research, thirdly, it is a universal tool, where for each indicator the assessment is maximally consistent with the objective relations to which the corresponding indicator is subordinated, and can be used to solve many problems, and is also applicable for territorial organization and management of water use .

AUTHORS' CONTRIBUTION

Conceptualization – ZhM; resources - KM; formal analysis – KM ; methodology - ZhM; software - KM; supervision - ZhM; visualization – KM; writing -original draft preparation – ZhM; writing—review and editing - KM .

REFERENCES

1 Falkenmark M. (1986). Fresh water: Time for a modified approach. M. Falkenmark: Ambio, pp. 192-200.
2 Raskin P., Gleick P., Pontius G., Strzepek K. (1977). Water Futures: Assessment of Long-range Pattens and Problems. Stockholm: Stockholm Environmental Institute, 77 p.
3 Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S. (2006). Potreblenie vody: ekolog., ekon., soc. i polit. aspekty [Water consumption: environmental, economic, social and political aspects]. M.: Nauka, 221 p. [in Russian].
4 Shiklomanov I.A. (2008). Vodnye resursy Rossii i ego ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use]. St. Petersburg: State Hydrological Institute, 600 p. [in Russian].
5 Boulay A, Bare J, Benini L, Berger M, Klemmayer I, Lathulliere M, Loubet P, Manzardo A, Margni M., Ridoutt B. (2014). Building consensus on a generic water scarcity indicator forLCA-based water footprint: preliminary results from WULCA 9th Int. Conf. LCA Food San Fr.USA, 8-10 Oct. 2014 2050, pp. 8
6 Mustafaev Zh. S. Sovershenstvovanie metodov ocenki vodoobespechennosti vodosbornyh territorij rechnyh bassejnov s uchetom ekologicheskogo priznaka vodopol'zovaniya [Improvement of methods for assessing water availability in river basin catchment areas, taking into account the environmental aspect of water use]. V sbornike: Ustojchivoe razvitie territorij: teoriya i praktika. materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. g. Sibaj, 2022, pp. 120-122 [in Russian].

7 Hernández-Bedolla J., Solera A., Paredes-Arquiola J., Pedro-Monzonis M., Andreu J., Sfnchez-Quispe S.T. (2017). The assessment of sustainability indexes and climate change impacts on integrated water resource management. Water, 9(3), pp. 213. https;//doi.org/10.3390./w 9030213.
8 Damkjaer S.,Taylor R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. Ambio 46, pp. 513–531
9 Karamouz M., Mohammadpour P., Mahmoodzadeh D. (2017). Assessment of sustainability in water supply-demand considering uncertainties. Water Resources Management, 31, pp. 3761-3778. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1703-9
10 Oxley R.L., Mays L.W. (2017). Sustainability index for the management of river basins based upon ecological, environmental andhydrological integrity and the minimization of long term risks to supply. Environment and Natural Resources Research, 7(4), pp. 1-16.
11 Kourgialas N.N., Karatzas G.P., Dokou Z., Kokorogiannis A. (2018). Groundwater footprint methodology as policy tool for balancing water needs (agriculture & tourism) in water scarce islands-The case of Crete, Greece. Science of the Total Environment, 615, pp. 381-389. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv. 2017.09.308
12 Felipe I. Arreguin-Cortes, Raul Saavedra-Horita J., Manuel Rodriguez-Varela J. Velitchko G. Zatchkov, Petronilo E. Cortez-Mejia, Oscar J. Llaguno-Guilberto, Arizabeth Sainos-Candelario. (2020). State level water security indices in Mexico. Sustainable Earth 3:9 https://doi.org/10.1186/s42055-020-00031-4
13 Moyle B.D., Weaver D.B., Gössling S., McLennan C.L., Hadinejad A. (2022). Are water-centric themes in sustainable tourism research congruent with the UN Sustainable Development Goals? Journal of Sustainable Tourism, 30(8), pp. 1821-1836.
14 Salehie O., Ismail T.B., Shahid S., Hamed M.M., Chinnasamy P., Wang X. (2022). Assessment of water resources availability inAmu Darya River basin using GRACE data. Water, 14(4), pp. 533. https://doi.org/10.3390/w14040533
15 Sabia G., Mattioli D., Langone M., Petta L. (2023). Methodology for a preliminary assessment of water use sustainability inindustries at sub-basin level. Journal of Environmental Management, 343, pp. 118163.https://doi.org/10.1016/j. jenvman. 2023.118163
16 Jiang M., Wu Z., Guo X., Wang H., Zhou Y. (2023). Study on the Contribution of Land Use and Climate Change to Available Water Resources in Basins Based on Vector Autoregression (VAR) Model. Water, 15(11), pp. 2130.
17 Mustafayev Zh., Medeu A., Skorintseva I., Bassova T., Aldazhanova G. (2024). Improvement of the Methodology for the assessment of the agro-resource potential of agricultural landscapes. Sustainability, Vol. 16, No.1. pp. 419-435.
18 Mustafayev Zh., Skorintseva I., Toletayev, A., Aldazhanova G.,Kuderin A. (2024). Comprehensive assessment of water supply of the Turkestan region for the development of economic sectors and recreational tourism. GeoJournal of Tourism and Geosites, Vol. 52, No. 1. pp. 20-29.
19 Isachenko A.G. (2001). Ekologicheskaya geografiya Rossii [Ecological geography of Russia]. SPb.: Publishing house of SPbSU. 328 p. [in Russian].
20 Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V., Kurepina N.Yu. (2011). Metodika zonirovaniya territorii rechnogo bassejna po sovokupnoj antropogennoj nagruzke (na primere Ob'-Irtyshskogo bassejna) [Methodology for zoning the territory of a river basin based on the total anthropogenic load (on the example of the Ob-Irtysh basin)]. Water management of Russia, No. 4. pp. 42-52 [in Russian].
21 Odesser S.V. (1991). Territorial'naya differenciaciya v ekonomiko-geograficheskih tipologiyah [Territorial differentiation in economic-geographical typologies]. Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geographical series, No. 6. pp. 61-69 [in Russian].
22 Mustafayev Zh.S., Kozykeeva A.T., Ivanova N.Yu., Esmakhanov M.K., Tursynbaev N.A. (2017). Ocenka tekhnogennoj nagruzki na vodosbornuyu ploshchad' transgranichnogo bassejna reki Talas na osnove integral'nyh pokazatelej antropogennoj deyatel'nosti [Assessment of technogenic load on the catchment area of the transboundary Talas River basin based on integral indicators of anthropogenic activity]. Bulletin of the NAS RK, series of agricultural sciences, No. 2. pp. 48-56 [in Russian].
23 Mustafayev Zh.S., Kireycheva L.V., Abdeshev K.B., Tursynbaev N.A. (2022). Ocenka antropogennoj nagruzki na vodosbornuyu ploshchad' transgranichnogo rechnogo bassejna Assa-Talas [Assessment of anthropogenic load on the catchment area of the Assa-Talas transboundary river basin]. International technical and economic journal, No. 3. pp.46-61 [in Russian].
24 Harington J. (1965). The Desirability Function. Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10. pp. 494–498.
25 Pichkalev A.V. (2012). Obobshchennaya funkciya zhelaemosti Harringtona dlya sravnitel'nogo analiza tekhnicheskih sredstv [Generalized Harrington desirability function for comparative analysis of technical means]. Research of the science city. No. 1 (1). pp.25-28 [in Russian].
26 Akhnazarova S.L., Gordeev L.S. (2003). Ispol'zovanie funkcii zhelaemosti Harringtona pri reshenii optimizacionnyh zadach himicheskoj inzhenerii [Using the Harrington Desirability Function in Solving Optimization Problems of Chemical Engineering]. Textbook. Moscow: Mendeleyev University of Chemical Technology. 76 p. [in Russian].
27 Vorobeychik E.P., Sadykov O. F. Farafontov M.G. (1994). Ekologicheskaya standartizaciya tekhnogennogo zagryazneniya nazemnyh ekosistem (lokal'nyj uroven') [Environmental Standardization of Technogenic Pollution of Terrestrial Ecosystems (Local Level)]. Yekaterinburg: Nauka, 280 p. [in Russian].
28 Opekunov A. Yu., Opekunova M.G. (2014). Kompleksnaya ocenka zagryazneniya landshafta s ispol'zovaniem funkcii zhelatel'nosti Harringtona [Integral Assessment of Landscape Pollution Using the Harrington Desirability Function]. Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 7. Issue. 4. pp. 101-113 [in Russian].
29 Lyubushin N.P., Brikach G.E. (2014). Ispol'zovanie obobshchennoj funkcii zhelaemosti Harringtona v mnogoparametricheskih ekonomicheskih zadachah [Using the Generalized Harrington Desirability Function in Multiparameter Economic Problems]. Economic Analysis: Theory and Practice. No. 18 (369). pp. 2-10 [in Russian].
30 Shumetov V.G. (2004). Analiz dannyh v upravlenii: lekcionnyj kurs [Data Analysis in Management: Lecture Course]. Orel: ORAGS. 156 p. [in Russian].
31 Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. (2010). Ocenka antropogennoj nagruzki na vodosbornyj bassejn verhnej i srednej techeniya Obi [Assessment of Anthropogenic Load on the Catchment Area of the Upper and Middle Ob]. The World of Science, Culture and Education. No. 6 (25). Part 2. pp. 295-299. [in Russian].

ХАРРИНГТОННЫҢ ЖАЛПЫ ҚАЛАУЛЫҚ ФУНКЦИЯСЫН ПАЙДАЛАНУ АРҚЫЛЫ ӨЗЕННІҢ СУЖИНАУ АЛАБЫНЫҢ ЖАНАМА ТЕХНОГЕНДІК ЖҮКТЕМЕЛЕРІН БАҒАЛАУ ӘДІСІ

Жумахан С. Мустафаев[1]*т.ғ.д, профессор, Канат Ж. Мұстафаев[2], э.ғ.к.

[1] География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; z-mustafa@rambler.ru
[2] «GENC KZ CONSTRUCTION» ЖШС, Алматы, Казахстан; kmustafaev@gmail.com
*Автор корреспондент: Жұмахан С. Мұстафаев, z-mustafa@rambler.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

өзеннің сужинау алабы, жанама техногендік жүктемелерді бағалау, Харрингтон жалпыламалық функциясы, бағалау бірлігі.

Мақала жайында:
Жіберілді: 22.06.2025
Қайта қаралды: 24.09.2025
Қабылданды: 29.09.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Зерттеуде пәні - жалпылама көрсеткішті құру әдісін пайдалана отырып, мақсатты баллдық бірлігін қолдану арқылы өзен алаптарының су жинау алабы аумағында жанама техногенндік жүктемелерді бағалау жүйесін құру.Мақаланың мақсаты - Харрингтонның жалпыламалық қолайлылық функциясының негізінде өзен алаптарының су жинау алаңына түсетін жанама техногендік жүктемелерді бағалаудың әдіснамалық тәсілін әзірлеу.Мақаланың мақсаты өзен алаптарының су жинау алаңына жанама техногендік жүктемелерді бағалаудың қолданыстағы тәсілдерін, жалпыламалық қолайлылық көрсеткішін пайдаланудың әдістемелік негізін және Харрингтон жалпыламалық функциясын пайдаланудың негіздемесін талдау болып табылады. Өзен алаптарының су жинау алабы аумағында жанама техногендік жүктемелерді бағалауға арналып әзірленген әдісі қосымша интегралдық бағалау көрсеткішін қарастырмауға мүмкіндік береді және көптеген мәселелерді шешу үшін пайдалануға болады, сонымен қатар суды пайдалануды аумақтық ұйымдастыру және басқару үшін де қолдануға болады.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОСВЕННЫХ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК НА ТЕРРИТОРИЯХ ВОДОСБОРА РЕЧНЫХ БАССЕЙНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННОЙ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА

Жумахан С. Мустафаев[1]*д.т.н., профессор, Канат Ж. Мустафаев[2], к.э.н.

[1] АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; z-mustafa@rambler.ru
[2] ТОО «GENC KZ CONSTRUCTION», Алматы, Казахстан; kmustafaev@gmail.com
Автор корреспондент: Жумахан С. Мустафаев, z-mustafa@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водосбор речных бассейнов, оценка косвенных антропогенных нагрузок, обобщение функции Харрингтона, шкала оценивания

По статье:
Получено: 22.06.2025
Пересмотрено: 24.09.2025
Принято: 29.09.2025
Опубликовано: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Предметом исследования являются процессы оценки косвенных антропогенных нагрузок на территории водосбора речных бассейнов путем применения балльной шкалы желательности с использованием метода построения обобщенного показателя. Целью статьи является на основе обобщенной функции желательности Харрингтона разработать методический подход к оценке косвенных антропогенных нагрузок на территории водосбора речных бассейнов. Задача статьи состоит в анализе существующих подходов к оценке косвенных антропогенных нагрузок на территории водосбора речных бассейнов, методических аспектов использования обобщенного показателя желательности и обоснование использования обобщенной функции Харрингтона. Разработанный метод оценки косвенных антропогенных нагрузок на территории водосбора речных бассейнов дает возможность избежать аддитивного интегрального показателя оценки и может быть использована для решения многих задач, а также применима и для территориальной организации и управления водопользованием.

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

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ НИЗОВИЙ РЕКИ ШУ

Турсун Т. Ибраев[1] к.т.н., Марина А. Ли[1]*к.т.н., Нурлан Н. Бакбергенов[2], Талгат К. Иманалиев[2], Нурлан Н. Балгабаев[2] д.с-х.н.

[1]АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; kiwr-t@mail.ru (ТТИ), limarina76@mail.ru (МАЛ)
[2]ТОО «Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства», Тараз, Казахстан; bakbergenovnurlan@mail.ru (ННБ), tonimontana_777@mail.ru (ТКИ), balgabayev@mail.kz (ННБ)
*Автор корреспондент: Марина А. Ли, limarina76@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водообеспеченность, водохозяйственная инфраструктура, натурные исследования, регулирование, управление

АБСТРАКТ

Полная зарегулированность и интенсивное хозяйственное использование стока бассейна реки Шу оказало значительное влияние на водный режим экосистемы низовий, ее флору и фауну, социально-бытовые и хозяйственно-экономические условия проживания населения. Причиной является дефицит воды, в особенности в маловодные годы, что также создает предпосылки для противоречий между государствами бассейнов трансграничных рек. В этой связи проведены натурные исследования с комплексным анализом, разработкой рекомендаций и мероприятий обеспечения рационального планирования водопользования и водораспределения в низовьях р. Шу. На основе результатов которых предлагается решение актуальных проблем сохранения сельскохозяйственных и природных комплексов речного бассейна.

По статье:
Получено: 03.06.2025
Пересмотрено:26.09.2025
Принято: 04.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Низовья бессточной р. Шу представляют собой значительную часть Жамбылской области, в виде внутриконтинентальной многорукавной дельты с обилием естественных проток, серповидных и петлеобразных стариц, лиманов и вторичных пойменных озер. В многоводные годы весь этот регион покрывается водой на период весна-лето. Под влиянием глобального изменения климата и интенсивного антропогенного воздействия на данную территорию в низовьях р. Шу резко уменьшилась общая увлажненность речного бассейна. Что привело к регрессу количественных и качественных показателей речного стока реки, деградации водной системы дельты. Чрезмерное расширение площади орошаемых земель с низкой эффективностью использования водных ресурсов в бассейнах трансграничных рек, увеличение народонаселения за последние десятилетия привели к значительному росту водозабора из бассейнов рек Жамбылской области. Такое положение, и в особенности в маловодные годы, приводит к острому дефициту воды и создает предпосылки для противоречий между государствами бассейнов трансграничных рек. В этой ситуации больше всего страдают территории, расположенные в низовьях рек. Негативные последствия исчерпания водных ресурсов и снижения качества воды в низовьях р. Шу проявились, в основном, масштабным развитием катастрофической экологической ситуации на территории региона. Данный процесс воздействует на

Для цитирования:
Ибраев Т., Ли М., Бакбергенов Н., Иманалиев Т., Балгабаев Н. Современное состояние водообеспечения сельскохозяйственных и природных комплексов низовий реки Шу // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 22-34.

общее экономическое состояние сельскохозяйственных и природных комплексов (падение урожайности с/х культур, сокращение рыбного промысла, продуктивности водно-болотных угодий и т.д.) и усиление влияния маловодных лет на общую социально-экономическую ситуацию Жамбылской области [1].

В целом вопрос водообеспечения трансграничных рек является достаточно хорошо проработанным вопросом в мировом научном сообществе [2...11]. Однако, каждый речной бассейн имеет большое количество различных специфических условий и особенностей, оказывающих решающее воздействие на водообеспечение сельскохозяйственных и природных комплексов. Поэтому научно-исследовательские работы (НИР) по водообеспечению низовьев р. Шу являются в настоящее время актуальными. Кроме того, анализ отечественного и зарубежного опыта по нормированию антропогенной нагрузки на бассейны рек показал, что нет экологических норм, регламентирующих антропогенную нагрузку на водообеспечение экосистемы речных бассейнов, отсутствует методология экологического нормирования. Имеющиеся предложения по нормам и критериям антропогенной нагрузки характеризуют лишь частное влияние отдельных видов хозяйственной деятельности; комплексные критерии несовершенны. Решение ряда проблемных вопросов затруднено из-за отсутствия системы экологического мониторинга, который основывался бы на детальных и длительных стационарных исследованиях антропогенного изменения элементов природной среды [12].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Река Шу образуется в Кыргызской Республике (КР) от слияния рек Кочкор и Джуанарык, берущих начало в высокогорном Тянь-Шане и имеющих снежно-ледниковое питание. В начале р. Шу течет в направлении озера Иссык-Куль, но, не достигая его в 8...10 км, поворачивает на запад, а затем на север и направляется в Боамское ущелье. По выходе из ущелья река, протекая по Шуйской долине, принимает ряд притоков, наиболее крупным из которых является р. Чонкемин. На границе с песчаной пустыней Мойынкум в реку с Кыргызского хребта впадает последний приток – р. Курагаты, которая питает воды р. Шу только в половодье (рисунок 1) [1].



Рисунок 1. *Карта-схема бассейна р. Шу*

Река Шу имеет пик половодья в июле – августе, при второстепенном влиянии дождевых вод на общий речной сток. Подземные воды значительно питают сток реки за счет процесса выклинивания лишь в меженный период. При этом большое влияние на сток р. Шу оказывает хозяйственная деятельность: водозаборы на орошение и

другие нужды отраслей экономики; строительство водохранилищ, прудов с существенными потерями на испарение с их поверхности и фильтрацию в ложе.
Притоки бассейна р. Шу отличаются большим разнообразием водных режимов, типов питания и высот водосборов (таблица 1).

Таблица 1

Характеристики притоков бассейна р. Шу

Приток	Тип питания	Высота водосбора	Время половодья	Время начала межени
Караконыз, Ыргайты	Снегово-дождевого	До 1.5 тыс. м	февраль-март	апрель-май
Каракыстак, Мерке	Снегово-ледниковое	До 2.5 тыс. м	апрель	июнь
Аспара	Ледниково-снеговое	Около 3 тыс. м	июль	-
Курагаты	Смешанное	-	март-май	-

По завершению вегетационного периода (сентябрь-октябрь), из-за прекращения водозабора в оросительные системы, расположенные в бассейне р. Шу, а также поступления в реку возвратных вод с орошаемых массивов, имеет место значительное увеличение стока в нижней части речного бассейна. При этом максимальные расходы зафиксированы в ноябре, по мере установления ледостава.

Вблизи с. Мойынкум Жамбылской области р. Шу замедляет свое течение и поворачивает на северо-запад. При этом ее русло разделяется здесь на несколько рукавов, которые в половодье образуют просторные Гуляевские (Фурмановские), Уланбельские и Камкалинские разливы. Половодье на р. Шу характеризуется относительно длительным и значительным увеличением водности реки с подъемом уровня воды, выходом вод из меженного русла и затоплением поймы (рисунок 2) [13].

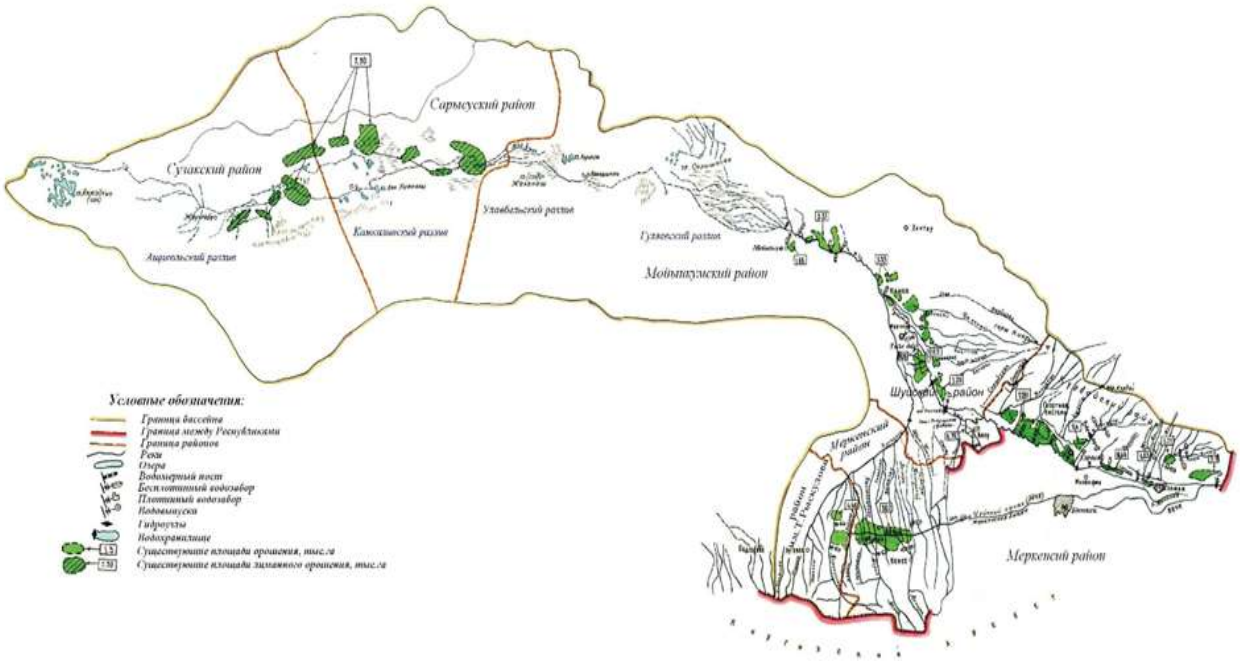


Рисунок 2. *Водохозяйственные объекты бассейна р. Шу*

В бассейне р. Шу на территории Казахстана насчитывается 201 озеро, площадь водного зеркала которых равна 238 км^2. Из них 192 озера с площадью зеркала 222 км^2 относятся бассейну р. Шу, а остальные – 9 озер, с площадью зеркала – 15.8 км^2, расположены в междуречье Шу-Талас. Вода в большинстве озер (около 80 %) пресная,

соленые озера составляют приблизительно 20%. Небольшие озера в летнее время пересыхают [12].

В бассейне реки функционирует 17 водохранилищ, больших и малых с суммарной полезной емкостью около 580 млн м^3. Самое крупное водохранилище: Тасоткельское на р. Шу ($W_{полез}$ = 551 млн м^3) используется для орошения. Для орошения и обводнения пастбищ используются мелкие водохранилища (емкостью менее 1 км^3) и пруды, общий объем которых составляет 4.03 млн м^3 [14]. Основной регулирующей емкостью бассейна р. Шу на территории Казахстана является Тасоткельское водохранилище – водохозяйственный объект республиканского значения РК, расположенное в средней части Шуской долины (40 км от с. Толе би). Основные технические характеристики Тасоткельского водохранилища: классность – II, год ввода в эксплуатацию – 1975, объем при НПУ – 620 млн м^3, вид регулирования и назначения – сезонное, пропускная способность сооружения – 360 м^3/с. Назначение водохранилища – обеспечение поливной водой 104.2 тыс га орошаемых земель и залив 100 тыс га сенокосных угодий Шуйского, Мойынкумского районов Жамбылской области, а также обеспечение водой 30 тыс га сенокосов и 150 тыс га пастбищ и улучшение экологической обстановки Созакского района Туркестанской области [15].

По делению казахстанской части р. Шу от с. Мойынкум начинаются низовья, которые представляют собой вытянутое понижение местности, занятое долинами р. Шу с многочисленными протоками, рукавами, озерами, обширными разливами, общей протяженностью около 450 км, простирающееся на северо-запад от с. Мойынкум к низовьям р. Сарысу. Ниже с. Мойынкум река Шу не имеет единого и четкого выраженного русла и теряется в зарослях тростника, образуя три обособленные группы разливов, соединенных узкими горловинами: Гуляевские разливы общей протяженностью около 130 км и шириной до 25 км; Уланбельские – протяженностью 80 км и шириной до 20 км, а также Камкалинские разливы протяженностью около 100 км и шириной 30 км [14].

Гуляевские разливы являются территорией аккумуляции стока реки, которая ежегодно до 8 месяцев в году находится в затопленном состоянии, и именно здесь теряется наибольшая часть стока р. Шу (инфильтрация, испарение и транспирация). Большую часть стока реки Гуляевские разливы накапливают в зимний период (наледные явления).

Уланбельские разливы в отдельные годы аккумулируют зимний сток и отличаются значительной засоленностью территорий, в сравнении с площадью Гуляевских разливов. Району Уланбельских разливов свойственны многочисленные озера (сравнительно крупные Караколь, Жаланаш, Лебяжье и др.), развитые соры (мелководные солончаки), солонцы (почвы насыщенные растворимыми солями) и песчаных бугров.

В Камкалинские разливы воды попадают только в весенний период, при этом большое значение имеет поступление грунтовых вод, что определяет высокую засоленность земель.

Ниже моста с. Тасты низовья р. Шу являются территорией конечного стока речного бассейна, которая отличается узкой поймой редко затапливаемой водой, полностью отсутствуют разливы.

Глобальное изменение климата и интенсивное антропогенное воздействие оказало огромное негативное влияние на дельтовую область р. Шу. В настоящее время перемещение поверхностных водных ресурсов от разлива к разливу чрезвычайно затруднено, т.к. наряду с общим сокращением речного стока быстро растет объем водопотребления отраслей экономики и растущего населения региона.

С увеличением стока в зимний период вода в основном накапливается в виде льда на обширной территории Фурмановской дельты, что приводит к недостаточным объемам воды на нижерасположенных разливах. Остаточный зимний сток в

Уланбельской дельте в последующих разливах сильно задерживается и зачастую полностью отсутствует, что приводит к возникновению процессов опустынивания и деградации почвенного покрова, растительности, обеднения животного мира. В дельтовой области р. Шу весь речной сток постепенно теряется на испарение и фильтрацию, используется на транспирацию влаголюбивой растительностью.

В 1973...1987 гг., при совпадении естественного сокращение речного стока с резким ростом хозяйственной деятельности, отмечен аномально маловодный период р. Шу, приведший к уменьшению притока в Фурмановскую дельту до 50...60 %, в Уланбельскую – до 20...30 %, по сравнению со среднемноголетним периодом, в Камкалинской дельте сток практически отсутствовал [1]. Это привело к высыханию, опустыниванию и деградации природной речной экосистемы низовьев р. Шу. Увеличение речного стока в последующие годы вызвало лишь частичное восстановление экосистем низовьев р. Шу. При этом не достигнуто их первоначальное состояние, поэтому определение современного уровня и прогноз дальнейшего развития или деградации природно-хозяйственных комплексов представляет большой интерес.

Проведенное натурное исследование сельскохозяйственных и природных комплексов низовий р. Шу позволило оценить их современное состояние и пути сохранения речной экосистемы. Оно позволяет оперативно получить достоверные и полные данные, а не полагаться только на результаты лабораторных экспериментов или теоретические модели. Полученные результаты натурных исследований состояния сельскохозяйственных и природных комплексов низовий р. Шу послужат практических дополнением имеющихся теоретических материалов. Это будет содействовать реализации последующих задач оценки водообеспечения сельскохозяйственных и природных комплексов низовий реки.

Согласно данных водохозяйственных организаций [14, 15] до 50 % от общего водозабора на сельское хозяйство, и соответственно до 30 % от располагаемых водных ресурсов низовьев р. Шу приходится на орошаемое земледелие. Что дает возможность для уменьшения этого показателя путем внедрения водосберегающих технологий и различных мероприятий по рациональному использованию воды. В этой связи при проведении исследований водообеспечения сельскохозяйственных и природных комплексов особое внимание уделялось орошаемому земледелию в бассейне р. Шу.

В пределах территории Казахстана р. Шу протекает через Кордайский, Шуйский и Мойынкумский районы Жамбылской области, а также Созакский район Туркестанской области. В бассейне р. Шу функционирует: 3 водохранилища; 4 гидроузла; 1 плотина (таблица 2); 18 магистральных каналов, пропускная способность – 198.7 м^3/с, общая длина – 437.193 км, в том числе земляные каналы – 308.023 км, бетонированные каналы – 129.17 км, подвешенная площадь - 53033 га; 113 межхозяйственных каналов, пропускная способность – 127.98 м^3/с, общая длина – 754.143 км, в т.ч. земляные каналы – 443.902 км, бетонированные каналы – 310.241 км, подвешенная площадь - 62047 га; 16 внутрихозяйственных каналов (на балансе Жамбылского филиала РГП «Казводхоз»), пропускная способность – 7.45 м^3/с, общая длина – 76.408 км, в т.ч. земляные каналы – 7.047 км, бетонированные каналы – 69.361 км, подвешенная площадь - 4526 га [14].

Водохозяйственная инфраструктура бассейна р. Шу отличается большим количеством гидротехнических сооружений (ГТС) со степенью износа 4...88 %, что свидетельствует о необходимости проведения капитального ремонта и реконструкции на сооружениях [14].

На границе Казахстана и Кыргызстана трансграничный Чумышский гидроузел распределяет воду в Георгиевский магистральный канал. для орошения земель Кордайского района Жамбылской области (рисунок 3).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Трансграничный характер бассейна р. Шу определяет вододеление водных ресурсов между странами в соотношении: 42 % получает Республика Казахстан, 58 % Кыргызская Республика, а сотрудничество осуществляется на основании специального соглашения [16], Лимиты подачи воды по р. Шу на вегетационный период постоянно корректируются в зависимости от водности года, однако казахстанская сторона систематически недополучает необходимый объем воды (таблица 3) [17].

Таблица 2

Технические характеристики ГТС бассейна р. Шу [14]

№	Наименование	Классность	Водоисточник	Год ввода в эксплуатацию	Объем при НПУ млн м^3		Назначение	Пропускная способность, м^3/с	Подвешенная площадь, га	Площадь зеркала, км^2	Степень износа, %
					полный	полезный					
водохранилища											
1	Тасоткельское	I	р. Шу	1974	620	551	Ирригация	360	34,53	77,6	13
2	Караконыз	II	р. Караконыз	1986	8,5	6,73	Ирригация	5	2,8	0,69	22
3	Какпатас	IV	р. Какпатас	1988	10,3	9,4	Ирригация	5	0,67	1,44	35
гидроузлы											
1	Меркенский	IV	р. Мерке	1967	-	-	Ирригация	65	5,382	-	80
2	Аспаринский	IV	р. Аспара	1965	-	-	Ирригация	40	4,088	-	88
3	Каракыстакский	IV	р. Каракыстак	1984	-	-	Ирригация	38	2,794	-	4
4	Фурмановский	IV	р. Шу	1985	-	-	Ирригация	356	-	-	26
плотины											
1	Тасоткельская	IV	р. Шу	1941	-	-	Ирригация	350	13,61	-	54

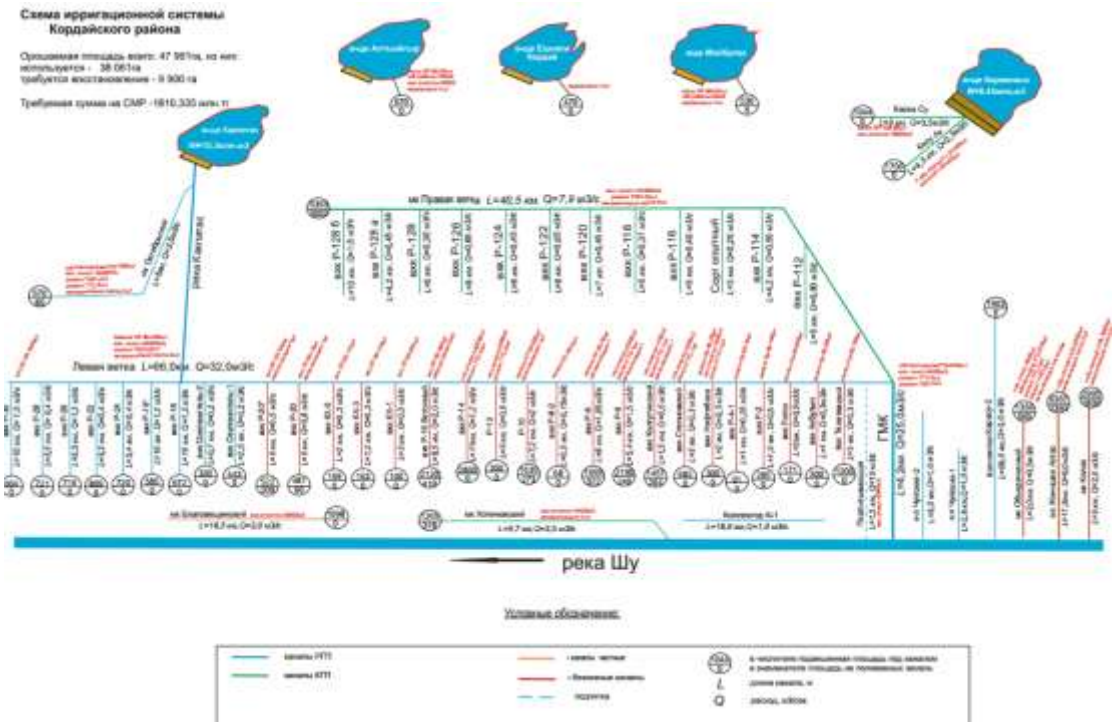


Рисунок 3. *Схема ирригационной системы Кордайского района [14]*

В связи с систематическим недополучением необходимых объемов воды в вегетационный период водоснабжение отраслей экономики и удовлетворение потребностей орошаемого земледелия в бассейне р. Шу крайне нестабильно.

Таблица 3

Объемы воды поступившые в Казахстан по межгосударственным объектам р. Шу

Показатели	Год						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Лимитный объем, млн м^3	370	370	370	370	370	370	370
Фактический объем, млн м^3	163.5	203.1	178.5	151.7	176	135.7	138.2
Недобор, %	44	55	48	41	47	37	37
Недобор, млн м^3	206.5	166.9	191.5	218.3	194	234.3	231.8

Для решения данной проблемы необходимы следующие мероприятия:

- аккумуляция водных ресурсов в водохранилищах, с увеличением их объема путем реконструкции и строительства новых водохранилищ;
- использование возобновляемых источников подземных вод;
- применение водосберегающих технологий и техники полива (капельное орошение, дождевание, подземное орошение и др.) и внедрение менее влагоемких сельхозкультур;
- снижение непроизводительных потерь воды при транспортировке путем реконструкции и строительства новых оросительных систем;
- соблюдение севооборота на орошаемых полях.

Распределение годового стока в среднем по водности году по бассейну р. Шу следующее: суммарный сток – 2790 млн м^3, сток, поступающий из территории Кыргызской Республики – 2316 млн м^3, сток, формирующийся в пределах Жамбылской области – 474 млн м^3 [14].

В пределах территории Казахстана сток реки Шу фиксировался на следующих гидрометрических постах (ГП): с. Кайнар, с. Ташуткуль (до 2022 г.), с. Уланбель (Большая Арна), с. Уланбель (Малая Арна).

За период 2019…2024 гг. годовой сток (объем стока) р. Шу изменялся в пределах:

- ГП Кайнар 1593…1470 млн м^3 (разница 123 млн м^3 или 7.7 % от максимального значения), средний за период 1388 млн м^3, т.е. годовой сток характеризуется относительной стабильностью;
- ГП Ташуткуль 1896…1747 млн м^3 (разница 145 млн м^3 или 7.6 % от максимального значения), средний за период 1799 млн м^3, т.е. годовой сток стабилен;
- с. Уланбель (Большая Арна) 842…199 млн м^3 (разница 643 млн м^3 или 76.4 % от максимального значения), средний за период 437 млн м^3, т.е. годовой сток изменяется в больших пределах, с резкими перепадами, что отрицательно влияет на водообеспечение природно-хозяйственных комплексов речного бассейна;
- с. Уланбель (Малая Арна) 195…13 млн м^3 (разница 182 млн м^3 или 93.3 % от максимального значения), средний за период 93 млн м^3, т.е. годовой сток изменяется в больших пределах, с резкими перепадами, что отрицательно влияет на водообеспечение природно-хозяйственных комплексов речного бассейна.

Баланс р. Шу за период 2019…2024 г. (таблица 4) показал, что ситуация с водообеспечением природно-хозяйственных комплексов речного бассейна только в начальной части отличается относительной стабильностью, в нижней части водообеспечение следует признать не удовлетворительным. Это объясняется тем, что поступающего стока реки, вследствие маловодности, недостаточно для поддержания функционирования экосистемы низовьев, и последние годы отмечаются признаки деградации водно-болотных угодий.

Таблица 4

Баланс р. Шу за период 2019…2024 г., млн. м^3 [14]

Год	1.Приходная часть						2.Расходная часть					
	Сток, поступающий на участок	Сток, формирующий на участке	Забор подземных вод	Регулирования стока сработка вдхр	Поступление воды на участок извне	Всего	Безвозвратное водопотребление	Испарение с поверхности вдхр	Подача воды за пределы участка	Обязательные попуски	Наполнение вдхр	Всего
2019	2253.9	65.1	100.0	40.8	288.3	2658.1	412.1	128.9	593.0	1524.1	0	2658.1
2020	2013.0	1173.0	11.0	4.5	292.5	2438.3	484.3	118.6	380.0	1455.4	0	2438.3
2021	1688.3	61.3	11.1	0	292.5	2053.2	558.2	110.3		1384.7	0	2053.2
2022	1680.5	263.9	11.6	210.9	244.3	2411.2	521.8	114.9		1774.5	0	2411.2
2023	1565.2	140.0	12.2	0	140.9	1858.3	587.1	64.0		1029.2	178.0	1858.3
2024	1926.1	115.1	14.1	0	102.2	2157.5	695.3	24.6		1420.8	16.8	2157.5

График располагаемых и используемых водных ресурсов (рисунок 4) показали следующее:

- объем располагаемых водных ресурсов речного бассейна в пределах территории Казахстан имеет устойчивую тенденцию на постоянное уменьшение от 2658.1 до 2157.5 млн м^3, приблизительно на 20 %, и в перспективе следует ожидать дальнейшего сокращения этого показателя, что может оказать неблагоприятно воздействия на состояние сельскохозяйственных и природных комплексов низовий реки Шу;

- водопотребление в речном бассейне за рассматриваемый период значительно увеличивается от 412.1 до 695.3 млн м^3, также приблизительно на 40 %, что составляет около 22 % от объема располагаемых водных ресурсов, но в перспективе следует ожидать роста этого показателя и соответствующего уменьшения объема попусков в низовья р. Шу;

- объем обязательных попусков в низовья р. Шу немного уменьшается от 1524.1 до 1420.8 млн м^3, приблизительно на 7 %, что, в первую очередь связано с общей тенденцией постоянного уменьшения объема располагаемых водных ресурсов речного бассейна, хотя и в большей степени, чем общее уменьшение водных ресурсов, здесь сказывается увеличение водопотребления отраслями экономики;

- подача за пределы речного бассейна и потери воды также уменьшаются от 721.9 до 41.4 млн м^3, приблизительно в 17 раз, под влиянием уменьшения объема располагаемых водных ресурсов речного бассейна и роста водопотребления.

Следует признать, что водообеспечение природно-хозяйственных комплексов бассейна р. Шу в пределах территории Казахстана постоянно ухудшается, что связано в первую очередь с общим уменьшением стока реки, а только во вторую – с увеличением водопотребления в речном бассейне. Это требует разработки и применения широкомасштабных водохозяйственных мероприятий по эффективному использованию водных ресурсов для сохранения и восстановления сельскохозяйственных и природных комплексов речного бассейна.

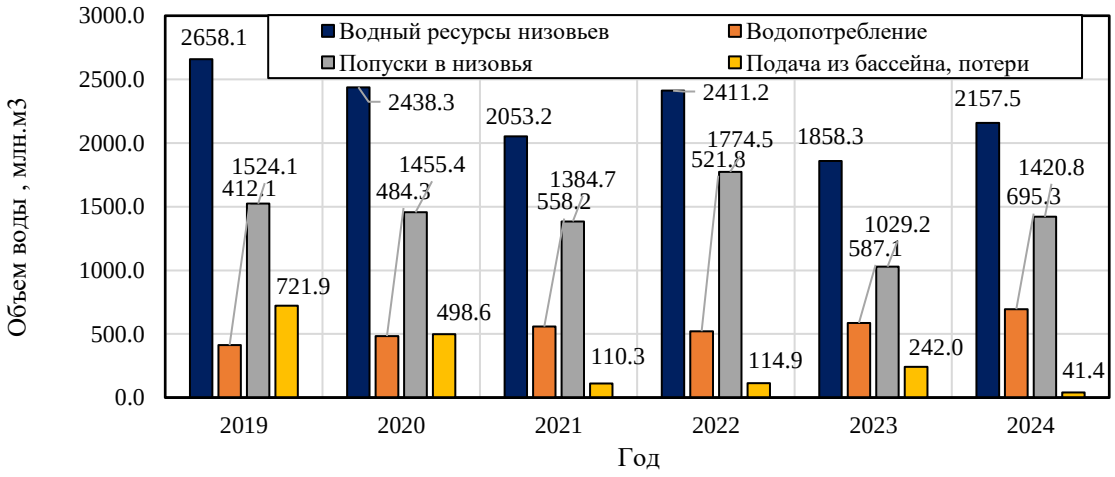


Рисунок 4. *Годовой сток р. Шу в пределах территории Казахстана*

Водохозяйственный баланс бассейна р. Шу 2024 г. характеризуется приходной частью общим объемом 2157500 тыс м^3, из которых 1926100 тыс м^3 (89 %) - сток, поступивший в бассейн р. Шу из Кыргызстана; 115100 тыс м^3 (5.3 %) – сток, сформировавшийся на территории Казахстана; 102200 тыс м^3 (4.7 %) – сток, поступивший из других речных бассейнов; 14100 тыс м^3 (0.7%) – забор подземных вод (остальное другие источники). Определяющим фактором поступления воды в низовья р. Шу являются трансграничный водные ресурсы, при малых объемах из других водоисточников.

Расходная часть состоит из обязательных попусков в низовья реки - 142800 тыс м^3 (66 %); безвозвратного водопотребления – 695300 тыс м^3 (32 %); наполнения водохранилищ – 16800 тыс м^3 (0.8 %); испарение с поверхности водохранилищ – 24600 тыс м^3 (1.1 %). При этом весомую часть составляют использование водных ресурсов на нужды населения и производства, а также многолетнее регулирование и потери, что значительно уменьшает долю водообеспечения природных комплексов низовьев речного бассейна.

Основными потребителями водных ресурсов бассейна р. Шу являются сельское хозяйство, в том числе залив сенокосов, орошаемое земледелие, животноводство, рыбное хозяйство, а также коммунальное хозяйство, производственные нужды и энергетика. Отраслью экономики не потребляющее, а пользующиеся водой является гидроэнергетика.

В 2024 г. основные показатели забора и использования водных ресурсов р. Шу показали, что при общем объеме забора воды в 1538396.2 тыс м^3, сельское хозяйство забирает 1523766.1 тыс м^3 (99 %), на коммунальное хозяйство – 9326.7 тыс м^3 (0.6 %), на производственные нужды – 5299.9 тыс м^3 (0.3 %). В определяющем объеме водопотребления на сельское хозяйство большую часть подается на залив сенокосов – 1013137.3 тыс м^3 (66.5 %), а на регулярное орошение – 510628.8 тыс м^3 (33.5 %) или 33.2 % от общего забора водных ресурсов р. Шу. Следует отметить большой объем потерь при транспортировании водных ресурсов в бассейне р. Шу равного 616191.0 тыс м^3 (40.1 %), что дает возможность для эффективного внедрения различных инженерно-технических мероприятий по уменьшению этого показателя.

Анализ динамики изменения общего забора и использования водных ресурсов в бассейне р. Шу за период 2019…2024 гг. показал значительное уменьшение: забора воды от 1639511.8 тыс м^3 до 1224968 тыс м^3, на 25 %; использование воды, от 1198169.3 тыс м^3 до 729919.2 тыс м^3, на 39 %; однако потери при транспортировании воды возросли, от 439771.2 тыс м^3 до 495048.8 тыс м^3, на 12.6 %.

Приведенные данные свидетельствуют в первую очередь о негативном влиянии процесса уменьшения стока р. Шу на забор и использование водных ресурсов на нужды населения и производства региона. И хотя объем забора и использования водных ресурсов составляет в среднемноголетнем разрезе порядка 22 % от общей величины располагаемых водных ресурсов бассейна р. Шу, его можно уменьшить на 20…30 % за счет внедрения водосберегающих технологий и различных мероприятий по рациональному использованию воды.

Особого внимание заслуживает динамика использования водных ресурсов в сельском хозяйстве бассейна р. Шу за период 2019…2024 гг.: объем водопользования в сельском хозяйстве стабильно уменьшается от 1627953.2 тыс м^3 до 1212819 тыс м^3, на 25.5 %; залив сенокосов от 1217100 тыс м^3 до 655400 тыс м^3, на 46.2 %; возрос объем воды на регулярное орошение от 409917 тыс м^3 до 557418.4 тыс м^3, на 36 %. При этом водопотребление на регулярное орошение составляло 25.2…46.0 % от общего водозабора на сельское хозяйство, и соответственно 15.4…30 % от водных ресурсов низовьев р. Шу.

Здесь также сказывается негативное влияние процесса уменьшения стока р. Шу на использование водных ресурсов в сельском хозяйстве. При этом доля объем забора и использования водных ресурсов на регулярное орошение постоянно возрастает, что сокращает водообеспечение животноводства за счет уменьшения залива сенокосов. За период 2019…2024 гг. доля водопотребления на регулярное орошение бассейна р. Шу возросла почти в 2 раза от общего водозабора на сельское хозяйство и от общих водных ресурсов низовьев речного бассейна. Этот факт свидетельствует о необходимости скорейшего и широкого внедрения водосберегающих технологий и различных мероприятий по рациональному использованию воды, в свете дальнейшего сокращения стока р. Шу и роста потерь воды при орошении сельхозкультур.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полная зарегулированность и интенсивное хозяйственное использование стабильно уменьшающегося стока р. Шу, наряду с сокращением сельскохозяйственного производства и ухудшением среды проживания населения региона, приводят к необратимым последствиям для окружающей среды, выражаемых деградацией озерных систем и пойменных лесов, понижением уровня грунтовых вод и пересыханием родников, сокращением площадей заливных лугов, пойменных пастбищ, с ускорением процесс опустынивания, со значительным сокращением потенциала биологической продуктивности речной экосистемы.

Водохозяйственной инфраструктуре бассейна р. Шу свойственны большое количество гидротехнических сооружений со степенью износа до 88 %, каналы оросительных систем в земляном русле с КПД до 0.3, что требует широкого внедрения водосберегающих технологий и всевозможные мероприятия по рациональному использованию водных ресурсов.

Водообеспечение природно-хозяйственных комплексов бассейна р. Шу в пределах территории Казахстана постоянно ухудшается, что связано в первую очередь с общим уменьшением стока реки, а только во вторую – с увеличением водопотребления в речном бассейне. Расходная часть за 2024 г. состоит из обязательных попусков в низовья реки – 55 %; безвозвратного водопотребления – 31.6 %; наполнения водохранилищ – 9.6 %; испарение с поверхности водохранилищ – 3.4 %.

Анализ динамики изменения водохозяйственной обстановки в бассейне р. Шу за период 2019...2024 гг. показал, что объем забора и использования водных ресурсов составляет в среднем порядка 22 % от общей величины располагаемых водных ресурсов. Это свидетельствуют в первую очередь о негативном влиянии процесса уменьшения стока р. Шу на забор и использование водных ресурсов на нужды населения и производства региона. Использование водных ресурсов в сельском

хозяйстве бассейна р. Шу за период 2019...2024 гг. уменьшился на 25.5 %, залив сенокосов на 46.2 %, зато возрос объем воды на регулярное орошение на 36 %, при этом водопотребление на регулярное орошение составляло 25.2...46.0 % от общего водозабора на сельское хозяйство, и соответственно 15.4...30.0% от водных ресурсов р. Шу.

Для решения водохозяйственных проблем в низовьях р. Шу рекомендуется:

- в краткосрочной перпективе: проведение инвентаризации и паспортизации водохозяйственных объектов, введение современной тарифной политики, контроль соблюдения Положения о вододелении со стороны КР, .создание центров обучения передовым технологиям;

- в долгосрочной песрпективе: повышение эффективности использования водных ресурсов, сокращение непроизводительных потерь воды, улучшение технического состояния водохозяйственной инфраструктуры, внедрение систем учета использования воды, автоматизации водоучета и управления водными ресурсами, использование передовых водосберегающих технологий и способов полива.

Приведенные рекомендации по решению водохозяйственных проблем низовьев р. Шу позволят уменьшить негативное воздействие общепланетарного потепления климата, длительного маловодья и неуклонного сокращения стока рек. Если их планомерно не решать, то велика вероятность возникновения водного стресса в бассейне р. Шу, ухудшение продовольственной безопасности региона и в целом всей страны, а также появления риска межгосударственных водных конфликтов в ближайшей перспективе.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ННБ; управление данными - ТТИ; формальный анализ - ТКИ; методология -ТТИ, МАЛ; программное обеспечение - МАЛ; отслеживание - МАЛ; визуализация -ННБ; написание исходного проекта - ТТИ; написание и редактирование обзора - МАЛ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Научно-исследовательские работы выполнены при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23488693).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Оценка потребностей для сохранения важных глобально значимых водно-болотных угодий в бассейне реки Шу (в пределах территории Казахстана) // Отчет о научно-исследовательской работе. – Офис программ ОБСЕ в Астане. – Астана, 2023. – 104 с.

2 Sahana M., Dhali M.K., Lindley S. (2024). Global disparities in transboundary river research have implications for sustainable management. Communications Earth & Environment. Vol. 5, № 786. DOI: 10.1038/s43247-024-01928-0.

3 Yu Y., Bo Y., Castelletti A. (2024). Transboundary cooperation in infrastructure operation generates economic and environmental co-benefits in the Lancang-Mekong River Basin. Nature Water. Vol. 2. pp. 589–601. DOI: 10.1038/s44221-024-00246-1.

4 Mohammed Y.A., Acer Y. (2024). Management of Transboundary Watercourse in Euphrates-Tigris and Nile River Basins. Land and Water Degradation in Ethiopia. Springer Geography. Springer, Cham. pp. 341–360. DOI: 10.1007/978-3-031-60251-1_15.

5 Arfa A., Ayyoubzadeh S.A., Shafizadeh-Moghadam H. (2025). Transboundary hydropolitical conflicts and their impact on river morphology and environmental degradation in the Hirmand Basin, West Asia. Sci Rep. Vol. 15, № 2754. DOI: 10.1038/s41598-024-84501-1.

6 Mahmoodzadeh D., Morid S. Ketabchi H. (2025). Assessment of water resources sustainability under unilateral development projects using WEAP model in transboundary river basins. Environ Sci Pollut Res. Vol. 32. pp. 6130–6152. DOI: 10.1007/s11356-025-36063-6.

7 Fu J., Lu T., Xu B. (2024). Water Resources Allocation in a Transboundary River Based on a Rubinstein Bargaining Model. Water Resour Manage. Vol. 38. pp. 639–663. DOI: 10.1007/s11269-023-03691-x.

8 Sivokhip Z.T., Chibilev A.A. (2022). Transboundary River Basins: Basic Principles for Solving the Problems of Interstate Cooperation. Geogr. Nat. Resour. Vol. 43. pp. 218–227. DOI: 10.1134/S1875372822030118.

9 Ibrayev T., Li M., Bakbergenov N., Panenka P., Batyrbayeva A. (2022). Problems of the use of water resources and the ways of their solution in Kazakhstan. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. Vol. 4, № 454. pp. 69–80. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.201.
10 Faraz Ul Haq, Ahma, I., Khan N.M. (2024). Climate Change, Water Variability, and Cooperation Along Transboundary River Basins in Perspective of Indus Water Treaty. The Water, Climate, and Food Nexus. Springer, Cham. pp. 457–473. DOI: 10.1007/978-3-031-50962-9_20.
11 Jaiswal H., Kumar P. (2025). Transboundary Rivers of South Asia: Issues and Challenges. Land and Water Nexus in South Asia. Advances in Asian Human-Environmental Research. Springer, Cham. pp. 137-179. DOI: 10.1007/978-3-031-87429-1_5.
12 Переход к интегрированному управлению водными ресурсами (ИУВР) в низовьях и дельтах рек Амударьи и Сырдарьи // Предварительное обоснование. – Научно-информационный центр Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии (НИЦ МКВК). – Ташкент, 2005. – 198 с.
13 Дускаев К.К, Жанабаева Ж.А. Природоохранные и экологические попуски как основа в сохранении водных экосистем в нижнем течении рек // Вестник казахстанско-немецкого университета: Устойчивое развитие Центральной Азии. – №2 (4). – Алматы, 2014. – С. 168–171.
14 Отчеты о заборе, использовании и водоотведении вод // Жамбылский филиал Республиканского государственного предприятия «Казводхоз». – Тараз, 2019–2024 гг.
15 Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Шу. (Обновление СКИОВР 2007 г.) // Сводная записка. - ПК «Институт Казгипроводхоз». – Алматы, 2017. – 133 с.
16 Соглашения между Правительством Республики Казахстан и Правительством Кыргызской Республики об использовании водохозяйственных сооружений межгосударственного пользования на реках Шу и Талас // Астана, 2000. – 2 с.
17 Положения о делении стока р. Чу // Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР от 24.02.1983 г. – М., 1983. – 7 с.

REFERENCES

1 Ocenka potrebnostej dlya sohraneniya vazhnyh global'no znachimyh vodno-bolotnyh ugodij v bassejne reki SHu (v predelah territorii Kazahstana) [Assessment of needs for the conservation of globally important wetlands in the Shu River basin (within the territory of Kazakhstan)] (2023). Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. Ofis programm OBSE v Astane [in Russian].
2 Sahana M., Dhali M.K., Lindley S. (2024). Global disparities in transboundary river research have implications for sustainable management.Communications Earth & Environment. Vol. 5, № 786. DOI: 10.1038/s43247-024-01928-0.
3 Yu Y., Bo Y., Castelletti A. (2024).Transboundary cooperation in infrastructure operation generates economic and environmental co-benefits in the Lancang-Mekong River Basin.Nature Water. Vol. 2. pp. 589–601. DOI: 10.1038/s44221-024-00246-1.
4 Mohammed Y.A., Acer Y. (2024). Management of Transboundary Watercourse in Euphrates-Tigris and Nile River Basins. Land and Water Degradation in Ethiopia. Springer Geography. Springer, Cham. pp. 341–360. DOI: 10.1007/978-3-031-60251-1_15.
5 Arfa A., Ayyoubzadeh S.A., Shafizadeh-Moghadam H. (2025). Transboundary hydropolitical conflicts and their impact on river morphology and environmental degradation in the Hirmand Basin, West Asia. Sci Rep. Vol. 15, № 2754. DOI: 10.1038/s41598-024-84501-1.
6 Mahmoodzadeh D., Morid S. Ketabchi H. (2025). Assessment of water resources sustainability under unilateral development projects using WEAP model in transboundary river basins. Environ Sci Pollut Res. Vol. 32. pp. 6130–6152. DOI: 10.1007/s11356-025-36063-6.
7 Fu J., Lu T., Xu B. (2024). Water Resources Allocation in a Transboundary River Based on a Rubinstein Bargaining Model. Water Resour Manage. Vol. 38. pp. 639–663. DOI: 10.1007/s11269-023-03691-x.
8 Sivokhip Z.T., Chibilev A.A. (2022). Transboundary River Basins: Basic Principles for Solving the Problems of Interstate Cooperation. Geogr. Nat. Resour. Vol. 43. pp. 218–227. DOI: 10.1134/S1875372822030118.
9 Ibrayev T., Li M., Bakbergenov N., Panenka P., Batyrbayeva A. (2022). Problems of the use of water resources and the ways of their solution in Kazakhstan. NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of geology and technical sciences. Vol. 4, № 454. pp. 69–80. DOI: 10.32014/2022.2518-170X.201.
10 Faraz Ul Haq, Ahma, I., Khan N.M. (2024). Climate Change, Water Variability, and Cooperation Along Transboundary River Basins in Perspective of Indus Water Treaty. The Water, Climate, and Food Nexus. Springer, Cham., pp. 457–473. DOI: 10.1007/978-3-031-50962-9_20.
11 Jaiswal H., Kumar P. (2025). Transboundary Rivers of South Asia: Issues and Challenges.Land and Water Nexus in South Asia. Advances in Asian Human-Environmental Research. Springer, Cham. pp. 137-179. DOI: 10.1007/978-3-031-87429-1_5.
12 (2005). Perekhod k integrirovannomu upravleniyu vodnymi resursami (IUVR) v nizov'yah i del'tah rek Amudar'i i Syrdar'I [Transition to integrated water resources management (IWRM) in the lower reaches and deltas of the Amu Darya and Syr Darya rivers]. Predvaritel'noe obosnovanie. Nauchno-informacionnyj centr Mezhgosudarstvennaya koordinacionnaya vodohozyajstvennaya komissiya Central'noj Azii (NIC MKVK), Tashkent, 2005. 198 p. [in Russian].
13 Duskaev K.K, Zhanabaeva Zh.A. (2014). Prirodoohrannye i ekologicheskie popuski kak osnova v sohranenii vodnyh ekosistem v nizhnem techenii rek [Environmental and ecological permits as the basis for preserving aquatic ecosystems in the lower reaches of rivers]. Vestnik kazahstansko-nemeckogo universiteta: Ustojchivoe razvitie Central'noj Azii, 2 (4), pp.168-171 [in Russian].
14 (2014-2024) Otchety o zabore, ispol'zovanii i vodootvedenii vod (2019-2024) [Reports on water abstraction, use, and discharge]. ZHambylskij filial Respublikanskogo gosudarstvennogo predpriyatiya «Kazvodhoz». Taraz [in Russian].
15 (2024). Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany vodnyh resursov bassejna r. Shu [Scheme for the comprehensive use and protection of water resources in the Shu River basin.]. (Obnovlenie SKIOVR 2007). Svodnaya zapiska. PK «Institut Kazgiprovodhoz». Almaty, 133 p. [in Russian].
16 (2000). Soglasheniya mezhdu Pravitel'stvom Respubliki Kazahstan i Pravitel'stvom Kyrgyzskoj Respubliki ob ispol'zovanii vodohozyajstvennyh sooruzhenij mezhgosudarstvennogo pol'zovaniya na rekah SHu i Talas [Agreements between the Government of the Republic of Kazakhstan and the Government of the Kyrgyz Republic on the use of interstate water management facilities on the Shu and Talas rivers] (2000). 2 p.[in Russian].
17 (1983). Polozheniya o delenii stoka r. CHu [Provisions on the division of the flow of the Chu River [(1983). Ministerstvo melioracii i vodnogo hozyajstva SSSR ot 24.02.1983 g., M. 7 p. [in Russian].

ШУ ӨЗЕНІНІҢ ТӨМЕНГІ ЖЕРЛЕРІНДЕГІ АУЫЛ ШАРУАШЫЛЫҒЫ ЖӘНЕ ТАБИҒИ КЕШЕНДЕРДІҢ ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ

Тұрсын Т. Ыбыраев[1] т.ғ.к., Марина А.Ли[1] т.ғ.к., Нұрлан Н. Бақбергенов[2], Талғат Қ., Иманалиев[2], Нұрлан Н. Балғабаев[2] а-ш.ғ.д.

[1] «География және су қауіпсіздігі институты », Алматы, Қазақстан; kiwr-t@mail.ru, limarina76@mail.ru
[2] «Қазақ су шаруашылығы ғылыми зерттеу институты», Тараз, Қазақстан; bakbergenovnurlan@mail.ru, tonimontana_777@mail.ru, balgabayev@mail.kz
*Автор корреспондент: Марина А. Ли, limarina76@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

сумен қамтамасыз ету,
су шаруашылығы инфрақұрылымы,
далалық зерттеулер,
реттеу,
басқару

Мақала жайында:
Жіберілді: 03.06.2025
Қайта қаралды: 26.09.2025
Қабылданды: 04.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Шу өзені бассейні ағынының толық реттелуі және қарқынды шаруашылық пайдаланылуы төменгі ағысының экожүйесінің су режиміне, оның флорасы мен фаунасына, халықтың әлеуметтік-тұрмыстық және шаруашылық-экономикалық өмір сүру жағдайларына айтарлықтай әсер етті. Себебі, су тапшылығы, әсіресе су аз жылдары, бұл да трансшекаралық өзен бассейндерінің мемлекеттері арасындағы қайшылықтардың алғышарттарын жасайды. Осыған байланысты Шу өзенінің төменгі ағысында су пайдалану мен су таратуды ұтымды жоспарлауды қамтамасыз ету бойынша ұсынымдар мен іс-шараларды кешенді талдаумен, әзірлеумен заттай зерттеулер жүргізілді. Оның негізінде өзен бассейнінің ауылшаруашылық және табиғи кешендерін сақтаудың өзекті мәселелерін шешу ұсынылады.

THE CURRENT STATE OF AGRICULTURAL AND NATURAL COMPLEXES OF THE LOWER RIVER SHU

Tursun Ibrayev[1] Candidate of Technical Sciences, Marina Li[1]* Candidate of Technical Sciences, Nurlan Bakbergenov[2], Talgat Imanaliyev[2], Nurlan Balgabayev[2] Doctor of Agricultural Sciences

[1] Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; kiwr-t@mail.ru, limarina76@mail.ru
[2] Kazakh Research Institute of Water management LLP, Taraz, Kazakhstan; bakbergenovnurlan@mail.ru, tonimontana_777@mail.ru, balgabayev@mail.kz
*Corresponding author: Marina Li, limarina76@mail.ru

KEY WORDS

water supply,
water management infrastructure, field studies,
regulation,
management

About article:
Received: 03.06.2025
Revised: 26.09.2025
Accepted: 04.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

The complete regulation and intensive economic use of the runoff of the Shu River basin had a significant impact on the water regime of the lower ecosystem, its flora and fauna, social, household and economic conditions of the population. The reason is the shortage of water, especially in low-water years, which also creates prerequisites for contradictions between the states of the basins of transboundary rivers. In this regard, field studies have been conducted with a comprehensive analysis, development of recommendations and measures to ensure rational planning of water use and water distribution in the lower reaches of the Shu River. Based on the results of which the solution of urgent problems of conservation of agricultural and natural complexes of the river basin is proposed.

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

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ ПО АРАЛО-СЫРДАРЬИНСКОМУ ВХБ

Татьяна С. Гричаная* к.т.н., Павел А. Калашников к.т.н., Алихан С. Кали, Гульнаурыз С. Отеберген

ТОО «Казахский научно-исследовательский институт водного хозяйства», Тараз, Казахстан; tank_gr@mail.ru (ТСГ), kalashnikov_81@inbox.ru (ПАК), k.alihan_95@mail.ru (АСК), gulnauryz.utepbergen@mail.ru (ГСО)
*Автор корреспондент: Татьяна С. Гричаная, tank_gr@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

орошаемое земледелие, водные ресурсы, Арало-Сырдарьинский бассейн, эффективность водопользования, устойчивое сельское хозяйство

АБСТРАКТ

Казахстан относится к категории стран с большим дефицитом водных ресурсов. По водообеспеченности страна занимает последнее место среди стран СНГ. Удельная водообеспеченность составляет 37 тыс. $м^3$ на 1 $км^2$ и 6,0 тыс. $м^3$ на 1 человека в год. Это положение усугубляется еще и тем, что распределение водных ресурсов в Казахстане неравномерное в пространстве и большинство рек являются трансграничными. В перспективе ожидается сокращение ресурсов трансграничного стока в республику в связи с хозяйственной деятельностью в соседних государствах, так как больше половины стока формируется за пределами РК. Прогнозируемое сокращение водных ресурсов вследствие глобальных и региональных изменений климата представляет серьезную угрозу водообеспеченности страны и требует проведение детального анализа эффективности использования имеющихся водных ресурсов. Учитывая, что основные площади орошаемого земледелия расположены в южных регионах, в частности в Арало-Сырдарьинском водохозяйственном бассейне, данная статья посвящена оценке эффективности использования возобновляемых водных ресурсов в орошаемом земледелии этого бассейна.
В качестве базы были взяты имеющиеся статистические данные с 2010 по 2022 годы по водопользованию, структуре посевов, фактической водообеспеченности года, а также климатические показатели. В проведенных исследованиях рассматривался количественный метод определения эффективности использования оросительной воды при регулярном орошении. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования водной политики и устойчивого управления водными ресурсами в сельском хозяйстве региона.

1. ВВЕДЕНИЕ

Казахстан относится к числу стран, где орошаемое земледелие в сельскохозяйственном производстве играет ведущую роль. Основные площади орошаемых земель расположены в южных регионах, в том числе в Туркестанской области около 38 % и в Кызылординской области 14 %, входящих Арало-Сырдарьинский бассейн [1]. Эти территории характеризуются засушливым климатом, высокой зависимостью от трансграничной реки (Сырдарья), а также значительным потреблением воды в сельском хозяйстве, особенно в сфере орошаемого земледелия. В последние годы в регионе наблюдаются тенденции уменьшения объема воды в реке, вызванного глобальными климатическими изменениями, нестабильностью водных поступлений из сопредельных стран и отсутствием эффективной системы управления водными ресурсами. В результате усиливаются риски продовольственной и

По статье:
Получено: 07.08.2025
Пересмотрено:05.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:
Гричаная Т., Калашников П., Кали А., Отеберген Г. Оценка эффективности использования возобновляемых водных ресурсов в орошаемом земледелии по Арало-Сырдарьинскому ВХБ // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 35-46.

экологической безопасности, снижается урожайность, ухудшается социально-экономическая ситуация в сельских районах.

Целью исследования было оценить, как можно улучшить использование возобновляемых водных ресурсов в орошаемом земледелии в Арало-Сырдарьинском ВХБ, чтобы повысить его эффективность.

Ключевыми задачами являлись: исследование динамики водопотребления, анализ структуры посевных площадей, оценка фактической обеспеченности водными ресурсами за продолжительный период, а также изучение климатических параметров. На основе полученных данных определялась эфективность применения оросительной воды в условиях регулярного полива.

Новизна работы заключается в оценке эффективности использования водных ресурсов в орошаемом земледелии Арало-Сырдарьинского ВХБ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Арало-Сырдарьинский бассейн занимает площадь около 345 тыс. км^2 [2], расположен в зоне резко континентального климата, где характерны значительная годовая и суточная амплитуда колебания температуры воздуха, большая сухость воздуха, малая облачность, скудность осадков при неравномерном их распределении по году и незначительный снежный покров. Лето жаркое, со средней температурой июля от +24 °С до +28°С, а зима холодная, со средней температурой января от -8 °С до -15 °С. Зимой в отдельные годы морозы могут достигать -30 °С и ниже [2].

Среднегодовое количество осадков составляет от 130 мм до 300 мм, но в горных районах может быть выше [3]. Большая часть осадков выпадает в виде дождя весной и осенью. В регионе преобладают засушливые и суховейные явления, что обусловлено его географическим положением в центре Евразии и влиянием пустынных и полупустынных ландшафтов.

Гидрографическая сеть бассейна развита неравномерно. Наибольшее количество рек приурочено к горным районам, тогда как равнинные территории реками бедны, а пустыни совсем не имеют поверхностных вод. Основной рекой бассейна является река Сырдарья, которая берет начало за пределами Казахстана.

Бассейн включает в себя равнинные и предгорные участки. Основную часть территории занимают пустыни и полупустыни. В географическом отношении территория Арало-Сырдарьинского бассейна расположена в основном в пределах трех широтных природных зон: пустынной, предгорно-степной и предгорно-полупустынной с разными коэффициентами увлажненности (Ку) [4]:

Коэффициенты увлажненности территорий бассейна свидетельствует о высоком недостатке влаги и только орошение сельскохозяйственных культур в регионе позволяет обеспечить население областей собственной продукцией.

В целом, природные условия Арало-Сырдарьинского водохозяйственного бассейна определяются засушливым климатом, дефицитом водных ресурсов, сложной гидрографией и значительным антропогенным воздействием, что приводит к серьезным экологическим проблемам. Особенно остро стоит вопрос эффективного использования воды для орошения. Вопрос дефицита воды в Казахстане широко рассматривается как в отечественных, так и международных источниках. Работы ряда исследователей, а также публикации международных организаций (FAO, UNECE, World Bank) подчёркивают нарастающий дефицит водных ресурсов в Центральной Азии, обусловленный климатическими изменениями, ростом населения и устаревшей системой водораспределения. Ряд исследований указывает на низкий уровень водоэффективности в сельском хозяйстве Казахстана и необходимость внедрения современных ирригационных технологий. Также подчёркивается значимость трансграничного сотрудничества в бассейне реки Сырдарья.

Материалы по водопользованию, климатическим показателям и фактический состав возделываемых сельскохозяйственных культур создали предпосылки для

определения эффективности использования оросительной воды при регулярном орошении. В данной работе был применен количественный метод определения эффективности использования оросительной воды при регулярном орошении, а именно разница средневзвешенной оросительной нормы и возможного к использованию объема воды непосредственно на поле с учетом потерь при транспортировке.

Климатические факторы и фактический состав возделываемых сельскохозяйственных культур создали предпосылки для определения эффективности использования оросительной воды при регулярном орошении по Арало-Сырдарьинскому бассейну.

Методика оценки эффективности

Основной принцип методической оценки эффективности использования возобновляемых водных ресурсов в орошаемом земледелии по Арало-Сырдарьинскому ВХБ заключается в сравнении нормативного объема воды, необходимого для орошения (средневзвешенной оросительной нормы), с фактическим объемом, который реально поступает на поля. Разница между этими показателями и является мерой эффективности (формула 1):

$$E=H_{\text{ср}} - V_{\text{факт}}, \quad (1)$$

где, $H_{\text{ср}}$ - средневзвешенная оросительная норма, м³/га, $V_{\text{факт}}$ - фактически используемый объём воды на поле, м³/га.

Средневзвешенная оросительная норма определялась с учетом структуры посевных площадей и фактической водообеспеченности года по Арало-Сырдарьинскому бассейну (формула 2):

$$H_{\text{ср}}=(\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot H_i), \quad (2)$$

где, n - количество культур, шт; P_i - доля посевной площади под i-й культурой (в долях от 1); H_i - оросительная норма для i-й культуры, м³/га.

$$V_{\text{факт}} = V_{\text{подано}} \cdot (1 - \alpha), \quad (3)$$

где, $V_{\text{подано}}$ - объём воды, поданный в систему (м³/га); α - коэффициент потерь воды при транспортировке (в долях от 0 до 1).

Таким образом, полная формула будет выглядеть следующим образом (формула 4):

$$E=(\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot H_i) - V_{\text{подано}} \cdot (1 - \alpha), \quad (4)$$

Разница между этими показателями показывает оценку эффективности использования водных ресурсов в Арало-Сырдарьинском бассейне.

Для определения потребности сельскохозяйственных культур в воде для ВХБ было проведено расчетное суммарное водопотребление на структурный гектар, в котором учитывалось долевое участие фактически выращиваемой культуры и требуемые оросительные нормы с учетом структуры посевов (формула 5):

$$N_{cpj} = \sum_{i=1}^{n}(\frac{D_i}{100} \cdot N_{ij}) \quad (5)$$

где, Ncpj -средневзвешенная оросительная норма по бассейну при водообеспеченности j (в м³/га), D_i - доля культуры в структуре посевных площадей (%); Nij - оросительная норма для культуры i в год обеспеченности j (j= 50%,75%,95%); i — индекс культуры.

Данный подход позволяет получить объективную картину рациональности водопользования в орошаемом земледелии Арало-Сырдарьинского бассейна, учитывая как природные, так и антропогенные факторы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка эффективности использования возобновляемых водных ресурсов в орошаемом земледелии по Арало-Сырдарьинскому водохозяйственному бассейну проводилась с учетом структуры посевных площадей орошаемых земель в Кызылординской и Туркестанской областях (таблица 1) [5], фактической водообеспеченности территорий по данным «Казгидромет» [6] с 2010 по 2022 годы и КПД каналов по данным Арало-Сырдарьинской бассейновой инспекции (таблица 2) [7]. Данный период был выбран из-значительных изменений климатических условий, включая вариации осадков и температуры и усиление антропогенной нагрузки на водные ресурсы. Также за данный период ведется систематический сбор и учет данных, что обеспечивает достоверность и сопоставимость показателей, необходимых для качественного анализа.

Таблица 1

Структура посевных площадей орошаемых земель, тыс. га (по данным МСХ РК)

№	Область	Масличные	Многолетние травы	Кормовые, (в т.ч. кукуруза на зерно)	Овощи	Хлопчатник	Картофель	Яровые зерновые	Рис	Бахчевые	Всего
1	Кызылординская	5.7	41.8	19.2	5.6		3.8	10.4	89.5	8.1	184.1
2	Туркестанская (без Созакского района)	60.6	28.1	32.3	30.6	125.8	10.9	13.7	3.9	44.3	350.2
	ИТОГО	66.3	69.9	51.5	36.2	125.8	14.7	24.1	93.4	52.4	534.3

Таблица 2

Фактическая водообеспеченность по годам и КПД каналов за период 2010…2022 гг

Показатели	Годы												
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Факт. водообеспеченность года, %	38.6	63.6	75.0	50.0	22.7	29.5	13.6	27.3	65.9	77.3	61.4	88.6	20.5
КПД оросительных сетей	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.68	0.74

По результатам данных наблюдается нестабильность водообеспеченности, с чередующимися годами достаточного и крайне низкого уровня. Эти показатели

указывают на высокую зависимость от внешних факторов (гидрологическая обстановка, межгосударственное распределение воды, метеоусловия). Максимальные значения фактической водообеспеченности года наблюдаются в 2021 году – 88.6 %, 2012 году – 75.0 %, 2019 году – 77.3 %, минимальные в 2016 год – 13.6 %, 2022 год – 20.5 %, 2014 год – 22.7 %. Уровень эффективности оросительных сетей с 2010 по 2020 год составлял в среднем 0.60 (60 %). В последние 2 года отмечается повышение эффективности оросительных систем, что может быть связано с проведением работ по их модернизации или о внедрении мер, направленных на сокращение водопотерь.

Для оценки эффективности проведен расчет средневзвешенных значений оросительных норм для каждой культуры, возделываемой в Арало-Сырдарьинском бассейне с учетом природных зон и коэффициентов увлажненности. Средневзвешенные оросительные нормы по Арало-Сырдарьинскому ВХБ согласно Укрупненных норм водопотребления и водоотведения [4] с учетом структуры посевных площадей и доли каждой культуры от общей площади орошаемых земель в бассейне приведены в таблице 3.

Таблица 3

Средневзвешенные оросительные нормы по Арало-Сырдарьинскому ВХБ с учетом структуры посевных площадей

Орошаемые культуры	**Доля поливной площади с/х культур в % от общей орошаемой площади по ВХБ**	**Нормы водопотребления по годам водообеспеченности, м³/га**		
		50 %	**75 %**	**95 %**
Масличные	12.4	5475.00	6368.75	7462.50
Многолетние травы	13.1	9006.25	10006.25	11518.75
Кормовые, (в т.ч. кукуруза на зерно)	9.6	6137.50	7031.25	8137.50
Овощи	6.8	7381.25	8456.25	9762.50
Хлопчатник	23.5	6828.57	7614.29	8878.57
Картофель	2.7	6200.00	6968.75	8075.00
Яровые зерновые	4.5	3831.25	4431.25	5418.75
Рис	17.5	21433.33	24816.67	26966.67
Бахчевые	9.8	4431.25	4875.00	5743.75
Всего:	100.0			

Как видно из таблицы 3, наибольшую площадь в бассейне занимают хлопчатник (23.5%), рис (17.5%), масличные культуры (12.4%) и многолетние травы (13.1%). Вместе они занимают более 60% всех посевных земель в бассейне. При этом три из них - рис, многолетние травы и хлопчатник отличаются высоким водопотреблением, что оказывает существенное воздействие на общий водный баланс региона.

Наименьшие нормы орошения приходятся на яровые зерновые от 3831 до 5418 м³/га, картофель – 6200…8075 м³/га и бахчевые – 4431…5743 м³/га в зависимости от водообеспеченности года. Общее водопотребление по бассейну согласно агрегированной нормы потребления воды составляет при 50 % обеспеченности – 9082.12 м³/га; при 75 % обеспеченности – 10351.03 м³/га; при 95 % обеспеченности – 11713.48 м³/га.

Расчет средневзвешенной оросительной нормы, на 1 структурный гектар на год с 50% обеспеченностью приведён по формуле (5):

$$N_{\text{ср}50\%} = \frac{12{,}4 \cdot 5475 + 13{,}1 \cdot 9006{,}25 + \cdots\cdots\cdots + 9{,}8 \cdot 4431{,}25}{100} = 9082{,}12 \text{ м}^3/\text{га};$$

Аналогично вычислены значения для 75% и 95% обеспеченности: $N_{\text{ср}75\%}$ = 10351.03 м³/га; $N_{\text{ср}95\%}$ = 11713.48 м³/га.

Эффективность использования оросительной воды при регулярном орошении по фактическим данным в Арало-Сырдарьинском ВХБ приведена в таблице 4 и для наглядности на рисунке 1.

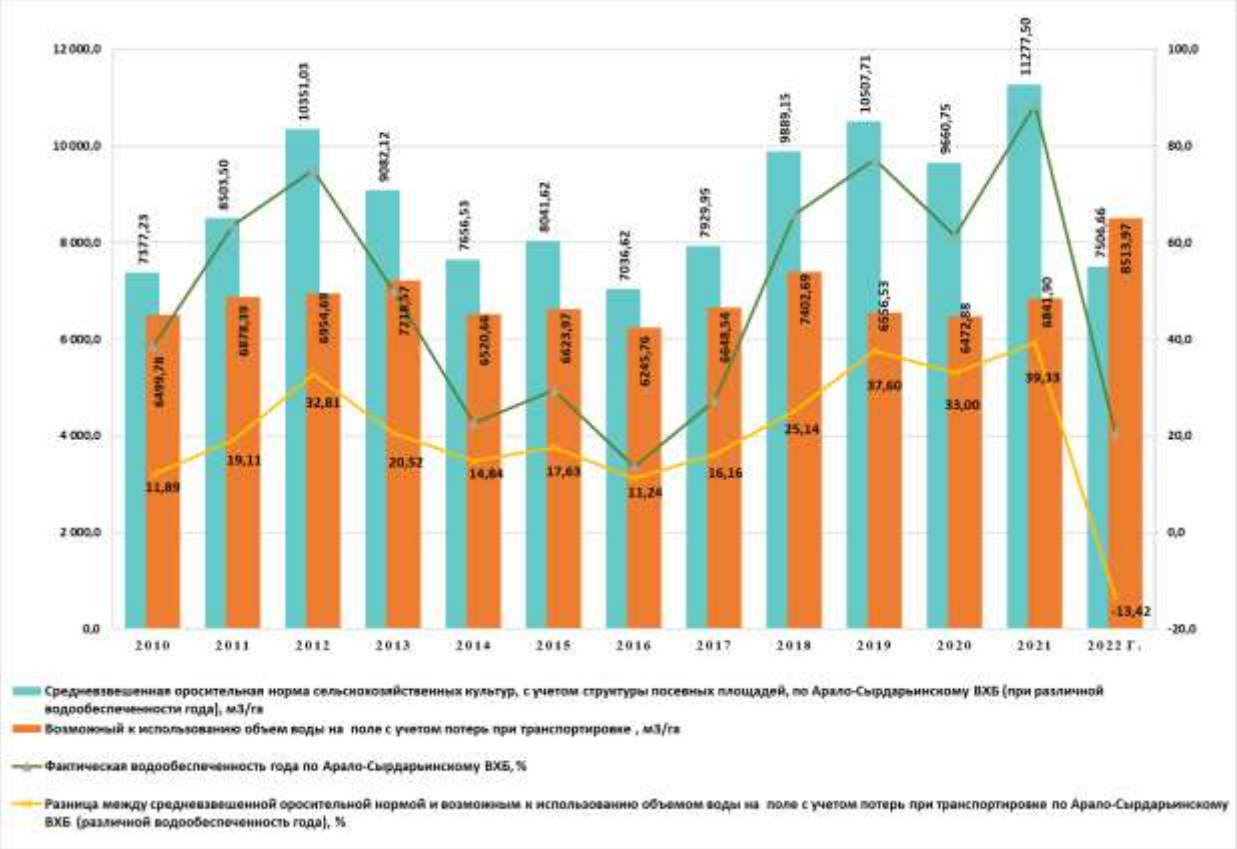


Рисунок 1. *Эффективность использования оросительной воды при регулярном орошении по Арало-Сырдарьинскому ВХБ*

При рассмотрении вышеприведенного графика по Арало-Сырдарьинскому ВХБ можно отметить, что, разница между средневзвешенной оросительной нормой и возможным к использованию объемом воды на поле с учетом потерь при транспортировке и фактической обеспеченности года (отклонение от усредненной оросительной нормы в %) имеет как положительные, так и отрицательные значения. Положительные значения данной величины указывают на то, что фактически поданный объем оросительной воды на каждый гектар орошаемой площади меньше нормативного. Это означает что, в целом, по усредненным показателям, на всей орошаемой площади, подача оросительной воды была проведена в недостаточном объеме для нормального роста и развития возделываемых сельскохозяйственных

культур. На рисунке **1** видно, что разница между средневзвешенной оросительной нормой и возможным к использованию объемом воды на поле с учетом потерь при транспортировке и фактической обеспеченности года (отклонение от усредненной оросительной нормы в %) с 2010 по 2021 гг. имеет положительную динамику, что неблагоприятно сказывается на возделываемых сельскохозяйственных культурах и только в 2022 году отмечается отрицательный показатель, так как данный год является самым водообеспеченным и переизбыток влаги на поле составил 13**.**42 %. Отрицательные значения данной величины говорят о том, что фактически поданный объем оросительной воды на поле превышает средневзвешенную оросительную норму.

Для получения хорошего урожая яровых зерновых [8,9], многолетних трав [10], кукурузы [11,12], овощей [13], хлопка [14,15], картофеля [16,17] риса [18] и других культур [19] критически важен сбалансированный режим увлажнения. Как недостаток, так и избыток влаги оказывают негативное воздействие на растения, приводя к снижению урожайности и ухудшению качества продукции. Недостаток влаги может вызывать увядание, пожелтение, уменьшение размера плодов и даже гибель растений. Избыточное увлажнение, в свою очередь, способствует развитию болезней, гниению корней и плодов, растрескиванию и ухудшению качества продукции. Для каждой культуры существует оптимальный уровень влажности почвы, например, для хлопчатника это около 60 % НВ, а для картофеля – 60…80 % от НВ.

Таким образом, для эффективного управления орошением необходимо учитывать не только средние многолетние показатели, но и фактическую водообеспеченность каждого года, а также потери воды при транспортировке. Важно стремиться к точному соответствию между потребностью культур в воде и объемом подаваемой воды, избегая как дефицита, так и избытка влаги. Для этого необходимо проводить регулярный мониторинг влажности почвы и использовать современные методы орошения, позволяющие точно дозировать воду и минимизировать потери. В частности, капельное орошение и дождевание могут быть эффективными инструментами для поддержания оптимального уровня влажности почвы и повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Успешный опыт внедрения инновационных технологий орошения в ряде регионов и стран привел к ощутимому увеличению урожайности и более эффективному управлению водными ресурсами. Капельное орошение помогло Калифорнии стать одним из самых продуктивных сельскохозяйственных регионов в мире, значительно повысив урожайность при одновременной экономии воды [20]. Опыт Израиля показывает, что эффективное управление орошением с помощью капельного орошения и датчиков влажности может превратить засушливые регионы в продуктивные сельскохозяйственные районы [21]. США, Европа и Азия экономят орсительную воду и увеличивают урожайность за счет применения систем дождевания [22]. Эти примеры иллюстрируют, как эффективные стратегии и технологии орошения были реализованы в различных регионах, что привело к улучшению сельскохозяйственных результатов и улучшению практики управления водными ресурсами.

Таблица 4

Средневзвешенные оросительные нормы по Арало-Сырдарьинскому ВХБ с учетом структуры посевных площадей

Показатели	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Всего орошаемых земель, тыс. га	580.33	585.84	586.78	573.50	655.72	673.92	680.51	672.34	605.12	692.21	692.21	692.21	590.36
Водозабор на орошаемое земледелие, млн. м^3	6286.7	6716.0	6801.5	6899.8	7126.2	7440.0	7083.8	7450.1	7465.9	7564.1	7467.6	6964.7	6792.3
Средневзвешенные зараты воды на 1 га, м^3/га, $V_{\text{подано}}$	10832.97	11463.98	11591.15	12030.95	10867.77	11039.95	10409.59	11080.90	12337.81	10927.54	10788.13	10061.61	11505.36
Средневзвешенная оросительная норма с/х культур, с учетом структуры посевных площадей, по ВХБ (при различной водообеспечен-ности года), м^3/га, $H_{\text{ср}}$	7377.23	8503.50	10351.03	9082.12	7656.53	8041.62	7036.62	7929.95	9889.15	10507.71	9660.75	11277.50	7506.66
КПД оросительных сетей (по данным Арало-Сырдарьинской БИ)	0.60	0.60	0.60	0.60	0,60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.68	0.74
Возможный к исполь-зованию объем воды на поле с учетом потерь при транспортировке, м^3/га, $V_{\text{факт}}$	6499.78	6878.39	6954.69	7218.57	6520,66	6623.97	6245.76	6648.54	7402.69	6556.53	6472.88	6841.90	8513.97
Разница между среднев-звешенной оросительной нормой и возможным к использованию объемом воды на поле с учетом потерь при транспорти-ровке (при различной водообеспеченности года), м^3/га	877.45	1625.11	3396.34	1863.55	1135,87	1417.65	790.86	1281.41	2486.46	3951.19	3187.87	4435.60	-1007.31
Разница между средневз-вешенной оросительной нормой и возможным к использованию объемом воды на поле с учетом потерь при транспорти-ровке по ВХБ (различной водообеспеченность года), %	11.89	19.11	32.81	20.52	14,84	17.63	11.24	16.16	25.14	37.60	33.00	39.33	-13.42

Кроме того, необходимо учитывать особенности каждой культуры и ее потребность в воде на разных стадиях развития. Например, в период цветения и плодообразования потребность в воде у многих культур возрастает. Поэтому важно адаптировать режим орошения к конкретным потребностям каждой культуры и к текущим погодным условиям. Внедрение систем автоматического управления орошением.

Практическая значимость исследований заключается в возможности применения полученных в ходе научной работы результатов для решения конкретных задач и проблем в реальной жизни, отрасли науки или профессиональной деятельности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В географическом отношении территория Арало-Сырдарьинского бассейна рас-положена в основном в пределах 3-х широтных природных зон: пустынной, предгорно-степной и предгорно-полупустынной.

2. Основой для определения эффективности использования оросительной воды при регулярном орошении был применен количественный метод расчета.

3. За наблюдаемый период с 2010 по 2021 годы наблюдаются положительные значения данной величины указывают на то, что фактически поданный объем оросительной воды на каждый гектар орошаемой площади меньше нормативного. Это означает что, в целом, по усредненным показателям, на всей орошаемой площади, подача оросительной воды была проведена в недостаточном объеме для нормального роста и развития возде-лываемых сельскохозяйственных культур и только в 2022 году отмечается отрицательный показатель, так как данный год является самым водообеспеченным и переизбыток влаги на поле составил 13.42 %.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из отчетов «КазНИИВХ» и Арало-Сырдарьинской бассейновой инспекции.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ТСГ; управление данными – ПАК, ТСГ; формальный анализ - ГСО; методология – АСК, ГСО; руководство - ПАК; визуализация - АСК; написание исходного проекта – АСК, ГСО; написание и редактирование текста – ГСО, ТСГ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства водных ресурсов и ирригации Республики Казахстан (ИРН BR23791322).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 ТОП-7 регионов Казахстана по площадям орошения. 15 августа 2020. [Электронный ресурс]. URL: https://eldala.kz/rating/1946-top-7-regionov-kazahstana-po-ploshchadyam-orosheniya (дата обращения 09.06.2025).
2 Климат Казахстана. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.suntravel.uz/klimat-kazakhstana#:~:text (дата обращения 10.06.2025.
3 Physical-geographic characteristics of the region [Электронный ресурс]. URL https://www.cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/english/docs/fiziko_geog_kharack_regiona.html?utm_source=chatgpt.com (дата обращения 09.06.2025).
4 Об утверждении укрупненных норм водопотребления и водоотведения для отдельных отраслей экономики. 16 ноября 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600014514 (дата обращения 11.06.2025).
5 Валовый сбор сельскохозяйственных культур в Республике Казахстан [Электронный ресурс]. -URL https://stat.gov.kz/ru/industries/businessstatistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/113764/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения 09.06.2025).
6 Казгидромет официальные климатические данные и отчёты. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kazhydromet.kz (дата обращения 09.06.2025).
7 Арало-Сырдарьинская бассейновая инспекция. Отчёт о деятельности за 2010-2022 годы. г. Кызылорда, Туркестан. (Документ предоставлен по запросу).
8 Sadras V. O., Richards R. A. (2014). Improvement of crop water use efficiency. Agricultural Water Management, 145, 43–60. [Электронный ресурс]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377414001693 (дата обращения 12.06.2025).

9 Blum A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research, 112(2-3), 119-123.
10 Почему газон желтеет - причины пожелтевшей травы, что делать, если появи-лись сухие пятна. [Электронный ресурс]. URL: https://rusgrass.ru/stati/pochemu-gazon-zhelteet/#:~:text (дата обращения 16.06.2025).
11 Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29(1), 185–212.
12 Требования кукурузы к условиям среды. [Электронный ресурс]. URL: https://shans-group.com/poleznaya-informatsiya/kultury/kukuruza/trebovaniya-kukuruzy-k-usloviyam-sredy/#:~:text (дата обращения 18.06.2025).
13 Astija Astija Effect of Watering on Tomato (Solanum lycopersicum L.) Plant Growth // International Journal of Science and Research (IJSR) 7(2), August 2018 pp. 194-196 [Электронный ресурс]. -URL: https://www.researchgate.net/publication/327111062_Effect_of_Watering_on_Tomato_Solanum_lycopersicum_L_Plant_Growth (дата обращения 19.06.2025).
14 Giuseppe S.V., Aurelio S., Silvia Z. (2024). Agronomic Strategies for Sustainable Cotton Production: A Systematic Literature Review. Journal Agriculture, 14(9):1597
15 Simarjot Singh, Ritu Kumari, Ankita Thakur, Lalit Saini (2025). Comprehensive Agronomic Practices for optimizing Cotton Production: from Seed to Harvest. In book: Production Tech-niques of Agronomical Crops. pp.50. Edition: 1Publisher: Grammya Prakashan.
16 Wojciech Nowacki. (2018). Water in potato production, problems and challenges. Inżynieria Ekologiczna 19(6), December 2018 pp. 14-25.
17 Trevor W. Crosby, Yi Wang. (2021). Effects of Different Irrigation Management Practices on Potato (Solanum tuberosum L.). Department of Horticulture, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA Sustainability 2021, 13(18), 10187.
18 Dr. Amanullah, F. Sh Rice. (2017). Technology and Production. Book Edition: 1Publisher: InTech (Croatia)Editor: Amanullah, Shah Fahad ISBN: 978-953-51-5200-2, March 2017.
19 Прекращайте поливать арбузы - правила полива для получения максимально сладких плодов. -9.12.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://agrolife.ua/blog/Prekrashchayte-polivat-arbuzy-pravila-poliva-dlya-polucheniya-maksimalno-sladkikh-plodov/ (дата обращения 27.06.2025).
20 Agricultural Water Conservation and Efficiency Potential in California, Natural Re-sources Defense Council. June 2014 IB:14-05-F. [Электронный ресурс]. URL: https://www.nrdc.org/sites/default/files/ca-water-supply-solutions-ag-efficiency-IB.pdf (дата обращения 16.06.2025).
21 Alon Tal Israeli. (2021). Agriculture-Innovation and Advancement. In book: From Food Scarcity to Surplus. DOI:10.1007/978-981-15-9484-7_9. pp.299-358. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/349156223_Israeli_Agriculture-Innovation_and_Advancement (дата обращения 16.06.2025).
22 Kulkarni S.A., Reinders F.B., Ligetvari F. Global scenario of sprinkler and micro irrigat-ed areas/ 7th International Micro Irrigation Congress. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.scribd.com/document/456068998/19241160543876696 8#:~:text (дата обращения 16.06.2025).

REFERENCES

1 TOP-7 regionov Kazakhstana po ploshchadyam orosheniya [TOP-7 regions of Kazakhstan by irrigation areas]. (2020, August 15). [Electronic resource]. URL: https://eldala.kz/rating/1946-top-7-regionov-kazahstana-po-ploshchadyam-orosheniya (date of access 09.06.2025) [in Russian]
2 Klimat Kazakhstana [Climate of Kazakhstan]. [Electronic resource]. URL: https://ru.suntravel.uz/klimat-kazakhstana#:~:text (date of access 10.06.2025) [in Russian]
3 Physical-geographic characteristics of the region. [Electronic resource]. URL https://www.cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/english/docs/fiziko_geog_kharack_regiona.html?utm_source=chatgpt.com (date of access 10.06.2025)
4 Ob utverzhdenii ukrupnennykh norm vodopotrebleniya i vodootvedeniya dlya otdel'nykh otrasley ekonomiki. [On approval of enlarged norms of water consumption and disposal for certain sectors of the economy]. (2016, November 16). [Electronic resource]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600014514 (date of access 11.06.2025) [in Russian]
5 Valovyy sbor sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Respublike Kazakhstan [Gross harvest of agricultural crops in the Republic of Kazakhstan]. [Electronic resource]. URL https://stat.gov.kz/ru/industries/businessstatistics/stat-forrest-village-hunt-fish/publications/113764/?utm_source=chatgpt.com (date of access 09.06.2025) [in Russian]
6 Gidrologicheskaya baza dannykh RGP «Kazgidromet» [Hydrological database of RSE "Kazhydromet"]. [Electronic resource]. URL https://www.kazgidromet.kz/ru/post/2045?utm_source=chatgpt.com (date of access 09.06.2025)
7 Aralo-Syrdar'inskaya basseynovaya inspektsiya. Otchot o deyatel'nosti za 2010-2022 gody. [Aral–Syrdarya Basin Inspection. Activity report for 2010–2022]. Kyzylorda–Turkestan. (Dokument predostavlen po zaprosu) [in Russian].
8 Sadras V. O., Richards R. A. (2014). Improvement of crop water use efficiency. Agricultural Water Management, 145, 43–60. . [Electronic resource]. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377414001693 (date of access 12.06.2025).
9 Blum A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. Field Crops Research, 112(2-3), 119-123.
10 Pochemu gazon zhelteyet - prichiny pozheltevshey travy, chto delat', yesli poyavi-lis' sukhiye pyatna. [Why does the lawn turn yellow – causes and what to do if dry spots appear]. [Electronic resource]. URL: https://rusgrass.ru/stati/pochemu-gazon-zhelteet/#:~:text (date of access 16.06.2025) [in Russian].
11 Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Agronomy for Sustainable Development, 29(1), 185–212.
12 Trebovaniya kukuruzy k usloviyam sredy. [Electronic resource]. URL: https://shans-group.com/poleznaya-informatsiya/kultury/kukuruza/trebovaniya-kukuruzy-k-usloviyam-sredy/#:~:text (date of access 18.06.2025) [in Russian].
13 Astija Astija Effect of Watering on Tomato (Solanum lycopersicum L.) Plant Growth // International Journal of Science and Research (IJSR) 7(2), August 2018 pp. 194-196 [Электронный ресурс]. -URL: https://www.researchgate.net/publication/327111062_Effect_of_Watering_on_Tomato_Solanum_lycopersicum_L_Plant_Growth (date of access 19.06.2025).
14 Giuseppe S.V., Aurelio S., Silvia Z. (2024). Agronomic Strategies for Sustainable Cotton Production: A Systematic Literature Review. Journal Agriculture, 14(9):1597

15 Simarjot Singh, Ritu Kumari, Ankita Thakur, Lalit Saini (2025). Comprehensive Agronomic Practices for optimizing Cotton Production: from Seed to Harvest. In book: Production Tech-niques of Agronomical Crops. pp.50. Edition: 1Publisher: Grammya Prakashan.
16 Wojciech Nowacki. (2018). Water in potato production, problems and challenges. Inżynieria Ekologiczna 19(6), December 2018 pp. 14-25.
17 Trevor W. Crosby, Yi Wang. (2021). Effects of Different Irrigation Management Practices on Potato (Solanum tuberosum L.). Department of Horticulture, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI 53706, USA Sustainability 2021, 13(18), 10187.
18 Dr. Amanullah, F. Sh Rice. (2017). Technology and Production. Book Edition: 1Publisher: InTech (Croatia)Editor: Amanullah, Shah Fahad ISBN: 978-953-51-5200-2, March 2017.
19 Prekrashchayte polivat' arbuzy - pravila poliva dlya polucheniya maksimal'no sladkikh plodov. [Stop watering watermelons – irrigation rules for obtaining the sweetest fruits]. (2020, December 9). [Electronic resource]. URL: https://agrolife.ua/blog/Prekrashchayte-polivat-arbuzy-pravila-poliva-dlya-polucheniya-maksimalno-sladkikh-plodov/ (date of access 27.06.2025) [in Russian].
20 Agricultural Water Conservation and Efficiency Potential in California, Natural Re-sources Defense Council. June 2014 IB:14-05-F. [Electronic resource]. URL: https://www.nrdc.org/sites/default/files/ca-water-supply-solutions-ag-efficiency-IB.pdf (date of access 16.06.2025).
21 Alon Tal Israeli. (2021). Agriculture-Innovation and Advancement. In book: From Food Scarcity to Surplus. DOI:10.1007/978-981-15-9484-7_9. pp.299-358. [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/349156223_Israeli_Agriculture-Innovation_and_Advancement (date of access 16.06.2025).
22 Kulkarni S.A., Reinders F.B., Ligetvari F. Global scenario of sprinkler and micro irrigat-ed areas/ 7th International Micro Irrigation Congress. [Electronic resource]. URL: https://ru.scribd.com/document/456068998/19241160543876696 8#:~:text (date of access 16.06.2025).

АРАЛ-СЫРДАРИЯ СУ ШАРУАШЫЛЫҚ БАССЕЙНІНДЕ СУАРМАЛЫ ЕГІНШІЛІКТЕ ЖАҢАРТЫЛАТЫН СУ РЕСУРСТАРЫН ПАЙДАЛАНУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ

Татьяна С. Гричаная* т.ғ.к., Павел А. Калашников т.ғ.к., Әлихан С. Қали, Гүлнаурыз С.Өтеберген

«Қазақ су шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты» ЖШС, Тараз, Қазақстан; tank_gr@mail.ru, kalashnikov_81@inbox.ru, k.alihan_95@mail.ru, gulnauryz.utepbergen@mail.ru
*Автор корреспондент: Татьяна С. Гричаная, tank_gr@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

суармалы егіншілік,
су ресурстары,
Арал-Сырдария бассейні,
суды пайдалану тиімділігі,
тұрақты ауыл шаруашылығы

АБСТРАКТ

Қазақстан су ресурстарының тапшылығы жоғары болатын елдер санатына жатады. Еліміз сумен қамтамасыздығы бойынша ТМД елдерінің арасында соңғы орында тұр. Меншікті сумен қамтамасыздығы 1 км^{2}-ге 37 мың м^{3} және жылына 1 адамға 6.0 мың м^{3} құрайды.

Бұл жағдай Қазақстанда су ресурстарының кеңістікте біркелкі таралмауымен және өзендердің көпшілігі трансшекаралық болып табылатындығымен қиындатылуда. Болашақта көрші мемлекеттердегі шаруашылық қызметке байланысты республикаға трансшекаралық ағын ресурстарының қысқаруы күтілуде, өйткені ағынның жартысынан көбі ҚР шегінен тыс жерлерде қалыптасады. Климаттың жаһандық және өңірлік өзгеруіне байланысты су ресурстарының болжамды қысқаруы елдің сумен қамтамасыздығына елеулі қауіп төндіреді және қолда бар су ресурстарын пайдалану тиімділігіне егжей-тегжейлі талдау жүргізуді талап етеді. Суармалы егіншіліктің негізгі алқаптары оңтүстік өңірлерде, атап айтқанда Арал-Сырдария су шаруашылығы бассейнінде орналасқанын ескере отырып, бұл мақала осы бассейннің суармалы егіншілігінде жаңартылатын су ресурстарын пайдалану тиімділігін бағалауға арналған.

База ретінде 2010...2022 жылдар аралығында суды пайдалану, егіс құрылымы, жылдың нақты сумен қамтамасыз етілуі, сондай-ақ климаттық көрсеткіштер бойынша қолдағы бар статистикалық мәліметтер алынды. Жүргізілген зерттеулер жүйелі суару кезінде суарма суын пайдаланудың тиімділігін анықтаудың сандық әдісін қарастырды. Алынған нәтижелер су саясатын жетілдіру үшін және өңірдің ауыл шаруашылығындағы су ресурстарын тұрақты басқару үшін пайдаланылуы мүмкін.

Мақала жайында:
Жіберілді: 07.08.2025
Қайта қаралды: 05.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USE OF RENEWABLE WATER RE-SOURCES IN IRRIGATED AGRICULTURE IN THE ARAL-SYRDARYA WATER ECONOMY BASIN

Tatyana Grichanaya Candidate of Technical Sciences, Pavel Kalashnikov Candidate of Technical Sciences, Alikhan Kali, Gulnauryz Otebergen

LLP «Kazakh Research Institute of Water Management», Taraz, Kazakhstan; tank_gr@mail.ru, kalashnikov_81@inbox.ru, k.alihan_95@mail.ru, gulnauryz.utepbergen@mail.ru
*Corresponding author: T.S. Grichanaya, tank_gr@mail.ru

KEY WORDS

irrigated agriculture,
water resources,
Aral-Syrdarya basin,
water use efficiency,
sustainable agri-culture

ABSTRACT

Kazakhstan is classified as a country with a significant water resource deficit. In terms of water availability, the country ranks last among the CIS countries. The specific water availability is 37 000 m³ per 1 km² and 6.0 thousand m³ per person per year.

This situation is further aggravated by the fact that the distribution of water resources in Kazakhstan is uneven in space, and most rivers are transboundary. In the future, a reduction in transboundary runoff resources in the republic is expected due to economic activity in neighboring countries, since more than half of the runoff is generated outside the Republic of Kazakhstan. The predicted reduction in water resources due to global and regional climate change poses a serious threat to the country's water supply. It requires a detailed analysis of the efficiency of using available water resources. Considering that the main areas of irrigated agriculture are located in the southern regions, in particular in the Aral-Syrdarya water management basin, this article is devoted to assessing the efficiency of using renewable water resources in irrigated agriculture in this basin.

The available statistical data from 2010 to 2022 on water use, crop structure, actual water supply of the year, as well as climate indicators, were used as a base. The conducted studies con-sidered a quantitative method for determining the efficiency of using irrigation water with regular irrigation. The results obtained can be used to improve water policy and sustainable water management in agriculture in the region.

About article:
Received: 07.08.2025
Revised: 05.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 08.10.2025

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

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОЩАДИ ЛЕДНИКОВ И МОРЕННЫХ ОЗЕР В БАССЕЙНЕ РЕКИ ТУРГЕН

Әлима А. Амангелді*, Гульнара М. Искалиева, Айбек А. Мерекеев, Мәдина С. Сағат

ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан; amangeldialimma@gmail.com (ӘАА), igm.ionos@gmail.com (ГМИ), merekeev.aibek@gmail.com (ААМ), sagat.madina1@gmail.com (МСС)
*Автор корреспондент: Әлима А. Амангелді, amangeldialimma@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

изменение климата, площадь ледников, моренные озера, дистанционное зондирование Земли

АБСТРАКТ

В этой научной статье рассматриваются изменения, происходящие в зонах ледников и моренных озер, расположенных в бассейне реки Тургень, с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Анализ спутниковых снимков (Landsat, Sentinel-2 и PlanetScope) за период с 1999 по 2024 годы показал значительное уменьшение ледового покрова, а также динамику образования моренных озер. Эмпирические данные свидетельствуют о том, что, что площадь ледников в Тургенском бассейне уменьшилась на 50.3 %, с 34.8 км² в 1955 году до 17.3 км² в 2024 году. Также в бассейне реки наблюдается заметное увеличение площади моренных озер, что способствует повышенному риску наводнений в ледниковых озерах. Для оценки влияния климатических переменных использовались данные метеорологической станции Ассы, показывающие тенденцию повышения среднегодовой температуры в сочетании с уменьшением количества осадков. Результаты данного исследования подчеркивают необходимость постоянного мониторинга ледников и моренных озер, а также разработки стратегий, направленных на снижение рисков, связанных с их преобразованием.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ледники Центральной Азии играют ключевую роль в формировании водных ресурсов региона, однако в последние десятилетия они демонстрируют значительное сокращение площади и объема. Это сокращение сопровождается нарушениями водного баланса и обострением водных проблем в условиях усиливающегося климатического стресса. Недавние исследования подтверждают, что таяние ледников оказывает существенное влияние на гидрологический режим рек, изменяя доступность воды для населения, сельского хозяйства и экосистем [1...2]. Таким образом, деградация ледников рассматривается как один из наиболее чувствительных индикаторов текущих климатических изменений в регионе.

Изменения в криосфере, включая деградацию снежного покрова и вечной мерзлоты, могут служить индикаторами более широких трансформаций климатической системы Центральной Азии [3]. Подобные процессы усиливаются в условиях роста температур и снижения суммарного накопления твёрдых осадков в высокогорных районах.

Исторический анализ развития ледников показывает выраженные различия в их динамике, обусловленные климатической зональностью. Так, исследования указывают, что ледники во влажных и засушливых регионах развивались по-разному: в первом случае максимумы достигались в период морской кислородно-изотопной стадии 3...2 (около 30...15 тыс. лет назад), тогда как в аридных районах пик оледенения

По статье:
Получено: 22.09.2025
Пересмотрено:04.10.2025
Принято: 05.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:
Амангелді Ә., Искалиева Г., Мерекеев А., Сағат М. Анализ изменений площади ледников и моренных озер в бассейне реки Турген // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 47-57.

наблюдался значительно раньше – между стадиями 6 и 4 (около 190...60 тыс. лет назад) [4]. Данные различия в палеоклиматических условиях находят продолжение в современной пространственно-временной неоднородности баланса массы ледников, что напрямую отражается на сезонных и межгодовых колебаниях речного стока и доступности водных ресурсов [5].

Особенно выраженное сокращение ледников наблюдается в Северном Тянь-Шане, где за период с 1990 по 2015 год их площадь и объем значительно уменьшились. Такой факт подтверждается как дистанционными спутниковыми наблюдениями, так и результатами полевых исследований [6].

Одним из наиболее ощутимых последствий отступления ледников является ускоренное формирование моренных озер. Ледники, наряду с таянием снега и атмосферными осадками, являются основным источником подпитки таких озер, особенно в районах Иле Алатау. Рост числа и объема моренно-подпрудных озер повышает вероятность прорывных наводнений, представляющих угрозу для населения и инфраструктуры в долинах рек [7]. За последние десятилетия на территории Иле Алатау наблюдается активный рост числа и объёмов опасных озёр, что связано с деградацией оледенения и изменениями климатических условий [8]. Подобные тенденции прослеживаются и за пределами региона. Shan и др. сообщают, что на Гималайском плато наблюдается увеличение числа моренных озер, из которых 301 озеро идентифицировано как потенциально опасное [9]. Аналогично, по данным других иследователей, отступление ледника Гепанг Гатх вызвало рост площади приледниковых озер на 44%, что вызывает обеспокоенность по поводу безопасности населённых пунктов ниже по течению [10]. В работе документируется появление более 160 моренно-подпрудных озер в юго-восточном Казахстане, многие из которых представляют потенциальную опасность из-за нестабильных ледово-моренных дамб [11].

Изменения площади ледников фиксируются с использованием повторных спутниковых снимков, что позволяет охватывать обширные и труднодоступные территории (WGMS, 2008). Анализ спутниковых данных свидетельствует о значительном уменьшении массы льда в ледниках, особенно в нижней части ледниковых языков, где наблюдается активное разрушение и таяние обломочного льда. Этот процесс продолжается с возрастающей интенсивностью на протяжении последних нескольких десятилетий [12...14].

Совокупность существующих исследований подчёркивает необходимость систематического мониторинга и разработки стратегий по снижению рисков, связанных с деградацией ледников и формированием моренных озер. Природные явления, возникающие в результате переполнения таких озер, представляют серьёзную угрозу для населения и объектов экономической инфраструктуры, особенно в горных районах Иле Алатау. В этом контексте особую значимость приобретает анализ рельефных изменений, связанных с таянием ледников, а также оценка их влияния на накопление воды в моренно-подпрудных озёрах.

Такие исследования имеют решающее значение для раннего выявления потенциальных очагов опасности и последующего прогноза природных катастроф, включая оползни, прорывные и внезапные наводнения, вызванные разрушением нестабильных моренных плотин.

В данной статье рассматриваются пространственно-временные изменения площади ледников и моренных озёр в бассейне реки Турген, выявленные на основе методов дистанционного зондирования Земли. Проведён анализ спутниковых данных за период с 1999 по 2024 год, позволивший оценить динамику ледниковых тел и связанных с ними озёрных систем в пределах данной высокогорной территории.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Область исследования

Ледники Иле Алатау представляют собой важный компонент региональной экосистемы, характеризующийся разнообразием форм, классификаций и пространственного распределения. Их морфологические и физико-географические характеристики оказывают прямое влияние на гидрологическую динамику речных бассейнов, обеспечивая устойчивое поступление водных ресурсов, необходимых как для нужд сельского хозяйства, так и для поддержания экологического баланса.

Территорией исследования является бассейн реки Турген, расположенный в Иле-Алатауском районе на юго-востоке Казахстана (Рисунок 1). Река Турген берёт начало на северных склонах хребта Иле Алатау и питается главным образом за счёт таяния ледников, сезонного снежного покрова и атмосферных осадков.

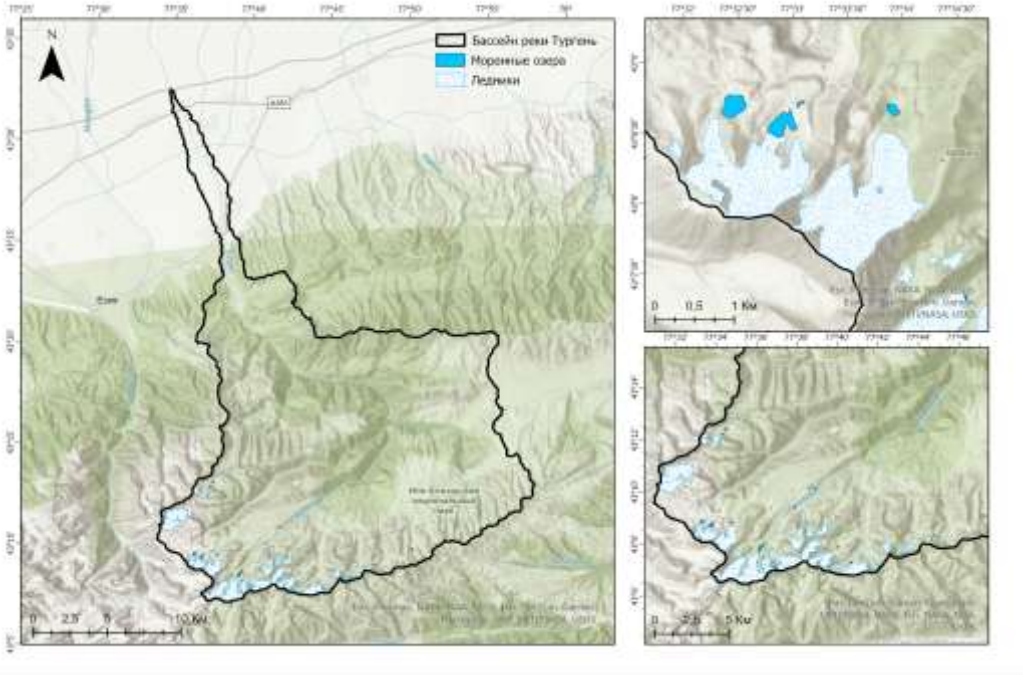


Рисунок 1. *Бассейн реки Турген*

В пределах бассейна сосредоточены значительные ледниковые массивы, которые играют ключевую роль в формировании стока, особенно в периоды весенне-летнего таяния. Таким образом, ледники Тургенского бассейна выступают как важный регулятор водоснабжения региона, обеспечивая стабильность речного стока в условиях климатической изменчивости

Данные

Для анализа текущего состояния ледников и изучения их изменений были использованы спутниковые снимки с платформ Landsat 7-8, Sentinel-2 и PlanetScope. Снимки, полученные в конце периода абляции (август-сентябрь), когда снежный покров минимален, обеспечивают наиболее точное выявление границ ледников и моренных озёр. На основе этих данных была проведена оценка динамики ледниковых систем и водных объектов за период с 1999 по 2024 год.

В исследовании применялся метод спектрального соотношения полос Landsat ETM+ и Landsat OLI, рекомендованный F. Paul [15,16]. Этот подход основан на расчёте индексов, таких как Band 3 / Band 5 для Landsat ETM+, Band 4 / Band 6 для Landsat OLI, а также Band 4 / Band 11 для Sentinel-2. Использование разных комбинаций спектральных каналов позволило повысить точность автоматического выделения ледников на многолетнем временном ряду.

Для анализа моренных озёр были привлечены данные с различных спутниковых платформ, в том числе Sentinel-2, что обеспечило детальный и непрерывный временной охват. В ходе сравнения методов извлечения водных объектов – таких как

NDWI, MNDWI, AWEI и метод пороговых значений по NIR – было установлено, что нормализованный разностный водный индекс (NDWI) демонстрирует наибольшую точность для различных типов водоёмов. Однако следует учитывать, что эффективность того или иного метода может варьироваться в зависимости от природных условий конкретной территории [17].

Идентификация и картографирование ледниково-моренных озёр в исследуемом регионе осуществлялись в два этапа: сначала выполнялась сегментация спутниковых изображений, затем проводилась ручная верификация и оцифровка полученных контуров.

Для комплексного понимания процессов, влияющих на сокращение площади ледников и рост площади озёр, дополнительно были проанализированы климатические параметры. В качестве основного источника климатических данных использовались многолетние наблюдения, зарегистрированные на метеостанции Ассы, обеспечивающие репрезентативность климатической характеристики региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современное состояние и эволюция ледников

В ходе исследования была определена скорость отступления ледников, количественно оценены масштабы этого сокращения, а также выявлены основные факторы, влияющие на изменения. Как показано в таблицах 1 и 2, ледники в исследуемом районе демонстрируют отрицательную динамику.

Таблица 1

Изменения количества и площади ледников

Год	1955	1999	2014	2021	2024
площадь, км²	34.8	24.7	19.5	18.9	17.3
количество	30	25	22	22	21
			Сокращение		
Период	1955…1999	1955…2021	1999…2014	1999…2021	2014…2021
Сокращение площади, %	-28.9 %	-45.7 %	-21.3 %	-23.6 %	-2.9 %
Скорость сокращения в год, %	-0.7 %	-0.7 %	-1.4 %	-1.1 %	-0.4 %

Согласно данным, приведённым в таблице 1, ледники региона значительно уменьшили свою площадь за последние десятилетия. В 1955 году по данным каталога СССР, общая площадь ледников в бассейне составляла 34.8 км², включая 30 ледников. К 2024 году эта площадь сократилась до 17.3 км², что соответствует уменьшению на 50.3 % по сравнению с первоначальными данными.

Таблица 2

Изменения площади 4 ледников в бассейне Тургень

Название ледника согласно схеме (каталог СССР 1955 г.)	Морфологический тип ледника	Площадь открытой части ледника, км²		
		1955	2014	2024
№227	шлейфовый	2.8	2.07	1.9
№231	Простой долинный	2.1	1.52	1.45
№234 Горного Института	котловинный	9.4	6.2	5.85
№241 Гляциологов	шлейфовый	3.2	1.9	1.53

Изучение темпов уменьшения площади ледников показывает, что с 1955 по 1999 год среднегодовая скорость сокращения составила 0.7 %, и площадь ледников уменьшилась на 28.9 %. В более поздний период, с 1999 по 2014 год, темпы усадки увеличились до 1.4 % в год, что привело к сокращению площади на 21.3 %. Однако,

начиная с 2014 года, темпы деградации ледников начали замедляться: с 2014 по 2021 год площадь уменьшилась всего на 2.9 %, а среднегодовая скорость сокращения снизилась до 0.4 %.

Для более детального анализа динамики ледников в бассейне Турген приведены данные в таблице 2. Ледник № 227 в 1955 году занимал площадь 2.8 км², но к 2024 году его площадь сократилась до 1.9 км². Ледник № 234, принадлежащий Горному институту, также показал значительное сокращение: его площадь уменьшилась с 9.4 км² в 1955 году до 5.85 км² в 2024 году.

Эти результаты подтверждают тенденцию резкого сокращения ледников в исследуемом регионе, что связано с изменениями климатических условий, а также с процессами глобального потепления.

Динамика формирования и изменений моренных озер или Моренные озера: формирование, изменение и потенциальные риски

После завершения процесса картографирования каждое ледниково-моренное озеро было отнесено к необходимым характеристикам для составления кадастра и оценки его текущего состояния, а также для анализа временных колебаний, наблюдаемых в ледниково-моренных озерах, расположенных в центральных и восточных районах северного склона Иле Алатау. В качестве атрибутов были указаны: обозначение озера, географические координаты (широта и долгота), высота (в метрах над уровнем моря) и площадь поверхности озера, как показано в таблице 3.

Таблица 3

Изменения площади и количества моренных озер

Год	Площадь, м²	Количество	Новые озера
Паспортизированные в 2017*	495 825.2	32	
2024 (Sentinel-2)	512 792.8	31	7
2024 (PlanetScope)	458 321.3	31	8

Примечание: *Данные получены от ГУ «Казселезащита» МЧС

Анализ данных спутников Sentinel-2 и PlanetScope показал заметные изменения в площади и количестве моренных озер. В 2017 году общая площадь озер составила 495 825.2 м², при этом было зарегистрировано 32 озера. По данным Sentinel-2, к 2024 году площадь увеличилась до 512 792.8 м², но количество озер уменьшилось до 31, хотя появилось 7 новых озер. В то же время, согласно данным PlanetScope, площадь моренных озер составила 458 321.3 м², при неизменном числе озер (31), но с добавлением 8 новых озер.

Кроме того, задокументированы случаи осушения некоторых моренных озер, что, вероятно, связано с ухудшением состояния ледникового покрова и изменениями в региональном гидрологическом режиме. В бассейне реки Турген проводится активный сброс воды из крупных моренных озер для снижения рисков прорывов и последующих наводнений.

Регресс ледников и его влияние на формирование озер

Одним из последствий деградации ледников и изменения криосферы является формирование и трансформация ледниково-моренных озёр. По данным, приведённым в таблице 3, сокращение площади ледников в сочетании с деградацией вечной мерзлоты способствует формированию новых моренных озёр. Эти водоёмы возникают в зонах интенсивного таяния ледников, где моренные отложения играют роль естественных плотин, препятствующих свободному оттоку талой воды. Увеличение количества и площади моренных озёр может привести к существенному росту риска прорывных паводков, особенно в уязвимых горных районах. Эти изменения оказывают заметное влияние на гидрологическую динамику речных систем, включая

сезонное перераспределение стока, повышение вероятности внезапных паводков и усиление давления на водохозяйственную инфраструктуру.

Визуальное представление различных типов ледниковых озёр и используемых в данном исследовании данных приведено на рисунке 2. На схеме зелёным цветом обозначены данные, применяемые для анализа эволюции ледников; параметр «dh/dt» указывает на скорость изменения толщины ледяного покрова. Синим цветом показаны ледниковые озёра, а красные и оранжевые стрелки иллюстрируют направления их развития. Пунктирные линии обозначают возможные пути стока из озёр, а аббревиатура «GLOF» указывает на прорыв ледникового озера (Glacial Lake Outburst Flood) [18].

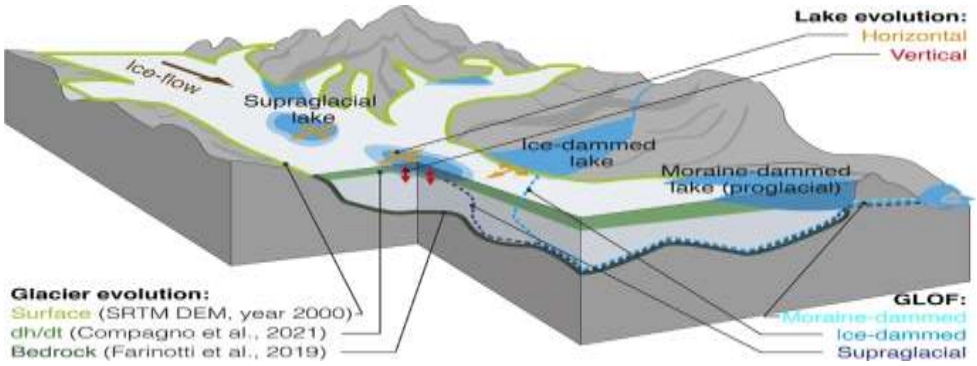


Рисунок 2. *Схематический обзор различных типов ледниковых озер и входные данные [18]*

Анализ данных метеостанций: температура, осадки и их тенденции

Глобальные изменения климата оказывают существенное влияние на ледниковые системы, что обусловливает актуальность их исследования. Одним из ключевых факторов является повышение температур, особенно в летние месяцы, которое приводит к активному таянию ледников. Это, в свою очередь, увеличивает объем талой воды, поступающей в моренные озера, и способствует росту уровня воды в реках.

Анализ температурных и осадочных условий на территории бассейна реки Турген проведен на основе данных метеорологической станции Ассы, предоставленных Республиканским гидрометеорологическим фондом РГП «Казгидромет», за период с 1961 по 2022 год (рисунок 3). Формулировка и представление выводов на основе полученных результатов; сопоставление полученных результатов с уже имеющимися результатами по данной тематике; оценка практической ценности полученных результатов.

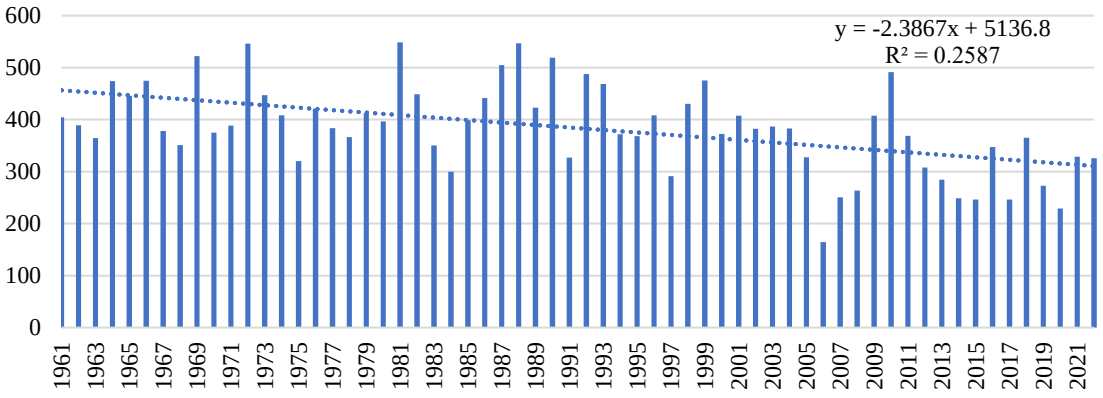


Рисунок 3. *Годовая сумма осадков (1961…2022 гг.) на территорию бассейна Турген*

Снижение количества осадков за исследуемый период (1961...2022 гг.) подтверждается отрицательным углом наклона трендовой линии (–2.3867), что указывает на тенденцию к уменьшению годовых сумм осадков. Коэффициент детерминации R^2=0.2587 свидетельствует о слабой степени объяснённости вариаций осадков линейной моделью тренда. Значение R^2 ниже общепринятого уровня статистической значимости (обычно 0.95 или 95 % доверительный уровень), что указывает на наличие других факторов, влияющих на распределение осадков, помимо линейного тренда [19].

На рисунке 4 прослеживается устойчивая тенденция к повышению как годовой, так и летней температуры. Угловые коэффициенты трендовых линий положительны и составляют 0.0145 для летнего периода и 0.0141 для годового, что указывает на стабильный рост температурных показателей.

Полученные на метеостанции Асса данные подтверждают влияние климатических изменений на региональные атмосферные условия. Зафиксированное повышение температуры оказывает непосредственное воздействие на ледниковые системы, ускоряя процессы их абляции.

Одним из последствий этих процессов является активное формирование новых моренных озёр. В частности, в бассейне реки Турген зафиксировано появление семи новых водоёмов, сформировавшихся в областях с интенсивным таянием льда. В подобных районах моренные отложения выполняют роль естественных преград, способствующих удержанию талой воды и образованию устойчивых озёрных структур.

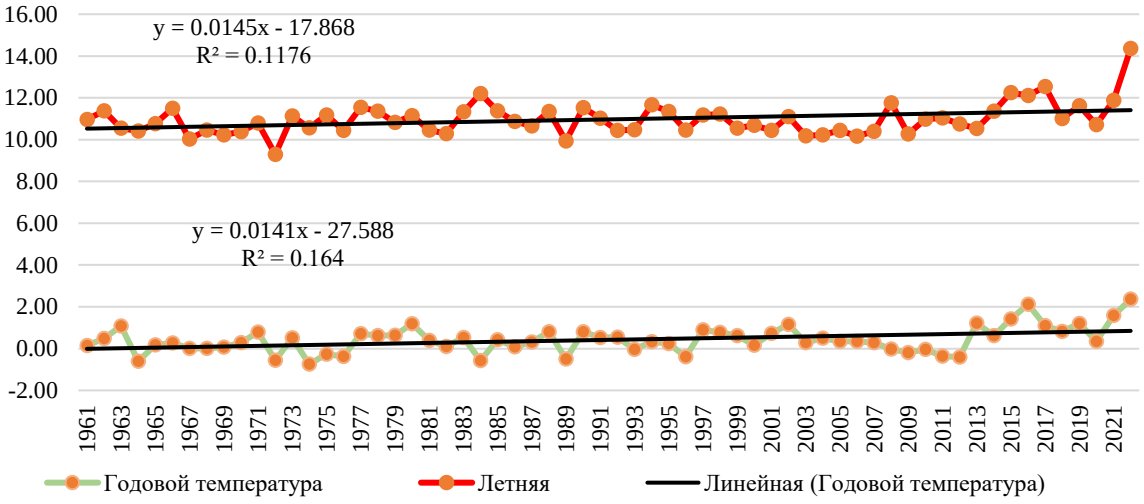


Рисунок 4. *Годовая и летняя (июнь-август) температура на территорию Турген*

Увеличение площади и числа моренных озёр отражает активное развитие гляциальных процессов, происходящих на северных склонах Иле Алатау. В условиях продолжающегося потепления климатической системы возможно, как расширение уже существующих озёр, так и формирование новых водоёмов. Эти изменения существенно повышают вероятность прорывов моренных озёр, что несёт потенциальную угрозу катастрофических паводков и может вызвать значительные трансформации в гидрологическом режиме горных речных бассейнов.

Современные климатические изменения оказывают существенное влияние на ледниковые системы Центральной Азии, вызывая их стремительное сокращение. Это оказывает глубокое воздействие на гидрологическую динамику региона и способствует формированию новых водных объектов. В Иле-Алатауском регионе Казахстана фиксируется заметный рост как количества, так и площади моренно-

ледниковых озёр, что напрямую связано с деградацией ледников и активным таянием вечной мерзлоты [9…19].

Согласно данным многолетних наблюдений, количество таких озёр увеличилось с 20 в 1978 году до 77 в 2021 году, в то время как на юго-востоке Казахстана общее число ледниково-моренных водоёмов превысило 160 к 2018 году. Указанные трансформации сопровождаются усилением природных рисков, включая вероятность катастрофических наводнений, вызванных прорывами озёр, а также формированием селевых потоков, представляющих угрозу как для объектов инфраструктуры, так и для населения в горных районах [11].

Сокращение ледниковых тел оказывает прямое влияние на гидрологическое равновесие региона. По прогнозам, процесс дегляциации в Казахстане будет ускоряться вплоть до середины XXI века. Прогнозируемое уменьшение объёмов ледников может составить от 38 % до 50 %, а сокращение площади – от 34 % до 39 %. Эти изменения, в свою очередь, приведут к перераспределению речного стока: при сниженной степени оледенения предполагается уменьшение летнего стока, тогда как в районах с высокой долей ледников возможно усиление весеннего паводка.

Анализ ретроспективных данных за период с 1955 по 2015 год подтверждает эти тенденции: за указанный промежуток времени площадь ледников в Казахстане сократилась на 40.8 %, а их объём – на 42.5 % [21]. В региональном масштабе, по оценкам, площадь ледников Центральной Азии за последние 45 лет уменьшилась на 16…27 %, что обусловлено повышением летних температур и изменением характера осадков. Такие климатические сдвиги оказывают не только влияние на режим речного питания, но и способствуют формированию потенциально опасных озёр, связанных с ледниковой динамикой [22].

Особую важность приобретает воздействие климатических изменений на экосистемы горных и равнинных территорий Центральной Азии. Изменение объёмов талой воды и динамики криосферы оказывает существенное влияние на деградацию вечной мерзлоты и приводит к трансформациям в биоразнообразии, нарушая устойчивость природных систем.

Дополнительную угрозу представляет ускорение движения скальных ледников, наблюдаемое в пределах Иле Алатау и Кунгёй Ала-Тоо. Этот процесс свидетельствует об активизации осадочных потоков, что значительно повышает вероятность возникновения селевых процессов и оползневых образований в зоне активного горного рельефа.

Масштабы изменений в ледниковых массивах и их влияние на водные системы требуют комплексного научного подхода. Для эффективного мониторинга и управления рисками необходимо активное применение технологий дистанционного зондирования, моделирования гидрологических процессов и регулярных полевых исследований. Такие меры позволят не только своевременно оценить последствия дегляциации, но и разработать стратегии адаптации, направленные на устойчивое управление природными ресурсами в условиях изменяющегося климата.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные факторы, способствующие сокращению ледников, вероятно, связаны с изменением климата, включая повышение среднегодовой температуры и уменьшение осадков в зоне пополнения ледников. Несмотря на повсеместное сокращение ледников, недавнее замедление их деградации требует дополнительных исследований для более точной оценки воздействия метеорологических переменных на динамику ледников.

Повышение средней температуры и увеличение частоты экстремальных метеорологических явлений существенно усиливают процессы деградации ледников. Эмпирические данные спутниковых наблюдений и гляциологические исследования

подтверждают, что в бассейне реки Турген наблюдается постоянное сокращение площади и массы ледников, что ведет к увеличению притока талых вод в речную систему.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ӘАА; управление данными - ААМ, МСС; формальный анализ - ГМИ, МСС; методология - ӘАА, МСС; программное обеспечение - ААМ; отслеживание - ӘАА; визуализация - ААМ; написание исходного проекта - ӘАА; написание и редактирование обзора - ӘАА, ГМИ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа сделана в рамках проекта, который финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21882365).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Xu M., Wang P., Wu H., Kang S. (2023). Different patterns of changes in glacier mass balance and glacier runoff over the Tarim Basin, Central Asia. Hydrological Processes, 37(10), e14997. https://doi.org/10.1002/hyp.14997
2 Denzinger F., Machgut, H., Barandun M., Berthier E., Girod L., Kronenberg M., Usubaliev R., Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. Journal of Glaciology, 67(262), 331-342. https://doi.org/10.1017/jog.2020.108
3 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. https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.10007
4 Batbaatar J., Gillespie A. R., Koppes M., Clark D. H., Chadwick O. A., Fink D., Matmon A., Rupper S. (2021). Glacier development in continental climate regions of central Asia. https://doi.org/10.1130/2020.2548(07)
5 Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). Nature Climate Change, 2(10), 725-731. https://doi.org/10.1038/nclimate1592
6 Zhang Q., Chen Y., Li Z., Xiang Y., Li Y., Sun C. (2022). Recent changes in glaciers in the northern tien Shan, central Asia. Remote Sensing, 14(12), 2878. https://doi.org/10.3390/rs14122878
7 Попов Н. В., Ранова С. У., Камалбекова А. Н., Алдаберген Ұ. Р. Количественная оценка гляциальной селевой опасности в Иле Алатау// География и водные ресурсы. – 2024. - № (4). – С. 115-129.
8 Татькова М. Е., Северский И. В., Усманова З. С., Капица В. П. Тестирование возможностей методики оперативного мониторинга горно-ледниковых систем // География и водные ресурсы. – 2024. - №(3). – С. 68-83.
9 Shan Z., Li Z., Dong X. (2021). Impact of glacier changes in the Himalayan Plateau disaster. Ecological Informatics, 63, 101316. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101316
10 Kumar V., Mehta M., Shukla T. (2021). Spatially resolved estimates of glacial retreat and lake changes from Gepang Gath Glacier, Chandra Basin, Western Himalaya, India. Journal of the Geological Society of India, 97(5), 520-526. https://doi.org/10.1007/s12594-021-1718-y
11 Medeu A. R., Popov N. V., Blagovechshenskiy V. P., Askarova M. A., Medeu A. A., Ranova S. U., Kamalbekova A., Bolch T. (2022). Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan. Earth-Science Reviews, 229, 103999. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999
12 Bolch,T., Pieczonka T., Benn D. I. (2011). Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. The Cryosphere, 5(2), 349-358. https://doi.org/10.5194/tc-5-349-2011
13 Kääb A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., Arnaud Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. Nature, 488(7412), 495-498. https://doi.org/10.1038/nature11324
14 Brun F., Wagnon P., Berthier E., Jomelli V., Maharjan S. B., Shrestha F., Kraaijenbrink P. D. A. (2019). Heterogeneous influence of glacier morphology on the mass balance variability in High Mountain Asia. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124(6), 1331-1345. https://doi.org/10.1029/2018JF004838
15 Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. Annals of Glaciology, 34, 355-361. https://doi:10.3189/172756402781817941
16 Paul F., Barrand N. E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Joshi S.P., Konovalov V., Winsvold S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Annals of Glaciology, 54(63), 171-182. https://doi:10.3189/2013AoG63A296
17 Yue H., Li Y., Qian J., Liu Y. (2020). A new accuracy evaluation method for water body extraction. International Journal of Remote Sensing, 41(19), 7311-7342. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1755740
18 Compagno L., Huss M., Zekollari H., Miles E. S., Farinotti D. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. Communications Earth & Environment, 3(1), 191. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8
19 Lafon T., Dadson S., Buys G., Prudhomme C. (2013). Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. International journal of climatology, 33(6), 1367-1381. https://doi.org/10.1002/joc.3518
20 Mussina A., Abdullayeva A., Barandun M., Cicoira A., Tursyngali M. (2024). Assessment of the current state and temporal changes of glacial-moraine lakes in the Central and Eastern part of the northern slope of the Ile Alatau, Kazakhstan. Journal of Water and Land Development. https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786
21 Вилесов Е. Н. Изменение размеров и состояния ледников Казахстана за 60 лет (1955–2015 гг.) // Лёд и Снег. – 2018. - №58(2). -С. 159-170. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170
22 Merekeyev A.A., Iskaliyeva G.M., Gaipova A.B., Amangeldi A.A, Sagat M.S., Sydyk N.K. (2025). Methods of monitoring moraine lakes in Central Asia under climate change. Izdenister natigeler, 2 (106)), 469-480.

REFERENCES

1 Xu M., Wang P., Wu H., Kang S. (2023). Different patterns of changes in glacier mass balance and glacier runoff over the Tarim Basin, Central Asia. Hydrological Processes, 37(10), e14997. https://doi.org/10.1002/hyp.14997

2 Denzinger F., Machgut, H., Barandun M., Berthier E., Girod L., Kronenberg M., Usubaliev R., Hoelzle, M. (2021). Geodetic mass balance of Abramov Glacier from 1975 to 2015. Journal of Glaciology, 67(262), 331-342. https://doi.org/10.1017/jog.2020.108

3 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. https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.10007

4 Batbaatar J., Gillespie A. R., Koppes M., Clark D. H., Chadwick O. A., Fink D., Matmon A., Rupper S. (2021). Glacier development in continental climate regions of central Asia. https://doi.org/10.1130/2020.2548(07)

5 Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. (2012). Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). Nature Climate Change, 2(10), 725-731. https://doi.org/10.1038/nclimate1592

6 Zhang Q., Chen Y., Li Z., Xiang Y., Li Y., Sun C. (2022). Recent changes in glaciers in the northern tien Shan, central Asia. Remote Sensing, 14(12), 2878. https://doi.org/10.3390/rs14122878

7 Popov N.V., Ranova S.U., Kamalbekova A.N., Aldabergen U.R. (2024). Kolichestvennaya ocenka glyacial'noj selevoj opasnosti v Ile Alatau [Quantitative assessment of glacial debris flow hazard in the Ili Alatau]. Geografiya i vodnye resursy, (4), 115-129. [in Russian]

8 Ta'kova M. E., Severskij I. V., Usmanova Z. S., Kapica V. P. (2024). Testirovanie vozmozhnostej metodiki operativnogo monitoringa gorno-lednikovyh sistem [Testing the capabilities of the methodology for operational monitoring of mountain glacier systems]. Geografiya i vodnye resursy, (3), 68-83 [in Russian]

9 Shan Z., Li Z., Dong X. (2021). Impact of glacier changes in the Himalayan Plateau disaster. Ecological Informatics, 63, 101316. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101316

10 Kumar V., Mehta M., Shukla T. (2021). Spatially resolved estimates of glacial retreat and lake changes from Gepang Gath Glacier, Chandra Basin, Western Himalaya, India. Journal of the Geological Society of India, 97(5), 520-526. https://doi.org/10.1007/s12594-021-1718-y

11 Medeu A. R., Popov N. V., Blagovechshenskiy V. P., Askarova M. A., Medeu A. A., Ranova S. U., Kamalbekova A., Bolch T. (2022). Moraine-dammed glacial lakes and threat of glacial debris flows in South-East Kazakhstan. Earth-Science Reviews, 229, 103999. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103999

12 Bolch,T., Pieczonka T., Benn D. I. (2011). Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. The Cryosphere, 5(2), 349-358. https://doi.org/10.5194/tc-5-349-2011

13 Kääb A., Berthier E., Nuth C., Gardelle J., Arnaud Y. (2012). Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. Nature, 488(7412), 495-498. https://doi.org/10.1038/nature11324

14 Brun F., Wagnon P., Berthier E., Jomelli V., Maharjan S. B., Shrestha F., Kraaijenbrink P. D. A. (2019). Heterogeneous influence of glacier morphology on the mass balance variability in High Mountain Asia. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124(6), 1331-1345. https://doi.org/10.1029/2018JF004838

15 Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeberli W. (2002). The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. Annals of Glaciology, 34, 355-361. https://doi:10.3189/172756402781817941

16 Paul F., Barrand N. E., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Joshi S.P., Konovalov V., Winsvold S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Annals of Glaciology, 54(63), 171-182. https://doi:10.3189/2013AoG63A296

17 Yue H., Li Y., Qian J., Liu Y. (2020). A new accuracy evaluation method for water body extraction. International Journal of Remote Sensing, 41(19), 7311-7342. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1755740

18 Compagno L., Huss M., Zekollari H., Miles E. S., Farinotti D. (2022). Future growth and decline of high mountain Asia's ice-dammed lakes and associated risk. Communications Earth & Environment, 3(1), 191. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00520-8

19 Lafon T., Dadson S., Buys G., Prudhomme C. (2013). Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. International journal of climatology, 33(6), 1367-1381. https://doi.org/10.1002/joc.3518

20 Mussina A., Abdullayeva A., Barandun M., Cicoira A., Tursyngali M. (2024). Assessment of the current state and temporal changes of glacial-moraine lakes in the Central and Eastern part of the northern slope of the Ile Alatau, Kazakhstan. Journal of Water and Land Development. https://doi.org/10.24425/jwld.2024.151786

21 Vilesov, E. N. (2018). Izmenenie razmerov i sostoyaniya lednikov Kazahstana za 60 let (1955–2015 gg.) [Changes in the size and condition of Kazakhstan's glaciers over 60 years (1955–2015)]. Lyod i Sneg, 58(2), 159-170. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-2-159-170 [in Russian]

22 Merekeyev A.A., Iskaliyeva G.M., Gaipova A.B., Amangeldi A.A, Sagat M.S., Sydyk N.K. (2025). Methods of monitoring moraine lakes in Central Asia under climate change. Izdenister natigeler, 2 (106)), 469-480.

ТҮРГЕН ӨЗЕНІ БАССЕЙНІНДЕГІ МҰЗДЫҚТАР МЕН МОРЕНАЛЫҚ КӨЛДЕР АУДАНЫНЫҢ ӨЗГЕРУІН ТАЛДАУ

Әлима А. Амангелді*, Гульнара М. Искалиева, Айбек А. Мерекеев, Мәдина С. Сағат

«Ионосфера институты» ЖШС, Алматы, Казахстан; amangeldialimma@gmail.com, igm.ionos@gmail.com, merekeev.aibek@gmail.com, sagat.madina1@gmail.com
*Автор корреспондент: Әлима А. Амангелді, amangeldialimma@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

климаттың өзгеруі,
мұздықтар ауданы,
мореналық көлдер,
Жерді қашықтықтан зондтау

Мақала жайында:
Жіберілді: 22.09.2025
Қайта қаралды: 04.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Бұл ғылыми мақалада Түрген өзенінің бассейнінде орналасқан мұздықтар мен морендалық көлдер аймақтарында болып жатқан өзгерістер Жерді қашықтықтан зондтау (ЖҚЗ) әдістерін қолдану арқылы қарастырылады. 1999...2024 жылдар аралығындағы Landsat, Sentinel-2 және PlanetScope спутниктік деректерін талдау мұздық жамылғысының айтарлықтай азайғанын және мореналық көлдердің қалыптасу динамикасын көрсетті. Эмпирикалық деректер Түрген бассейніндегі мұздықтар ауданы 1955 жылы 34.8 км² болған болса, 2024 жылы 17.3 км²-ге дейін азайып, 50.3 % қысқарғанын көрсетеді. Сонымен қатар, бассейнде морендік көлдердің ауданының айтарлықтай ұлғайғаны байқалады, бұл мұздық көлдердің тасыма қаупінің (GLOF) артуына ықпал етеді. Климаттық айнымалылардың әсерін бағалау үшін Ассы метеостанциясының деректері қолданылып, жылдық орташа температураның жоғарылау және жауын-шашын мөлшерінің азаю үрдісі анықталды. Зерттеу нәтижелері мұздықтар мен мореналық көлдерді үнемі бақылаудың маңыздылығын, сондай-ақ олардың трансформациясымен байланысты қауіп-қатерлерді азайтуға бағытталған стратегияларды әзірлеу қажеттігін көрсетеді.

ANALYSIS OF GLACIER AND MORAINE LAKE AREA CHANGES IN THE TURGEN RIVER BASIN

Alima Amangeldi*, Gulnara Iskaliyeva, Aibek Merekeyev, Madina Sagat

LLP «Institute of Ionosphere», Almaty, Kazakhstan; amangeldialimma@gmail.com, igm.ionos@gmail.com, merekeev.aibek@gmail.com, sagat.madina1@gmail.com
*Corresponding author: Alima Amangeldi, amangeldialimma@gmail.com

KEY WORDS

climate change,
glacier area,
moraine lakes,
remote sensing

About article:
Received: 22.09.2025
Revised: 04.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

This scientific paper examines the changes occurring in glacier zones and moraine lakes located in the Turgen River basin using remote sensing (RS) methods. Analysis of satellite imagery (Landsat, Sentinel-2, and PlanetScope) from 1999 to 2024 revealed a significant reduction in glacier cover as well as the dynamics of moraine lake formation. Empirical data show that the glacier area in the Turgen basin has decreased by 50.3 %, from 34.8 km² in 1955 to 17.3 km² in 2024. In addition, a noticeable increase in the area of moraine lakes has been observed, which contributes to a heightened risk of glacier lake outburst floods (GLOFs). To assess the impact of climatic variables, data from the Assy meteorological station were used, showing a trend of increasing average annual temperature combined with a decrease in precipitation. The results of this study highlight the need for continuous monitoring of glaciers and moraine lakes, as well as the development of strategies aimed at reducing the risks associated with their transformation.

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

КОМПЛЕКСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ БУКТЫРМИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ (2014...2025 ГГ.)

Лаура Т. Исмуханова PhD, Ботакоз М. Султанбекова*, Айнұр Мұсақұлқызы к.т.н., Азамат С. Мадибеков ассоциированный профессор, PhD

АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан, Алматы, Казахстан; l--aura@bk.ru (ЛТИ), sultanbekova_botakoz@mail.ru (БМС), mus_ain@mail.ru (АМ), madibekov@mail.ru (АСМ)
*Автор корреспондент: Ботакоз М. Султанбекова, sultanbekova_botakoz@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Буктырминское водохранилище, тяжелые металлы, гидрохимическое состояние, экологическая оценка, биоаккумуляция, мониторинг

АБСТРАКТ

Буктырминское водохранилище, крупнейший водный объект в верхнем течении р. Ертис, играет ключевую роль в водохозяйственном комплексе Восточного Казахстана, сочетая функции гидроэнергетики, регулирования стока, водоснабжения и рыбохозяйственного использования. Интенсивное развитие горнодобывающей и металлургической промышленности региона сопровождается поступлением в экосистему водного объекта тяжелых металлов, обладающих устойчивостью, миграционной способностью и склонностью к биоаккумуляции.
В работе обобщены данные государственного мониторинга РГП «Казгидромет» за 2014...2025 гг., а также результаты отечественных и зарубежных исследований, посвященных изучению воды, донных отложений и гидробионтов. Гидрохимические параметры водохранилища в целом стабильны: вода имеет слабощелочную реакцию, удовлетворительный кислородный режим и умеренную минерализацию. Основными элементами, формирующими токсикологический состояние, являются медь и марганец, концентрации которых в отдельные годы достигали 3.9 мкг/дм³ и 24.0 мкг/дм³ соответственно, что связано как с локальным техногенным воздействием, так и с природными процессами вторичного высвобождения загрязнителей из донных отложений. Содержание цинка, никеля, свинца и кадмия в большинстве случаев соответствовало фоновому уровню. Установлено наличие локальных зон повышенного накопления металлов и их биоаккумуляции в тканях рыб.

По статье:
Получено: 23.09.2025
Пересмотрено: 03.10.2025
Принято: 04.10.2025
Опубликовано:08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные экологические исследования подчеркивают необходимость комплексного подхода к оценке загрязнения природных систем, особенно в условиях индустриально освоенных регионов. В восточной части Казахстана, где сосредоточены крупнейшие горнодобывающие и металлургические предприятия страны, вопросы охраны водных экосистем приобретают стратегическое значение. Загрязнение тяжелыми металлами рассматривается как один из наиболее серьезных факторов экологического риска, поскольку данные элементы обладают высокой токсичностью, устойчивостью к разложению, способностью к миграции в различных средах и к биоаккумуляции в тканях гидробионтов [1..3]. При этом поверхностные воды играют двойную роль: они служат транспортирующей средой для загрязнителей и одновременно становятся объектом их аккумуляции, поскольку значительная часть соединений металлов накапливается в донных осадках и живых организмах. В дальнейшем такие депонирующие компоненты способны выступать вторичным

Для цитирования:
Исмуханова Л., Султанбекова Б., Мұсақұлқызы А., Мадибеков А. Комплексная характеристика состояния Буктырминского водохранилища на основе многолетних наблюдений (2014...2025 гг.) // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 58-69.

источником загрязнения, особенно в условиях колебаний гидрологического режима [4...5].

Буктырминское водохранилище, образованное на р. Ертис, является одним из крупнейших водоемов Казахстана и ключевым гидротехническим объектом региона, который выполняет функции регулирования стока, водоснабжения, энергетического обеспечения и рыбохозяйственного использования. Вместе с тем водоем находится под влиянием как природных геохимических процессов, так и антропогенной нагрузки. Район характеризуется сочетанием активного горнодобывающего и металлургического производства, сельскохозяйственного освоения и урбанизации. В этих условиях водохранилище становится объектом поступления соединений меди, цинка, свинца, кадмия, хрома и других элементов, поступающих как с промышленными стоками, так и с атмосферными осадками и поверхностным стоком с урбанизированных территорий [6].

История изучения экосистемы Буктырминского водохранилища охватывает более полувека. Первые работы 1960...1970-х годов были посвящены ихтиофауне и рыбохозяйственной оценке. Вклад в исследование биологии промысловых рыб внесли Мартехов П.Ф., Ерещенко В.И., Федотова Л.А., Исмуханов Х.К., Кириченко О.И., Куликов Е.В. что позволили выявить изменения в составе и численности рыбных запасов в условиях гидротехнического регулирования стока и указывали на первые признаки воздействия антропогенных факторов на экосистему [7...17].

Параллельно развивались гидробиологические направления, охватывавшие изучение фитопланктона, зоопланктона, бентоса и перифитона. Вклад в эти исследования внесли Тютеньков С.К., Пильгук В.И., Козляткин А.Л., Баженова О.П. и Девятков В.И. и др. Данные работы показали, что изменения структуры сообществ напрямую связаны с антропогенным прессингом, включая поступление загрязнителей и изменение гидрологического режима [18...26].

С конца 1970-х годов все большее внимание уделялось гидрохимии и проблеме накопления тяжелых металлов. Работы Козляткина А.Л. и Мещеряковой Т.И. показали наличие превышений концентраций меди, цинка и свинца в отдельных зонах, особенно вблизи мест сброса сточных вод [21,23]. Баженова О.П. и Куликовой Е.В. выявила аккумуляцию свинца, меди, цинка и кадмия в донных отложениях, а также изменения состава бентоса, связанные с хроническим загрязнением. Современные исследования с применением атомно-абсорбционной спектрометрии и масс-спектрометрии позволили количественно подтвердить локальные геохимические аномалии [16,23]. Так, Тирская Н.А. показала накопление меди и цинка в органах рыб: содержание меди в мышцах доходило до 4.47 мг/кг, а цинка – до 14.6 мг/кг, что приближалось к санитарным нормативам, при этом в печени и жабрах концентрации были в 2...3 раза выше [27,28].

Современное состояние водоема характеризуется умеренным уровнем загрязнения в среднем по акватории, но при этом в ряде локальных зон зафиксированы концентрации меди и цинка, превышающие рыбохозяйственные нормативы в 1.2...2.1 раза. Наибольшая опасность заключается в способности донных отложений выступать вторичным источником загрязнения при изменении гидродинамических условий, а также в подтвержденном факте биоаккумуляции металлов в тканях рыб, что создает угрозу для трофических цепей и рыбохозяйственного использования [1,16,29,30].

Таким образом, история изучения Буктырминского водохранилища демонстрирует многолетнюю актуальность проблемы тяжелых металлов и комплексность воздействия на экосистему. Наличие локальных зон накопления загрязнителей и их перенос по пищевым цепям подтверждают необходимость системного мониторинга с использованием как химико-аналитических методов, так и биоиндикации. Целью настоящей статьи является обобщение многолетних данных о

гидрохимическом и токсикологическом состоянии Буктырминского водохранилища, выявление закономерностей распределения тяжелых металлов в воде, донных осадках и биоте, а также сопоставление полученных результатов с аналогичными исследованиями в других регионах Казахстана и мира для комплексной оценки экологических рисков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является Буктырминское водохранилище, расположенное в Восточном Казахстане, в бассейне р. Ертис. Водохранилище образовано строительством Буктырминской ГЭС, введенной в эксплуатацию в 1960 г. Площадь зеркала водоема, составляет около 5490 км², объем при нормальном подпорном уровне – 49.6 км³, длина водохранилища – более 400 км. Гидрологический режим определяется регулированием стока Верхнего Ертиса, поступлением вод из Бухтармы и многочисленных малых притоков. Благодаря крупным размерам и проточности, водохранилище сочетает черты речного и озерного типа, а в отдельных заливах и плесах формируются локальные застойные условия [6].

Мониторинг РГП «Казгидромет» в период 2014…2025 гг. охватывал пять стационарных створов, отражающих различные гидрологические и антропогенные условия:

- п. Новая Бухтарма – Пункт привязки 1.8 км (0.5 км протяженности водохранилища) от правого берега по А-250 от нефтебазы и от опорного геодезического пункта;
- с. Хрестовка – Пункт привязки 0.3 км (0.5 км протяженности водохранилища) по створу от левого берега в районе села Хрестовка;
- с. Куйган – Пункт привязки 1.8 км (0.9 км протяженности водохранилища) по створу от левого берега в районе села Куйган, вблизи нефтебазы;
- с. Хайрузовка – Пункт привязки 8.7 км (0.37 км протяженности водохранилища) по А-254 от устья реки Нарым в районе села Хайрузовка;
- Каракасское сужение – Пункт привязки 1 км (0.52 км протяженности водохранилища) от юго-восточного берега по А-120 от южной границы Нижний Каракас, подверженный влиянию течения и береговой эрозии [31].

В исследовании использовались статистические и расчетные методы на основе данных Казгидромета. В Microsoft Excel выполнялись обработка исходных данных и расчет средних значений. Такой подход обеспечил надежную интерпретацию данных и их наглядное представление.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические параметры

Анализ данных государственного мониторинга за 2014...2025 г., представленных РГП «Казгидромет», позволяет проследить многолетнюю динамику качества воды и оценить риски, связанные с содержанием токсичных элементов. Вода водохранилища служит источником хозяйственно-бытового, промышленного и рекреационного водопользования, поэтому понимание ее состояния имеет стратегическое значение.

За весь период наблюдений вода в Буктырминском водохранилище характеризовалась слабощелочной реакцией (таблица 1). Водородный показатель находился в диапазоне от 7.8...7.9 в начале периода до 8.2...8.4 в последние годы. Такая стабильность указывает на устойчивость биохимических процессов и сбалансированность карбонатной системы, формирующей кислотно-щелочной баланс воды. Щелочная реакция благоприятна для развития фитопланктона и зоопланктона, что подтверждается высокой биологической продуктивностью водоема, отмеченной в независимых исследованиях. При этом повышение pH в летний период связано с фотосинтетической активностью водорослей, а зимой

значения несколько ниже, что отражает снижение интенсивности биохимических процессов [32,33].

Содержание кислорода в воде варьировало от 7.2 мг/дм³ в неблагоприятные периоды до 13.0 мг/дм³ в условиях максимального насыщения. Средние значения находились на уровне 7.9...8.8 мг/дм³, что указывают на удовлетворительное состояние кислородного режима. Однако в летние месяцы в некоторых створах фиксировалось снижение содержания кислорода до 7.2...7.4 мг/дм³, что связано с повышением температуры и стратификацией водной массы. Несмотря на эти колебания, критического дефицита кислорода не отмечалось, что позволяет сделать вывод об отсутствии угрозы массовой гибели гидробионтов из-за низкого содержания кислорода [32,33].

Таблица 1

Средние многолетние гидрохимические параметры воды Буктырминского водохранилища (2014…2025 гг.)

Створ	pH	Растворенный кислород, мг/дм³	БПК₅, мг/дм³	ХПК, мг/дм³	Взвешенные вещества, мг/дм³	Минерализация, мг/дм³
Хрестовка	7.8	8.99	1.56	8.45	5.9	158
Каракасское сужение	7.9	8.77	1.95	8.84	12.4	169
Новая Бухтарма	8.0	8.45	1.83	9.09	11.6	185
Куйган	7.8	9.80	1.66	9.62	6.9	160
Хайрузовка (р. Нырым)	8.2	8.15	1.41	8.95	7.2	195

Средние значения биохимического потребления кислорода ($БПК_5$) в воде составили 1.4...1.9 мг/дм³, что указывает на низкий уровень органического загрязнения и локальные подъемы в районах Новой Бухтармы и Каракасского сужения. Химическое потребление кислорода (ХПК) варьировало в пределах 8.5...9.6 мг/дм³, отражая допустимый уровень загрязнения с повышением у Куйгана и Новой Бухтармы, где влияние хозяйственных факторов наиболее выражено.

Взвешенные вещества в среднем находились на уровне 4.0...9.0 мг/дм³, что соответствует умеренному загрязнению. Однако в отдельные годы отмечались аномально высокие значения: в 2013 г. до 69.0 мг/дм³, а в 2020 г. – до 86.0 мг/дм³, что связано с размывом берегов, ветровыми процессами и поступлением стока с прилегающих территорий. В остальные годы концентрации взвешенных веществ были в значительно малых концентрациях, что говорит о стабильности водного объекта.

Минерализация воды находилась в пределах от 160 до 206 мг/дм³, с высокими значениями до 270 мг/дм³, гидрокарбонатно-кальциевого типа вод, характерный для верхнего течения р. Ертис. Существенных изменений минерализации не выявлено, что говорит об устойчивости геохимического баланса, без существенного антропогенного воздействия.

Содержание тяжелых металлов

Медь на протяжении рассматриваемого периода характеризовалась достаточно стабильными уровнями (таблица 2). Средние концентрации за 2014...2025 гг. находились в диапазоне 1.2...1.9 мкг/дм³, что ниже предельно допустимых значений для рыбохозяйственных нормативов. Максимальные величины варьировали от 3.1 мкг/дм³ в Каракасском сужении до 4.5 мкг/дм³ в районе Новой Бухтармы и Хрестовки. Наиболее высокий значения зафиксированы в Хайрузовке, где содержание меди достигало 9.0 мкг/дм³. В пространственном распределении, наибольшие значения меди чаще встречаются в районах с интенсивной прибрежной деятельностью и в узких створах, где течение замедлено и происходят процессы накопления взвешенных частиц. Межгодовые изменения меди выражены слабо: в отдельные годы отмечались

колебания в пределах 0.5...1.0 мкг/дм³ относительно среднего уровня, но общая тенденция роста или снижения отсутствует. Таким образом, можно утверждать, что загрязнение медью происходит за счет антропогенной нагрузки.

Средние значения марганца в воде составляли 6.0...7.0 мкг/дм³, что соответствует низкому уровню загрязнения, однако в отдельные годы фиксировались значительно высокие значения. Так, в 2013 г. максимальное содержание достигало 24.0 мкг/дм³, в 2019 г. – 18.0 мкг/дм³, в 2023 г. – 12.0 мкг/дм³. Высокие значения марганца были зарегистрированы в 2019 г. в районе Хрестовки до 38.0 мкг/дм³. Характерно, что повышенные уровни марганца фиксировались преимущественно летом. В этот период происходило активное поступление металла из донных отложений в условиях снижения кислорода у дна и высокой температуры воды, что активизировало ранее накопленные соединения. Именно этот механизм объясняет устойчивые подъемы марганца у Куйгана и Хрестовки, где гидродинамика менее интенсивна и процессы донного высвобождения наиболее выражены. Наблюдается повторяемость летних максимумов в годы с жаркой погодой и низкой водностью. Зимой и весной, напротив, концентрации выравнивались по акватории и опускались до фоновых величин. Таким образом, марганец представляет собой элемент, содержание которого сильнее зависит от сезонных факторов и внутренних процессов водоема, чем от внешнего притока.

Таблица 2

Средние многолетние концентрации тяжелых металлов в воде (2014…2025 гг., мкг/дм³)

Створ	Cu	Zn	Ni	Mn	Cd	Pb
Хрестовка	1.64	1.77	0.04	7.22	следы	следы
Каракасское сужение	1.51	2.18	0.04	7.07	следы	следы
Новая Бухтарма	1.49	2.26	0.06	6.58	следы	следы
Куйган	1.67	1.96	0.07	7.04	следы	следы
Хайрузовка (р. Нырым)	1.53	2.35	0.20	6.69	следы	следы

Концентрации цинка были в пределах 2.0...3.0 мкг/дм³, что значительно ниже нормативных уровней. При этом зафиксированы значительные увеличения концентрации в 2017...2019 гг. до 15.0...38.0 мкг/дм³. у Хайрузовки и Куйгана и носили кратковременный характер, которое связано с поступлением загрязненных взвесей при паводках или с локальными хозяйственными воздействиями. В целом содержание цинка в среднем по акватории оставался в пределах нормативных значений.

Никель, как и цинк, определялся преимущественно на уровне следов. Среднее содержание по многолетним данным составило менее 1.0 мкг/дм³. В отдельные годы наблюдались кратковременные подъемы до 12.0...18.0 мкг/дм³, зафиксированные в 2017...2019 гг., но они не повторялись систематически и не формировали устойчивую тенденцию. В подавляющем большинстве случаев никель находился на уровне, близком к пределу обнаружения, что указывает на отсутствие стабильного источника его поступления в водоем.

Свинец за весь период наблюдений определялся в крайне малых концентрациях. Содержание не превышало 0.3 мкг/дм³ и чаще всего фиксировалось на уровне следов. Отсутствие значимых концентраций свинца позволяет сделать вывод, что данный элемент не оказывает заметного влияния на современное состояние водоема и не связан с устойчивым антропогенным сигналом.

Кадмий также характеризовался низкими уровнями. Средние концентрации составляли около 0.02 мкг/дм³, максимальные значения достигали 0.3 мкг/дм³ в 2025 г. Подобные величины соответствуют естественному фоновому уровню и не указывают на наличие значимого техногенного источника [34].

Пространственный анализ показывает, что Новая Бухтарма и Каракасское сужение чаще всего характеризуются повышенными значениями меди, что связано с деятельностью прибрежных объектов и замедленным водообменом. В районе Хайрузовки фиксировались максимальные значения по меди и цинку, что может быть связано с локальными источниками поступления и особенностями гидрологии. Куйган и Хрестовка стали участками с наиболее частыми летними подъемами марганца, что подтверждает их особую роль в формировании внутриводоемных процессов. В то же время в среднем по акватории уровни тяжелых металлов остаются в пределах допустимых значений, что указывает на локализованный характер превышений. Анализ пространственного распределения металлов показал, что верхний плес в районе Новой Бухтармы характеризуется повышенными значениями меди, тогда как марганец выше среднего уровня в зонах Куйгана и Хрестовки. Каракасское сужение выделяется как участок с высокими колебаниями как меди, так и взвешенных веществ, что связано с особенностями гидродинамики. Участок у Хайрузовки демонстрирует более стабильные показатели, что объясняется хорошим водообменом и меньшей антропогенной нагрузкой.

Влияние климатических факторов проявляется в межгодовой динамике. В многоводные годы (2014 и 2020 гг.) фиксировались максимальные значения взвешенных веществ и минерализации, что связано с повышенным размывом и поступлением стока. В засушливые годы (2018 и 2021 гг.) показатели были ниже средних значений, что отражает меньший размыв и уменьшение поступления загрязняющих веществ. Жаркие летние периоды сопровождались повышением pH и снижением кислорода, тогда как холодные зимние месяцы характеризовались максимальным насыщением воды кислородом.

Антропогенное воздействие на водоем проявляется прежде всего через промышленную нагрузку региона, т.к. Восточный Казахстан является крупным центром горнодобывающей и металлургической промышленности. Поступление меди, цинка и никеля может быть связано с деятельностью таких предприятий, как Ульбинский металлургический завод, «Казцинк», Риддерский горно-обогатительный комплекс, Риддерский металлургический завод, а также Зыряновский свинцово-цинковый комбинат и горнорудные предприятия Глубоковского района. Деятельность данных предприятий исторически сопровождается сбросом сточных вод, загрязненных медью, цинком, свинцом и никелем, а также образованием хвостохранилищ, которые продолжают служить источником миграции загрязнителей в поверхностные и подземные воды. Несмотря на то, что в последние годы средние концентрации тяжелых металлов в водохранилище остаются низкими, эпизодические подъемы, особенно по цинку и никелю, свидетельствуют о наличии техногенного влияния со стороны этих промышленных объектов и подтверждают необходимость регулярного контроля [35..37].

Сравнение состояния Буктырминского водохранилища с другими водоемами Казахстана показывает, что оно сохраняет относительно благополучное положение. В Капшагайском водохранилище концентрации меди находятся на уровне 1.0...3.0 мкг/дм³, марганца – 6.0...10.0 мкг/дм³, что сопоставимо с нашими результатами [4]. В Шульбинском водохранилище отмечались случаи снижения кислорода ниже 6.0 мкг/дм³, что свидетельствует о менее устойчивом режиме [38]. В Балкашском регионе фиксировались значительно более высокие концентрации цинка и никеля, что связано с деятельностью предприятий цветной металлургии [39]. В международном контексте показатели Буктырминского водохранилища близки к уровню водоемов Сибири и Центральной Азии и существенно ниже, чем в промышленных районах Китая и Европы, где концентрации меди и цинка могут превышать 10.0...20.0 мкг/дм³ [40,41].

Экологическое состояние водоема можно оценить как удовлетворительное. Несмотря на то, что концентрации большинства металлов находятся на низком

уровне, локальные и сезонные повышения меди и марганца могут представлять риск для гидробионтов. Особенно это касается летней стратификации, когда в придонных слоях снижается содержание кислорода, что может способствовать поступлению металлов из донных отложений. Такие процессы увеличивают вероятность накопления токсичных элементов в организмах и их дальнейшего распространения по пищевой цепи.

Для минимизации таких рисков необходимы дальнейшие исследования, включающие анализ донных осадков, биоаккумуляции металлов в гидробионтах и использование современных методов оценки качества воды. Важно расширить спектр наблюдений, включив новые пункты, особенно в районах повышенного хозяйственного использования. Также рекомендуется применение интегральных индексов загрязнения, которые позволяют комплексно оценивать состояние водоемов, учитывая совокупность химических и биологических показателей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ гидрохимического состояния Буктырминского водохранилища свидетельствует о сохранении общей устойчивости водной экосистемы при наличии отдельных признаков локальной и сезонной нагрузки. Водная масса характеризуется стабильной слабощелочной реакцией, диапазон минерализации остается в пределах 160...206 мг/дм³, а кислородный режим в среднем соответствует 7.9...8.8 мг/дм³, что отражает сбалансированность основных физико-химических параметров и способность водоема поддерживать высокую биологическую продуктивность.

Выявлено, что основными элементами токсикологического состояния водохранилища, являются медь и марганец в пределах 1.2...1.9 мкг/дм³ и 7.0...9.0 мкг/дм³, однако фиксируются устойчивые сезонные подъемы, приуроченные к летнему периоду и зонам со стратифицированной структурой водной толщи. Подобные процессы обусловлены, прежде всего, вторичным загрязнением металлами из донных отложений и могут усиливаться при снижении кислородного содержания в придонных слоях. Несмотря на то, что цинк, никель, свинец и кадмий фиксировались преимущественно на уровне пределов обнаружения, факт их периодического появления указывает на сохраняющийся риск поступления техногенных примесей в систему.

Локальные подъемы концентраций меди и марганца, особенно в районах Новой Бухтармы, Каракасского сужения и сел Куйган и Хрестовка, свидетельствуют о необходимости экологического контроля. В условиях климатической изменчивости, характеризующейся ростом температуры и изменением водности бассейна р. Ертис, роль подобных локальных очагов может возрастать, усиливая нагрузку на экосистему в целом.

Таким образом, Буктырминское водохранилище в настоящий момент сохраняет статус устойчивой водной экосистемы, обладающей высокой способностью к саморегуляции. Однако выявленные признаки локального напряжения свидетельствуют о необходимости превентивных мер, направленных на укрепление экологической безопасности водоема, что имеет критическое значение для устойчивого развития региона и сохранения водных ресурсов бассейна р. Ертис.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЛТИ; управление данными – ЛТИ, БМС; формальный анализ – ЛТИ, АМ; методология – ЛТИ, АМ; руководство –АСМ, ЛТИ; визуализация – ЛТИ, АСМ; написание исходного текста –ЛТИ, БМС; написание и редактирование окончательного текста – ЛТИ, БМС, АМ, АСМ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН AP26103691 «Экосистемная оценка загрязнения и устойчивости водной среды Буктырминского водохранилища с применением инновационных методов и разработкой рекомендаций по сохранению качество воды».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Elder John F. (1988). Metal biogeochemistry in surface-water systems. United States Government Printing Office, № I 19.4/2:1013, 50 p.
2 Тихомиров О.А., Марков М.В. Накопление тяжелых металлов в донных отложениях аквальных комплексов водохранилища сезонного регулирования стока // Ученые Записки Казанского Государственного Университета. – 2009. - Т. 151, кн. 3. – С. 143-152.
3 Jia Zh., Li Sh., Liu Q., Jiang F., Hu J. (2021). Distribution and partitioning of heavy metals in water and sediments of a typical estuary (Modaomen, South China): The effect of water density stratification associated with salinity. Environmental Pollution, Vol. 287, 117277. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117277
4 Ismukhanova, L., Choduraev T., Opp C., Madibekov A. (2022). Accumulation of Heavy Metals in Bottom Sedimentand Their Migration in the Water Ecosystem of Kapshagay Reservoir in Kazakhstan. Appl. Sci., 12, 11474. DOI: 10.3390/app122211474
5 Савинкова О.В. О взаимосвязи гидрологического и гидрохимического режимов Бухтарминского водохранилища. Гидрометеорология и экология. -2013. - № 1. – С. 137-144.
6 Алибаев К.У. Водохранилища на реке Иртыш Бухтарминское водохранилище (литературный обзор). ПК «Институт «Казгипроводхоз». Алматы, 2020. - 38 с.
7 Мартехов П.Ф. К ведению рыбного хозяйства на внутренних водоемах // Биологические основы рыбного хозяйства на водоемах Средней Азии и Казахстана. - 1966. - С. 25-27.
8 Ерещенко В.И., Тютеньков С.К. Результаты акклиматизационных работ в Бухтарминском и других водохранилищах Казахстана // Акклиматизация рыб и беспозвоночных в водоемах СССР. - 1968. - С. 228-237.
9 Ерещенко В.И. Особенности Бухтарминского водохранилища, влияющие на его рыбопродуктивность // Гидробиология и ихтиология. - 1969. - С. 134-147.
10 Федотова Л.А. Пути повышения эффективности Бухтарминского НВХ // Биологические основы рыбного хозяйства водоемов Средней Азии и Казахстана. - 1978. - С. 429-431.
11 Исмуханов Х.К. Рациональное использование кормовых ресурсов и повышение рыбопродуктивности Бухтарминского водохранилища // Водоемы Сибири и перспективы их рыбохозяйственного использования. - 1973. - С. 131-133.
12 Исмуханов Х.К. Формирование рыбных запасов Бухтарминского водохранилища под воздействием акклиматизационных мероприятий и других факторов // Известия ГосНИОРХ. - 1980. - Т. 152. - С. 12-22.
13 Кириченко О.И. К вопросу о восстановлении численности аборигенных видов рыб Бухтарминского водохранилища // Охрана окружающей среды и природопользование Прииртышья. - 1990. - С. 153-154.
14 Куликов Е.В. Пространственное и сезонное распределение концентраций рыб в Бухтарминском водохранилище // Экосистемы водоемов Казахстана и их рыбные ресурсы. - 1997. - С. 15-21.
15 Куликов Е.В. Влияние гидрологического режима реки Черный Иртыш на формирование рыбных запасов // Биологические науки Казахстана. – 2005. - № 2. - С. 30-35.
16 Куликова Е.В., Тирская Н.А. Особенности накопления и перераспределения тяжелых металлов в органах и тканях рыб Бухтарминского водохранилища // Гидрометеорология и экология. - 2009. - № 2. - С. 144-152.
17 Тютеньков С.К. Краткий обзор рыб и беспозвоночных, акклиматизированных на водоемах Казахстана. А-Ата, 1963.
18 Тютеньков С.К., Козляткин А.Л. Акклиматизация кормовых беспозвоночных в Бухтарминском водохранилище // Рыбные ресурсы водоемов Казахстана и их использование. – 1974. - Вып. 8. – С. 90-92.
19 Пильгук В.Я. Формирование зоопланктона Бухтарминского водохранилища в первые годы его наполнения // Биологические основы рыбного хозяйства на водоемах Средней Азии и Казахстана. – 1966. - С. 297-298.
20 Пильгук В.Я. Динамика планктона и бентоса Бухтарминского водохранилища в период его наполнения, Балхаш, 1973.
21 Козляткин А.Л., Мещерякова Т.И. Гидролого-гидрохимическая характеристика Бухтарминского водохранилища // Известия ГосНИОРХ. – 1980. - Вып. 152. - С. 3-12.
22 Козляткин А.Л., Тютеньков С.К., Шендрик Л.Л. Количественное развитие и распределение зообентоса Бухтарминского водохранилища // Водоемы Сибири и перспективы их рыбохозяйственного использования. – 1973. - С. 188-190.
23 Мещерякова Т.И. Сезонная динамика биогенных элементов и первичной продукции в озерной части Бухтарминского водохранилища // Биологические основы рыбного хозяйства водоемов Средней Азии и Казахстана. - 1978. – С. 109-111.
24 Баженова О.П. Сезонное развитие фитопланктона Бухтарминского водохранилища // Биологические основы рыбного хозяйства водоемов Средней Азии и Казахстана. -1978. - С. 23-25.
25 Баженова О.П., Куликов Е.В. Изменение фитопланктона Бухтарминского водохранилища // Актуальные проблемы экологии и охраны окружающей среды: матер, междунар. науч. конфер. Тольятти, 2004. - С. 193-198.
26 Девятков В.И. Развитие зоопланктона в Бухтарминском водохранилище в весенне-летний период // Биологические основы рыбного хозяйства водоемов Средней Азии и Казахстана. - 1986. – С. 51-52.
27 Тирская Н.А. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов в органах и тканях мирных видов рыб из горной части Бухтарминского водохранилища // Гидрометеорология и экология. -2012. - № 1. - С. 179-184.
28 Колесников В.А., Бойченко Н.Б. Динамика накопления соединений тяжелых металлов в органах и тканях разных видов рыб, обитающих в пределах одной водной экосистемы // Вестник КрасГАУ. – 2012. - № 8. -С. 93-104.
29 В акватории Бухтарминского водохранилища обнаружено превышение предельно-допустимой концентрации вредных веществ. [Электронный ресурс]. URL: https://matritca.kz/old/news/2001-v-akvatorii-buhtarminskogo-vodohranilischa-obnaruzheno-prevyshenie-predelno-dopustimoy-koncentracii-vrednyh-veschestv.html (дата обращения 17.07.2025 г.)
30 Решетняк О.С., Закруткин В.Е. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2016. - №4. - С. 1-8. (URL: https://cyberleninka.ru/article/n/donnye-otlozheniya-kak-istochnik-vtorichnogo-zagryazneniya-rechnyh-vod-metallami-po-dannym-laboratornogo-eksperimenta).
31 Гидрологическая база Казахстана (Казгидромет) «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». Доступно онлайн: http://ecodata.kz:3838/app_hydro/ (дата обращения: 17 июля 2025 г.).
32 Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометиздат, 1970. – 112 с.

33 Zhensikbayeva N., Saparov K., Kabdrakhmanova N., Atasoy E., Yeginbayeva A., Abzeleeva K., Bakin S., Sedelev V., Amangeldy N. (2024). An Assessment of the Construction and Hydrographic Conditions of Bukhtarma and Ust-Kamenogorsk Reservoirs in the East Kazakhstan Region for 2017–2021. Sustainability, 16, 10348. DOI: 10.3390/su162310348
34 Информационный бюллетень о состоянии окружающей среды по Восточно-Казахстанской и Абайской областям (Казгидромет). Усть-Каменогорск, 2024. - № 4. - 40 с.
35 Адрышев А.К., Сагынганова И.К. Источники загрязнения тяжелыми металлами рек Иртыш и Ульба // Вестник ВКГУ. Экология. – 2008. - № 3. - С. 110-114.
36 Мукажанов Т.А. Экологические проблемы и состояние заболеваемости злакачественными новообразованиями в северно-восточном индустриальном и южном регионах Республики Казахстан // Вестник ВКГУ. Экология. – 2008. - № 3. - С. 120-126.
37 Егорина А.В., Логиновская А.Н. Экологические аспекты использования прибрежной территории Бухтарминского водохранилища // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. - № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-aspekty-ispolzovaniya-pribrezhnoy-territorii-buhtarminskogo-vodohranilischa (дата обращения: 17.07.2025).
38 Тирская Н., Куликова Е. (2023). Особенности гидрохимического режима Шульбинского водохранилища // Гидрометеорология и экология. – 2023. -№1. – С. 129-136.
39 Кунанбаева Г.С., Романова С.М. Распределение тяжелых металлов в континентальных озерах под влиянием антропогенных факторов // Наука и техника Казахстана. – 2002. - №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-tyazhelyh-metallov-v-kontinentalnyh-ozerah-pod-vliyaniem-antropogennyh-faktorov (дата обращения: 17.07.2025).
40 Liao W., Zheng Y., Feng C. (2023). An often-overestimated ecological risk of copper in Chinese surface water: bioavailable fraction determined by multiple linear regression of water quality parameters. Environ Sci Eur 35, 84. DOI: 10.1186/s12302-023-00792-7
41 Popescu F., Trumi´c M., Cioabla A.E., Vuji´c B., Stoica V., Trumi´c M., Opris C., Bogdanovi´c G., Trif-Tordai G. (2022). Analysis of Surface Water Quality and Sediments Content on Danube Basin in Djerdap-Iron Gate Protected Areas. Water, 14, 2991. DOI: 10.3390/w14192991

REFERENCES

1 Elder J. F. (1988). Metal biogeochemistry in surface-water systems. United States Government Printing Office, No. I 19.4/2:1013, 50 p.
2 Tikhomirov O.A., Markov M.V. (2009). Nakoplenie tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyakh akval'nykh kompleksov vodokhranilishcha sezonnogo regulirovaniya stoka [Accumulation of heavy metals in bottom sediments of aquatic complexes of a seasonal flow regulation reservoir]. Uchenye Zapiski Kazanskogo Gosudarstvennogo Universiteta, 151(3), pp. 143–152 [in Russian]
3 Jia Zh., Li Sh., Liu Q., Jiang F., Hu, J. (2021). Distribution and partitioning of heavy metals in water and sediments of a typical estuary (Modaomen, South China): The effect of water density stratification associated with salinity. Environmental Pollution, 287, 117277. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117277
4 Ismukhanova, L., Choduraev, T., Opp, C., Madibekov, A. (2022). Accumulation of heavy metals in bottom sediments and their migration in the water ecosystem of the Kapshagay Reservoir in Kazakhstan. Applied Sciences, 12, 11474. https://doi.org/10.3390/app122211474
5 Savinkova O.V. (2013). O vzaimosvyazi gidrologicheskogo i gidrokhimicheskogo rezhimov Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [On the relationship between the hydrological and hydrochemical regimes of the Bukhtarma Reservoir]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 1, pp. 137–144. [in Russian]
6 Alibaev K.U. (2020). Vodokhranilishcha na reke Irtysh: Bukhtarminskoe vodokhranilishche (literaturnyi obzor) [Reservoirs on the Irtysh River: Bukhtarma Reservoir (literature review)]. PC “Institut Kazgiprovodkhoz”, Almaty, 38 p. [in Russian].
7 Martehov P.F. (1966). K vedeniyu rybnogo khozyaistva na vnutrennikh vodoemakh [On the management of fisheries in inland waters]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva na vodoemakh Srednei Azii i Kazakhstana, Alma-Ata, pp. 25–27 [in Russian]
8 Ereshchenko V.I., Tyutenkov S.K. (1968). Rezul'taty akklimatizatsionnykh rabot v Bukhtarminskom i drugikh vodokhranilishchakh Kazakhstana [Results of acclimatization work in the Bukhtarma and other reservoirs of Kazakhstan]. In: Akklimatizatsiya ryb i bespozvonochnykh v vodoemakh SSSR, Moscow, pp. 228–237 [in Russian]
9 Ereshchenko V.I. (1969). Osobennosti Bukhtarminskogo vodokhranilishcha, vliyayushchie na ego ryboproduktivnost’ [Features of the Bukhtarma Reservoir affecting its fish productivity]. In: Gidrobiologiya i ikhtiologiya, Dushanbe, pp. 134–147 [in Russian]
10 Fedotova L.A. (1978). Puti povysheniya effektivnosti Bukhtarminskogo NVKh [Ways to improve the efficiency of the Bukhtarma fishery]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva vodoemov Srednei Azii i Kazakhstana, Frunze, pp. 429–431 [in Russian]
11 Ismukhanov Kh.K. (1973). Ratsional'noe ispol'zovanie kormovykh resursov i povyshenie ryboproduktivnosti Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Rational use of feed resources and increase in fish productivity of the Bukhtarma Reservoir]. In: Vodoemy Sibiri i perspektivy ikh rybokhozyaistvennogo ispol'zovaniya, Tomsk, pp. 131–133 [in Russian]
12 Ismukhanov Kh.K. (1980). Formirovanie rybnykh zapasov Bukhtarminskogo vodokhranilishcha pod vozdeistviem akklimatizatsionnykh meropriyatii i drugikh faktorov [Formation of fish stocks in the Bukhtarma Reservoir under the influence of acclimatization measures and other factors]. Izvestiya GosNIORKh, 152, pp. 12–22 [in Russian]
13 Kirichenko O.I. (1990). K voprosu o vosstanovlenii chislennosti aborigennykh vidov ryb Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [On the issue of restoring the abundance of native fish species in the Bukhtarma Reservoir]. In: Okhrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie Priirtysh'ya, Ust-Kamenogorsk, pp. 153–154 [in Russian]
14 Kulikov E.V. (1997). Prostranstvennoe i sezonnoe raspredelenie kontsentratsii ryb v Bukhtarminskom vodokhranilishche [Spatial and seasonal distribution of fish concentrations in the Bukhtarma Reservoir]. In: Ekosistemy vodoemov Kazakhstana i ikh rybnye resursy, Alma-Ata, pp. 15–21 [in Russian]
15 Kulikov E.V. (2005). Vliyanie gidrologicheskogo rezhima reki Chernyi Irtysh na formirovanie rybnykh zapasov [Influence of the hydrological regime of the Black Irtysh River on the formation of fish stocks]. Biologicheskie nauki Kazakhstana, 2, pp. 30–35 [in Russian]
16 Kulikova E.V., Tirskaya N.A. (2009). Osobennosti nakopleniya i pereraspredeleniya tyazhelykh metallov v organakh i tkanyakh ryb Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Features of accumulation and redistribution of heavy metals in the organs and tissues of fish in the Bukhtarma Reservoir]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 2, pp. 144–152 [in Russian]
17 Tyutenkov S.K. (1963). Kratkii obzor ryb i bespozvonochnykh, akklimatizirovannykh na vodoemakh Kazakhstana [A brief review of fish and invertebrates acclimatized in the water bodies of Kazakhstan]. Alma-Ata [in Russian]
18 Tyutenkov S.K., Kozlyatkin A.L. (1974). Akklimatizatsiya kormovykh bespozvonochnykh v Bukhtarminskom vodokhranilishche [Acclimatization of forage invertebrates in the Bukhtarma Reservoir]. In: Rybnye resursy vodoemov Kazakhstana i ikh ispol'zovanie, Alma-Ata, 8, pp. 90–92 [in Russian]

19 Pil'guk V.Ya. (1966a). Formirovanie zooplanktona Bukhtarminskogo vodokhranilishcha v pervye gody ego napolneniya [Formation of zooplankton in the Bukhtarma Reservoir during the first years of filling]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva na vodoemakh Srednei Azii i Kazakhstana, Alma-Ata, pp. 297–298 [in Russian]
20 Pil'guk V.Ya. (1973). Dinamika planktona i bentosa Bukhtarminskogo vodokhranilishcha v period ego napolneniya [Dynamics of plankton and benthos in the Bukhtarma Reservoir during its filling period]. Balkhash [in Russian]
21 Kozlyatkin A.L., Meshcheryakova T.I. (1980). Gidrologo-gidrokhimicheskaya kharakteristika Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Hydrological and hydrochemical characteristics of the Bukhtarma Reservoir]. Izvestiya GosNIORKh, 152, pp. 3–12 [in Russian]
22 Kozlyatkin A.L., Tyutenkov S.K., Shendrik L.L. (1973). Kolichestvennoe razvitie i raspredelenie zoobentosa Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Quantitative development and distribution of zoobenthos in the Bukhtarma Reservoir]. In: Vodoemy Sibiri i perspektivy ikh rybokhozyaistvennogo ispol'zovaniya, Tomsk, pp. 188–190 [in Russian]
23 Meshcheryakova T.I. (1978). Sezonnaya dinamika biogennykh elementov i pervichnoi produktsii v ozernoi chasti Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Seasonal dynamics of biogenic elements and primary production in the lake part of the Bukhtarma Reservoir]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva vodoemov Srednei Azii i Kazakhstana, Frunze, pp. 109–111 [in Russian]
24 Bazhenova O.P. (1978). Sezonnoe razvitie fitoplanktona Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Seasonal development of phytoplankton in the Bukhtarma Reservoir]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva vodoemov Srednei Azii i Kazakhstana, Frunze, pp. 23–25 [in Russian]
25 Bazhenova O.P., Kulikov E.V. (2004a). Izmenenie fitoplanktona Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Changes in phytoplankton of the Bukhtarma Reservoir]. In: Aktual'nye problemy ekologii i okhrany okruzhayushchei sredy: Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Togliatti, pp. 193–198 [in Russian]
26 Devyatkov V.I. (1986). Razvitie zooplanktona v Bukhtarminskom vodokhranilishche v vesenne-letnii period [Development of zooplankton in the Bukhtarma Reservoir during the spring-summer period]. In: Biologicheskie osnovy rybnogo khozyaistva vodoemov Srednei Azii i Kazakhstana, Ashkhabad, pp. 51–52 [in Russian]
27 Tirskaya N.A. (2012). Soderzhanie i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v organakh i tkanyakh mirnykh vidov ryb iz gornoi chasti Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Content and distribution features of heavy metals in the organs and tissues of peaceful fish species from the mountain part of the Bukhtarma Reservoir]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 1, pp. 179–184 [in Russian]
28 Kolesnikov V.A., Boichenko N.B. (2012). Dinamika nakopleniya soedinenii tyazhelykh metallov v organakh i tkanyakh raznykh vidov ryb, obitayushchikh v predelakh odnoi vodnoi ekosistemy [Dynamics of accumulation of heavy metal compounds in the organs and tissues of different fish species inhabiting a single aquatic ecosystem]. Vestnik KrasGAU, 8, pp. 93–104 [in Russian]
29 Matritca.kz (2025). V akvatorii Bukhtarminskogo vodokhranilishcha obnaruzheno prevyshenie predel'no dopustimoi kontsentratsii vrednykh veshchestv [In the water area of the Bukhtarma Reservoir, an excess of the maximum permissible concentration of harmful substances was detected]. [Electronic resource]. URL: https://matritca.kz/old/news/2001-v-akvatorii-buhtarminskogo-vodohranilischa-obnaruzheno-prevyshenie-predelno-dopustimoy-koncentracii-vrednyh-veschestv.html (date of access 17.07.2025) [in Russian]
30 Reshetnyak O.S., Zakrutkin V.E. (2016). Donnye otlozheniya kak istochnik vtorichnogo zagryazneniya rechnykh vod metallami (po dannym laboratornogo eksperimenta) [Bottom sediments as a source of secondary pollution of river waters with metals (based on laboratory experiment data)]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki, 4, pp. 1–8. [Electronic resource]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/donnye-otlozheniya-kak-istochnik-vtorichnogo-zagryazneniya-rechnyh-vod-metallami-po-dannym-laboratornogo-eksperimenta [in Russian].
31 Gidrologicheskaya baza Kazakhstana (2023). Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi [Annual data on the regime and resources of surface waters]. Kazhydromet. [Electronic resource]. URL: http://ecodata.kz:3838/app_hydro/ (date of access 17 July 2025)
32 Alekin O.A. (1970). Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, p. 112 [in Russian]
33 Zhensikbayeva N., Saparov K., Kabdrakhmanova N., Atasoy E., Yeginbayeva A., Abzeleeva K., Bakin S., Sedelev V., Amangeldy N. (2024). An assessment of the construction and hydrographic conditions of Bukhtarma and Ust-Kamenogorsk Reservoirs in the East Kazakhstan Region for 2017–2021. Sustainability, 16, 10348. https://doi.org/10.3390/su162310348
34 Informatsionnyi byulleten' o sostoyanii okruzhayushchei sredy po Vostochno-Kazakhstanskoi i Abaiskoi oblastyam (Kazhydromet) (2024). Informatsionnyi byulleten' o sostoyanii okruzhayushchei sredy, 4, 40 p., Ust-Kamenogorsk [in Russian]
35 Adryshev A.K., Sagynganova I.K. (2008). Istochniki zagryazneniya tyazhelymi metallami rek Irtysh i Ul'ba [Sources of heavy metal pollution in the Irtysh and Ulba rivers]. Vestnik VKGU. Ekologiya, 3, pp. 110–114 [in Russian]
36 Mukazhanov T.A. (2008). Ekologicheskie problemy i sostoyanie zabolevaemosti zlokachestvennymi novoobrazovaniyami v severno-vostochnom industrial'nom i yuzhnom regionakh Respubliki Kazakhstan [Environmental problems and cancer morbidity in the northeastern industrial and southern regions of the Republic of Kazakhstan]. Vestnik VKGU. Ekologiya, 3, pp. 120–126 [in Russian]
37 Egorina A.V., Loginovskaya A.N. (2015). Ekologicheskie aspekty ispol'zovaniya pribrezhnoi territorii Bukhtarminskogo vodokhranilishcha [Ecological aspects of using the coastal territory of the Bukhtarma Reservoir]. Interekspo Geo-Sibir', 2. [Electronic resource]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskie-aspekty-ispolzovaniya-pribrezhnoy-territorii-buhtarminskogo-vodohranilischa (date of access 17.07.2025) [in Russian]
38 Tirskaya N., Kulikova E. (2023). Osobennosti gidrokhimicheskogo rezhima Shul'binskogo vodokhranilishcha [Features of the hydrochemical regime of the Shulbinsk Reservoir]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 1, pp. 129–136. (in Russian).
39 Kunambaeva G.S., Romanova S.M. (2002). Raspredelenie tyazhelykh metallov v kontinental'nykh ozerakh pod vliyaniem antropogennykh faktorov [Distribution of heavy metals in continental lakes under the influence of anthropogenic factors]. Nauka i tekhnika Kazakhstana, 2. [Electronic resource]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/raspredelenie-tyazhelyh-metallov-v-kontinentalnyh-ozerah-pod-vliyaniem-antropogennyh-faktorov (date of access 17.07.2025) [in Russian]
40 Liao W., Zheng Y., Feng C., et al. (2023). An often-overestimated ecological risk of copper in Chinese surface water: bioavailable fraction determined by multiple linear regression of water quality parameters. Environmental Sciences Europe, 35, 84. https://doi.org/10.1186/s12302-023-00792-7
41 Popescu F., Trumić M., Cioabla A. E., Vujić B., Stoica V., Trumić M., Opris C., Bogdanović G., Trif-Tordai G. (2022). Analysis of surface water quality and sediment content in the Danube Basin in the Djerdap-Iron Gate Protected Areas. Water, 14, 2991. https://doi.org/10.3390/w14192991

БҰҚТЫРМА СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН КӨПЖЫЛДЫҚ БАҚЫЛАУЛАР НЕГІЗІНДЕ КЕШЕНДІ СИПАТТАМАСЫ (2014...2025 ЖЖ.)

Лаура Т. Исмуханова PhD, Ботакоз М. Султанбекова, Айнур Мұсақұлқызы т.ғ.к., Азамат С. Мадибеков қауымдастырылған профессор, PhD

«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; l--aura@bk.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, mus_ain@mail.ru (AM), madibekov@mail.ru (ACM)
*Автор корреспондент: Ботакоз М. Султанбекова, sultanbekova_botakoz@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Бұқтырма су қоймасы, ауыр металдар, гидрохимиялық жағдай, экологиялық бағалау, биоаккумуляция, мониторинг

Мақала жайында:
Жіберілді: 23.09.2025
Қайта қаралды: 03.10.2025
Қабылданды: 04.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Ертіс өзенінің жоғарғы ағысындағы ең ірі су нысаны болып табылатын Бұқтырма су қоймасы Шығыс Қазақстанның су шаруашылық кешенінде маңызды рөл атқарады: гидроэнергетика, ағынды реттеу, сумен жабдықтау және балық шаруашылығы функцияларын ұштастырады. Өңірдегі тау-кен өндіру және металлургия өнеркәсібінің қарқынды дамуы тұрақты, миграциялық қабілеті жоғары әрі биоаккумуляцияға бейім ауыр металдардың экожүйеге түсуімен қатар жүреді.

Жұмыста РМК «Қазгидромет» мемлекеттік мониторингінің 2014...2025 жж. деректері, сондай-ақ су, түптік шөгінділер және гидробионттарды зерттеуге арналған отандық және шетелдік зерттеулердің нәтижелері жинақталды. Су қоймасының гидрохимиялық көрсеткіштері жалпы тұрақты: су реакциясы әлсіз сілтілі, оттегінің режимі қанағаттанарлық, минералдануы – орташа. Токсикологиялық бейінді негізінен мыс пен марганец қалыптастырады, жекелеген жылдары олардың концентрациялары сәйкесінше 3,9 мкг/дм³ және 24,0 мкг/дм³-қа жеткен; бұл жергілікті техногендік әсермен қатар түптік шөгінділерден ластағыштардың екінші реттік высвобождениесі сияқты табиғи үдерістермен де байланысты. Мырыш, никель, қорғасын және кадмий мөлшерлері көп жағдайда фондық деңгейге сәйкес келеді. Металдардың жоғары жиналуының жергілікті ошақтары мен олардың балық тіндерінде биоаккумуляциясы анықталды.

COMPREHENSIVE CHARACTERIZATION OF THE STATE OF THE BUKHTARMA RESERVOIR BASED ON MULTI-YEAR OBSERVATIONS (2014...2025)

Laura Ismukhanova PhD, Botakoz Sultanbekova, Ainur Musakulkyzy Candidate of Technical Sciences, Azamat Madibekov Associate Professor, PhD

JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; l--aura@bk.ru, sultanbekova_botakoz@mail.ru, mus_ain@mail.ru, madibekov@mail.ru
*Corresponding author: Botakoz Sultanbekova, sultanbekova_botakoz@mail.ru

KEY WORDS

Bukhtarma Reservoir, heavy metals, hydrochemical status, ecological assessment, bioaccumulation, monitoring

ABSTRACT

The Bukhtarma Reservoir, the largest water body in the upper course of the Irtysh River, plays a key role in the water-management complex of East Kazakhstan, combining hydropower generation, flow regulation, water supply, and fisheries. The intensive development of the region's mining and metallurgical industries is accompanied by inputs of heavy metals into the ecosystem-substances notable for persistence, mobility, and a propensity for bioaccumulation.

About article:
Received: 23.09.2025
Revised: 03.10.2025
Accepted: 04.10.2025
Published: 08.10.2025

This study synthesizes state monitoring data from RSE «Kazhydromet» for 2014...2025 together with national and international research on water, bottom sediments, and aquatic organisms. Ehe reservoir's hydrochemical parameters are generally stable: the water exhibits a slightly alkaline pH, an adequate dissolved-oxygen regime, and moderate mineralization (TDS). Copper and manganese are the main elements shaping the toxicological profile; in certain years their concentrations reached 3.9 μg/dm³ and 24.0 μg/dm³, respectively-linked both to localized technogenic impacts and to natural processes of secondary remobilization from bottom sediments. Zinc, nickel, lead, and cadmium mostly remained at background levels. Localized hotspots of elevated metal accumulation and bioaccumulation in fish tissues were identified.

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

FUTURE WAVE HEIGHT DYNAMICS IN THE KAZAKH PART OF THE CASPIAN SEA

Serik Sairov Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Aizat Yeltay PhD, Galina Shishkina, Aigerim Kurmangalieva, Laura Bazarbay*, Nurganym Zhagparova

RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; sairov_s@meteo.kz (SS), eltai_a@meteo.kz (AY), shishkina_g@meteo.kz (GSh), kurmangalieva_a@meteo.kz (AK), bazarbay_l@meteo.kz (LB), zhagparova_n@meteo.kz (NZh)
* Corresponding author: Laura Bazarbay, bazarbay_l@meteo.kz

KEY WORDS

Caspian Sea,
wave,
wave height,
zoning maps

ABSTRACT

The development of oil and gas fields in the Caspian region, year-round navigation at sea, and the need to preserve biodiversity have led to a growing interest in comprehensive studies of the Caspian Sea, including wind disturbance. This study aims to investigate the process of wind waves at sea and calculate its spatial and temporal changes in the future based on numerical modeling using the SWAN spectral-wave model. Calculations of wave height projection into the future up to 2050 using climate model data from the NEX-GDDP-CMIP6 dataset for two greenhouse gas emission scenarios showed that up to 2050 the maximum wave heights can vary from 1.1 m to 4.0 m at SSP1-2.6 with the highest values in 2023, 2029, 2042; from 1.3 m to 4.1 m at SSP5-8.5 with the highest values in 2029, 2033, 2050. In the Kazakhstan part of the sea, significant and strong waves are possible in the future (for the period 2022...2050). Because by 2050 the wave height may reach 6 m in the Middle Caspian Sea it is necessary to build protective dams in the areas of oil fields and settlements, as well as strengthening and reconstruction of previously built.

About article:
Received: 24.09.2025
Revised: 04.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

1. INTRODUCTION

Wind-driven waves dominate movements in the marine environment and are a major factor affecting coastal populations, ecosystems, coastal infrastructure and maritime activities, including oil field development and shipping [1,2]. Storms can generate strong waves and currents, which in turn affect the location and strength of surf waves [3, 4].

Coastal areas are subject to the combined action of several factors: sea level changes, increasing frequency of natural phenomena and coastal degradation. The development of technical means for the exploitation of offshore waters (oil and gas production), the marine fleet and the need to preserve biodiversity have led to a growing interest in a comprehensive study of the Caspian Sea, including hydrometeorological processes.

In this context, information on hazardous and natural hydrometeorological phenomena, such as gale force winds, high waves, sea level rise and fall, etc., is required when carrying out work at sea, when designing open water and coastal structures, in order to ensure the safe navigation of the civil and military fleet.

All calculations related to wave parameters are hampered by the lack of long-term observational series, which in turn are carried out visually, and therefore the various wave characteristics are mainly determined by statistical or numerical modelling.

The aim of this work is to analyze the process of wind waves in the Caspian Sea and to predict their spatial and temporal changes in the future based on numerical modelling.

In economic, transport and infrastructure terms, the Caspian Sea region is of strategic interest to the Caspian littoral states. In Kazakhstan, the port of Aktau was built on the coast in 1963 and the port of Kuryk in 2014. The oil and gas industry are developing successfully

For citation:
Sairov S., Yeltay A., Shishkina G., Kurmangalieva A., Bazarbay L., Zhagparova N. Future wave height dynamics in the Kazakh part of the Caspian Sea// Гидрометеорология и экология, №4 (119), 2025, 70-83.

and there are three major oil and gas fields in Kazakhstan: Tengiz, Karachaganak and Kashagan.

Forecasting ocean and sea waves is a very difficult task in coastal and water engineering in general due to their high degree of randomness. Several authors, especially scientists from the Caspian countries, have studied wave processes in the Caspian Sea, such as Abuzyarov Z.K. [5…7], Nesterov E.S. [8], Lopatukhin L.I. [9], Myslenkov S.A. [10], Arkhipkina V.S. [11], Lebedev S.A. [12], Kostyanoy A.G. [13], etc.

According to some research, modern methods of numerical modelling, their development and an increase in the amount of remote sensing data make it possible to analyze the dynamic processes occurring in the Caspian Sea quite accurately [14…18], including wave processes.

Studies conducted by Dobrovolsky A.D. and Zalogin B.S. on various hydrometeorological characteristics of the Caspian Sea have determined that periods of high waves exceeding 6 points are observed from November to March [19].

According to data from the Kazhydromet observation network, the highest waves in the Kazakh part of the Caspian Sea, reaching 4.5 m, were recorded in Aktau [20]. Studies conducted by Kazakhstan specialists for the waters near the port of Aktau in 2017…2018 showed that the average wave height reaches 1 m, and the maximum wave height reaches 4 m [21].

Numerous researchers have adapted hydrodynamic and wave models for the Caspian Sea waters [21...29]. The automated system of wind wave prediction for the Caspian, Black and Azov Seas, developed at the Russian Hydrometeorological Centre, is based on the software code of the WaveWatch III spectral model. It has shown a sufficiently high prediction quality, comparable with another foreign systems [25...26]. Bruneau N. and Toumi R. [27] carried out wave calculations on the coupled ocean-atmosphere-wave system using WRF, ROMS and SWAN. The results showed that multimode wave states are observed in the Caspian Sea. For example, weak waves less than 50 cm in height are common in the northern part and are directed to the east and west. Rusu E., Onea F. [28] modelled the wave characteristics using ERA-Interim wind reanalysis for 2005-2010, the result of which showed that the maximum wave heights are formed in the central part of the sea, so in the water area adjacent to Kazakhstan the maximum wave height reached 2.84 m.

In 2014, R.M. Mammadov developed the Hydrometeorological Atlas of the Caspian Sea [30], and in 2015, the Russian Geographical Society of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University developed the Electronic Atlas of the Caspian Sea, which includes oceanographic research (water temperature, salinity, ice conditions, wave climate). According to the Atlas, there are several areas in the Caspian Sea where the highest waves form throughout the year: near the Absheron Peninsula and the central part of the Southern Caspian, as well as in the eastern part of the Middle Caspian [31].

The purpose of this work is to perform numerical calculations and determine wave height values for the Kazakh part of the Caspian Sea.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Description of study area

The Caspian Sea is the largest enclosed body of water in the world, located at the junction of Europe and Asia. Its shores are bordered by the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan, Turkmenistan, the Islamic Republic of Iran, and the Republic of Azerbaijan [24].

The main orographic units of the coast are in the north - the pre-Caspian lowland, and in the west - the mountains of the Eastern Precaucasus and the Greater Caucasus, with a narrow coastal lowland [32,33]. The sea is divided into three parts: the shallow northern part (with an average depth of less than 10 m), the middle part (up to 788 m), and the southern part, which is the deepest, with a maximum depth of 1025 m [33].

The size of the Caspian Sea depends on fluctuations in sea level, which are determined by the characteristics of the water balance [34]. According to calculations for 2023, with an average sea level of minus 28.87 m BS [35], the sea area was 357 900 km^2, and the water volume amounted to 77 675 km^3. The catchment area of the sea is 3.1 million km2, of which about 30 % is in the undrained areas [36]. The Caspian Sea is fed by more than 130 rivers (including Volga, Zhaiyk, Terek, Kura, etc.), which together supply about 270…300 km^3 of water annually [28…33]. The Volga River alone accounts for about 80–85% of the inflow, making it the dominant factor in the water balance [37...38].

The Caspian Sea spans several climatic zones: the north is characterized by a sharply continental climate, whereas the south is influenced by subtropical conditions. The mean annual air temperature ranges from 6...8 °C in the north to 14...16 °C in the south. Precipitation varies from less than 200 mm along the eastern coasts to more than 1700 mm in the mountainous regions of the west and south. Annual evaporation from the sea surface exceeds river inflow, rendering the hydrological balance highly sensitive to climate change [36].

Wind regimes play a decisive role in wave generation. In the northern and eastern Caspian, strong northerly and north-easterly winds dominate, often exceeding 15...20 m/s during storms. In the central and southern parts, winds are more variable, contributing to the development of long-fetch waves. During winter, the northern Caspian freezes, with ice thickness reaching 40...70 cm, whereas the central and southern parts remain ice-free [36].

2.2. Datasets

Changes in wave height in coastal waters were analyzed using data from the national monitoring network. At present, visual changes in wave height are monitored at 7 marine stations in Kazakhstan: Kulaly Island, Fort-Shevchenko, Saura, Aktau, Isan, Kuryk and Fetisovo [39] (Figure 1).

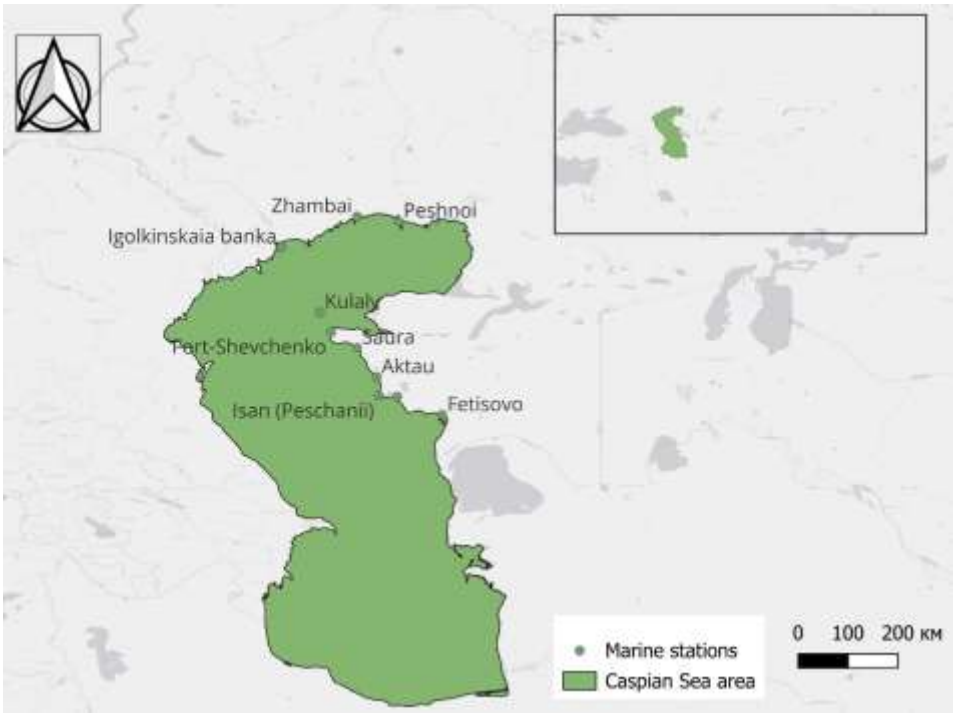


Figure 1. *Study area. Location of hydrological stations Kazakhstan marine observing network*

Qualitative data on bathymetry represents a crucial prerequisite for effective wave forecasting. In this study, the GEBCO bathymetry dataset was employed at a resolution of 450 m, encompassing 2648 depth measurements within the Caspian Sea region [40].

The quality of the wind fields is a determining factor in the outcome of wave modelling. The daily mean wind speeds were derived from climate model data of the NEX-GDDP-CMIP6 dataset, which consists of downscaled global climate scenarios (0.25° by 0.25° data resolution) derived from General Circulation Model runs conducted as part of the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6). Additionally, two greenhouse gas emission scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5) known as the socio-economic shared pathways (SSP) were incorporated into the analysis [41].

From the total NEX-GDDP-CMIP6 dataset of 35 models, 27 models consisting of daily average data for 365/366 days per year for two scenarios, SSP1-2.6 and SSP5-8.5, for the Caspian Sea area were selected for evaluation of wind speed variation and subsequent application to wind wave calculations (Table 1).

Table 1

Description of CMIP6 models

Model name	Simulation Centre, country	Horizontal resolution
TaiESM1	AS-RCEC (Taiwan)	0.9x1.25
NorESM2-MM	NorESM (Norway)	1.25◦× 0.942◦
NorESM2-LM	NorESM (Norway)	2.5◦× 1.895◦
NESM3	NUIST (China)	1.875◦× 1.865◦
MPI-ESM2-0	MRI (Japan)	1.125◦× 1.121◦
MPI-ESM1-2-LR	MPI (Germany)	1.875◦× 1.865◦
MPI-ESM1-2-HR	MPI (Germany)	0.9375◦× 0.935◦
MIROC6	MRI (Japan)	1.4◦× 1.4◦
MIROC-ES2L	MRI (Japan)	2.8125◦× 2.79◦
KIOST-ESM	KIOST (Republic of Korea)	2.2 × 2.2
IPSL-CM6A-LR	IPSL (France)	2.5◦× 1.27◦
INM-CM5-0	INM (Russia)	1.5 × 2.0
INM-CM4-8	INM (Russia)	1.5 × 2.0
GISS-E2-1-G	GISS (USA)	2.0° × 2.5°
GFDL-ESM4	NOAA	1.0 × 1.3
FGOALS-g3	CAS (China)	2.3 × 2.0
EC-Earth3-Veg-LR	EC-EARTH (Netherlands/Ireland)	0.7 × 0.7
EC-Earth3	EC-EARTH (Netherlands/Ireland)	0.7 × 0.7
CanESM5	CCCma (Canada)	2.8125◦× 2.79◦
CNRM-ESM2-1	CNRM (France)	1.4 × 1.4
CNRM-CM6-1	CNRM (France)	1.4◦× 1.4◦
CMCC-ESM2-1	CNRM (France)	1.4 × 1.4
CESM2	NCAR (USA)	1.25◦× 0.94◦
BCC-CSM2-MR	BCC (China)	2.8 × 2.8
ACCESS-ESM1-5	Beijing Climate Center	1.2 × 1.8
ACCESS-CM2	CSIRO (Australia)	1.25◦× 1.875◦
CMCC-CM2-SR5	CMCC (Italy)	1.25◦× 0.94◦

2.3 Methods

The third-generation SWAN spectral wave model [42...43], developed by Delft University of Technology (Netherlands), was used to calculate wind wave dynamics in the Caspian Sea.

In the linear wave model, the sea surface height is adequately represented by a stationary Gaussian process. The sea surface height at a given point in time can be expressed by the following equation (1):

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad (1)$$

where, η·- sea surface height, ai – amplitude of the i-th wave component, σi – relative frequency in radians or the circular frequency of the i-th wave component in the presence of the ambient current, αi– random phase of the i-th wave component [42,43].

The model is founded upon the resolution of the wave field energy balance equation in spectral space (2), and incorporates the non-linear interactions of the three waves.

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta c_x N}{\delta x} + \frac{\delta c_y N}{\delta y} + \frac{\delta c_\sigma N}{\delta \sigma} + \frac{\delta c_\theta N}{\delta \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2)$$

where, N – specific spectral density, x, y – spatial coordinates, t – time, σ – wave frequency, θ – wave angle, cσ,cθ - propagation velocity in spectral space, Stot– source function, which includes physical processes such as wave generation due to wind energies, nonlinear transfer of wave energy by harmonic interactions, wave reduction due to foam and splash formation, friction on the bottom and wave reversal at critical depth [42,43].

In the model, the significant wave height is defined as (3) [43]:

$$H_s = 4\sqrt{\iint E(\omega,\theta)d\omega d\theta} \quad (3)$$

where, E (ω, θ, σ) – dispersion density spectrum, ω – absolute frequency in radians, k – wave number.

The SWAN model is primarily dependent on two key input parameters: bathymetry and wind characteristics.

A comparison of CMIP6 model data with actual data on daily mean wind speed at stations along the Caspian Sea coast for the period 1995 to 2014 revealed that the modelled annual mean wind speeds are in close alignment with the actual data.

The statistical criterion for evaluating the accuracy or applicability of climate change projection data is as follows:

mean absolute error:

$$MAE = \frac{1}{N} - \sum|X - Y| \quad (4)$$

root mean square error:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(X - Y)^2} \quad (5)$$

efficiency coefficient:

$$E = 1 - \frac{\Sigma(x_i - y_i)^2}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

index of agreement:

$$d = 1 - \frac{\Sigma(x_i - y_i)^2}{\Sigma(y_i - \bar{x}) + (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

Based on wind data from CMIP6 models using the SWAN model, maximum wave height values were simulated for the Kazakh part of the Caspian Sea. For the period between 1995 and 2014, the maximum wave height ranged from 2.29 m (ACCESS-CM2) to 3.53 m (EC-Earth3) for Fort-Shevchenko and from 2.47 m (INM-CM4-8) to 4.59 m (EC-Earth3) for Aktau. Figure 2 presents a comparison between the maximum wave height based on actual data and calculated data using the ERA5 reanalysis and CMIP6 models.

The correlation coefficients between the actual and calculated values when applying these CMIP6 models exhibited fluctuations within the same limits for the selected stations. For Aktau, the fluctuation ranged from -0.8 to 0.8, while for Fort-Shevchenko, it ranged from -0.9 to 0.8.

The analysis of statistical evaluation criteria showed that MAE values range from ~0.6 to 1.5 m. The lowest MAE values are observed in the MRI-ESM2-0, MPI-ESM1-2-LR, and MIROC6 models, especially for the Fort Shevchenko and Aktau stations. The highest MAE

values (>1.3 m) are observed in the EC-Earth3 and ACCESS-ESM1-5 models, especially for Aktau.

The RMSE values range from 0.8 to 1.8 m. The lowest RMSE values are observed for MRI-ESM2-0, MPI-ESM1-2-LR, and MIROC6, confirming their better performance in reproducing wave characteristics.

The efficiency coefficient values are negative for almost all models, indicating that the modeling results are worse than simply using the mean of the observations. Higher values (less negative, closer to zero) are obtained for MRI-ESM2-0, MIROC6, and MPI-ESM1-2-LR, which confirms their relative advantage.

Among the models considered, the most stable and least erroneous results for maximum wave height are provided by MRI-ESM2-0, MIROC6, and MPI-ESM1-2-LR.

The observation station Fort-Shevchenko is better represented by the models, while Aktau shows the largest errors and the worst efficiency coefficients, which may be related to the more complex wave conditions in the southern Caspian Sea.

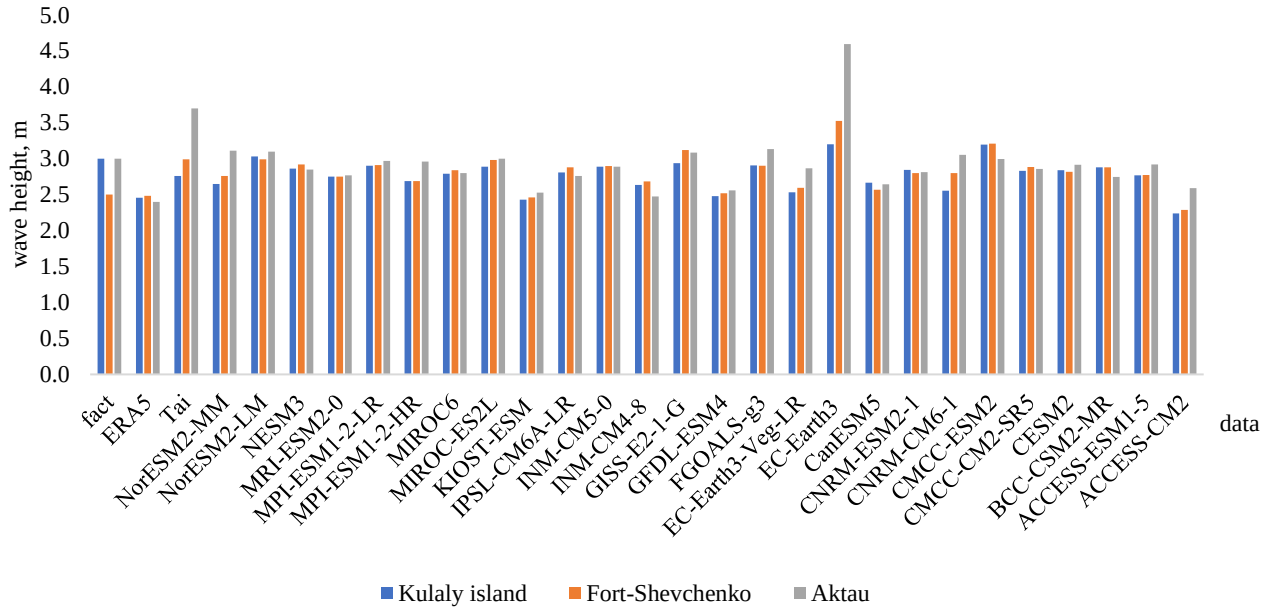


Figure 2. *Graph of actual and calculated maximum wave height for the period 1995...2014*

Following an analysis of the degree of correlation between observed and computed wave heights, it was determined that 13 models exhibited the highest correlation with the actual data: ACCESS-ESM1-5, BCC-CSM2-MR, CESM2, CNRM-CM6-1, CNRM-ESM2-1, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, INM-CM4-8, KIOST-ESM, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NESM3. It is important to note that coastal wave observations are made visually, rather than through the use of automated instruments.

In the context of offshore operations, the maximum wave height represents the most critical wave characteristic, as storm waves have the potential to inflict significant damage to coastal and offshore structures, in addition to ships at sea. Subsequently, projections of future wave height change up to 2050 were calculated for maximum wave heights under two climate change scenarios, SSP1-2.6 and SSP5-8.5, of the ensemble of 13 CMIP6 models.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the Kazakh part of the sea, the occurrence of waves with a height of 2 meters or above was documented on 265 occasions between the years 1980 and 2021. The predominant wave direction is westerly, occurring with a frequency of 30% over the course of the study period. It is noteworthy that the north-west and south-east directions also exhibited a notable frequency, at 26% and 25%, respectively [20, 21, 44].

The three most significant areas within the Kazakh section of the Caspian Sea, including Fort-Shevchenko, Aktau, Kuryk, were identified as being of particular importance with regard to the socio-economic sphere of the Mangistau and Atyrau regions of the Republic. In addition, these areas are home to a number of strategic maritime installations, including ports and hydropower stations.

The maximum wave heights from CMIP6 models off Fort Shevchenko for the future up to 2050 under the climate change scenario SSP1-2.6 were found to range from 1.1 m to 4.0 m (Figure 3). The highest values of 3.6 m in 2023 (CNRM-CM6-1) and 4.0 m in 2029 (NESM3) were observed. In the case of Fort Shevchenko, the maximum wave heights that can be expected from 2015 to 2050 under the SSP5-8.5 scenario range from 1.4 m to 3.4 m, with the highest values of 3.3 m in 2029 (MRI-ESM2-0), 2033 (KIOST-ESM) and 3.4 m in 2050 (MPI-ESM1-2-HR).



Figure 3. *Projection of maximum wave height to 2050 under scenarios a) SSP1-2.6 and b) SSP5-8.5*

The maximum wave heights for Aktau predicted by CMIP6 models for the future up to 2050 indicate that under the SSP1-2.6 climate change scenario, maximum wave heights may vary from 1.3 m to 3.6 m, with the highest values of 3.6 m in 2023 (CNRM-CM6-1), 2029 (NESM3), and 2042 (CESM2) (Figure 3). In the context of the SSP 5-8.5 scenario, the potential range of maximum wave heights is estimated to vary between 1.5 m and 4.1 m between 2015 and 2050. The highest values are projected to occur in 2029 (MRI-ESM2-0).

The maximum wave heights projected by CMIP6 models at Kuryk for the future to 2050 indicate that under the SSP1-2.6 climate change scenario, maximum wave heights could range from 1.3 m to 3.9 m, with peaks reaching 3.9 m in 2029 (Figure 3). (NESM3),

and under the SSP5-8.5 to 2050 scenario, maximum wave heights could vary from 1.4 m to 4.0 m, with maximum values of 4.0 m in 2029 (MRI-ESM2-0).

Figure 4 illustrates the projected spatial variation of maximum wave height in the Caspian Sea region for the 2023...2050 period. The distribution of wave height in the Caspian Sea area for the future, as projected by the SSP1-2.6 climate change scenario, indicated a mean wave height ranging from 0.65 m to 1.25 m with a mean value of 1.02 m. The maximum value was observed to range from 1.86 m to 5.58 m.

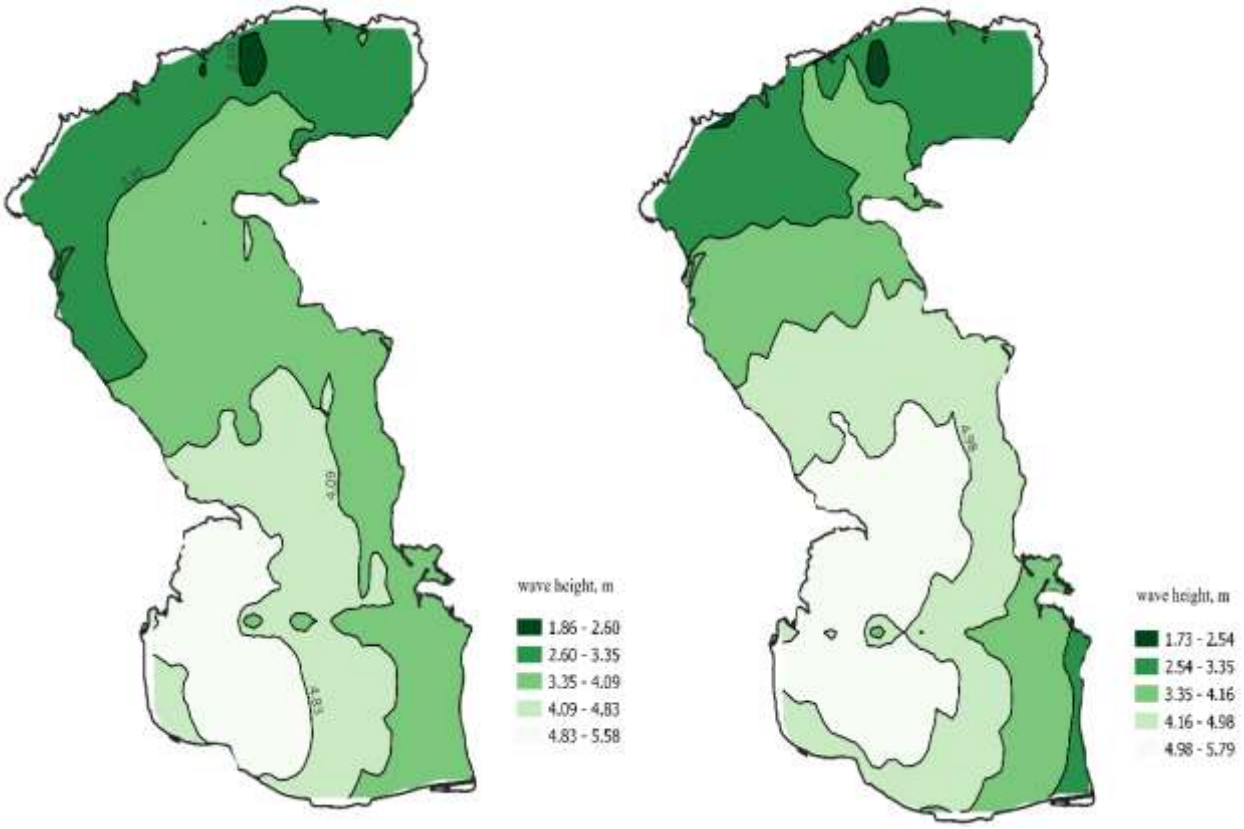


Figure 4. *Map of the distribution of maximum wave height based on the projection of SSP1-2.6 (left) and SSP5-8.5 (right) for 2023...2050*

In the Kazakhstan sector of the sea, the occurrence of substantial and robust waves is anticipated in the forthcoming period between 2023 and 2050. However, the highest wave heights are projected to be observed in the western region of the sea, in close proximity to the Azerbaijani coast and the Apsheron peninsula. Historical data indicates that this region is prone to intense and tumultuous winds, a consequence of its geographical location and orographic effect.

The mean wave height for future climate change projections at SSP5-8.5 in the Caspian Sea (Figure 4) is likely to be between 0.65 m and 1.2 m, with an average value of 0.99 m across the entire water area. The maximum wave height was found to be 5.79 m, with the smallest calculated maximum value being 1.73 m.

Under the SSP5-8.5 scenario, it is probable that the northeastern part of the sea will be subject to moderate to significant swell, while strong waves will spread in the eastern part.

The discrepancy between the maximum values under the two climate change scenarios is not substantial and exhibits no unidirectional trends.

The location of one of the state's strategic seabed areas in the Kazakh sector of the Caspian Sea provides a framework for ensuring the safety of offshore operations and preventing man-made emergencies [45]. It is imperative that the safety of offshore operations in the North Caspian Sea is guaranteed in accordance with the stipulations set forth in Chapter 19 of the Environmental Law of the Republic of Kazakhstan. This entails

ensuring the normal spawning run of fish, the preservation of birds in nesting areas and the population of the Caspian Sea [46].

Sea surface condition is defined in points, contains characteristics of the appearance of the water surface created by wind of different strengths.

The sea state is characterized, among other things, by the degree of swell. The scale of the degree of swell, depending on the maximum height, is subdivided from weak to exceptional swell up to 11 m [47].

The calculation and prediction of waves on large bodies of water is of significant practical importance. It is of great importance to be aware of the dimensions and characteristics of waves in a given area of sea or coastline, as this knowledge is fundamental to the navigation of maritime vessels, the design and operation of ships, the design and construction of various hydraulic structures on the shelf and along the coastline, whose activity is dependent on the sea state [47]. Of the various characteristics of waves, maximum wave height is of particular significance, as high waves present the greatest risk to navigation and to hydraulic and shelf structures. The speed of navigation of ships at sea is significantly affected by the height of waves and their direction of propagation, which in turn affects the economic performance of ships.

For the Kazakhstan sector of the Caspian Sea, due to the very rare recurrence of very strong and exceptional waves, the wave degree scale was adjusted to the maximum possible calculated wave heights presented in Table 2.

Table 2

Wave Degree Scale of the Kazakhstan Sector of the Caspian Sea

Wave height, m	Degree of wave	Points	Colour code of the area
1.0...2.0	Moderate	I	
2.0...3.0	Significant	II	
3.0...4.0	Significant	III	
4.0...5.0	Strong	IV	
5.0...6.0	Strong	V	

In this regard, maps of zoning of the water area of the Kazakhstan sector of the Caspian Sea by the degree of excitement for the future for the period 2022...2050 were constructed under two climate change scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (Figure 5).

The zoning maps were constructed on the basis of the "Atlas of zoning of seas and oceans for hydrometeorological support of maritime activities" [48], which includes the Caspian Sea zoning scheme, which includes the Caspian Sea zoning scheme. The boundary of the Kazakhstan part of the sea is drawn along the division points between the Caspian countries.

Due to shallow depths and sea level drop at present in the north-eastern part of the sea (area 4) it is conditionally agreeable that at this sea area the wind disturbance may not exceed 1...2 m and the degree of excitement will be moderate in I score.

The zoning map for the future (2022...2050) according to the SSP1-2.6 scenario showed that in districts 1...2, there is a significant wave of I, III and a strong wave of III, IV in districts 1...2. And in Area 3, significant swell of III is prevalent (Fig. 5 left).

In accordance with the projected climate change scenario SSP5-8.5, the following predictions can be made: in the first area, a strong swell of IV point and V point is to be expected; in the second area, a strong swell of IV point and a significant swell of III point are to be expected; in the third area, a significant swell of III point and a swell of III point are to be expected (Figure 5 right).

Table 3 presents the values of wave height variation by season. The least exposed to the influence of strong waves is spring, where, over the long-term retrospective period, the wave height in the Kazakhstan sector of the sea was between 1.1 m and 2.7 m. In the prospective period up to 2050, it did not exceed 2.05 m.

In summer, there is also significant swell, which did not exceed 1.7 m for 1959...2021, but projections for the future indicate that wave heights may reach a high wave level of 4 and 5.

The cold period of the year (autumn-winter) is the most susceptible to the influence of strong sea swell, mainly at 5 points, when the maximum wave height reached 3.2 m according to retrospective data. The results of climate change projection calculation showed that under the SSP1.25 scenario, the maximum wave height may reach 4.59 m, under SSP5-8.5 it may be 5.68 m and reach the upper limit of strong wave degree of 6 points.

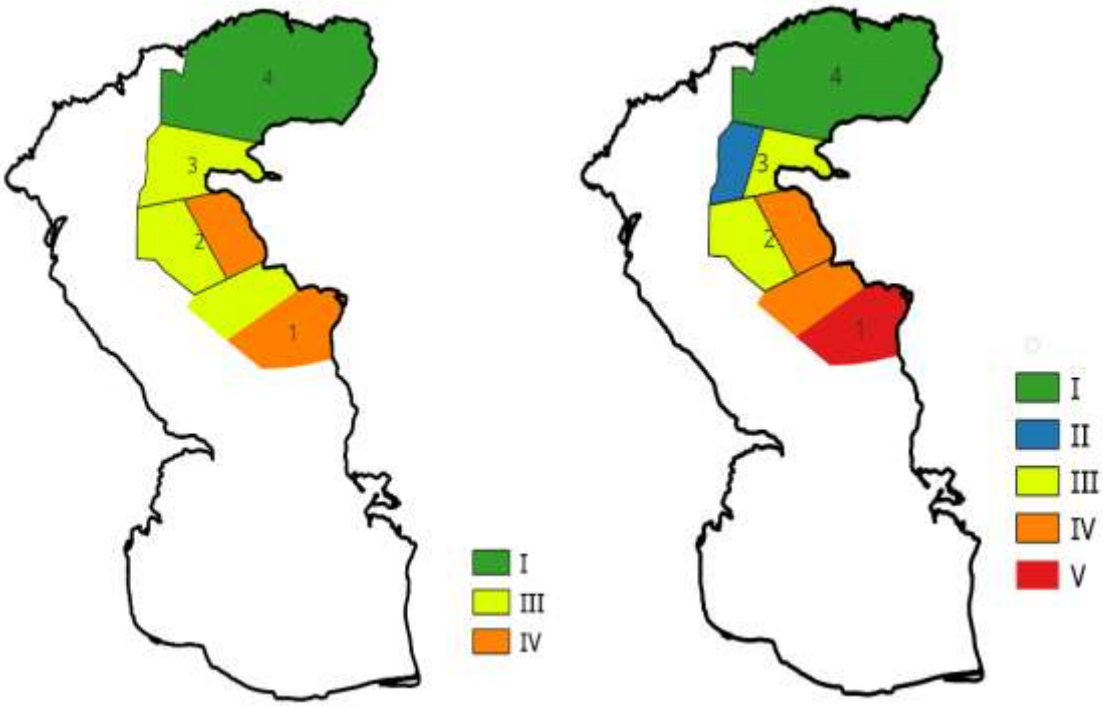


Figure 5. *Map of zoning of the Kazakh sector of the Caspian Sea by degree of wave according to climate change projections for 2023....2050 under scenarios SSP1-2.6 (left), SSP5-8.5 (right)*

4. CONCLUSION

At present, one of the main global threats to the security of the world's population is environmental problems, including the depletion of the ozone layer, global warming, the pollution of the world's oceans, the reduction of biological species, etc. [49]. In our region, the problem of the ecological state of the Caspian Sea, which washes the coasts of five countries, occupies a special place.

In order to mitigate the impact of man-made and natural emergencies on the coasts and waters of the Caspian Sea, it is imperative to consider the potential for significant wave height increases in the Middle Caspian Sea, which could reach 6 m by 2050. This necessitates the introduction of a special regime in areas prone to dangerous hydrometeorological phenomena, including tidal waves, strong waves, and storms. In the event of natural phenomena, the following measures should be taken:

1. Sites for the construction of structures at sea should be selected in accordance with the rules on the health protection of coastal waters.

2. When planning measures in the coastal zone, data on high and low water levels, as well as the maximum heights of rare future waves, should be obtained.

In order to prevent the effects of wave processes, it is necessary to construct protective dams in the areas of oil fields and settlements, as well as to reinforce and re-construct the existing dams.

DATA AVAILABILITY

The data used in this study were obtained by the authors from RSE Kazhydromet, Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) sources.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

Conceptualization – AY, SS; data curation – AY, GSh; formal analysis – AY, LB; methodology – AY, SS; software – AY, LB, AK, GSh; supervision – SS, AY; B **v**isualization -AY, AK, NZh; writing – original draft – AY, SS; writing – review & editing – AY, SS, LB.

Table 3

Variation of estimated maximum wave heights in the Kazakhstan sector of the Caspian Sea

№	Area	Wave height, m		
		Retrospective	SSP1-2.6	SSP5-8.5
		YEARLY		
1	Kuryk	2.63...2.91	3.10... 4.34	3.76... 5.11
2	Aktau	2.63...3.19	3.10... 4.34	3.08... 4.43
3	Fort-Shevchenko	2.63...3.19	3.10... 4.34	2.40... 3.76
4	North-East Caspian	1.50... 3.19	1.86... 4.34	1.73... 3.76
		WINTER		
1	Kuryk	2.2...2.9	2.64... 4.59	3.67... 5.68
3	Aktau	2.5...3.2	2.64... 4.59	2.67... 4.67
3	Fort-Shevchenko	2.9...3.2	2.64... 3.62	2.67... 3.67
4	North-East Caspian	1.5... 2.5	1.66... 3.62	1.66 ... 4.67
		SPRING		
1	Kuryk	2.1...2.7	1.21... 2.05	1.10... 1.85
2	Aktau	2.4...2.7	1.21... 2.05	1.10... 1.85
3	Fort-Shevchenko	2.1...2.7	1.21... 2.05	1.10... 1.85
4	North-East Caspian	1.1... 2.4	0.8... 2.05	0.73... 1.85
		SUMMER		
1	Kuryk	1.4...1.6	2.63... 4.60	3.73... 4.76
2	Aktau	1.4...1.6	2.63... 3.62	2.69... 4.76
3	Fort-Shevchenko	1.4...1.6	2.63... 3.62	2.69... 3.73
4	North-East Caspian	0.8... 1.6	1.65... 3.62	1.66... 3.73
		AUTUMN		
1	Kuryk	2.0...2.5	2.64... 4.59	3.67... 5.68
2	Aktau	2.0...2.5	2.64... 3.62	2.67... 4.67
3	Fort-Shevchenko	2.3...2.5	2.64... 3.62	2.67... 3.67
4	North-East Caspian	1.1... 2.3	1.66... 3.62	1.66... 4.67

REFERENCES

1 Ardhuin F., Orfila A. (2018). Wind waves. New Frontiers in operational oceanography, Chapter 14, pp. 393-422 doi:10.17125/gov2018.ch14.

2 Casas-Prat M., Hemer M.A., Dodet G., Morimm J., Wang X., Mori N., Young I., Erikson L., Kamranzad B., Kumar P., Menen-dez M., Feng Y. (2024). Wind-wave climate changes and their impacts. Nature Reviews Earth and Environment 5, 23–42. doi: 10.1038/s43017-023-00502-0

3 Zou Q, Chen H. (2017). Wind and Current Effects on Extreme Wave Formation and Breaking. Journal of Physical Oceanography, 47, 1817–1841. doi: 10.1175/JPO-D-16-0183.1

4 Chen H., Zou Q. (2022). Geometry of Deep and Intermediate Water Breaking Waves Influenced by Wind Speed and Direction. Physics of Fluids, 087126, 13. doi: 10.1063/5.0101943.

5 Abuzyarov Z.K. (1981). Sea swell and its forecasting. Hydrometeoizdat, 162 p. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-417193526.pdf [in Russian]

6 Abuzyarov Z.K., Shamraev Y.I. (1974). Marine hydrological information and forecasts. Hydrometeoizdat, 218 p. https://korobkaknig.ru/gumanitar_nauka/nauki_o_zemle/morskie-gidrologicheskie-informacii-i-prognozy-35051.html [in Russian]

7 Abuzyarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. (2009). Operational oceanographic service, IG-SOCIN, 288 p. https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/ocean-monogr.pdf [in Russian]
8 Nesterov E.S. (2015). Extreme waves in oceans and seas, IG-SOCIN, 64 p. https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/special/nao-nesterov.pdf [in Russian]
9 Lopatukhin L.I. (2019). Wind-wave climate of the Caspian Sea. Meteorological Research, 47 (5), 89-97. doi:10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).7 [in Russian]
10 Myslenkov S.A. (2017). Diagnosis and forecast of wind waves in the coastal zone of the Black Sea. Ph.D. Thesis, Moscow, Russia, 161 p. https://ipfran.ru/files/293/2017-myslenkov-diss.pdf [in Russian]
11 Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. (2022). Storm surges and storm wind waves in the Caspian Sea in the present and future climate. Civil Engineering Journal. Vol 8, №11. p. 2353-2377. doi: 10.28991/CEJ-2022-08-11-01
12 Lebedev S.A. (2014). Satellite altimetry of the Caspian Sea. Ph.D. Thesis, Moscow, Russia, 350 p [in Russian]
13 Lebedev S., Kostianoy A. (2006). Satellite altimetry of the Caspian Sea. Current problems in remote sensing of the Earth from space. Vol.3, No.2, P. 113–120. http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol2-113-120.pdf
14 . Lavrova O.Yu., Kostyanoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. (2011). Integrated satellite monitoring of the Russian seas. IKI RAS, 2011, p. 480. [in Russian]
15 Yaitskaya N.A. (2017). Retrospective analysis of wind waves in the Caspian Sea in the second half of XX - early XXI centuries and the relationship with regional manifestations of climate change. Geographical Bulletin, 2(41), 57-70. doi 10.17072/2079-7877-2017-2-57-70 [in Russian]
16 Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. (2019). Wave climate of the Caspian Sea. Wind input data for hydrodynamic modelling and some calculation results. Oceanology. 59 (1), 12-21. doi: 10.31857/S 0030-15745912-21
17 Lopatukhin L.I., Yaitskaya N.A. (2019). Data of reanalysis of wind fields over the Caspian Sea for calculation of the wind wave regime. Water Resources, 46 (6), 598-604. doi: 10.31857/S0321-0596466598-604
18 Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Pavlova A.V., Dobrolyubov S.A. (2018). Wave climate of the Caspian Sea based on modelling data. Meteorology and Hydrology, 10, 60-70. https://istina.msu.ru/publications/article/156853005/
19 Dobrovolskiy A.D., Zalogin B.S. (1982). Seas of the USSR. Moscow: Moscow State University Publ., 192 p. [in Russian]
20 Yeltay A., Ivkina N.I., Klove Bjorn (2019). Wind influence on wave height in the Kazakhstan part of the Caspian Sea. Central Asian Journal of Water Resources Research, 5 (1-2), 82-94. doi: 10.29258/CAJWR/2019-R1.v5-1/58-70.eng
21 Yeltay A., Ivkina N., Narbayeva K. (2023). Verification of the results of the SWAN model for the water area near port Aktau. GEOMATE Journal, 25 (109), 77-84. doi: 10.21660/2023.109.m2305
22 Yeltay A. (2019). Monitoring of wind waves on the Kazakhstani coast of the Caspian Sea.Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia, Irkutsk, June 5–7, 2019, pp. 172–178. [in Russian]
23 Mahmoudof D., Takami M. (2022). Numerical study of coastal wave profiles at the sandy beaches of Nowshahr (Southern Caspian Sea). Oceanologia Volume 64, Issue 3, July–September 2022. pp. 457-472.
24 Kamranzad D., Etemad-Shahidi A, Chegini V. (2016). Sustainability of wave energy resources in southern Caspian Sea. Energy Volume 97, 15 February 2016. pp. 549-559.
25 Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Martynov S.L. (2012). Verification of the Wind Wave Forecasting System for the Black, Azov and Caspian Seas. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. WCRP Informal Report № 5. CAS/JSC WGNE, Geneva: WMO, 2012. pp. 8.5–8.6. https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/zelenko/avtoreferat_zelenko.pdf
26 Strukov B.S., Zelenko A.A., Resnyansky Y.D., Martynov S.L. (2013). Wind wave characteristics forecasting system and the results of its testing for the Azov, Black and Caspian Seas. Information Collection № 40 New technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts and the results of their operational tests, pp. 64-79 https://meteoinfo.ru/images/misc/sovet/zelenko/avtoreferat_zelenko.pdf
27 Bruneau N., Toumi R. (2016). A fully-coupled atmosphere-ocean-wave model of the Caspian Sea. Ocean Modeling. Vol. 107, pp. 97-111. doi: 10.1016/j.ocemod.2016.10.006
28 Rusu E., Onea F. (2013). Evaluation of the wind and wave energy along the Caspian Sea. Energy, Vol. 20137, pp. 1-14 doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.11.044.
29 Ivkina N.I., Galaeva A.V. (2017). Forecasting of wind waves in the Caspian Sea using the SWAN model. Hydrometeorology and Ecology, 2 (85), 36-45. https://journal.kazhydromet.kz/index.php/kazgidro/article/view/1073
Mammadov R.M. (2014). Hydrometeorological atlas of the Caspian Sea. Baku [in Russian]
30 (2015). The electronic atlas of the Caspian Sea was developed with the support of the Russian Geographical Society. [Electronic resource]. URL: http://www.geogr.msu.ru/casp/ (date of access 10.10.2023)
31 Baidin S.S., Kosarev A.N. (1986). Caspian Sea: Hydrology and Hydrochemistry. Nauka, p. 261 [in Russian]
32 Kerimov A.A., Kosarev A.N., Terziev F.S. (1992). Project "Seas. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas". Volume VI Caspian Sea, Issue 1 Hydrometeorological conditions. Hydrometeoizdat, p. 358. https://www.geokniga.org/node/10916 [in Russian]
33 The Caspian Sea Lotiya, GUNiO (2016). p. 406. https://navysoft.ru
34 CASPCOM. Caspian Sea Level Information Bulletin No. 23 dated 13 May 2022 [Electronic resource]. URL: http://www.caspcom.com/files/CASPCOM%20Bulletin%20No.%2023_1.pdf. (date of access 15.06.2023)
35 Nesterov E.S. (2016). Water balance and Caspian Sea level fluctuations. Modelling and Forecasting, Triada. p. 378. http://www.caspianmonitoring.ru/wp-content/uploads/2018/08/8-Nesterov.pdf [in Russian]
36 Shiklomanov I.A. (1988). Land water resources research: results, problems, prospects, Hydrometeoizdat, p. 152. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-09056.pdf [in Russian]
37 Surface water resources of the USSR (1970). Issue 12, Lower Volga Region and Western Kazakhstan, Vol. 2. Ural-Embinsky district, Hydrometeoizdat, p. 510. http://www.cawater-info.net/library/ussr-water-resources.htm [in Russian]
38 Annual data on the regime of the Caspian Sea, Kazakhstan coast for 2020 (2022). RSE Kazhydromet, p. 61. https://www.kazhydromet.kz/en/kaspiyskoe-more/ezhegodnye-dannye-o-rezhime-kaspiyskogo-morya
39 GEBCO [Electronic resource]. URL: https://download.gebco.net/ (date of access 15.09.2021)
40 Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6) [Electronic resource]. URL: https://www.nasa.gov/nex/gddp. (date of access 01.02.2023)
41 SWAN user manual (2024). Netherlands: Delft University of Technology, 146 p. https://swanmodel.sourceforge.io/download/zip/swanuse.pdf
42 SWAN. Scientific and technical documentation (2024). Netherlands: Delft University of Technology, 168 p. https://swanmodel.sourceforge.io/download/zip/swantech.pdf
43 Yeltay A., Narbaeva K. (2023). Wind disturbance in the Kazakhstan part of the Caspian Sea. International Conference of Students and Young Scientists “Farabi əlemi”, 3 p. [in Russian]

44 Law on Subsoil and Subsoil Use of the Republic of Kazakhstan dated 27 December 2017 No. 125-VI [Electronic resource]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000125. (date of access 15.06.2023) [in Russian]
45 Environmental Law of the Republic of Kazakhstan dated 2 January 2021 No. 400-VI. [Electronic resource]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2100000400 (date of access 15.06.2023) [in Russian]
46 Bogoslovsky B.B. (1980). Waves, currents and water masses of reservoirs. Leningrad, p. 58. [in Russian]
47 Atlas of zoning of seas and oceans for hydrometeorological support of maritime activities (2009). OJSC "Fabrika Offsetnoy Print", p. 43. http://mgmtmo.ru/edumat/normdoc/28_48.pdf [in Russian]
48 Drobot G.A., Kochetkova E.V. (2009). Ecological problems as a global threat to security, Bulletin of Moscow University, Issue.18, Sociology and Political Science, No.3, p. 61-73. [in Russian]

КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ ҚАЗАҚСТАНДЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ БОЛАШАҚ ТОЛҚЫН БИІКТІГІНІҢ ДИНАМИКАСЫ

Серик Б. Саиров г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Айзат Ғ. Елтай PhD, Галина М. Шишкина, Айгерім Қ. Құрманғалиева, Лаура Б. Базарбай*, Нұрғаным Н. Жағпарова

«Казгидромет» РМК, Астана, Қазақстан; sairov_s@meteo.kz, eltai_a@meteo.kz, shishkina_g@meteo.kz, kurmangalieva_a@meteo.kz, bazarbay_l@meteo.kz, zhagparova_n@meteo.kz
*Автор корреспондент: Лаура Б.Базарбай, bazarbay_l@meteo.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Каспий теңізі;
толқын;
толқын биіктігі;
зоналау карталары

Мақала жайында:
Жіберілді: 24.09.2025
Қайта қаралды: 04.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды:08.10.2025

АБСТРАКТ

Каспий өңіріндегі мұнай-газ кен орындарын игеру, теңіздегі жыл бойы кеме қатынасының жүзеге асырылуы және биоалуантүрлілікті сақтау қажеттілігі Каспий теңізін кешенді зерттеуге, соның ішінде желдік толқындық құбылыстарды зерттеуге қызығушылықтың артуына себеп болды. Осы зерттеудің мақсаты – теңізде жел әсерінен толқындардың түзілу процесін зерттеу және олардың кеңістіктік пен уақыттық өзгерістерін болашақта сандық модельдеу негізінде бағалау. Бұл үшін спектралды-толқындық SWAN моделі қолданылды. 2050 жылға дейінгі толқын биіктігін болжау есептері NEX-GDDP-CMIP6 деректер жинағындағы климаттық модель нәтижелеріне сүйеніп, парниктік газдар шығарындыларының екі сценарийі бойынша жүргізілді. Есептеулер көрсеткендей, SSP1-2.6 сценарийі бойынша 2050 жылға дейін толқындардың ең жоғарғы биіктігі 1.1 м-ден 4.0 м-ге дейін өзгеруі мүмкін, ең жоғарғы мәндер 2023, 2029 және 2042 жылдары байқалады; SSP5-8.5 сценарийі бойынша ең жоғарғы толқын биіктігі 1.3 м-ден 4.1 м-ге дейін өзгеріп, ең жоғарғы мәндер 2029, 2033 және 2050 жылдары тіркелуі ықтимал. Қазақстандық бөлікте 2022...2050 жылдар аралығында айтарлықтай және күшті толқындардың пайда болуы мүмкін. 2050 жылға қарай Каспий теңізінің ортаңғы бөлігінде толқын биіктігі 6 метрге дейін жетуі ықтимал болғандықтан, мұнай кен орындары мен елді мекендер орналасқан аудандарда қорғаныс бөгеттерін салу, сондай-ақ бұрын салынғандарын нығайту мен қайта жаңғырту қажеттілігі туындайды.

ДИНАМИКА ВЫСОТЫ ВОЛН В БУДУЩЕМ В КАЗАХСТАНСКОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Серик Б. Саиров, к.г.н., ассоциированный профессор, Айзат Ғ. Елтай PhD, Галина М. Шишкина, Айгерім Қ. Құрманғалиева, Лаура Б. Базарбай*, Нұрғаным Н. Жағпарова

[1] РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан; sairov_s@meteo.kz, eltai_a@meteo.kz, shishkina_g@meteo.kz, kurmangalieva_a@meteo.kz, bazarbay_l@meteo.kz, zhagparova_n@meteo.kz
*Автор корреспондент: Лаура Б.Базарбай, bazarbay_l@meteo.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Каспийское море;
волна;
высота волны;
карты зонирования

АБСТРАКТ

Разработка нефтяных и газовых месторождений в Каспийском регионе, круглогодичное судоходство в море и необходимость сохранения биоразнообразия привели к росту интереса к комплексным исследованиям Каспийского моря, в том числе к изучению ветровых возмущений. Целью данного исследования является изучение процесса образования ветровых волн

в море и расчет их пространственных и временных изменений в будущем на основе численного моделирования с использованием спектрально-волновой модели SWAN. Расчеты прогноза высоты волн на период до 2050 года с использованием данных климатической модели из набора данных NEX-GDDP-CMIP6 для двух сценариев выбросов парниковых газов показали, что до 2050 года максимальная высота волн может варьироваться от 1.1 м до 4.0 м при SSP1-2.6 с максимальными значениями в 2023, 2029, 2042 годах; от 1.3 м до 4.1 м при SSP5-8.5 с максимальными значениями в 2029, 2033, 2050 годах. В казахстанской части моря в будущем (в период 2022…2050 гг.) возможны значительные и сильные волны. Поскольку к 2050 году высота волн в средней части Каспийского моря может достигать 6 м, необходимо построить защитные дамбы в районах нефтяных месторождений и населенных пунктов, а также укрепить и реконструировать ранее построенные.

About article:
Received: 24.09.2025
Revised: 04.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

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

ОЦЕНКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИ ПАВОДКАХ НА РЕКЕ ЖАЙЫК (УРАЛ)

Айгерим К. Калыбаева[*1], Саним Б. Бисенбаева [2] PhD

[1] ТОО Институт Ионосферы, Алматы, Казахстан; kalybayeva.aigerim@gmail.com (АКК)
[2] Казахский Национальный университет им.Аль-Фараби, Алматы, Казахстан; djusali@mail.ru (СББ)
*Автор корреспондент: Айгерим К. Калыбаева, kalybayeva.aigerim@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

паводки,
гидравлическое моделирование,
HEC-RAS,
зоны затопления,
дистанционное зондирование,
река Жайык

АБСТРАКТ

Наводнения на реке Жайык представляют серьёзную угрозу для природных экосистем и населения региона, что делает их исследование и прогнозирование особенно актуальными. В работе рассмотрены возможности применения гидравлического моделирования для определения зон затопления и оценки его достоверности с использованием современных данных наблюдений и дистанционного зондирования. Моделирование было выполнено в программном комплексе HEC-RAS 2D с применением гидрологических наблюдений и цифровой модели рельефа. Для проверки полученных результатов использовались спутниковые снимки высокого разрешения PlanetScope и данные беспилотных летательных аппаратов. Сравнение показало высокий уровень пространственного совпадения: пересечение смоделированных и фактических зон затопления составило 87 %, среднее расхождение по площади — 12.4 га, а средняя ошибка воспроизведения глубины паводковых вод не превышала 0.18 м. Результаты показали высокую степень согласованности расчётов с наблюдениями, что подтверждает эффективность применения гидравлического моделирования для анализа паводков. Полученные выводы имеют как научное, так и практическое значение. Использование интегрированного подхода на основе гидравлического моделирования, данных дистанционного зондирования и БПЛА открывает возможности для совершенствования систем мониторинга и прогнозирования паводков, а также для разработки мероприятий по снижению их последствий в бассейне реки Жайык.

По статье:
Получено: 02.10.2025
Пересмотрено:06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наводнения становятся всё более частыми и разрушительными, что связано как с изменением климата, так и с антропогенным воздействием [1,2]. Эти явления наносят значительный ущерб сельскому хозяйству, транспортной и инженерной инфраструктуре, жилым массивам и природным экосистемам, что подчёркивает необходимость разработки эффективных методов их оценки и прогнозирования [3...5].

Изменение климата приводит к учащению экстремальных осадков и ускоренному таянию снега в горных районах, усиливая вероятность наводнений и паводков [6...8]. В бассейнах, где основным источником питания рек служит снег, сочетание интенсивного таяния и обильных осадков в весенний период является ключевым фактором формирования высоких уровней половодья [9].

Гидравлические модели позволяют прогнозировать зоны затопления и глубину залегания воды, моделируя движение потока в руслах рек [10]. Система HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) [11] является одним из наиболее распространённых и надёжных инструментов для одномерного и

Для цитирования:
Калыбаева А., Бисенбаева С. Оценка моделирования зон затопления при паводках на реке Жайык (Урал) // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 84-94.

двумерного гидравлического моделирования. Она широко используется в практике анализа паводковых рисков и оценки последствий наводнений [12].

Бассейн реки Жайык отличается сложной морфологией – от горных заснеженных участков в верховьях до равнинных, извилистых русел в среднем и нижнем течении. Такая пространственная неоднородность требует проведения детальных гидрологических исследований и стратегического планирования водопользования. Рядом авторов проанализирована временная изменчивость стока реки Урал [13], а некоторые подчеркнули влияние температурных аномалий и грунтовых вод на гидрологический режим [14]. В дальнейшем определено влияние глобальных климатических изменений на речной сток [15].

Исследованы ежегодные, сезонные и месячные потребности в воде в различных секторах Казахстана, включая население, промышленность, сельское хозяйство и экосистемы, уделив особое внимание реке Урал в контексте устойчивого водопользования [16]. Проведен анализ экстремальной паводковой ситуации на реке Жайык, изучив гидрологические наблюдения и динамику волны половодья [17], а также проведен ретроспективный анализ многолетней изменчивости паводков, определивший вероятностные повторения экстремальных расходов воды и характерные уровни [18]. Выявлены тенденции сокращения годового стока и уменьшения амплитуды его колебаний на фоне роста температуры воздуха, что указывает на климатическое ослабление водных ресурсов бассейна [19].

Бассейн реки Жайык уязвим как к наводнениям, так и к засушливым периодам. С 1743 года здесь зафиксировано более 20 крупных паводков, включая события 1749, 1854, 1922, 1942, 1957, 1993, 2000 и 2005 годов [20]. Весной 2024 года произошло одно из наиболее разрушительных наводнений, приведшее к затоплению более 13 000 домов и эвакуации свыше 10 000 человек в районе города Уральск [21,22]. Масштаб катастрофы и её социально-экономические последствия подчёркивают необходимость углублённого изучения причин и механизмов формирования паводков в бассейне реки Жайык.

Настоящее исследование направлено на анализ гидрологических и антропогенных факторов, определяющих паводковую динамику в бассейне реки Жайык, с акцентом на разрушительное наводнение апреля 2024 года. Для этого применён метод гидравлического моделирования, позволивший оценить зоны затопления и проверить результаты по спутниковым данным. Особое внимание уделено влиянию интенсивности снеготаяния и водохозяйственных операций на формирование паводка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бассейн реки Жайык берёт начало в Уральских горах (Россия) и впадает в Каспийское море (Казахстан), занимая площадь 231 000 км². Около 36 % территории бассейна находится в пределах России, а 64 % - в Казахстане (рисунок 1). Высоты колеблются от уровня моря до 1100 м при среднем значении около 260 м. Средний уклон составляет около 3 %. В верховьях преобладают горные районы с крутыми склонами (более 10 %), ниже по течению рельеф становится более пологим и переходит в широкое плато. Территория бассейна преимущественно занята пахотными землями (около 45 %), пастбищами (28 %) и лесами (24 %).

Река Жайык отличается ярко выраженными фазами гидрологического режима, включая регулярные паводки. Она является главным водотоком региона и основным источником водоснабжения для населения, промышленности, сельского и рыбного хозяйства Западного Казахстана. Общая длина реки составляет 2428 км (из них 1706 км — в пределах России). Крупнейшие левобережные притоки — реки Орь (площадь водосбора 18.5 тыс. км²) и Илек (41.3 тыс. км², истоки в Казахстане); правобережный — Сакмара (30.2 тыс. км², исток в Башкортостане) [23, 24]. В пределах Казахстана в Жайык впадают притоки Елек, Орь, Утва, Шаган, Ембулатовка. С запада района

стекают Чижа 1-я, Чижа 2-я, Большой и Малый Узень, питающиеся с территории Саратовской области. На юге протекают реки Ойыл, Сагиз и Эмба (Жем), не имеющие постоянного устья и теряющие сток в песках [25].

Климат региона континентальный: холодная снежная зима, жаркое сухое лето и короткая весна с резкими переходами [26]. Среднегодовое количество осадков — около 320 мм. Среднегодовая температура — 5 °С (в дельте — 9.1 °С), с колебаниями от –40 °С (в январе) до +43 °С (в июле). Снежный покров сохраняется 4–5 месяцев в верхней и средней частях бассейна, но минимален в нижнем течении. Таким образом, бассейн реки Жайык характеризуется снежным типом водного режима.

Формирование экстремального паводка 2024 года на реке Жайык было обусловлено совокупным воздействием метеорологических и водохозяйственных факторов. По данным Гидрометцентра России, зимой 2023...2024 гг. в бассейне накопились аномально высокие запасы снега — до 120...130 % от среднегодовой нормы. Осенью 2023 года отмечалось повышенное увлажнение почв — в 2...3 раза выше нормы при глубоком промерзании (свыше 1 м) [26]. В начале апреля установилась устойчивая тёплая погода (до +10…+15 °С), что привело к интенсивному таянию снежного покрова и резкому увеличению объёма талых вод [27]. Существенное влияние оказали водохозяйственные операции: к началу половодья Ириклинское водохранилище имело ограниченную свободную ёмкость (около 579 млн м³), в результате чего сброс воды в начале апреля достиг 2000 м³/с [28]. Совпадение интенсивного снеготаяния с вынужденными сбросами стало ключевым фактором масштабного паводка 2024 года.

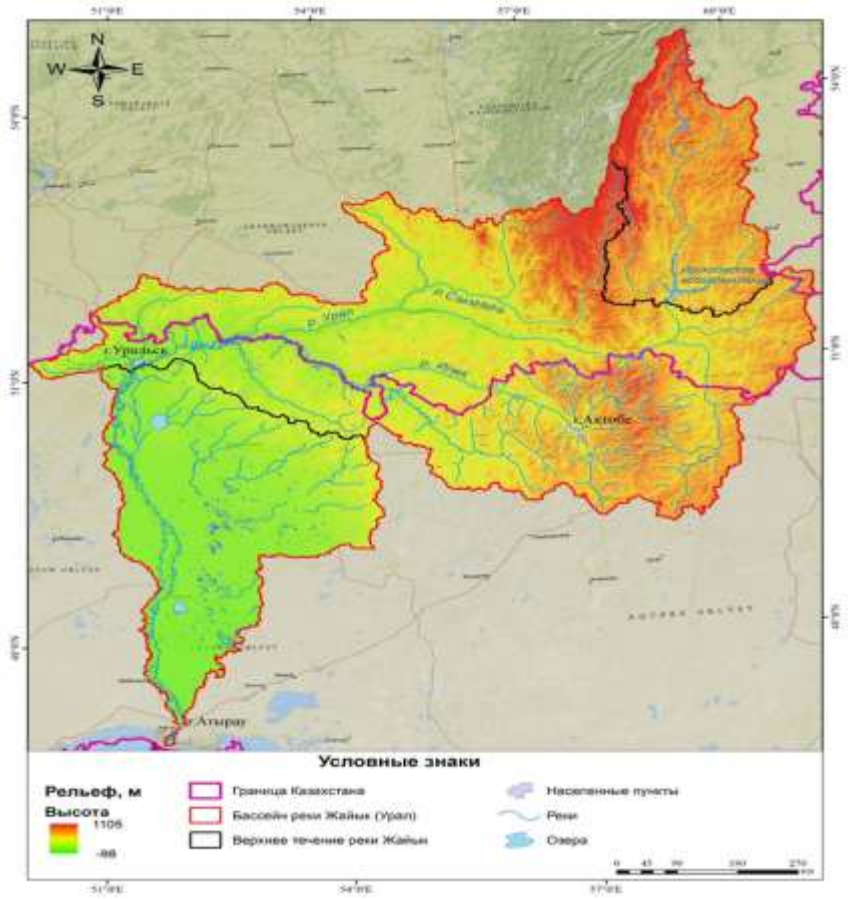


Рисунок 1. *Бассейн реки Жайык (Урал)*

Данные

В исследовании использовались данные дистанционного зондирования и гидрологические наблюдения. Пространственные данные включали цифровую

модель рельефа (DEM), информацию о растительном покрове и спутниковые изображения, фиксирующие последствия наводнения. Цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM DEM, NASA JPL, 2013) с разрешением 30 м обеспечила данные о топографии бассейна и морфологии русла, что стало основой для гидравлического моделирования.

Данные о растительном покрове из набора ESA WorldCover 2021 [29] использовались для задания коэффициентов шероховатости Мэннинга и более точного воспроизведения характеристик поверхности. Для калибровки и проверки модели применялись снимки высокого разрешения PlanetScope [30], позволившие построить карту фактического затопления, а также данные Gid360 о наблюдаемых глубинах паводковых вод [31].

Наблюдения за речным стоком, предоставленные РГП «Казгидромет» [32], использовались для калибровки и верификации результатов моделирования. Эти данные позволили воспроизвести паводковую ситуацию апреля 2024 года в бассейне реки Урал и сопоставить расчётные границы затопления с фактическими наблюдениями.

Методология

Гидравлическое моделирование применялось для оценки масштабов затопления и глубины воды во время наводнения в Уральске и его окрестностях в апреле 2024 года. Коэффициенты шероховатости поверхности, рассчитанные по Мэннингу на основе типов растительности, были преобразованы в значения русловой шероховатости по методу Коуэна.

Надёжность модели проверялась сравнением зон затопления и глубин воды с фактическими наблюдениями. Для визуальной оценки использовались спутниковые снимки высокого разрешения и водяные знаки, полученные с БПЛА.

Моделирование проводилось в среде HEC-RAS 2D (версия 6.6), основанной на решении уравнений мелкой воды и диффузионных волн, обеспечивающих сохранение массы и импульса. Первоначально использовалась сетка 50 м и метод диффузионной волны, однако такое разрешение оказалось недостаточным для точного отображения русла. В соответствии с рекомендациями руководства HEC-RAS 2D (USACE, 2025) была построена модель с уравнениями мелкой воды:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

где A - площадь поперечного сечения ($м^2$), Q - расход ($м^3/с$), x - расстояние вдоль направления потока (м), t - время (с), h - глубина свободной поверхности воды (м), g - ускорение свободного падения. ($м/с^2$), а S_f - угол трения (м/м).

Для более точного отображения русла разрешение сетки увеличено до 25 м. Чтобы избежать смещения направления потока и чрезмерных итераций, сетка была переориентирована вдоль тальвега, что повысило эффективность расчётов.

Коэффициенты шероховатости Мэннинга (n) были заданы для поверхности и канала. Значения n_surface определялись по данным ESA WorldCover 2021 [29] в зависимости от классов растительного покрова: древесный — 0.08; пастбища — 0.11; пахотные — 0.035; застроенные — 0.013; водоёмы — 0.04.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты гидравлической модели были проанализированы для оценки ее эффективности при валидации модели и сравнительном анализе на основе сценариев. Результаты моделирования HEC-RAS были использованы для определения зон затопления и глубин затопления. Первоначально валидация модели проводилась путем сравнения результатов моделирования с данными наблюдений.

Пространственная точность модели наводнения была оценена с использованием спутниковых снимков PlanetScope, в то время как смоделированные глубины затопления были проверены по водяным знакам, полученным с помощью снимков, сделанных с беспилотника Gid360.

Проверка гидравлической модели

Результаты модели HEC-RAS для события наводнения были пространственно сопоставлены со спутниковыми снимками PlanetScope для проверки достоверности. Площадь затопления, наблюдаемая на спутниковом снимке, составила 165.73 км^2, в то время как смоделированная площадь затопления составляла 155.35 км^2. Процентная разница между двумя значениями затопления была рассчитана как 6.26 %. Этот результат свидетельствует о том, что наблюдаемая площадь затопления во время наводнения хорошо согласуется с результатами модели HEC-RAS при аналогичных условиях, демонстрируя пространственную точность модели. На рисунке 2 показано совпадение зоны затопления, полученной в результате моделирования HEC-RAS (имитационный случай), и спутниковых снимков PlanetScope (наблюдаемый случай).

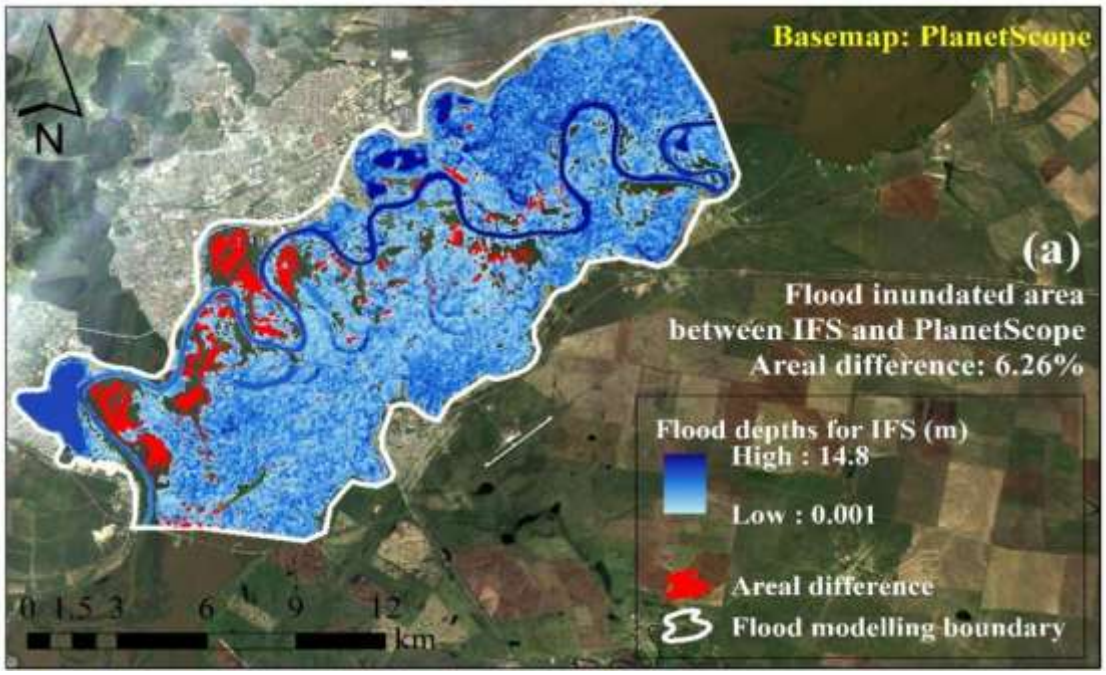


Рисунок 2. *Карта зон затопления*

Кроме того, были проанализированы глубины затопления в выбранных местах с использованием снимков наводнения, сделанных с помощью беспилотника Gid360 в разные даты. Снимки, сделанные с помощью беспилотника, позволили идентифицировать водяные знаки в 22 различных точках в разных местах, как показано на рисунке 3. Для определения водяных знаков в этих местах был применен инженерный подход, основанный на оценке уровня воды относительно высоты традиционных зданий и деревьев в регионе. На рисунке 3 показаны крупным планом контрольные точки 2, 5, 8 и 20 в качестве примеров. Затем наблюдаемые глубины затопления были сопоставлены с результатами модели HEC-RAS для оценки точности и валидации модели (таблица 1). Результаты, представленные в таблице 1, показывают, что различия в глубине затопления в 22 точках варьировались от 2 % (0.05 м) до 53 % (0.37 м), при этом средняя разница составляла 18%. В целом, модель HEC-RAS продемонстрировала высокую пространственную точность, поскольку смоделированные масштабы наводнения точно соответствовали полученным спутниковым снимкам. Кроме того, сравнение глубины наводнения в 22 точках

показало разумное совпадение, что еще раз подтверждает надежность модели в представлении события наводнения.

Таблица 1

Местоположения и различия между наблюдаемыми водяными знаками на снимках с беспилотника и смоделированными глубинами затопления в 22 выбранных точках

(Пункт №) Дата Местоположение	Глубина воды (м)		Разница, (м) (%)	Изображение с беспилотника	(Пункт №) Дата Местоположение	Глубина воды (м)		Разница, (м) (%)	Изображение с беспилотника
	Gid360	Модель				Gid360	Модель		
(1) 30.04.2024 Восток 1	2.20	2.71	0.51 (+23%)		(12) 24.04.2024 Дачная 3	1.00	1.04	0.04 (+4%)	
(2) 23.05.2024 Восток 2	2.20	2.15	–0.05 (–2%)		(13) 22.04.2024 Дачная 1	1.60	1.98	0.38 (+24%)	
(3) 23.04.2024 Арматурщик 1	1.80	2.58	0.78 (+43%)		(14) 23.04.2024 Дачная 2	2.10	2.46	0.36 (+17%)	
(4) 18.05.2024 Дачная 14	1.50	1.70	0.20 (+13%)		(15) 22.04.2024 Дачная 6	1.40	1.57	0.17 (+12%)	
(5) 22.04.2024 Дачная 9	1.50	1.56	0.06 (+4%)		(16) 23.04.2024 Учужныый затон1	0.60	0.78	0.18 (+30%)	
(6) 22.04.2024 Дачная 4	2.00	2.26	0.26 (+13%)		(17) 22.04.2024 Землячка 2	2.00	1.74	–0.26 (–13%)	
(7) 25.04.2024 Дачная 1	2.00	2.53	0.53 (+27%)		(18) 21.04.2024 СО Казинское 1	2.30	2.38	0.08 (+3%)	
(8) 26.04.2024 Дачная 1	2.00	2.06	0.06 (+3%)		(19) 19.04.2024 Казинские дачи	1.60	2.27	0.67 (+42%)	
(9) 25.04.2024 Дачная 4	2.10	2.57	0.47 (+22%)		(20) 21.04.2024 СО Казинское 2	2.20	1.96	–0.24 (–11%)	
(10) 25.04.2024 Дачная 4	0.70	1.07	0.37 (+53%)		(21) 25.04.2024 СТ Стеновик 1	1.90	1.31	–0.59 (–31%)	
(11) 23.04.2024 Дачная 2	1.90	2.14	0.24 (+13%)		(22) 23.04.2024 Учужный затон 2	2.00	2.10	0.10 (+5%)	

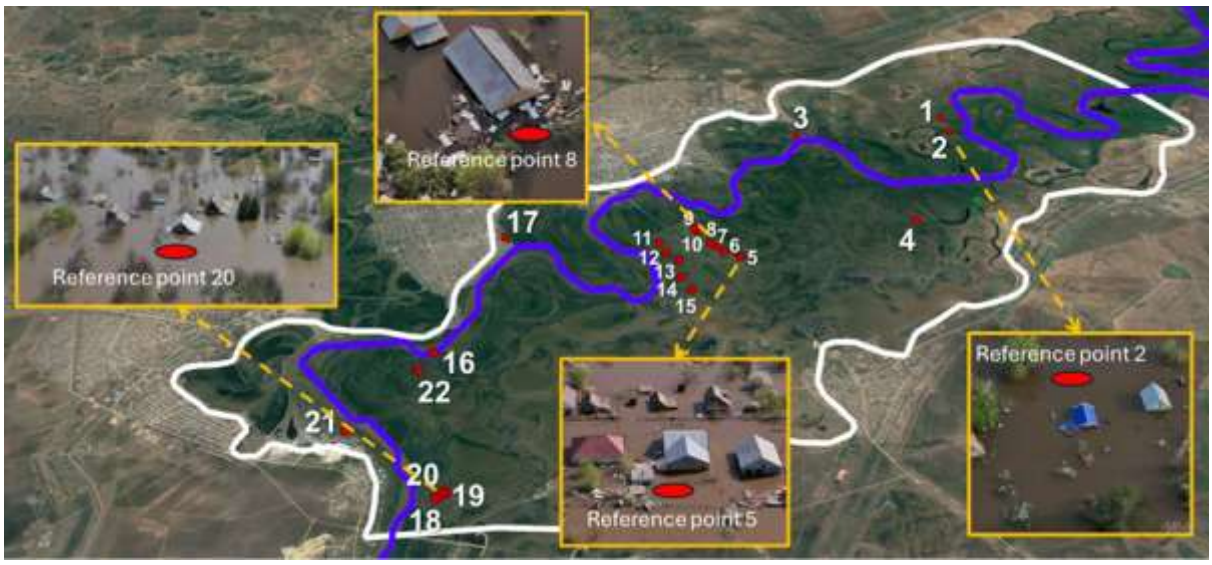


Рисунок 3. *Двадцать две контрольные точки, которые использовались для сравнения глубин затопления, а также увеличенные снимки с беспилотника выбранных точек отбора проб*

Площадь затопления и глубины, полученные с помощью гидравлической модели, были подтверждены с помощью спутниковых снимков и снимков с беспилотника. Эти процессы еще больше повысили надежность моделирования и анализа на основе сценариев. Точность результатов исследования во многом зависела от снимков, сделанных во время наводнения со спутников и беспилотных летательных аппаратов высокого разрешения. В частности, визуализация наводнения в режиме реального времени имела решающее значение для проверки достоверности гидравлической модели. Наличие снимков с беспилотника, документирующих затопленный город Уральск и прилегающие к нему пригородные районы, значительно укрепило полученные результаты, поскольку гидравлическая модель была проверена как в пространстве, так и в конкретных контрольных точках.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование подтвердило высокую эффективность гидравлического моделирования для оценки зон затопления в бассейне реки Жайык. Использование HEC-RAS 2D в сочетании с данными дистанционного зондирования и БПЛА позволило достоверно воспроизвести паводковую ситуацию апреля 2024 года. Совпадение смоделированных и фактических зон затопления составило 87 %, при среднем расхождении по площади 12.4 га и средней ошибке по глубине 0.18 м, что подтверждает надёжность методики.

Результаты обладают научной и практической значимостью. С научной стороны, работа демонстрирует потенциал интеграции гидравлического моделирования и пространственных данных для анализа механизмов паводкообразования. С практической — полученные результаты могут быть использованы для разработки систем мониторинга, раннего предупреждения и планирования мер по снижению последствий наводнений в уязвимых районах, включая Уральск.

Модель позволяет не только определять границы затопления, но и прогнозировать глубину водного покрова, что важно для оценки рисков разрушения инфраструктуры и планирования эвакуационных мероприятий.

Тем не менее, выявлены ограничения, связанные с разрешением цифровой модели рельефа и учётом локальных инженерных факторов (дамбы, каналы, дренаж). Дальнейшие исследования могут включать применение LiDAR-данных, более

детализированное моделирование русловых процессов и анализ сценариев климатических изменений.

Таким образом, применение гидравлического моделирования в сочетании с данными ДЗЗ и БПЛА доказало свою эффективность как инструмента анализа паводковых процессов и оценки рисков. В условиях нарастающих климатических изменений подобные подходы приобретают особую актуальность, обеспечивая основу для устойчивого управления водными ресурсами и повышения безопасности населения.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в данном исследовании, получены авторами из открытых баз данных РГП «Казгидромет», а также из открытых источников Gid360 и PlanetScope.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – АКК, СББ; управление данными –АКК.; формальный анализ – АКК; методология –АКК, СББ; программное обеспечение-АКК; отслеживание –СББ; визуализация –АКК; написание исходного текста –АКК, СББ; написание и редактирование окончательного текста –АКК, СББ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Мы выражаем благодарность Казгидромету, Gid360 и PlanetScope за предоставленную поддержку данными при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Kundzewicz Z. W., Mata L. J., Arnell N. W. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. Hydrological Sciences Journal. Vol. 53(1). –P. 3–10.
2 Kvočka D., Falconer R. A., Bray M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. Natural Hazards. Vol. 84(3). P. 1569–1599.
3 Tehrany M. S., Lee M., Pradhan B. (2014). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. Environmental Earth Sciences. Vol. 72(10). P. 4001–4015.
4 Kelesoglu M. K., Temur R., Gülbaz S. (2023). Site assessment and evaluation of the structural damages after the flood disaster in the Western Black Sea Basin on August 11, 2021. Natural Hazards. Vol. 116. P. 587–618.
5 Peker İ. B., Gülbaz S., Demir V. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. Sustainability. Vol. 16(3). Article 1226.
6 Kundzewicz Z. W., Pińskwar I., Brakenridge G. R. (2013). Large floods in Europe, 1985–2009. Hydrological Sciences Journal. Vol. 58(1). P. 1–7.
7 Yi Y., Liu S., Zhang X. (2023). Spring floods and their major influential factors in the upper reaches of Jinsha River basin during 2001–2020. Journal of Hydrology Regional Studies. Vol. 45. Article 101318.
8 Tuoliewubieke D., Mao W., Yao J. (2024). Spring snowmelt flood disasters in Altay, Northwest China: Spatio-temporal distribution and mechanisms. Journal of Hydrology Regional Studies. Vol. 57. Article 102142.
9 Merz B., Blöschl G., Vorogushyn S. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. Nature Reviews Earth & Environment. Vol. 2(9). P. 592–609.
10 Gülbaz S. (2019). Developing flood extent map by using numerical models and determination of areas under flood risk: Türkköse Stream case. Journal of Natural Hazards and Environment. Vol. 5(2). P. 335–349.
11 Brunner G. (2014). Using HEC-RAS for Dam Break Studies. – Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 39 p.
12 Cosgun T., Peker İ. B., Sayın B. (2022). Assessment of flood event based on numerical models and legal statute: A case of Eşkinoz Stream in Istanbul, Turkey. Arabian Journal of Geosciences. Vol. 15(7). Article 585.
13 Vasiliev D. Y., Chibilev A. A. (2021). Temporal variabilities and correlation of runoff in the Ural River. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 817(1). 012111.
14 Sivokhip Z. T., Pavleychik V. M., Chibilev A. A. (2021). Changes in River Runoff during Winter Low Water Periods in the Basin of the Ural River. Doklady Earth Sciences. Vol. 499(2). P. 703–707.
15 Sivokhip Z. T., Pavleichik V. M., Chibilyov A. A. (2023). Regional effects of global climate changes in the Ural River Basin. Doklady Earth Sciences. Vol. 509(2). P. 230–235.
16 Magritsky D. V. (2024). Assessment of the existing and future needs for river water in the Kazakhstan sector of the Ural River Water Resources. Vol. 51(5). P. 601–617.
17 Медеу А. Р., Махмудова Л. К., Мырзахметов А. Б. Паводковая ситуация на реке Жайык (Урал) в 2024 году // География и водные ресурсы. – 2024. – № 4. – С. 14–23.
18 Турсунова А. А., Мырзахметов А. Б., Баспакова Г. Р. Историческая справка о гидрологических характеристиках наводнений на реке Жайык // География и водные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 40–51.
19 Загидуллина А. Р., Смагулов Ж. Ж., Биримбаева Л. М. Тенденции многолетних изменений стока основных рек, формирующихся в Жайык-Каспийском водохозяйственном бассейне // География и водные ресурсы. – 2024. – № 2. – С. 15–26.
20 Eremkina T. V., Yarushina M. I. (2022). Ural River Basin. Elsevier eBooks. P. 883–899.
21 Kumenov A. (2024). Kazakhstan grappling with a fresh wave of flooding. Eurasianet. [Электронный ресурс] URL: https://eurasianet.org/kazakhstan-grappling-with-a-fresh-wave-of-flooding (дата обращения: 20.01.2025).

22 Greenall R. (2024). Russia Kazakhstan floods: High water levels swamp Orenburg houses. BBC. [Электронный ресурс] URL: https://www.bbc.com/news/world-europe-68796487 (дата обращения: 20.01.2025).
23 Ресурсы поверхностных вод СССР. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Урало-Эмбинский район. – Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – Т.12, Вып. 2. – 512 с.
24 Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. – Т. VII. Ресурсы речного стока Казахстана. – Кн. 1. – Алматы, 2012. – 684 с.
25 Давлетгалиев С. К. Прогноз водных ресурсов Урало-Каспийского бассейна // Гидрометеорология и экология. – 2015. – №1. – С. 115–120.
26 Чибилев А. А. Бассейн Урала: история, география, экология. – Екатеринбург, 2008. – 312 с.
27 Гидрометцентр России. – 2024. [Электронный ресурс] URL: https://meteoinfo.ru/ (дата обращения: 20.01.2025).
28 Филиал «Управление эксплуатации Ириклинского водохранилища». [Электронный ресурс] URL: https://ueiv.ru/category/reservoir/ (дата обращения: 20.01.2025).
29 Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200. https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221.
30 Planet Labs Inc. Спутниковые снимки PlanetScope. – 2024. [Электронный ресурс] URL: https://www.planet.com/explorer/. (дата обращения: 23.04.2024).
31 Gid360. Pavodok24. – 2025. [Электронный ресурс] URL: https://gid360.kz/viewer/pavodok24 (дата обращения: 13.01.2025).
32 Гидрологическая база данных РГП «Казгидромет». [Электронный ресурс]. URL: http://ecodata.kz:3838/app_hydro/ (дата обращения: 15.05.2025)

REFERENCES

1 Kundzewicz Z. W., Mata L. J., Arnell N. W. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. Hydrological Sciences Journal. Vol. 53(1). –P. 3–10.
2 Kvočka D., Falconer R. A., Bray M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. Natural Hazards. Vol. 84(3). P. 1569–1599.
3 Tehrany M. S., Lee M., Pradhan B. (2014). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. Environmental Earth Sciences. Vol. 72(10). P. 4001–4015.
4 Kelesoglu M. K., Temur R., Gülbaz S. (2023). Site assessment and evaluation of the structural damages after the flood disaster in the Western Black Sea Basin on August 11, 2021. Natural Hazards. Vol. 116. P. 587–618.
5 Peker İ. B., Gülbaz S., Demir V. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. Sustainability. Vol. 16(3). Article 1226.
6 Kundzewicz Z. W., Pińskwar I., Brakenridge G. R. (2013). Large floods in Europe, 1985–2009. Hydrological Sciences Journal. Vol. 58(1). P. 1–7.
7 Yi Y., Liu S., Zhang X. (2023). Spring floods and their major influential factors in the upper reaches of Jinsha River basin during 2001–2020. Journal of Hydrology Regional Studies. Vol. 45. Article 101318.
8 Tuoliewubieke D., Mao W., Yao J. (2024). Spring snowmelt flood disasters in Altay, Northwest China: Spatio-temporal distribution and mechanisms. Journal of Hydrology Regional Studies. Vol. 57. Article 102142.
9 Merz B., Blöschl G., Vorogushyn S. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. Nature Reviews Earth & Environment. Vol. 2(9). P. 592–609.
10 Gülbaz S. (2019). Developing flood extent map by using numerical models and determination of areas under flood risk: Türkköse Stream case. Journal of Natural Hazards and Environment. Vol. 5(2). P. 335–349.
11 Brunner G. (2014). Using HEC-RAS for Dam Break Studies. – Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 39 p.
12 Cosgun T., Peker İ. B., Sayın B. (2022). Assessment of flood event based on numerical models and legal statute: A case of Eşkinoz Stream in Istanbul, Turkey. Arabian Journal of Geosciences. Vol. 15(7). Article 585.
13 Vasiliev D. Y., Chibilev A. A. (2021). Temporal variabilities and correlation of runoff in the Ural River. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 817(1). 012111.
14 Sivokhip Z. T., Pavleychik V. M., Chibilev A. A. (2021). Changes in River Runoff during Winter Low Water Periods in the Basin of the Ural River. Doklady Earth Sciences. Vol. 499(2). P. 703–707.
15 Sivokhip Z. T., Pavleichik V. M., Chibilyov A. A. (2023). Regional effects of global climate changes in the Ural River Basin. Doklady Earth Sciences. Vol. 509(2). P. 230–235.
16 Magritsky D. V. (2024). Assessment of the existing and future needs for river water in the Kazakhstan sector of the Ural River Water Resources. Vol. 51(5). P. 601–617.
17 Medeu A. R., Makhmudova L. K., Myrzakhmetov A. B., Zagidullina A. R., Kanai A. M. (2024). Pavodkovaya situatsiya na reke Zhaiyk (Ural) v 2024 godu [Flood situation on the Zhaiyk (Ural) River in 2024]. Geografiya i vodnye resursy, (4), 14–23. [in Russian].
18 Tursunova A. A., Myrzakhmetov A. B., Baspakova G. R., Sailaubek A. M., Salavatova, Zh. T. (2024). Istoricheskaya spravka o gidrologicheskikh kharakteristikakh navodnenii na reke Zhaiyk [Historical reference on the hydrological characteristics of floods on the Zhaiyk River]. Geografiya i vodnye resursy, (2), 40–51. [in Russian].
19 Zagidullina A. R., Smagulov Zh. Zh., Birimbayeva L. M., Sailaubek A. M. (2024). Tendentsii mnogoletnikh izmenenii stoka osnovnykh rek, formiruyushchikhsya v Zhaiyk-Kaspiiskom vodokhoziaistvennom basseine [Trends of long-term changes in river runoff in the Zhaiyk-Caspian Basin]. Geografiya i vodnye resursy, (2), 15–26. [in Russian].
20 Eremkina T. V., Yarushina M. I. (2022). Ural River Basin. Elsevier eBooks. P. 883–899.
21 Kumenov A. (2024). Kazakhstan grappling with a fresh wave of flooding. Eurasianet. [Электронный ресурс] URL: https://eurasianet.org/kazakhstan-grappling-with-a-fresh-wave-of-flooding (дата обращения: 20.01.2025).
22 Greenall R. (2024). Russia Kazakhstan floods: High water levels swamp Orenburg houses. BBC. [Электронный ресурс] URL: https://www.bbc.com/news/world-europe-68796487 (дата обращения: 20.01.2025).
23 Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyi Kazakhstan. Uralo-Embinskii raion [Surface water resources of the USSR: Lower Volga and Western Kazakhstan. Ural-Emba region]. (1970). Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian].
24 Vodnye resursy Kazakhstana: otsenka, prognoz, upravlenie [Water resources of Kazakhstan: assessment, forecast, management]. (2012). Vol. VII, Book 1. Almaty. [in Russian].
25 Davletgaliev S. K. (2015). Prognoz vodnykh resursov Uralo-Kaspiiskogo basseina [Forecast of water resources of the Ural-Caspian Basin]. Gidrometeorologiya i ekologiya, (1), 115–120. [in Russian].
26 Chibilev A. A. (2008). Bassein Urala: istoriya, geografiya, ekologiya [The Ural Basin: History, geography, ecology]. Ekaterinburg. [in Russian].

27 Gidromettsentr Rossii [Hydrometeorological Center of Russia]. (2024). [Electronic resources] URL: https://meteoinfo.ru/(date of access: 20.01.2025) [in Russian].
28 Filial "Upravlenie ekspluatatsii Iriklinskogo vodokhranilishcha" [Branch "Operation of Iriklinsk Reservoir"]. (2024). [Electronic resources] URL: https://ueiv.ru/category/reservoir/ (date of access: 20.01.2025) [in Russian].
29 Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., et al. (2022). ESA WorldCover 10 m 2021 v200. https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221
30 Planet Labs Inc. (2024). Sputnikovye snimki PlanetScope [PlanetScope satellite images]. [Electronic resources] URL: https://www.planet.com/explorer/ (date of access: 15.07.2025) [in Russian].
31 Gid360. (2025). Pavodok24. [Electronic resources] URL: https://gid360.kz/viewer/pavodok24 (date of access: 23.04.2024) [in Russian].
32 «Kazhydromet» RSE hydrological database. [Electronic resources] URL: http://ecodata.kz:3838/app_hydro/ (date of access: 15.05.2025)

ЖАЙЫҚ ӨЗЕНІНДЕГІ СУ ТАСҚЫНЫ КЕЗІНДЕ СУ БАСУ АЙМАҚТАРЫН МОДЕЛЬДЕУДІ БАҒАЛАУ

Айгерім К. Калыбаева [1], Саним Б. Бисенбаева [2] PhD

[1] Ионосфера Институты, Алматы, Қазақстан; kalybayeva.aigerim@gmail.com
[2] әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; djusali@mail.ru
*Автор корреспондент: Айгерим К. Калыбаева, kalybayeva.aigerim@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

су тасқыны,
гидравликалық модельдеу,
HEC-RAS,
су басу аймақтары,
қашықтықтан зондтау,
Жайық өзені

Мақала жайында:
Жіберілді: 02.10.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Жайық өзеніндегі су тасқыны өңірдің табиғи экожүйелері мен халқы үшін айтарлықтай қауіп төндіреді, сондықтан оларды зерттеу мен болжау өзекті болып табылады. Бұл жұмыста су басу аймақтарын анықтау және олардың сенімділігін бағалау үшін гидравликалық модельдеуді заманауи бақылау және қашықтықтан зондтау деректерімен қолдану мүмкіндіктері қарастырылды. Модельдеу HEC-RAS 2D бағдарламалық кешенінде гидрологиялық бақылаулар мен цифрлық рельеф моделін пайдалану арқылы жүзеге асырылды. Нәтижелерді тексеру үшін PlanetScope жоғары айырымды спутниктік суреттері мен ұшқышсыз ұшу аппараттарының деректері қолданылды. Салыстыру нәтижесінде модельдік және нақты су басу аймақтарының сәйкестігі 87 %, орташа айырмашылық ауданы 12.4 га, ал су тереңдігін қайта өндірудегі орташа қате 0.18 м деңгейінде анықталды. Зерттеу нәтижелері модель есептеулері мен бақылау деректерінің жоғары деңгейде сәйкес келетінін көрсетті, бұл гидравликалық модельдеудің сенімділігін дәлелдейді. Зерттеу нәтижелері ғылыми әрі практикалық тұрғыдан маңызды. Гидравликалық модельдеу, қашықтықтан зондтау және ұшқышсыз ұшу аппараттары деректеріне негізделген интеграцияланған тәсіл су тасқынын бақылау мен болжау жүйелерін жетілдіруге, сондай-ақ олардың салдарын азайтуға бағытталған іс-шараларды әзірлеуге мүмкіндік береді

ASSESSMENT OF FLOOD INUNDATION MODELING ON THE ZHAYIK RIVER

Aigerim Kalybayeva *[1], Sanim Bissenbayeva[2] PhD

[1] Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan; kalybayeva.aigerim@gmail.com
[2] al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; djusali@mail.ru
*Corresponding author: Aigerim Kalybayeva, kalybayeva.aigerim@gmail.com

KEY WORDS

floods,
hydraulic modeling,
HEC-RAS,
flood inundation zones,
remote sensing,
Zhayik River

ABSTRACT

Floods on the Zhayik River pose a significant threat to natural ecosystems and the local population, making their study and forecasting particularly relevant. This study explores the potential of hydraulic modeling for flood inundation mapping and assessing its reliability using modern observational and remote sensing data. Modeling was carried out in the HEC-RAS 2D software package with the

application of hydrological observations and a digital elevation model. Validation of the results was performed using high-resolution PlanetScope satellite imagery and unmanned aerial vehicle (UAV) data. The comparison revealed a high level of spatial agreement: the overlap between simulated and observed inundation zones reached 87%, the mean difference in inundated area was 12.4 ha, and the average error in reproducing floodwater depth did not exceed 0.18 m. The results demonstrated a strong consistency between model outputs and observations, confirming the effectiveness of hydraulic modeling for flood analysis. The findings have both scientific and practical significance. The integrated approach, combining hydraulic modeling with remote sensing and UAV data, provides opportunities for improving flood monitoring and forecasting systems, as well as for developing measures to mitigate the consequences of flooding in the Zhayik River basin.

About article:
Received: 02.10.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 08.10.2025

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

ЖАЙЫҚ-КАСПИЙ СУ ШАРУАШЫЛЫҒЫ АЛАБЫНДАҒЫ КӨКТЕМГІ СУ ТАСҚЫНЫ АҒЫНДЫСЫН БАҒАЛАУ: ҚАЗІРГІ ЖАҒДАЙЫ ЖӘНЕ СЦЕНАРЛЫҚ БОЛЖАМЫ

Саят К. Алимкулов[1] г.ғ.к., қауымдастырылған профессор , Ляззат К. Махмудова[1] г.ғ.к., қауымдастырылған профессор , Эльмира К. Талипова[1,2] PhD, Жанибек Ж. Смагулов[1], Ақгүлім М. Сайлаубек[1,2*]

[1]«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; sayat.alimkulov@mail.ru (СКА), mlk2002@mail.ru (ЛКМ), elmira_280386@mail.ru (ЭКТ), zh.zh.smagulov@mail.ru (ЖЖС), gulima97life@gmail.com (АМС)
[2] әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; elmira_280386@mail.ru (ЭКТ), gulima97life@gmail.com (АМС)
Автор корреспондент: Ақгүлім М. Сайлаубек, gulima97life@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

максималды ағынды, көктемгі су тасқыны, өзен ағындысының трансформациясы, сценарийлік болжау, CMIP6

АБСТРАКТ

Зерттеу жұмысында Жайық-Каспий су шаруашылығы алабындағы көктемгі су тасқыны ағынды сипаттамалары қазіргі кезең үшін кешенді түрде талданып, 2030, 2040 және 2050 жылдарға арналған болжамды өзгерістері CMIP6 климаттық сценарийлері (SSP3-7.0 және SSP5-8.5) негізінде жасалды. 34 гидрологиялық бекетте жүргізілген бақылау деректерін талдау нәтижесі көктемгі ағынды көлемінің 35 % азайғанын, су тасқыны ұзақтығының қысқарғандығын және жекелеген өзендерде максималды су өтімінің 45 % дейін төмендегенін көрсетті. Ауа температурасының жоғарылауы, жылымықтардың жиілеуі және күзгі ылғалданудың азаюы максималды су өтімінің төмендеуіне және ағындының маусымдық ағынды режимінің қайта бөлінуіне алып келетіні анықталды. Сценарийлік болжамдар айқын түрде кеңістіктік әртектілікті көрсетті – кейбір өзендерде максималды су өтімінің 72 % дейін ұлғаюы күтілсе, ал біршама өзендерде су өтімінің 35 % дейін тұрақты төмендеуі байқалады. Алынған нәтижелер, су ресурстарын басқаруда өзен алаптарының аймақтық ерекшеліктерін, кіші және орта өзендердің климаттық өзгерістерге сезімталдығын ескеретін адаптивті суды басқару жүйесіне көшу қажеттігін көрсетеді.

Мақала жайында:
Жіберілді: 30.09.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

Дәйексөз үшін:
Алимкулов С., Махмудова Л., ТалиповаЭ., Смагулов Ж., Сайлаубек А. Жайық-Каспий су шаруашылығы алабындағы көктемгі су тасқыны ағындысын бағалау: қазіргі жағдайы және сценарлық болжамы // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 95-109.

1. КІРІСПЕ

Климаттық тұрақсыздық жағдайында өзендердің су тасқыны ағындысының қазіргі заманғы өзгерістерін бағалау және оны сценарлық болжау қазіргі гидрологияның негізгі міндеттерінің бірі болып табылады. Жайық-Каспий су шаруашылығы алабы (США) сынды жартылай құрғақ аумақтарда жылдық ағындының негізгі үлесін (80...90 % дейін) су тасқыны ағындысы құрайды және салыстырмалы түрде қысқа көктемгі кезеңге келеді [1]. Ағындының маусымдық әртектілігі аумақтың климаттық өзгерістерге осалдығын күшейте отырып, су тасқыны мен су тасуы сынды қауіптерді басқару кезінде ескеруді талап етеді.

Ресей аумағында климаттың өзгеруінен туындаған өзен ағындысының тербелісін зерттеу жұмыстары (Frolova, 2017; Wang, 2022; Медведев, 2023) [2-4] жылдық ағынды бойынша айтарлықтай ұзақ мерзімді үрдістерді анықтамағанымен, соңғы онжылдықта ағындының жыл ішілік маусымдық таралуы елеулі өзгеріске ұшырағанын көрсетті. Атап айтқанда, қысқы сабалық кезеңдегі ағынды көлемі айтарлықтай артты. Қысқы ағындының артуы жылымықтардың жиілеуімен байланысты болып, қысқы сабалық кезеңде су тасқындарының жиі көрініс беруіне алып келді. Ал, көктемгі ағынды мен қардың еруінен туындайтын тасқындар көктем

алдындағы қардағы су қорының азаюына байланысты қысқарды. Маусымдық ағынды трансформациясының осыған ұқсас ерекшеліктері Ресей аумағындағы Жайық өзені алабында да байқалады. Көпжылдық өзгергіштікті талдау нәтижилері көктемгі су тасқыны ағындысының азаюын және қысқы ағындының бір мезгілде ұлғаю тенденциясын анық көрсетеді [5]. Сивохип Ж.Т. [6] ғылыми зерттеу жұмысында Жайық өзенінің алабында ағындының жыл ішілік таралуы трансформациясының қазіргі заманғы үрдісі байқалады: сабалық кезеңнің үлесі (әсіресе қысқы) артып, көктемгі су тасқынының үлесінің азайғанын алға тартады. Мұндай маусымдық өзгерістер гидрологиялық тұрақсыздықты күшейтіп, экстремалды су тасқындарының пайда болу ықтималдығын арттырады. Айқын мысал ретінде 2024 жылдың көктем маусымында орын алған Жайық өзені алабындағы су тасқыны жағдайын атауға болады [7...8]. Danilovich I.S. және Laiskhanov S. [9...10] ғылыми зерттеулері климаттық жағдайлардың өзгеруіне байланысты ағындының экстремалды мәндері күшейетінін растайды, бұл өзгерістерге қардың ерте еруі, қысқы жауын-шашынның артуы және ауа температурасының көтерілуі жатады. Аталған процесстер су тасқыны мен құрғақшылық қауіптерін күшейтіп, су ресурстарын нақтырақ сценарийлік болжауға көшу қажеттілігін туындатады. Бұл ретте жаңа буынның климаттық модельдерін, соның ішінде CMIP6 үлгілерін пайдалану маңыздылығы артуда.

CMIP6 ансамбльдерін қолдана отырып, су тасқыны ағындысын сценарийлік болжау тек қана климаттық тенденцияларды ғана емес, сонымен қатар әлеуметтік-экономикалық траекториялар мен парниктік газдардың шығарындыларына байланысты кең ауқымды тұрақсыздықтарды да ескеруге мүмкіндік береді [11...13]. CMIP6 түрлі әлеуметтік-экономикалық даму сценарийлері жағдайында, климаттық параметрлерді талдаудың кең мүмкіндіктерін ұсынады - орташа деңгейдегі (SSP1) сценарийден бастап жоғары эмиссиялық (SSP5) сценарийге дейін. Дегенмен, ғаламдық климат модельдерінің (GCM) нәтижелерін белгілі бір аумаққа бейімдеу үшін түзету әдістерін қолдану қажет, өйткені бұл модельдердің кеңістіктік ажыратылымдылығы салыстырмалы түрде төмен және олар ағынды қалыптасуының жергілікті ерекшеліктерін ескере бермейді [14]. Осыған байланысты атмосфера мен мұхиттың жалпы циркуляциясының модельдерін (АМЖЦМ) динамикалық даунскейлинг (масштабты төмендету әдісі) жасау күрделі орография мен климаттық процесстердің жоғары кеңістіктік әртектілігі жағдайында аумақтық климаттық проекциялардың дәлдігін арттыруға арналған аса маңызды құрал болып табылады. Динамикалық даунскейлинг барысында белгілі бір жүйелі қателіктердің болуына қарамастан, ол физикалық тұрғыдан үйлестірілген аумақтық бағалауларды қамтамасыз етеді және климаттық айнымалылардың толық спектрін жоғары дәрежеде дәл сипаттайтын сапалы климаттық деректерді алуға мүмкіндік береді.

Қазіргі таңда халықаралық климаттық деректер қорының ішінде тек қана секторалық ықпал модельдерін салыстыру жобасы (ISIMIP) (https://www.isimip.org/) Орталық Азия аумағы үшін CMIP6 сценарийлері негізінде динамикалық даунскейлингтен өткен модельдеу нәтижелерін ұсынады. Осы бастама аясында CMIP6 климаттық модельдері, аумақтың орографиясы мен климаттық жағдайлардың ерекшеліктерін ескере отырып қосымша калибрленді, бұл қарастырылып отырған зерттеу ауданы үшін шынайы әрі қолданбалы бағалауларды қамтамасыз етеді.

Жайық–Каспий алабының қазақстандық бөлігіндегі климаттың болашақтағы өзгерістерін бағалау үшін үш жалпы әлеуметтік-экономикалық жол (SSP) шеңберінде ISIMIP жобасының үшінші фазасындағы жоғары ажыратылымдықтағы (0.25×0.25) және динамикалық төмендетілген CMIP6 климаттық модельдері, атап айтқанда SSP3-7.0 және SSP5-8.5 сценарийлері пайдаланылды, олар базалық сценарийлер болып табылады: халықтың өсуі, технологиялық прогресс, экономикалық даму, урбанизация

және денсаулық сақтау, білім беру, жерді пайдалану және энергетикалық инвестицияларға негізделген болашақ жолдарды сипаттайды [15].

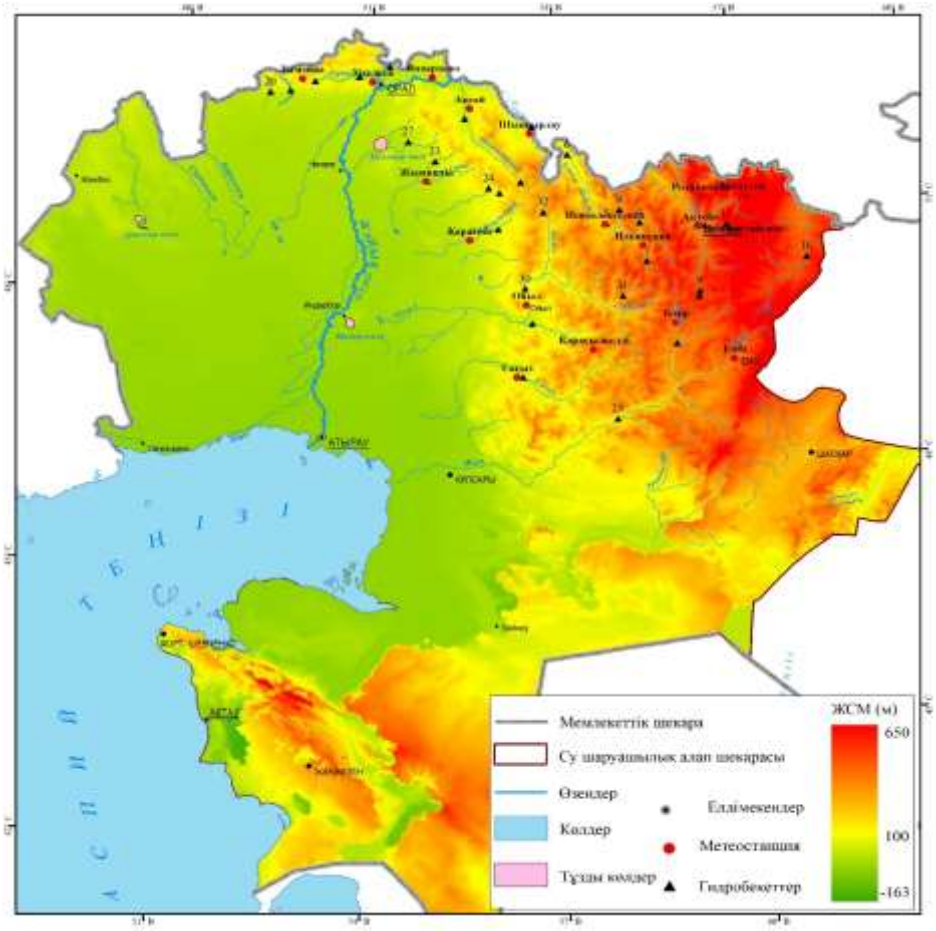
Жайық–Каспий США өзендерінде көктемгі су тасқыны ағындысының қалыптасуы көптеген климаттық, географиялық және антропогендік факторларға тәуелді. Бұл факторлардың рөлін анықтау, бұрын болған және болашақта мүмкін болатын гидрологиялық өзгерістердің шығу тарихын түсіну үшін, сондай-ақ олардың жағымсыз салдарын азайтуға бағытталған іс-шараларды қолдану үшін аса маңызды болып табылады. Зерттеу жұмысының мақсаты - Жайық-Каспий алабы өзендеріндегі көктемгі су тасқыны ағындысының қазіргі заманғы өзгеру тенденцияларын анықтау, сондай-ақ болашақ климаттық өзгерістер жағдайында оның мүмкін болатын трансформациясының сценарийлік болжамды бағаларын алу болып табылады. Сценарийлік болжам үш уақыттық көкжиекте жүргізілді: 2030 жыл (2026...2035 жж.), 2040 жыл (2036...2045 жж.) және 2050 жыл (2046...2055 жж.). Базалық кезең ретінде 1991...2020 жж. таңдалды.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу ауданы

Жайық-Каспий су шаруашылығы алабының аумағында өзен желісінің таралу ерекшеліктері оңтүстік-батысында Каспий теңізінің, ал солтүстік-шығыста – Оңтүстік Орал таулы жоталарының орналасуымен айқындалады. Осыған байланысты өзендер жалпы ағу бағытын солтүстік-шығыстан оңтүстік-батысқа қарай қалыптастырады. Қарастырылып отырған алап аумағында жүзден астам өзендер (уақытша тоғандар) бар, олардың ішінде ұзындығы 200 км-ден асатын 12 өзен кездеседі. Негізгі өзен – Жайық, оның жалпы ұзындығы 2534 км. Өзен Ресей Федерациясы аумағында қалыптасып, бастауын Оңтүстік Оралдан алып, Каспий теңізіне құяды, Қ

азақстан Республикасы аумағындағы өзен ұзындығы 1084 км құрайды (1 сурет) [16].



Сурет 1. *Жайық-Каспий су шаруашылық алабының метеорологиялық станциялары мен гидробекеттерінің орналасу картасы*

Зерттеу әдістері мен материалдары. Зерттеу жұмысында Жайық-Каспий США өзендерінің көктемгі су тасқыны ағындысының өзгерістерін талдау үшін 34 гидрологиялық бақылау бекетінен алынған ресми гидрологиялық деректер және 17 метеорологиялық станциядан жиналған ауа температурасы мен атмосфералық жауын-шашын бойынша метеорологиялық деректер пайдаланылды. Бастапқы материалдар аспаптық өлшеулердің 2022 жылды қоса алғандағы барлық кезеңін қамтиды. Барлық деректер https://www.kazhydromet.kz/ru/gidrologiya ресми сайтында орналастырылған «Қазгидромет» РМК ашық дереккөздерден алынды.

Көктемгі су тасқынының жүрісін талдау үшін негізгі параметрлер бойынша жыл сайынғы деректері пайдаланылды: көктемгі ағынды көлемі, максималды су өтімі, су тасқынының басталу және аяқталу күндері, сондай-ақ оның ұзақтығы. Деректерді өңдеу екі уақыттық кезең үшін жүргізілді: аспаптық бақылаулардың басталуынан 1973 жылға дейінгі (аралық) және қазіргі кезең 1974 жылдан 2022 жылға дейін.

Зерттеу барысында табиғи немесе шартты-табиғи режимдегі келесі гидрологиялық біртекті аудандар бойынша бар деректер пайдаланылды:

– Жайық өзенінің сол жағалау салалары (Ор, Елек, Үлкен Қобда, Шыңғырлау, Қарғалы, Қосестек, Ақтасты және т.б.);

– Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендер (Шаған, Деркөл, Шыжын 1, Шыжын 2);

– Орал алды үстіртінің оңтүстік бөлігіндегі өзендер (Өлеңті, Көпіраңқаты, Бұлдырты, Шидерті);

– Оңтүстік өзендер (Ойыл, Сағыз, Жем).

Көктемгі су тасқыны ағындысының ұзақ мерзімді сценарийлік болжамдарын зерттеуде CMIP6 климаттық модельдері пайдаланылды. ISIMIP проекциясында 6-фазалы (CMIP6) үлгілерді сәйкестендіру жобасының «басымдық берілген» деп анықталған 5 моделіне негізделген деректер жиынтығы қолданылады [17], бұл өз кезегінде әртүрлі климаттық сезімталдықты ескере отырып, климаттық әсерді модельдеуге арналған проекциялардың алуан түрлі жиынтығын ұсынуға мүмкіндік береді.

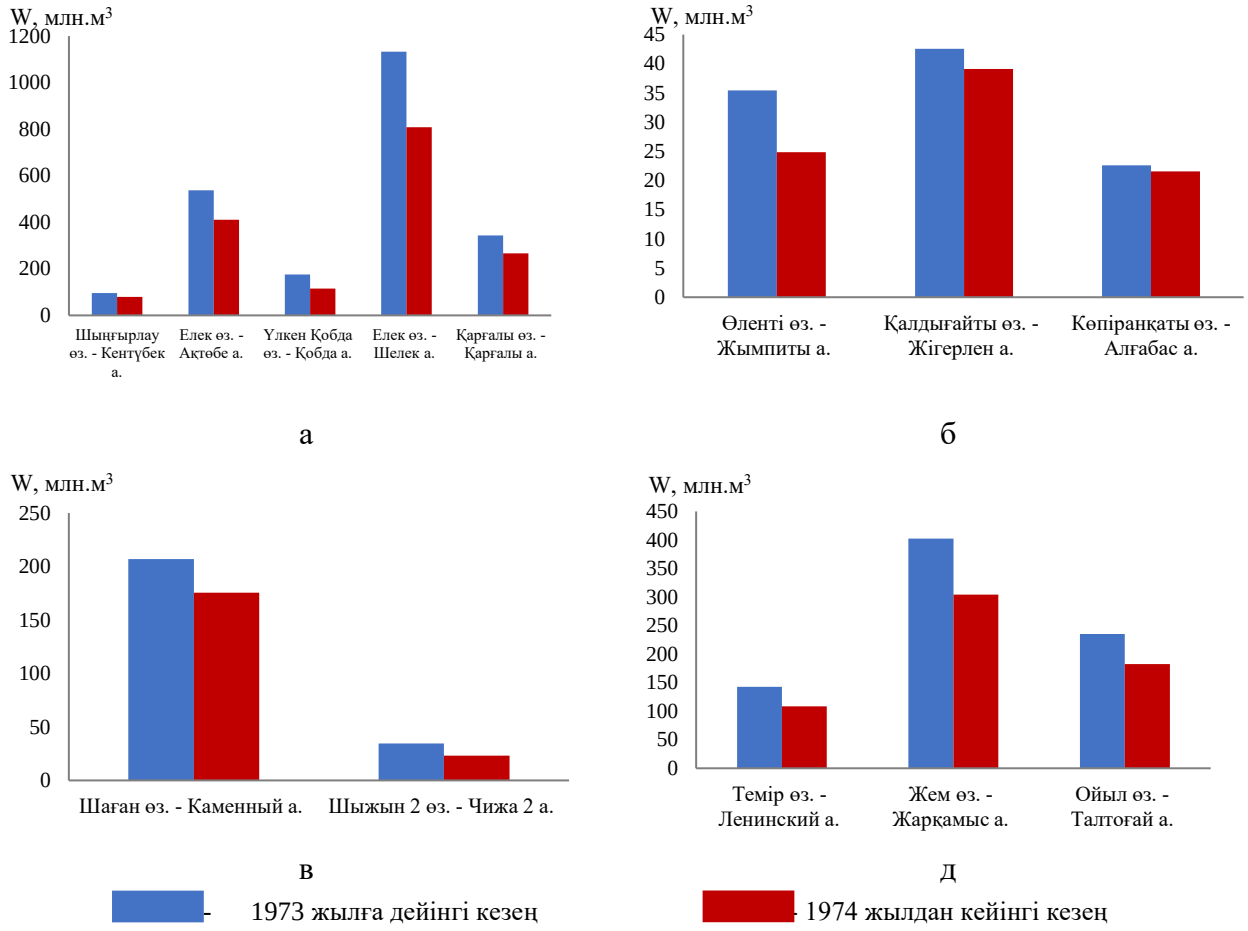
Гидрометеорологиялық есептеулер мен статистикалық талдау MS Excel және Statistica стандартты пакеттерін пайдалана отырып жүргізілді. Бақылау қатары толық емес гидробекеттерде бақылау қатарлары гидрологиялық аналогия әдісімен қалпына келтірілді (қысқа бақылау кезеңі және репрезентативті емес деректер болған жағдайда бақылау қатарлары репрезентативті кезеңге келтірілді). Уақыттық қатарларды талдау барысында су тасқыны ағындысының ұзақ мерзімді өзгеру тенденциялары ең кіші квадраттар әдісі [18...19] арқылы анықталды. Статистикалық талдау негізінде максималды ағынды мен климаттық айнымалылар арасындағы тәуелділіктер сызықтық және көптік регрессия әдістері арқылы анықталып, болашақтағы өзгерістеріне сценарийлік болжамы жасалынды.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Көктемгі су тасқыны сипаттамаларының қазіргі заманғы өзгерісі.

Көктемгі су тасқыны көлемі - су тасқыны кезіндегі өзендегі жалпы су өтімін сипаттайтын негізгі көрсеткіш болып табылады. Зерттеліп отырған алап өзендерінің көктемгі су тасқыны ағындысының көпжылдық өзгерістері айқын кеңістіктік айырмашылықтарымен ерекшеленеді. Қазіргі кезеңде 1974...2022 жж., іс жүзінде барлық аумақ бойынша көктемгі су тасқыны көлемінің азаюы көрініс береді. Жайық өзенінің сол жағалау салалары 1974...2022 жж. кезеңде ағынды көлемінің ең үлкен қысқаруымен сипатталады, 1973 жылғы дейінгі кезеңмен салыстырғанда орташа қысқару 20...30 % құрайды. Көктемгі ағынды көлемінің ең анық азаю көрінісі Үлкен

Қобда өзенінде (35 % азаю), Елек өзенінде (25...30 %) тіркелген (3 сурет). Орал алды үстіртінің оңтүстік бөлігінен ағатын өзендері үшін 1973 жылға дейінгі кезеңмен салыстырғанда, қазіргі кезеңде (1974...2022 жж.) көктемгі су тасқыны көлемінің айтарлықтай төмендеу үрдісі сипатталады: Өленті өзені – Жымпиты ауылында көктемгі ағындының ең жоғарғы азаю шамасы байқалған (30 % қысқарған). Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендерде 1974...2022 жж. кезеңдегі көктемгі су тасқыны көлемі 1973 жылға дейінгі кезеңмен салыстырғанда 15 %-дан 33 %-ға дейін едәуір азайған. Шаған өзені – Каменный ауылы тұстамасында су тасқыны көлемінің төмендеуі 1973 жылға дейінгі кезеңде 43.1 млн $м^3$/10 жыл жылдамдықпен жүрсе, қазіргі кезеңде 4.9 млн $м^3$/10 жыл деңгейінде тіркелген. Оңтүстік өзендерде келесідей көрініс байқалады: Темір өзені – Ленинский ауылы және Жем өзені – Жарқамыс ауылында су тасқыны көлемі 24 %-ға, Ойыл өзені – Талтоғай ауылында 22 %-ға азайған.



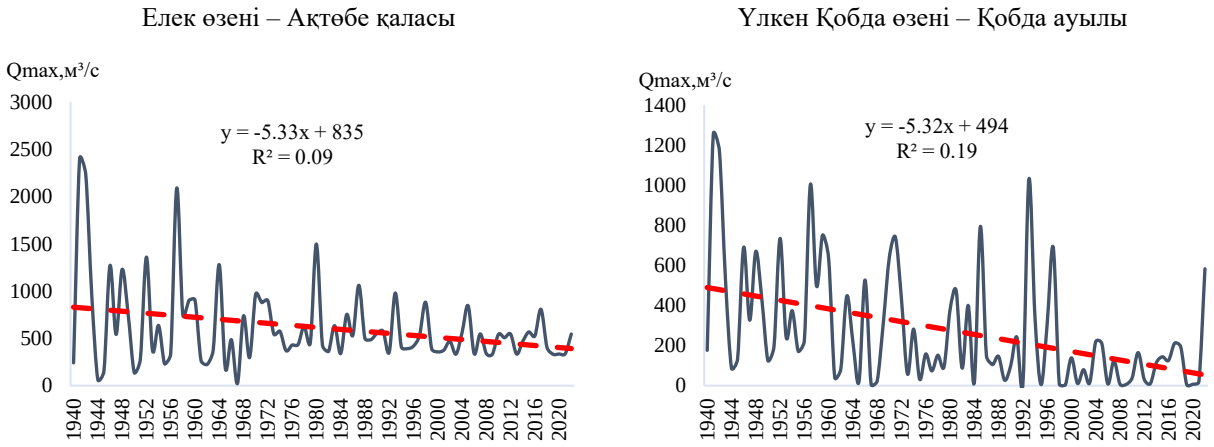
3 сурет. *Көктемгі ағынды көлемінің өзгерістері: а) Жайық өзенінің сол жағалау салалары; б) Орал алды үстіртінің оңтүстік бөлігінің өзендері; в) Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендер; д) Оңтүстік өзендер*

Максималды су өтімі

Зерттеліп отырған аумақта көктемгі су тасқыны көлемінің өзгеруінен бөлек, максималды су өтімінің азаюы да байқалады. 1973 жылға дейінгі кезеңде өзендердегі максималды су өтімдерінің мәндері айтарлықтай елеулі мәндерге ие болды: Елек өз. – 2500 $м^3$/с, Үлкен Қобда өз. – 1300 $м^3$/с, Темір өз. – 800 $м^3$/с шамасында тіркелген. Алайда 1974 жылдан кейін максималды су өтімінің айтарлықтай төмендеуі

байқалады: Елек өз. 1500 м^3/с дейін, Үлкен Қобда өз. – 1000 м^3/с дейін, ал Темір өзенінде 500 м^3/с дейін азайды (4 сурет).

Максималды су өтімдерінің өзгеру тенденцияларын талдау зерттеу алабындағы барлық өзендерде төмендеу тренді бар екенін көрсетеді. Дегенмен, бұл трендтердің маңыздылығы өзендерге байланысты өзгереді. Ең айқын байқалатын трендтер Елек және Үлкен Қобда өзендерінде төмендеу шамасы жылына 5.3 м^3/с жетеді. Темір және Көпіраңқаты өзендерінде трендтер салыстырмалы түрде әлсіздеу және төмендеу қарқыны сәйкесінше жылына 2.20 м^3/с және 1.19 м^3/с құрайды. Шаған және Ойыл өзендерінде айтарлық өзгеріс байқалмаған және максималды су өтімінің төмендеу қарқыны жылына 1.22 м^3/с аспайды.



4 сурет. *Максималды су өтімінің көпжылдық жүрісі*

Су тасқынының басталу және аяқталу күндері, ұзақтығы. Көктемгі су тасқынының негізгі сипаттамаларына оның басталу және аяқталу күндері, ұзақтығы кіреді. Су тасқынының басталу және аяқталу күндері ағынды гидрографы бойынша анықталды. Су тасқынының басталуы ретінде әдетте су деңгейі мен өтімінің күрт көтерілуіне дейін байқалатын су өтімінің біршама артуының бірінші күні алынады, ал су тасқынының аяқталуы – еріген қар суының негізгі көлемінің ағындысының аяқталуы нәтижесінде төмендеу қарқындылығы күрт түсіп, төмендеу қисығының соңындағы күн болып саналады. Жайық-Каспий США өзендерінің басым бөлігінде қазіргі кезеңде 1974...2022 жж. көктемгі су тасқынының ерте басталуы және ерте аяқталуы көрініс беріп, сәйкесінше су тасқыны ұзақтығының қысқаруы байқалады: су тасқыны орта есеппен 2...7 тәулікке ерте басталып, 5...16 тәулікке ерте аяқталады. 1973 жылға дейінгі кезеңмен салыстырғанда көктемгі су тасқынының басталу күндерінің ең айқын ығысуы Үлкен Қобда, Қарғалы, Қалдығайты өзендерінде көрініс берсе, тасқынның аяқталу күндері Елек, Қарғалы, Шыжын 2, Жем өзендерінде 5...16 тәулікке ерте келіп, нәтижесінде су тасқынының ұзақтығы қысқарған [16].

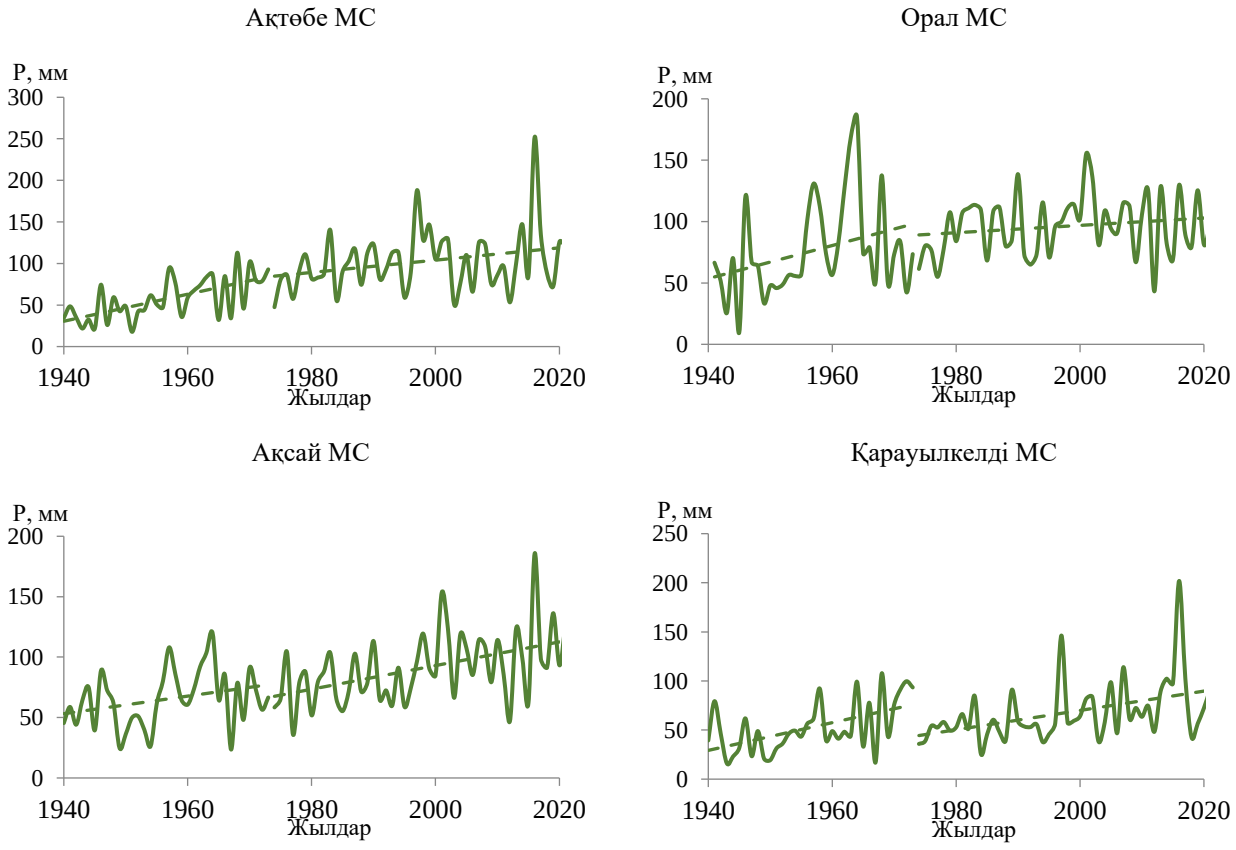
Максималды ағындының төмендеу тенденциясы барлық гидрологиялық біртекті аудандарда тұрақты сақталуда, бұл өз кезегінде қазіргі климаттық өзгерістерді көрсетеді. Көктемгі су тасқыны сипаттамаларындағы мұндай өзгерістер бірқатар факторларға байланысты, олардың арасында қысқы және көктемгі ауа температурасының жоғарылауы, жылымық жиілігінің артуы және топырақтың қату тереңдігінің төмендеуі ерекше орын алады. Жалпы алғанда, бұл процестер су тасқынының басталуына қарай ылғал қорының азаюына алып келеді. Ауа температурасының күрт жоғарылауы және қардың тез еруі көбінесе еріген судың негізгі арналарға жетпеуіне себеп болады, ал топырақтың қату тереңдігінің төмендеуі судың жер асты қабаттарына сіңіп кетуіне байланысты судың қосымша ылғал жоғалуына ықпал етеді. Ағындының осындай күрделі әрі бірмәнді емес өзгергіштігі -

көктемгі су тасқынын қалыптастыратын факторлардың алуан түрлілігі мен олардың әртүрлі бағыттағы ықпалымен түсіндіріледі.

Максималды ағындыға әсер ететін климаттық факторлардың қазіргі заманғы өзгерістері. Табиғи түрде, су тасқынының қалыптасуындағы негізгі факторлар тобы климаттық факторлар болып табылады, олардың ішінде атмосфералық жауын-шашын және ауа температурасы жетекші рөл атқарады. Су жинау алабының көктемгі су тасқыны ағындысына дайындығы күз айларында алаптың ылғалдануымен басталады. Егер күз мезгілі құрғақ болып және топырақтың ылғалдануы төмен болған жағдайда, еріген қар суының көп бөлігі инфильтрацияға шығындалып, көктемгі ағындының азаюына алып келеді [20-21]. Көктемгі су тасқыны ағындысына әсер ететін негізгі факторлар ретінде қысқы кезеңдегі жауын-шашын және VI...X және XI...III айлардағы орташа ауа температурасының жүрісі қарастырылды.

Жауын-шашын

Қысқы кезеңдегі (XII...III) атмосфералық жауын-шашын мөлшерінің жиынтық көрсеткішінің сызықтық трендтерін талдау алап аумағындағы метеостанциялардың басым бөлігінде негізінен оң өзгерістерді көрсетті. 1940...2022 жж. аралығындағы ұзақ уақыт кезеңінде метеорологиялық станциялардың (МС) көпшілігінде өзгеріс трендтері шамалы болып, бұл XX ғасырдағы қысқы ылғалданудың салыстырмалы тұрақтылығын көрсетеді. Алайда, қазіргі кезеңде (1974...2022 жж.) бірқатар метостанцияларда қысқы жауын-жашынның көбеюі байқалады. Соңғы онжылдықтардағы ең айқын өзгерістер Ақсай және Қарауылкелді МС-да өсу тенденциялары әр 10 жылда 9.8 мм құраса, ал Ақтөбе МС – әр 10 жылда 7.4 мм құрады (5 сурет). Бұл қысқы кезеңде ылғал қорының артуын көрсетеді, ал жылыну жағдайында қар жамылғысының тұрақтылығының төмендеуіне және қысқы ағынды үлесінің ұлғаюына әкеледі. Жекелеген метестанцияларда қысқы жауын-шашынның аз мөлшерде азаюы байқалады: Жымпиты МС теріс тренд 2.1 мм/10 жыл, Родниковка МС 1.8 мм/10 жыл және Ильинский МС 1.1 мм/10 жыл құрайды.



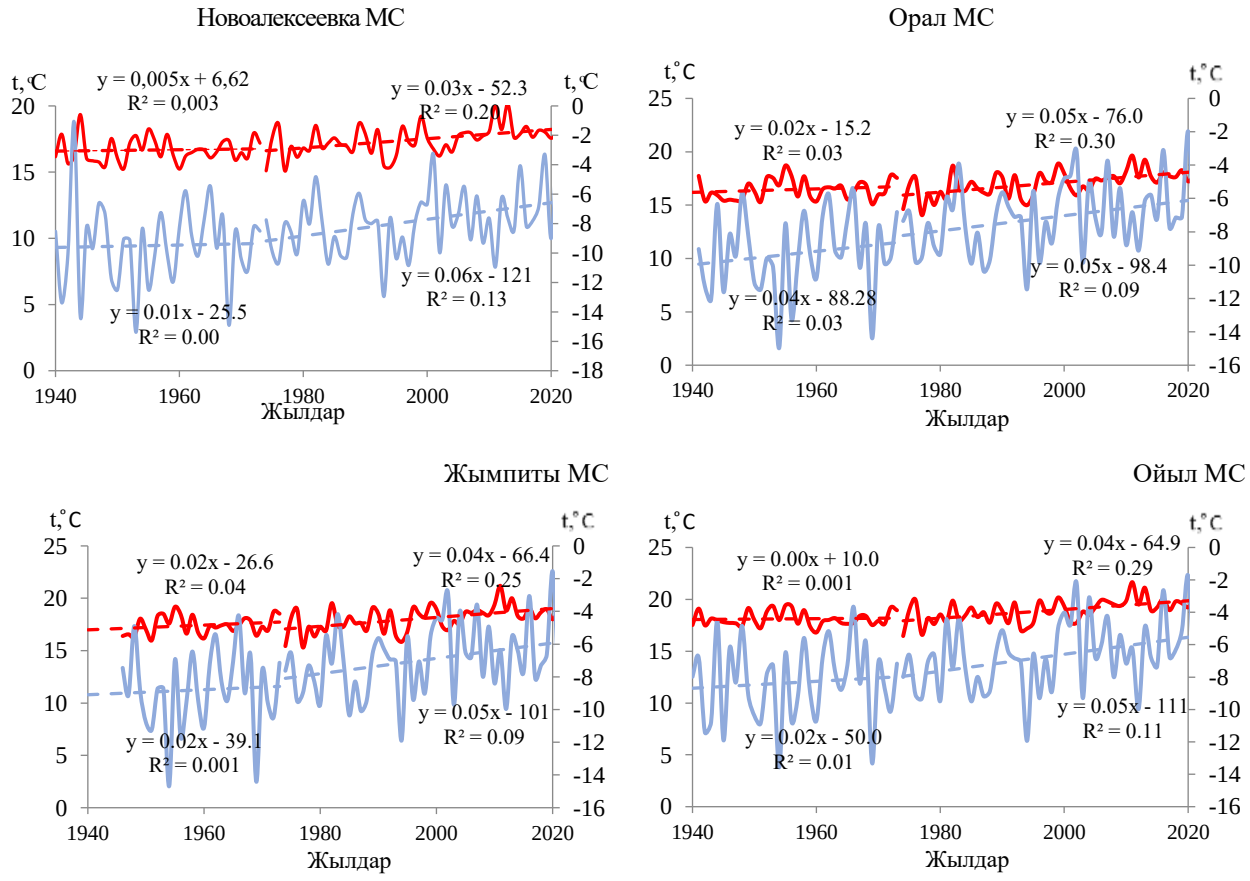
5 сурет. *XII...III айлардағы атмосфералық жауын-шашын суммасының өзгеру динамикасы*

Ауа температурасы

Талдау нәтижелері зерттеліп отырған аумақтағы температуралық режимнің де айтарлықтай өзгеріске ұшырағанын көрсетті: қысқы маусымдағы (XI-III) орташа ауа температурасы қазіргі кезеңде (1974...2022 жж.) айтарлықтай жоғарылаған. Мысалы, 1973 жылға дейінгі кезеңде Новоалексеевка МС ауа температурасы 0.1°С/10 жыл құраса, 1974 жылдан кейінгі кезеңде 0.6 °С/10 жылға дейін жоғарылады. Ойыл МС да ұқсас өсім байқалады: 1973 жылға дейінгі кезеңде 0.2 °С болса, 1974 жылдан кейінгі кезңде температураның өсу қарқыны 0.5 °С/10 жылға жетіп, аумақтағы жылыну тенденциясының анық байқалатынын көрсетті.

Қысқы маусыммен қатар, жылы кезеңде де (VI...X айлар) температураның тұрақты өсуі байқалады. 1974...2022 жж. аралығында Жайық-Каспий алабының барлық метеостанцияларында оң тренд тіркелген: +0.2-ден +0.5 °С/10 жылға дейін. Ең қарқынды жылыну тенденциясы Орал және Шыңғырлау МС байқалып, +0.5 °С/10 жылды құрады. Жыл маусымдағы ауа температурасының жоғарылауы булану шығындарының артуына, топырақ ылғалдылығының төмендеуіне және қысқы мезгілге қарай қалыптасатын ылғал қорының азаюына алып келеді, бұл өз кезегінде көктемгі су тасқынының сулылығын төмендетуі мүмкін (6 сурет).

1974 жылдан кейінгі кезеңде қысқы орташа ауа температурасының тұрақты өсуі - оң температуралар суммасының артуына, нәтижесінде қысқы жылымық күндерінің жиілеуімен қатар қардың қарқынды түрде еруін көрсетеді. Қазіргі кезеңде 16...20 күн және 20...30 күн болатын жылымықтар саны 1973 жылға дейінгі кезеңмен салыстырғанда шамамен екі есеге артқан. Мысалы, Орал МС 1940..1973 жж. аралығында ұзақтығы 16...20 және 20...30 күн болатын жылымық жағдайлары 4 рет тіркелсе, қазіргі кезеңде олардың саны 11-ге дейін өсті [22].



6 сурет. *VI...X және XI...III айлардағы орташа ауа температурасының уақыттық жүрісі*

Алынған деректерді талдау жұмыстарының нәтижелері – 1973 жылға дейінгі кезеңде климаттық сипаттамалардың жағдайы салыстырмалы түрде тұрақты болып, жауын-шашын мөлшері мен ауа температурасында айтарлықтай өзгерістер байқалмаған. Алайда, қазіргі кезеңде (1974...2022 жж.) күзгі-қысқы маусымдағы жауын-шашын көлемінің азаюы және ауа температурасының жедел өсуі байқалып, қар қорының азаюына, көктемгі су тасқынының ерте басталуына және оның ұзақтығының қысқаруына алып келді. Жалпы алғанда, аталған климаттық өзгерістер зерттеу аумағындағы климаттық қауіптердің өсуін және су шаруашылығын басқаруды жаңа климаттық жағдайларға бейімдеу қажеттігін көрсетеді.

Өзендердің көктемгі су тасқыны ағындысын сценарлық болжау

Зерттеу жұмысында сценарлық болжам тек қана көктемгі су тасқыны ағындысы көлемі үшін орындалды, себебі дәл осы шама маусымдық метеорологиялық айнымалылармен (предиктор) ең жоғарғы корреляциялық байланысты көрсетеді. Су тасқынының басқа да сипаттамаларын (максималды су өтімі, су тасқынының басталу және аяқталу күндері, су тасқыны ұзақтығы) болжау тәуліктік метеорологиялық деректерді қолдануды қажет етеді. CMIP6 деректері бойынша тәуліктік метеорологиялық мәліметтердің қолжетімді болуына қарамастан, оларды осы зерттеуде пайдалану қиындықтар туғызды. Себебі, мұндай деректермен жұмыс жасау үшін кеңістіктік ажыратылымдықты алдын-ала төмендету және тәуліктік деректерді түзету қажеттілігі, бастапқы жауын-шашын мәндері мен ауа температурасының амплитудасын, жиілігін және уақыттық сипаттамаларын едәуір бұрмалауы мүмкін. Осыған байланысты сценарийлік болжам модельдеу қателіктері аз маусымдық сипаттамалармен шектелді.

Максималды ағынды көлемін сценарлық болжау үшін статистикалық модель – көптік сызықтық регрессия қолданылды. Предикторлар ретінде су тасқынын қалыптастыру процесстеріне қатысты физикалық-географиялық түсініктерге де, сондай-ақ корреляциялық талдау нәтижелеріне де негізделіп іріктелген метеорологиялық параметрлер пайдаланылды. Маңызды предикторларды таңдау олардың көктемгі ағынды көлемімен байланысының деңгейін ескере отырып жүргізілді. Ең маңызды метеорологиялық факторлар (предикторлар) ретінде келесілер танылды:

- топырақтың күзгі ылғалдану дәрежесін және қардың жиналу көлемін сипаттайтын суық кезеңдегі (қыркүйек-наурыз) атмосфералық жауын-шашынның жиынтық мөлшері;

- маусым-қазан айлары аралығындағы судың сіңу қабілетін және топырақ-жер қыртысының булану шығынын анықтайтын ауаның орташа температурасы;

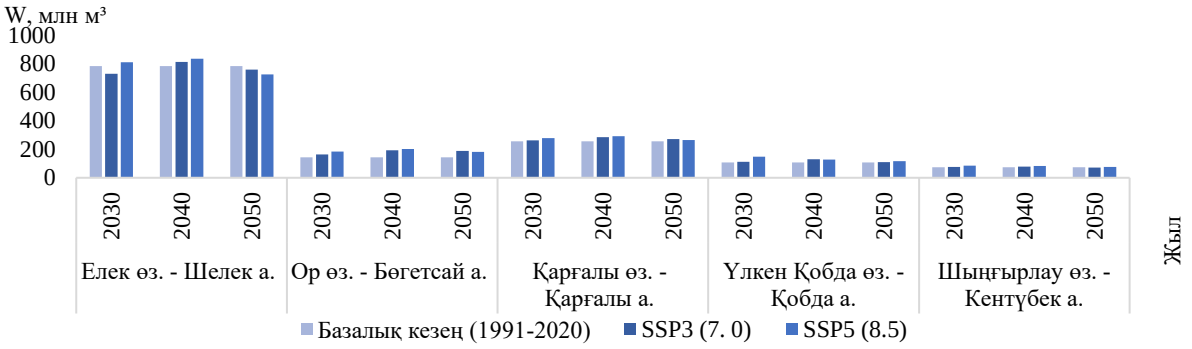
- жылымықтардың жиілігіне және ерте қардың еру қарқындылығына әсер ететін қысқы кезеңнің орташа ауа температурасы.

Жайық–Каспий США аумағындағы SSP3-7.0 және SSP5-8.5 климаттық сценарийлері жағдайында 2030, 2040 және 2050 жылдарға болжанған көктемгі су тасқыны ағындысын талдау кеңістіктік әртектілікті көрсетті (7 сурет).

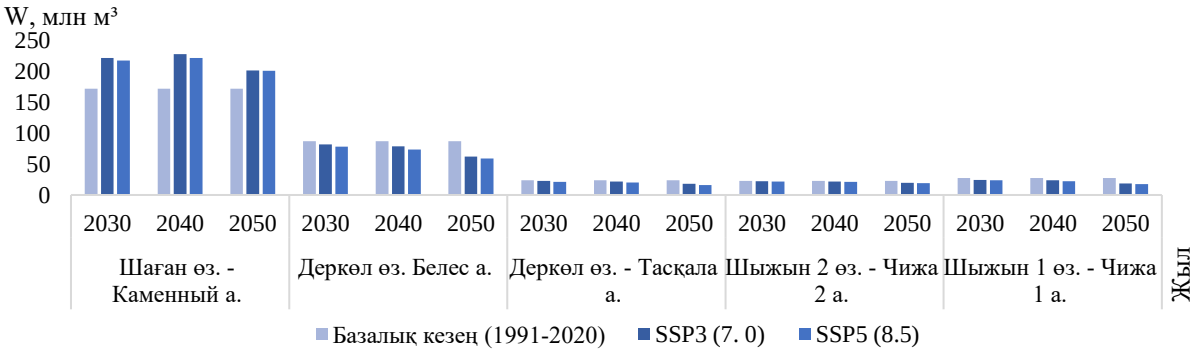
Жайық өзенінің сол жағалау салаларында SSP3-7.0 және SSP5-8.5 сценарийлері бойынша су тасқыны ағындысының өзгерістері бір мәнді сипатқа ие емес. SSP5-8.5 сценарийі бойынша, Сарықобда, Ор, Үлкен Қобда және Терісбұтақ сынды негізгі өзендерде базалық кезеңмен салыстырғанда максималды ағындының 6 %-дан 48 %-ға дейін аруты болжанады. Сонымен қатар, Қосестек, Қарақобда, Терісаққан және Елек өзендерінде ағындының 35 %-ға дейін тұрақты төмендеуі күтіледі.

Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендерде екі климаттық сценарий бойынша максималды ағындының тұрақты төмендеуі болжанады. Шыжын 1 және

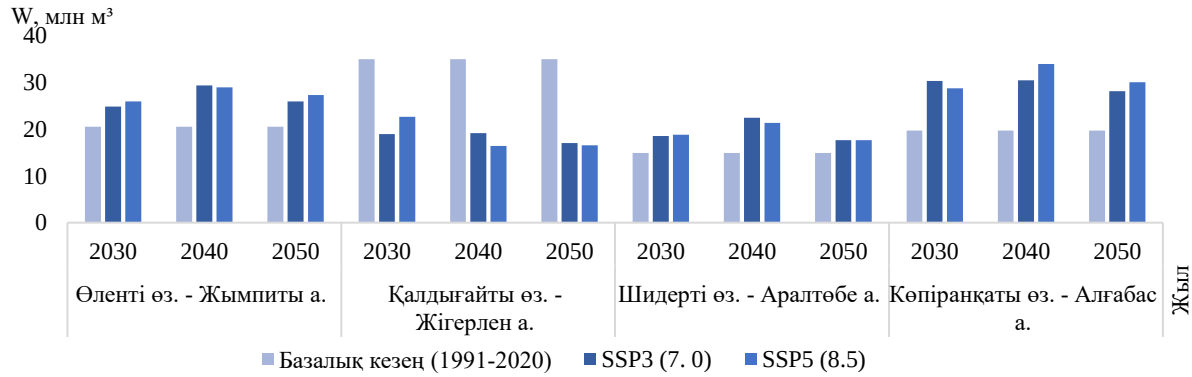
Деркөл өзендерінде ағынды көлемі 35 %-ға дейін азаяды. Ал, Шаған өзенінде су тасқыны ағындысының 33 %-ға дейін тұрақты өсуі байқалады.



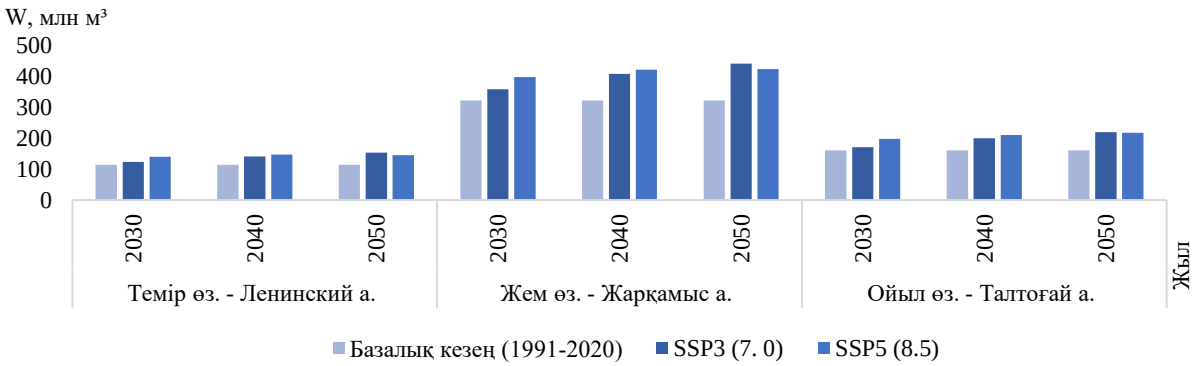
I - Жайық өзенінің сол жағалау салалары



II - Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендер



IV - Орал алды үстіртінің оңтүстік бөлігіндегі өзендер



V - Оңтүстік өзендер

7 сурет. *SSP3-7.0 және SSP5-8.5 сценарийлері бойынша 2030, 2040 және 2050 жылдардағы көктемгі су тасқыны ағынды көлемінің сценарийлік болжамы*

Орал алды үстіртінің оңтүстік бөлігіндегі өзендерде максималды ағындының әртүрлі бағыттағы өзгерістері байқалады. SSP5-8.5 сценарийі бойынша өзендердің көпшілігінде ағындының тұрақты түрде өсуі күтіледі, әсіресе, Көпіраңқаты және Шидерті өзендерінде 72 %-ға дейін өсуі айқын көрініс береді. Оңтүстік өзендерде тұрақты өсу: орташа алғанда, SSP3-7.0 сценарийі бойынша максималды ағынды 20 %, ал SSP5-8.5 бойынша 30 %-ға дейін өсуі күтіледі. Ал, Қиыл өзенінде су тасқыны ағындысының тұрақты төмендеуі базалық кезеңмен салыстырғанда 34 %-ға дейін байқалады.

Жайық-Каспий США алабы өзендерінің көктемгі су тасқыны ағындысының сценарийлік болжамдарын талдау аумақтың кіші және орта өзендерінде күтілетін климаттық өзгерістерге жоғары сезімталдығын көрсетеді. Бұл жағдай, әсіресе ағындының ауытқуы кең ауқымда өзгеретін дала және құрғақ аудандарда анық байқалады. Сонымен қатар, метеорологиялық параметрлердің болжамдық өзгерістерін су тасқыны ағындысының үлгіленген нәтижелерімен салыстыру су тасқынының қалыптасуында суық кезеңдегі жауын-шашын мөлшері мен ауа температурасының шөшуші рөл атқаратынын растайды.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Жайық–Каспий су шаруашылығы алабының қазіргі кезеңдегі (1974...2022 жж.) көктемгі су тасқыны деректерін талдау негізінде аумақтың барлық гидрологиялық біртекті аудандарында көктемгі ағынды көлемінің тұрақты төмендеу тенденциясы байқалатыны анықталды. Су тасқыны көлемінің айтарлықтай төмендеуі Жайық өзенінің сол жағалау салаларында, атап айтқанда Үлкен Қобда мен Елек өзендерінде (35 % азайған) тіркелген. Сондай-ақ, сулылықтың едәуір азаюы Орал алды үстіртінің оңтүстік өзендерінде (Өлеңті, Көпіраңқаты), Жайықтың оң жағалау салаларында (Шаған, Шыжын) және оңтүстік өзендерде (Темір, Ойыл, Жем) байқалады. 1974 жылдан кейінгі кезеңде төмендеу қарқынының біршама баяулауына қарамастан, теріс динамика сақталуда.

Аумақта ағынды көлемінің азаюымен қатар, максималды су өтімінің айтарлықтай төмендеуі байқалады. Елек өзенінде максималды су өтімі 2500-ден 1500 $м^3/с$, Үлкен Қобда өзенінде - 1300-ден 1000 $м^3/с$, Темір өзенінде - 800-ден 500 $м^3/с$ дейін азайған. Күрт төмендеу қарқыны Елек және Үлкен Қобда өзендерінде (жылына 5.3 $м^3/с$) тіркелді. Өзгерістер су тасқынының тек қана сандық емес, уақыттық сипаттамаларына да қатысты, су тасқынының басталуы орта есеппен 2...7 күнге ерте басталып және 5...16 күнге ерте аяқталуы көрініс беріп, Үлкен Қобда, Қарғалы, Қалдығайты, Елек, Шыжын және Жем өзендеріндегі су тасқыны ұзақтығының қысқаруына алып келді.

Көктемгі ағынды трансформациясының негізгі факторы климаттық жағдайлардың өзгеруі болып табылады. Алаптың барлық аумағында қысқы орташа ауа температурасының тұрақты өсуі байқалады: онжылдықта +0.5…+0.6 °С-қа дейін, бұл қысқы жылымықтардың жиіленуімен қатар жүреді. Теріс температуралар суммасының азаюы топырақтың қату тереңдігінің төмендеуіне және еріген қар суларының фильтрациялық шығындарының артуына жағдай жасайды. Сонымен қатар, қысқы жауын-шашын мөлшерінің азаюы топырақтың су ұстау қабілетін төмендетіп, су тасқыны кезінде су ресурстарының қосымша шығындалуына ықпал етеді.

CMIP6 жаһандық климаттық модельдерінің ансамблі негізінде SSP3-7.0 және SSP5-8.5 сценарийлері бойынша 2050 жылға дейінгі кезеңге жасалған болжам аумақтың су режиміне климаттық қысымның одан әрі күшею ықтималдығын көрсетеді. Қысқы кезеңде ауа температурасының 1.5...4.4 °С-қа дейін артуы және жауын-шашын мөлшерінің 30...60 %-ға өсуі болжанады. Алайда, өзен ағындысының климаттық өзгерістерге кеңістіктік біртексіздігінің әсері жоғары болып қала береді.

Жайық өзенінің сол жағалау салаларында көктемгі ағындының өсуі (+48 %) және төмендеуі (–35 %) болжанады. Шаған өзені алабын қоспағанда, Жалпы Сырт қыратының батыс бөлігіндегі өзендерде ағындының азаю тенденциясы басым, ал оңтүстік өзендерде (Темір, Ойыл, Жем) су тасқынының тұрақты өсуі (+72 %) тән.

Алап аумағындағы кіші және орта өзендер климаттың өзгеруіне қатысты, әсіресе көктемгі су тасқыны кезінде жоғары сезімталдыққа ие. Көктемгі су тасқыны – өзендердің гидрологиялық режимінің маусымдық тұрақтылығының маңызды көрсеткіші болып табылады, ал оның қазіргі кезеңдегі трансформацияға ұшырауы су ресурстары саласындағы жобалық және басқарушылық шешімдерді қайта қарау қажеттілігін талап етеді. Өсіп келе жатқан климаттық тұрақсыздық пен қауіптер жағдайында сценарийлік жосарлау, климаттық модельдеу және алаптардың жергілікті ерекшеліктерін ескере отырып, су ресурстарын басқарудың адаптивті тәсілдерін енгізу өзекті болып табылады. Алынған нәтижелер ғылыми әдебиеттерде жазылған жаһандық трендтер мен тұжырымдарға сәйкес келеді, бұл олардың сенімділігі мен аумақтық гидрологиялық саясат үшін маңыздылығын растайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар «Қазгидромет» РМК ашық деректер базасынан алды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – СКА; деректерді басқару - ЛКМ; Ресми талдау – ЛКМ, ЭКТ, АМС; Әдістеме – СКА, ЛКМ, ЭКТ; Визуализация - АМС; Бастапқы жобаны жазу - ЛКМ, ЭКТ, ЖЖС; Шолу жазу және редакциялау – ЭКТ, АМС.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Ғылыми зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім Министрлігі Ғылым комитетінің BR28713279 «Қазіргі климаттың өзгеруі жағдайында Қазақстанның жазық және ұсақ шоқылы аймақтарында су басу қаупін басқарудың ғылыми және қолданбалы негіздері» бағдарламасы негізінде қаржыландыру жасалынды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Tursunova A., Nurbatsina A., Salavatova Z., Huthoff F. (2025). Sustainability challenges in Kazakhstan's river systems: assessing climate-induced hydrological changes. Sustainability. Vol. 17, № 8. P. 3405. https://doi.org/10.3390/su17083405.

2 Frolova N. L., Agafonova S. A., Kireeva M. B., Povalishnikova E. S., Pakhomova O. M. (2017). Recent changes of annual flow distribution of the Volga Basin rivers. Geography, Environment, Sustainability. Vol. 10. P. 28–39. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-28-39.

3 Wang P., Shpakova R. N. (2022). Complex streamflow responses to climate warming in five river basins in South Yakutia, Russia. Frontiers in Environmental Science. Vol. 10. P. 1033943. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1033943.

4 Медведев А. И. Байесовы оценки изменения стока российских рек в XXI веке на основе CMIP6 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59, № 7. – С. 857–871.

5 Магрицкий Д. В., Евстигнеев В. М., Юмина М. Н., Торопов П. А., Кенжебаева А. Ж., Ермакова Г. С. Изменения стока в бассейне реки Урал // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2018. – № 1. – С. 90–101.

6 Сивохип Ж. Т., Павлейчик В. М. Современные тенденции внутригодового распределения речного стока в бассейне реки Урал // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2020. – Т. 33. – С. 112-123. – https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.112

7 Медеу А. Р., Махмудова Л. К., Мырзахметов А. Б., Загидуллина А. Р., Канай М. А. Паводковая ситуация на реке Жайык (Урал) в 2024 году // География и водные ресурсы. – 2024. – № 4. – С. 14–23. – https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-14-23.35

8 Терехов А. Г., Саиров С. Б., Абаев Н. Н., Сагатдинова Г. Н., Амиргалиев Е. Н. О возможных причинах исключительно больших весенних паводков 2024 года в Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21. – № 3. – С. 331–338. – https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-331-338

9 Danilovich I. S., Loginov V. F., Groisman P. Y. (2023). Changes of Hydrological Extremes in the Center of Eastern Europe and Their Plausible Causes. Water. Vol. 15, № 16. Article 2992. https://doi.org/10.3390/w15162992

10 Laiskhanov S., Sharapkhanova Z., Myrzakhmetov A., Levin E., Taukebayev O., Nurmagambetuly Z., Kaster S. (2025). Geo-Ecological Analysis of the Causes and Consequences of Flooding in the Western Region of Kazakhstan. Urban Science. Vol. 9, № 1. Article 20. – https://doi.org/10.3390/urbansci9010020

11 Dottori F., Szewczyk W., Ciscar J.-C., Zhao F., Alfieri L., Hirabayashi Y. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. Nature Climate Change. Vol. 8, № 9. P. 781–786. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z

12 Michalek A. T., Villarini G., Kim T., Quintero F., Krajewski W. F., Scoccimarro E. (2023). Evaluation of CMIP6 HighResMIP for hydrologic modeling of annual maximum discharge in Iowa. Water Resources Research. Vol. 59. https://doi.org/10.1029/2022WR034166

13 Suram A., Anand R. P., Vema V. K. (2024). Catchment response to climate change under CMIP6 scenarios: a case study of the Krishna River Basin. Journal of Water and Climate Change. Vol. 15, № 2. P. 476–498. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.442

14 Wu Y., Miao C., Fan X., Gou J., Zhang Q., Zheng H. (2022). Quantifying the Uncertainty Sources of Future Climate Projections and Narrowing Uncertainties with Bias Correction Techniques. Earth's Future. Vol. 10. https://doi.org/10.1029/2021EF002630

15 Fallah B., Rostami M., Russo E., Harder P., Menz C., Hoffmann P., Didovets I., Hattermann F. F. (2025). Climate model downscaling in central Asia: a dynamical and a neural network approach. Geoscientific Model Development. Vol. 18. P. 161–180. https://doi.org/10.5194/gmd-18-161-2025
16 Smagulov Z., Makhmudova L., Alimkulov S., Talipova E., Zagidullina A., Birimbayeva L., Sailaubek A. (2025). Transformation of seasonal distribution of river flow in the Zhaiyk-Caspian water basin under changing climate conditions. Journal of Water and Climate Change. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.537.
17 Frieler K., Lange S., Piontek F., Reyer C. P. O., Schewe J., Warszawski L., Zhao F., Chini L., Denvil S., Emanuel K., Geiger T., Halladay K., Hurtt G., Mengel M., Murakami D., Ostberg S., Popp A., Riva R., Stevanovic M., Suzuki T., Volkholz J., Burke E., Ciais P., Ebi K., Eddy T. D., Elliott J., Galbraith E., Gosling S. N., Hattermann F., Hickler T., Hinkel J., Hof C., Huber V., Jägermeyr J., Krysanova V., Marcé R., Müller Schmied H., Mouratiadou I., Pierson D., Tittensor D. P., Vautard R., van Vliet M., Biber M. F., Betts R. A., Bodirsky B. L., Deryng D., Frolking S., Jones C. D., Lotze H. K., Lotze-Campen H., Sahajpal R., Thonicke K., Tian H., Yamagata Y. (2017). Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). Geoscientific Model Development. Vol. 10. P. 4321–4345. https://doi.org/10.5194/gmd-10-4321-2017
18 Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2007. – 279 с.
19 Helsel D. R., Hirsch R. M. (2020). Statistical Methods in Water Resources (U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. A3). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 454 p. https://doi.org/10.3133/tm4A3
20 Владимиров А. М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Учёные записки РГГМУ. – 2009. – № 9. – С. 22–39.
21 Дмитриева В. А., Нефедова Е. Г. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. Гидрологические изменения. – 2018. – № 145. – С. 285–297.
22 Махмудова Л., Талипова Э., Мырзахметов А., Биримбаева Л., Тұрсынбай А., Әліпбек Ә. Климатические характеристики оттепелей на территории Жайык-Каспийского водохозяйственного бассейна // Journal of Geography and Environmental Management. – 2025. – Т. 75, № 4. – С. 80–91.

REFERENCES

1 Tursunova A., Nurbatsina A., Salavatova Z., Huthoff F. (2025). Sustainability challenges in Kazakhstan's river systems: assessing climate-induced hydrological changes. Sustainability. Vol. 17, № 8. P. 3405. https://doi.org/10.3390/su17083405.
2 Frolova N. L., Agafonova S. A., Kireeva M. B., Povalishnikova E. S., Pakhomova O. M. (2017). Recent changes of annual flow distribution of the Volga Basin rivers. Geography, Environment, Sustainability. Vol. 10. P. 28–39. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-28-39.
3 Wang P., Shpakova R. N. (2022). Complex streamflow responses to climate warming in five river basins in South Yakutia, Russia. Frontiers in Environmental Science. Vol. 10. P. 1033943. https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1033943.
4 Medvedev A. I. (2023) Baesovy otsenki izmeneniia stoka rossiiskikh rek v XXI veke na osnove CMIP6 [Bayesian estimates of changes in Russian river runoff in the 21st century based on CMIP6]. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Vol. 59, No. 7, pp. 857–871. [In Russian]
5 Magritskiy D. V., Evstigneev V. M., Yumina M. N., Toropov P. A., Kenzhebaeva A. Zh., Ermakova G. S. (2018) Izmeneniia stoka v basseyne reki Ural [Changes in runoff in the Ural River Basin]. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiia. No. 1, pp. 90–101. [In Russian]
6 Sivokhip Zh. T., Pavleichik V. M. (2020) Sovremennye tendentsii vnutrigodovogo raspredeleniia rechnogo stoka v basseyne reki Ural [Modern trends of intra-annual distribution of river runoff in the Ural River Basin]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle. Vol. 33, pp. 112–123. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.112. [In Russian]
7 Medeu A. R., Makhmudova L. K., Myrzakhmetov A. B., Zagidullina A. R., Kanai M. A. (2024) Pavodkovaia situatsiia na reke Zhaiyk (Ural) v 2024 godu [Flood situation on the Zhaiyk (Ural) River in 2024]. Geografiia i vodnye resursy. No. 4, pp. 14–23. https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-4-14-23.35. [In Russian]
8 Terekhov A. G., Sairov S. B., Abaev N. N., Sagatdinova G. N., Amirgaliyev E. N. (2024) O vozmozhnykh prichinakh iskliuchitel'no bol'shikh vesennikh pavodkov 2024 goda v Kazakhstane [On possible causes of exceptionally large spring floods in Kazakhstan in 2024]. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. Vol. 21, No. 3, pp. 331–338. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-3-331-338. [In Russian]
9 Danilovich I. S., Loginov V. F., Groisman P. Y. (2023). Changes of Hydrological Extremes in the Center of Eastern Europe and Their Plausible Causes. Water. Vol. 15, № 16. Article 2992. https://doi.org/10.3390/w15162992
10 Laiskhanov S., Sharapkhanova Z., Myrzakhmetov A., Levin E., Taukebayev O., Nurmagambetuly Z., Kaster S. (2025). Geo-Ecological Analysis of the Causes and Consequences of Flooding in the Western Region of Kazakhstan. Urban Science. Vol. 9, № 1. Article 20. – https://doi.org/10.3390/urbansci9010020
11 Dottori F., Szewczyk W., Ciscar J.-C., Zhao F., Alfieri L., Hirabayashi Y. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. Nature Climate Change. Vol. 8, № 9. P. 781–786. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z
12 Michalek A. T., Villarini G., Kim T., Quintero F., Krajewski W. F., Scoccimarro E. (2023). Evaluation of CMIP6 HighResMIP for hydrologic modeling of annual maximum discharge in Iowa. Water Resources Research. Vol. 59. https://doi.org/10.1029/2022WR034166
13 Suram A., Anand R. P., Vema V. K. (2024). Catchment response to climate change under CMIP6 scenarios: a case study of the Krishna River Basin. Journal of Water and Climate Change. Vol. 15, № 2. P. 476–498. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.442
14 Wu Y., Miao C., Fan X., Gou J., Zhang Q., Zheng H. (2022). Quantifying the Uncertainty Sources of Future Climate Projections and Narrowing Uncertainties with Bias Correction Techniques. Earth's Future. Vol. 10. https://doi.org/10.1029/2021EF002630
15 Fallah B., Rostami M., Russo E., Harder P., Menz C., Hoffmann P., Didovets I., Hattermann F. F. (2025). Climate model downscaling in central Asia: a dynamical and a neural network approach. Geoscientific Model Development. Vol. 18. P. 161–180. https://doi.org/10.5194/gmd-18-161-2025
16 Smagulov Z., Makhmudova L., Alimkulov S., Talipova E., Zagidullina A., Birimbayeva L., Sailaubek A. (2025). Transformation of seasonal distribution of river flow in the Zhaiyk-Caspian water basin under changing climate conditions. Journal of Water and Climate Change. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.537.
17 Frieler K., Lange S., Piontek F., Reyer C. P. O., Schewe J., Warszawski L., Zhao F., Chini L., Denvil S., Emanuel K., Geiger T., Halladay K., Hurtt G., Mengel M., Murakami D., Ostberg S., Popp A., Riva R., Stevanovic M., Suzuki T., Volkholz J., Burke E., Ciais P., Ebi K., Eddy T. D., Elliott J., Galbraith E., Gosling S. N., Hattermann F., Hickler T., Hinkel J., Hof C., Huber V., Jägermeyr J.,

Krysanova V., Marcé R., Müller Schmied H., Mouratiadou I., Pierson D., Tittensor D. P., Vautard R., van Vliet M., Biber M. F., Betts R. A., Bodirsky B. L., Deryng D., Frolking S., Jones C. D., Lotze H. K., Lotze-Campen H., Sahajpal R., Thonicke K., Tian H., Yamagata Y. (2017). Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). Geoscientific Model Development. Vol. 10. P. 4321–4345. https://doi.org/10.5194/gmd-10-4321-2017

18 Сикан А. В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – Санкт-Петербург: Изд-во РГГМУ, 2007. – 279 с.

19 Helsel D. R., Hirsch R. M. (2020). Statistical Methods in Water Resources (U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chap. A3). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 454 p. https://doi.org/10.3133/tm4A3

20 Vladimirov A. M. (2009) Faktory, opredeliaiushchie vozniknovenie ekstremal'nykh raskhodov i urovnei vody polovod'ia [Factors determining the occurrence of extreme discharges and water levels during floods]. Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. No. 9, pp. 22–39. [In Russian]

21 Dmitrieva V. A., Nefedova E. G. (2018) Gidrologicheskaia reaktsiia na meniaiushchiesia klimaticheskie usloviia i antropogennuiu deiatel'nost' v basseyne Verkhnego Dona [Hydrological response to changing climatic conditions and anthropogenic activity in the Upper Don Basin]. Voprosy geografii. Gidrologicheskie izmeneniia. No. 145, pp. 285–297. [In Russian]

22 Makhmudova L., Talipova E., Myrzakhmetov A., Birimbaeva L., Tursynbai A., Alipbek A. (2025) Klimaticheskie kharakteristiki ottepelei na territorii Zhaiyk-Kaspiiskogo vodokhoziaistvennogo basseina [Climatic characteristics of thaws in the Zhaiyk-Caspian water management basin]. Journal of Geography and Environmental Management. Vol. 75, No. 4, pp. 80–91. [In Russian].

ОЦЕНКА ВЕСЕННЕГО СТОКА ПОЛОВОДЬЯ В ЖАЙЫК-КАСПИЙСКОМ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ БАССЕЙНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И СЦЕНАРНЫЙ ПРОГНОЗ

Саят К. Алимкулов[1] к.г.н., ассоциированный профессор, Ляззат К. Махмудова[1] к.г.н., ассоциированный профессор, Эльмира К. Талипова[1,2] PhD, Жанибек Ж. Смагулов[1], Акгулим М. Сайлаубек[1,2*]

[1]АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; sayat.alimkulov@mail.ru, mlk2002@mail.ru, elmira_280386@mail.ru, zh.zh.smagulov@mail.ru, gulima97life@gmail.com
[2] Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; elmira_280386@mail.ru, gulima97life@gmail.com
Автор корреспондент: Акгулим М. Сайлаубек, gulima97life@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

максимальный сток, весеннее половодье, трансформация речного стока, сценарное прогнозирование, CMIP6

По статье:
Получено: 30.09.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано:08.10.2025

АБСТРАКТ

В настоящем исследовании выполнен комплексный анализ характеристик весеннего половодья в Жайык-Каспийском водохозяйственном бассейне за современный период и прогнозируемые изменения на горизонты 2030, 2040 и 2050 годы на основе климатических сценариев CMIP6 (SSP3-7.0 и SSP5-8.5). Анализ наблюдений на 34 гидрологических постах показал сокращение объёма весеннего стока до 35 %, уменьшение продолжительности половодья и снижение максимального расхода воды на отдельных реках до 45 %. Установлено, что повышение температуры, увеличение частоты оттепелей и снижение осеннего увлажнения приводят к снижению максимальных расходов воды и перераспределению сезонного режима стока. Сценарные прогнозы выявили выраженную пространственную неоднородность – на некоторых реках ожидается рост максимального стока, который достигает до 72 %, тогда как на других реках наблюдается устойчивое снижение максимального стока до 35 %. Полученные результаты указывают на необходимость перехода к адаптивной системе управления водными ресурсами, ориентированной на региональные особенности речных бассейнов и чувствительность малых и средних водотоков к климатическим изменениям.

ASSESSMENT OF SPRING FLOOD RUNOFF IN THE ZHAIYK-CASPIAN WATER MANAGEMENT BASIN: CURRENT STATE AND SCENARIO FORECAST

Sayat Alimkulov[1] Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Lyazzat Makhmudova[1] Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Elmira Talipova[1,2] PhD, Zhanybek Smagulov[1], Akgulim Sailaubek[1,2*]

[1]JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; sayat.alimkulov@mail.ru, mlk2002@mail.ru, elmira_280386@mail.ru, zh.zh.smagulov@mail.ru, gulima97life@gmail.com
[2] al-Farabi Kazakh National University, Almaty. Kazakhstan; elmira_280386@mail.ru, gulima97life@gmail.com
Corresponding author: Akgulim Sailaubek, gulima97life@gmail.com

KEY WORDS

maximum runoff,
river runoff transformation,
spring flood,
scenario projection,
CMIP6

About article:
Received: 30.09.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published:08.10.2025

ABSTRACT

This study presents a comprehensive analysis of the characteristics of spring runoff in the Zhaiyk-Caspian water management basin for the modern period, as well as an assessment of projected changes for the horizons of 2030, 2040, and 2050 based on CMIP6 climate scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5). The analysis of observations from 34 hydrological stations revealed a decrease in spring runoff volume of up to 35 %, a reduction in flood duration, and a decline in peak discharge on certain rivers of up to 45 %. It was established that rising air temperatures, an increased frequency of thaws, and reduced autumn soil moisture contribute to lower peak discharges and a transformation of the seasonal runoff regime. Scenario-based projections demonstrated pronounced spatial heterogeneity: some rivers are expected to experience an increase in maximum runoff of up to 72 %, while others show a steady decrease of up to 35 %. These findings highlight the necessity of transitioning to an adaptive water resources management system that takes into account the regional characteristics of river basins and the high sensitivity of small and medium-sized streams to climate change.

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

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАНСГРАНИЧНОГО СТОКА В ЖАЙЫК-КАСПИЙСКОМ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ БАССЕЙНЕ

Саят К. Алимкулов к.г.н., ассоциированный профессор, Альфия Р. Загидуллина*, Гаухар Р. Баспакова PhD

АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; sayat.alimkulov@mail.ru (СКА), zagidullina_a_88@mail.ru (АРЗ), sharafedenova@mail.ru (ГРБ)
*Автор корреспондент: Альфия Р. Загидуллина, zagidullina_a_88@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

трансграничный бассейн, водные отношения, вододеление

АБСТРАКТ

Проблема межгосударственного распределения трансграничного стока в Казахстане особо остра, так как страна занимает низовое (устьевое) положение практически для всех крупных рек и является зависимой от притока воды из-зарубежа. В данной работе исследован вопрос водного сотрудничества между Республикой Казахстан и Российской Федерацией в сфере использования и охраны трансграничных водных объектов в пределах Жайык-Каспийского водохозяйственного бассейна. Проведена оценка выполнения межправительственных обязательств по совместному использованию водных ресурсов рек Жайык, Караозен и Сарыозен. Построены графики ежегодного фактического притока рассматриваемых трансграничных рек с указанием их расчетных обеспеченностей, сделаны выводы о соответствии фактических значений согласованным объемам. Показано, что по р. Жайык в начале водохозяйственного года месячный объем стока за апрель, составляющий основную часть объема стока весеннего половодья и, соответственно, годового стока, практически каждый год меньше предусмотренного Протоколом. По рекам Караозен и Сарыозен в половине случаев приток из сопредельного государства не достигает лимита соответствующей водности года. Даны рекомендации к усовершенствованию механизма межгосударственного распределения трансграничного стока в исследуемом бассейне.

По статье:
Получено: 30.09.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано:08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата, рост населения, влияющий на производство продовольствия, расширение урбанизированных территорий, нерациональная антропогенная деятельность – все это приводит к существенным количественным и качественным изменениям водных ресурсов. Наблюдается повсеместный водный кризис, который особенно остро ощущается в засушливых и полузасушливых районах Земного шара [1]. Во многих случаях дефицит воды обусловлен неправильной политикой управления водными ресурсами.

Ситуация усугубляется «трансграничностью» водотоков, когда одна река протекает по территории двух и более государств, а единый природный речной бассейн разделен межгосударственными границами. Трансграничные речные бассейны частично охватывают территорию 145 стран, а территория 21 государства полностью входит в трансграничные речные бассейны [2]. В этих условиях потенциально противоречивые интересы различных водопользователей перерастают в потенциально противоречивые интересы соседствующих стран, в результате чего

Для цитирования:
Алимкулов С., Загидуллина А., Баспакова Г. Межгосударственное распределение трансграничного стока в Жайык-Каспийском водохозяйственном бассейне // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 110-120.

проблема совместного использования трансграничных водных ресурсов приобретает политический характер.

Важность и актуальность устойчивого распределения трансграничных водных ресурсов постоянно усиливается, поскольку 60 % мировых запасов пресной воды сосредоточено в трансграничных бассейнах. Многие из этих совместно используемых бассейнов уязвимы к последствиям изменения климата и нарастающим антропогенным нагрузкам [3].

В Казахстане данная проблема особо остра, так как 7 из 8 речных водохозяйственных бассейнов (ВХБ) республики являются трансграничными. Половина водных ресурсов (47.1 из 106 км^3) поступает из сопредельных государств, а именно: из Китая по рекам Ертис и Иле – 19.5 км^3, из России по реке Жайык – 7.87 км^3, из Узбекистана по реке Сырдария – 16.5 км^3, из Киргизии по рекам Шу и Талас – 2.77 км^3 [4, 5]. Казахстан сильно зависим от притока воды из-за рубежа, т.к. занимает низовое (устьевое) положение практически для всех крупных рек.

Одним из наиболее уязвимых бассейнов является Жайык-Каспийский (после Арало-Сырдариинского), его суммарные ресурсы на 82 % зависят от трансграничного притока с территории Российской Федерации [6]. Рассмотрим межгосударственное распределение трансграничного стока в этом бассейне.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Жайык-Каспийский водохозяйственный бассейн, охватывающий западный регион Казахстана – крупнейший по занимаемой площади (около 30 % территории республики) и один из важнейших для экономики страны ввиду добычи минерально-сырьевых ресурсов, в первую очередь нефти и газа.

Основная река – Жайык (Урал), формируется на территории Российской Федерации (РФ), в пределах Республики Казахстан (РК) сосредоточено нижнее течение реки, водосборные площади ее левобережных притоков Ор (Орь), Елек (Илек) (являются трансграничными, оттекают на территорию России), Шынгырлау (Утва). К Жайык-Каспийскому ВХБ также относятся реки, стекающие с западной части Общего Сырта, среди которых Караозен (Большой Узень) и Сарыозен (Малый Узень) являются трансграничными, внутренние реки Жайык-Жемского плато: Ойыл (Уил), Сагыз, Жем (Эмба). В ВХБ также входят рукав Кигаш (Кигач) и протока Шаронова, относящиеся к дельте реки Едил (Волга). На рисунке 1 представлена карта-схема расположения трансграничных рек в исследуемом бассейне.

Речной сток р. Жайык (Урал) и его притоков используется для водообеспечения Оренбургской и Челябинской областей РФ, Республики Башкортостан (субъект РФ), Западно-Казахстанской, Актюбинской и Атырауской областей РК на нужды промышленности (металлургической и нефтегазовой), населения (г. Атырау обеспечивается питьевой водой из реки Жайык), сельского хозяйства (регулярное и лиманное орошение, обводнение пастбищ), рыбного хозяйства и водного транспорта. Сток главной реки зарегулирован Верхнеуральским (объем 601 млн м^3), Магнитогорским (объем 174.0 млн м^3) и Ириклинским (объем 3260 млн м^3) водохранилищами, расположенными на территории РФ.

Реки Караозен (Большой Узень) и Сарыозен (Малый Узень) формируются на территории Саратовской области РФ, притекают в Западно-Казахстанскую область, где впадают в бессточные Камыш-Самарские озера. Сток рек зарегулирован как на территории России, так и в Казахстане. Каждый год с 15 апреля по 15 ноября осуществляется подача волжской воды по Саратовскому каналу (РФ) в истоки обеих рек для дальнейшего обеспечения отраслей экономики, пополнения прудов и водохранилищ РФ и РК, в том числе санитарные попуски в дельтовые озера для поддержания их уровня воды [7].



Рисунок 1. *Карта-схема расположения трансграничных рек в Жайык-Каспийском ВХБ*

Река Кигаш – один из крупных рукавов дельты р. Едил (Волга), протекает в крайней восточной её части, относится к системе рукавов Бузан-Ахтуба. Река Кигаш является пограничным водотоком, по его руслу проходит государственная граница между Российской Федерацией и Республикой Казахстан. Верхняя и правобережная часть системы рукава Кигаш расположена в Астраханской области РФ, остальная – в Атырауской области РК. Вблизи государственной границы у пос. Шортанбай Атырауской области РК от рукава Кигаш ответвляется значительная протока Шаронова, текущая на восток до с. Ганюшкино, далее на юго-восток до Каспийского моря (рисунок 2). С 1991 г. ведется забор воды из протоки Кигаш с дальнейшей подачей водоводом «Астрахань-Мангышлак» для обеспечения нефтяных месторождений и водоснабжение отдаленных населенных пунктов Атырауской и Мангистауской областей.



Рисунок 2. *Расположение рукава Кигаш и протоки Шаронова*

Методы исследования

Анализ межгосударственного распределения трансграничного стока в Жайык-Каспийском ВХБ проводится на основе данных Соглашения между Республикой Казахстан и Российской Федерацией «О совместном использовании и охране трансграничных водных объектов», подписанного 7 сентября 2010 года в г. Усть-Каменогорск [8]. Соглашение 2010 года действует взамен предыдущего Соглашения 1992 года [9], подписанного в г. Оренбург, однако оно не претерпело изменений относительно объемов вододеления трансграничных рек.

Оценка выполнения условий Соглашения производилась путем сравнения фактических годовых и месячных объемов стока с объемами, согласованными в Соглашении. Для р. Жайык обеспеченность лет по стоку рассчитывалась по ряду наблюдений на гидрологическом посту р. Жайык – с. Кушум. Данные взяты с официального сайта РГП «Казгидромет» [10]. Учитывая, что в соответствии с Протоколом объем передаваемого из Российской Федерации в Республику Казахстан стока реки Жайык указан только для лет 50-, 75-, 95-ти %-ной обеспеченности, для лет с иной обеспеченностью объем передаваемого стока определялся по линейной интерполяции, для лет с $P < 50$ % и $P > 95$ % принимался соответственно равным объему, установленному для лет 50 % и 95 % обеспеченности. Анализ ежегодного фактического притока по рекам Караозен и Сарыозен осуществлялся по данным отчетов Жайык-Каспийской бассейновой инспекции с 2004 г. [11], т.к. данные наблюдений гидрологической сети имеют значительные пропуски.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В Соглашении между Республикой Казахстан и Российской Федерацией «О совместном использовании и охране трансграничных водных объектов» указаны годовые и ежемесячные объемы передаваемого Российской Федерацией в Республику Казахстан стока рек Жайык, Шаган и объемы передаваемого Республикой Казахстан в Российскую Федерацию стока рек Ор, Елек, Улькен Кобда в годы различной обеспеченности (P=50 %, P=75 %, P=95 %). Годовые и ежемесячные объемы передаваемого стока приведены в таблице 1. Необходимо отметить, что ранее они были согласованы и отражены в Протоколе 6-го заседании рабочей группы по бассейну р. Урал 19.06.1996 г. в г. Курган [12]. В соответствии с Протоколом, в другие по водности годы размеры передаваемого стока устанавливаются в соответствии с ожидаемой (прогнозной) водностью рек в данном конкретном году с последующей корректировкой по фактической водности. В экстренных случаях, когда Республике Казахстан в маловодный период потребуется объем воды по р. Жайык сверх предусмотренного Протоколом, дополнительный объем воды может быть передан по совместному решению Сопредседателей Комиссии на основании предложений рабочей группы за счет сработки Ириклинского водохранилища.

Согласно Соглашению, по р. Жайык (при условии гарантированной подачи воды по р. Елек 5 $м^3/с$) при 50 %-ной обеспеченности года объем передаваемого стока должен составлять не менее 7.79 $км^3$ или 247 $м^3/с$, при 75 %-ной обеспеченности года – не менее 5.36 $км^3$ или 170 $м^3/с$, при 95 %-ной обеспеченности года – не менее 2.97 $км^3$ или 94.2 $м^3/с$ (таблица 1).

По результатам расчетов и проведенному анализу, ежегодный фактический приток по р. Жайык выше расчетного притока по Соглашению. Лишь в редкие годы, в 1995, 2008, 2011, 2016, 2020 гг., среднегодовой приток был меньше согласованного (на 14, 5, 6, 13, 32 % соответственно) (рисунок 2). Если рассматривать приток по месяцам, то объем стока в апреле практически каждый год меньше расчетного. По всей видимости, это связано со сроками согласования прогнозных значений водности расчетного года, так как в последующие месяцы проводится корректировка распределяемых объемов воды. Хотя, до конца года недополученный объем за апрель не всегда компенсируется.

Таблица 1

Объем передаваемого Российской Федерацией в Республику Казахстан и объемы передаваемого Республикой Казахстан в Российскую Федерацию стока рек в годы различной обеспеченности (в соответствии с приложением №4 Протокола заседания рабочей группы по бассейну р. Урал, подписанного 19.06.1996 г. в г. Курган)

Река	Терр., с которой поступает сток	Обеспеченность, %	Единицы измерения	За год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
р. Урал*	Российская Федерация	50	м^3/с	247.0	1430.0	657.0	240.0	141.0	85.9	70.6	73.4	84.1	62.5	38.6	34.6	37.9
			млн м^3	7790	3700	1760	622	378	233	183	197	218	168	103	83.7	102
		75	м^3/с	170.0	951.0	447.0	154.0	116.0	78.8	67.8	60.9	51.6	37.6	24.1	23.8	23.8
			млн м^3	5360	2460	1200	399	311	211	176	153	134	101	64.6	57.6	63.8
		95	м^3/с	94.20	497.00	216.00	46.20	25.60	40.70	41.10	40.20	43.70	26.10	22.10	24.30	40.20
			млн м^3	2970	1290	579	120	68.6	109	106	108	113	69.9	59.2	58.8	108
р. Орь	Республика Казахстан	50	м^3/с	7.86	1.53	62.20	23.41	1.73	0.70	0.60	0.65	0.76	0.76	0.52	0.39	0.16
			млн м^3	247.8	3.97	166.59	60.59	4.62	1.88	1.56	1.73	1.96	2.03	1.39	0.95	0.43
		75	м^3/с	2.89	0.51	22.45	9.3	0.2	0.15	0.15	0.3	0.41	0.41	0.25	0.13	0.14
			млн м^3	91.1	1.32	60.13	24.11	0.54	0.4	0.4	0.8	1.05	1.1	0.67	0.32	0.37
		95	м^3/с	0.74	0.04	5.19	2.29	0.07	0.03	0.03	0.03	0.13	0.11	0.09	0.03	0.03
			млн м^3	23.3	1.11	15.5	5.95	0.19	0.07	0.07	0.07	0.33	0.29	0.24	0.07	0.07
р. Илек	Республика Казахстан	50	м^3/с	11.8	93.8	27.6	2.2	1.9	1.9	1.9	2.7	2.2	1.9	1.9	2.1	2.9
			млн м^3	373	243	74	6	5	5	5	7	6	5	5	5	8
		75	м^3/с	5.3	32.8	12.2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.1	1.9
			млн м^3	168	85	33	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		95	м^3/с	2.3	5	3.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2.1	1.9
			млн м^3	73	13	9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
р. Чаган	Российская Федерация	50	м^3/с	5.7												
			млн м^3	180												
		75	м^3/с	3.44												
			млн м^3	108.4												
		95	м^3/с	1.53												
			млн м^3	48.2												
р. Хобда	Республика Казахстан	50	м^3/с	5.91	47.37	14.11	1.88	0.02	0.07	0.79	1.57	1.35	1.22	0.68	0.66	1.65
			млн м^3	186.6	122.78	37.78	4.89	0.05	0.21	2.04	4.22	3.5	3.28	1.83	1.59	4.43
		75	м^3/с	2.94	21.35	7.1	1.45	0.02	0.08	0.6	1.14	1.03	0.84	0.49	0.43	0.89
			млн м^3	92.6	55.33	19.02	3.75	0.05	0.22	1.56	3.06	2.66	2.24	1.3	1.03	2.38
		95	м^3/с	0.53	1.71	1.46	0.77	0.02	0.02	0.22	0.65	0.57	0.36	0.21	0.17	0.23
			млн м^3	16.8	4.43	3.91	2	0.05	0.05	0.56	1.74	1.49	0.98	0.56	0.41	0.62

Примечание: *при условии гарантированной подачи воды с территории Республики Казахстан в пограничном створе р. Илек в размере 5 м^3/с

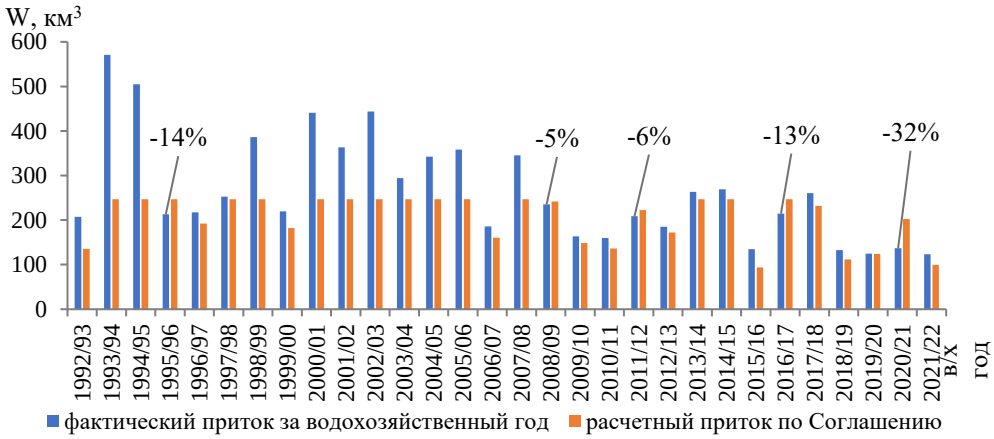


Рисунок 2. *Ежегодный приток по р. Жайык*

По рекам Караозен (Большой Узень) и Сарыозен (Малый Узень) существует Протокольное решение Госплана СССР от 18 октября 1960 г.. согласно которому долевое вододеление весеннего стока данных рек установлено в следующих объемах: – по р. Караозен (Большой Узень): Саратовская область РФ – 45 %. Западно-Казахстанская область РК – 55 %; по р. Сарыозен (Малый Узень) долевое вододеление весеннего стока по 50 % (таблица 2).

График ежегодного фактического притока по рекам Караозен и Сарыозен представлен на рисунках 3...4. За рассматриваемый 17-летний период приток по рекам Караозен и Сарыозен лишь в 9 случаях соответствует согласованному лимиту. в отдельные годы даже превышает (2010...2012 гг.. 2021 г.). но в 8 случаях приток из сопредельного государства не достиг лимита соответствующей водности года.

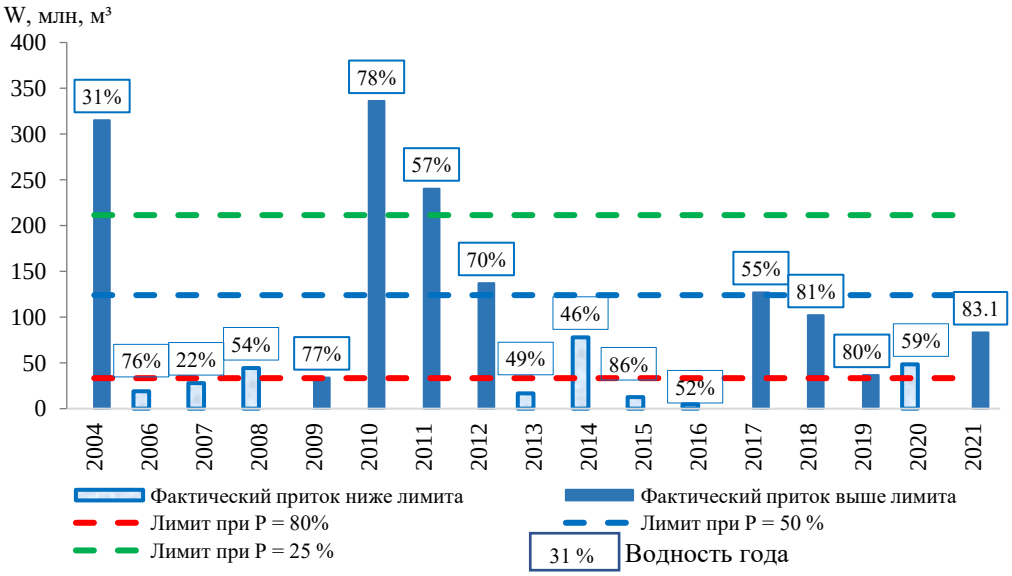


Рисунок 3. *Ежегодный приток по реке Караозен*

Данные о стоке воды рукава Кигаш практически отсутствуют. В статье [13]. приводится информация о стоке рук. Кигаш в створе поста Котяевка ($Q_{Котяевка}$ = $Q_{Шортанбай}$ – $Q_{Шароновка}$) в объеме 6.5 км³/год в 1950-х гг. (1952. 1953. 1956) или 2.75 % стока Волги. при этом суммарные водные ресурсы Кигаша ($Q_{Кигаш}$ = $Q_{ниже\ Тюрина}$ + $Q_{Шароновка}$) способны достигать в среднем 18.5...19.7 км³/год или 7.5...8.0 % общего стока Волги [14].

Таблица 2

Распределение стока рек Малого и Большого Узеней между Саратовской и Уральской областями, принятое на совещании при отделе водных ресурсов Госплана СССР от 18 ноября 1960 года

Области	Сток различной вероятности. млн.м3			Подлежит распределению						Подлежит использованию областями в результате распределения					
				80 %		50 %		25 %		80 %		50 %		25 %	
	80 %	50 %	25 %	объем млн $м^3$	% от мест-ного стока	объем млн $м^3$	% от местного стока	объем млн $м^3$	% от мест-ного стока	объем млн $м^3$	% от мест-ного стока	объем млн $м^3$	% от местного стока	объем млн $м^3$	% от местного стока
Бассейн реки Малый Узень															
Всего по бассейну	55	238	386	54		203		324		54	100	203	100	323.8	100
Саратовская	54	168	262	54	100	168	100	262	100	27	50	102	50	161	50
Уральская	0.9	69.5	124	0.4	50	35	50	61.9	50	27	50	102	50	161.9	50
Сброс в Уральскую область										27	49	66.5	33	100	30
Бассейн реки Большой Узень															
Всего по бассейну	61	301	518	61		274		471		61	100	274	100	470.8	100
Саратовская	61	247	423	61	100	247	100	423	100	27	45	123	45	211.9	45
Уральская		54	95			27	50	47.5	50	33	55	151	55	258.9	55
Сброс в Уральскую область										33	55	124	45	211.4	45

Примечание: * Объем стока различной обеспеченности. подлежащий делению. определялся из расчета суммы равной полному стоку. формирующемуся на территории Саратовской области плюс 50 % стока с водосборов Уральской области. Из-за равнинного рельефа Уральской области трудно полностью использовать местный сток для орошения и обводнения.

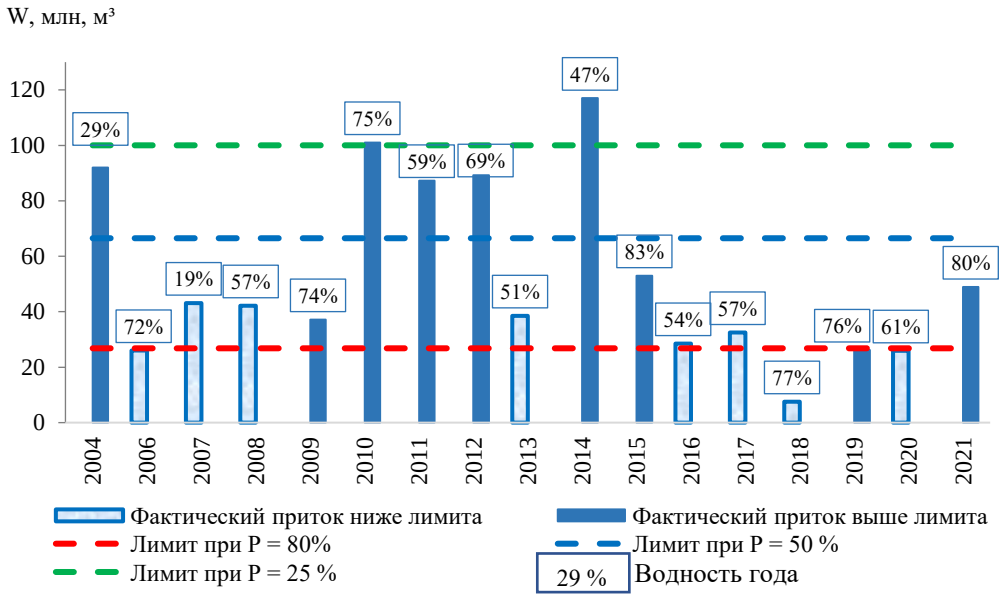


Рисунок 4. *Ежегодный приток по реке Сарыозен*

До недавнего времени измерения расходов воды на рук. Кигаш не проводились. В 1950-х гг. действовал уровенный пост у пос. Котяевка. который вновь был открыт в 1992 году. Измерения расходов воды на нем не проводились. т.к. данный пункт находится на пограничном участке и для выполнения измерений необходимо разрешение российской стороны.

Исследования протоки Кигаш начались в 2015 г. по решению Казахстанско-Российской комиссии по трансграничным рекам с целью запуска совместной программы по сохранению реки Жайык (Урал) и ее экосистемы. В 2016 г. были открыт гидропост на рукаве Кигаш у с. Шортанбай. На протоке Шаронова у с. Ганюшкино данные наблюдений за расходом воды имеются с 2007 года.

В настоящее время ведутся переговоры между странами по запуску совместной программы по сохранению реки Жайык (Урал) и ее экосистемы. В этих целях ежегодно проводятся экологические и историко-культурные экспедиции и различного рода акции для привлечения внимания Правительственных кругов обоих государств и общественности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка выполнения условий Соглашения между Правительствами Республики Казахстан и Российской Федерации «О совместном использовании и охране трансграничных водных объектов» показала соответствие фактического годового притока по главной реке Жайык согласованным объемам. Однако в начале водохозяйственного года месячный объем стока за апрель. составляющий основную часть объема стока весеннего половодья и. соответственно. годового стока. практически каждый год меньше предусмотренного Протоколом. Связано это со значительной ошибкой прогнозных значений ожидаемой водности года. В связи с этим необходимо усовершенствование методики прогнозирования водности года и составление совместных прогнозных оценок казахстанской и российской сторонами. Также необходимо утвердить единый временной период расчета обеспеченных величин года с учетом влияния происходящих климатических изменений на формирование речного стока.

По рекам Караозен и Сарыозен необходимо актуализировать пункты соглашения о вододелении. в частности методические подходы. т.к. существующее межгосударственное распределение трансграничного стока этих рек было утверждено

более 60 лет назад. В 2024 году группа казахстанских и российских экспертов начала научно-прикладную работу по составлению единого водохозяйственного баланса рек Караозен и Сарыозен. результаты которой лягут в основу вододеления этих рек.

По рукаву Кигаш механизм вододеления отсутствует вовсе. Более того отсутствует гидрологический мониторинг протоки ввиду ее принадлежности к пограничному участку. Необходимо ускорить процесс проведения научно-прикладных работ по совместному использованию и охране данного трансграничного объекта с последующей разработкой механизма его вододеления.

Данные рекомендации будут полезны для усовершенствования межгосударственного распределения трансграничного стока в рассматриваемом Жайык-Каспийском водохозяйственном бассейне.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – СКА; управление данными – АРЗ, ГРБ; формальный анализ - АРЗ, ГРБ; методология – СКА; руководство – СКА; визуализация – АРЗ; написание исходного текста – АРЗ, ГРБ; написание и редактирование окончательного текста – СКА, АРЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Всемирный доклад Организации Объединенных Наций о состоянии водных ресурсов. 2023 г. Партнерство и сотрудничество в поддержку водных ресурсов. Рабочее резюме. – UNESCO. 2023. – 12 с.
2 Giordano M.A., Wolf A.T. (2003). Sharing waters: Post-Rio international transboundary water management.Natural resources forum. Vol. 27. No 2. P. 163-171. DOI: 10.1111/1477-8947.00051
3 Руководство по распределению водных ресурсов в трансграничном контексте. – Организация Объединенных Наций – Женева. – 2021. – 244 с.
4 Tursunova A.A., Medeu A.R., Alimkulov S.K., Saparova A.A., Baspakova G.R. (2022). Water resources of Kazakhstan in conditions of uncertainty. Journal of water and land development. No. 54 (VII–IX). P. 138-149. DOI: 10.24425/jwld.2022.1415652022
5 Об утверждении Концепции развития системы управления водными ресурсами Республики Казахстан на 2024-2030 годы. [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000066 (дата обращения: 10.09.2025)
6 Алимкулов С.К., Турсунова А.А., Сапарова А.А. Ресурсы речного стока Казахстана в условиях будущих климатических и антропогенных изменений // Гидрометеорология и экология. – 2021. – №1. – С. 59-70.
7 Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Урал (Жайык) с притоками: в 6 томах. – Алматы: ПК «Институт Казгипроводхоз». 2007. – Т. I. – Кн. 2. – 176 с.
8 Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов (подписано в г. Усть-Каменогорск. РК. 7 сентября 2010 г.). [Электронный ресурс]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P100000891_ (дата обращения: 10.09.2025)
9 Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Казахстан о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов (подписано в г. Алматы. РК. 27 августа 1992 г.) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/icwc1.pdf (дата обращения: 10.09.2025)
10 Метеорологическая и гидрологическая базы данных [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kazhydromet.kz/meteo_db (дата обращения: 10.08.2025)
11 Отчет о деятельности Жайык-Каспийской бассейновой инспекции по регулированию использования и охране водных ресурсов/ РГУ «Жайык-Каспийская бассейновая инспекция по регулированию использования и охране водных ресурсов». – Атырау. – 2004-2021.
12 Протокол заседания рабочей группы по бассейну реки Урал (г. Курган. РФ. 16 июня 1996 г.). [Электронный ресурс]. – URL: https://tehranconvention.org/system/files/kazakhstan/azidullinporgpdf.pdf (дата обращения: 10.08.2025)
13 Кенжебаева А.Ж.. Магрицкий Д.В.. Ефимова Л.Е.. Гончаров А.В. Современное гидроэкологическое состояние русловой системы рукава Кигач (Казахстан. дельта Волги) // Проблемы комплексной безопасности Каспийского макрорегиона: материалы международной научно-практической конференции. – Астрахань. – 2021. – С. 103-111.
14 Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы. режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря. – М.: ГЕОС. 1998. – 280 с.

REFERENCES

1 Vsemirnyj doklad Organizacii Ob"edinennyh Nacij o sostoyanii vodnyh resursov [United Nations World Water Development Report.] (2023). Partnerstvo i sotrudnichestvo v podderzhku vodnyh resursov. Rabochee rezyume. UNESCO. 12 p. [In Russian]
2 Giordano M.A., Wolf A.T. (2003). Sharing waters: Post-Rio international transboundary water management.Natural resources forum. Vol. 27. No 2. P. 163-171. DOI: 10.1111/1477-8947.00051
3 Rukovodstvo po raspredeleniyu vodnyh resursov v transgranichnom kontekste [Guidelines for the allocation of water resources in a transboundary context] (2021). Organizaciya Ob"edinennyh Nacijю ZHeneva. 244 p. [In Russian]

4 Tursunova A.A., Medeu A.R., Alimkulov S.K., Saparova A.A., Baspakova G.R. (2022). Water resources of Kazakhstan in conditions of uncertainty. Journal of water and land development. No. 54 (VII–IX). P. 138-149. DOI: 10.24425/jwld.2022.1415652022
5 Ob utverzhdenii Koncepcii razvitiya sistemy upravleniya vodnymi resursami Respubliki Kazahstan na 2024-2030 gody [On approval of the Concept for the development of the water resources management system of the Republic of Kazakhstan for 2024-2030]. [Electronic resource]. URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000066 (date of access: 10.09.2025) [In Russian]
6 Alimkulov S.K.. Tursunova A.A.. Saparova A.A. (2021). Resursy rechnogo stoka Kazahstana v usloviyah budushchih klimaticheskih i antropogennyh izmenenij [River flow resources of Kazakhstan under future climatic and anthropogenic changes]. Gidrometeorologiya i ekologiya. №1. pp. 59-70. [In Russian]
7 Skhema kompleksnogo ispol'zovaniya i ohrany vodnyh resursov bassejna r. Ural (ZHajyk) s pritokami: v 6 tomah [River flow resources of Kazakhstan in 7. Scheme for the comprehensive use and protection of water resources in the Ural (Zhayik) River basin and its tributaries: in 6 volumes. conditions of future climatic and anthropogenic changes] (2007). Almaty: PK «Institut Kazgiprovodhoz». T. I. Kn. 2. 176 p. [In Russian]
8 Soglashenie mezhdu Pravitel'stvom Respubliki Kazahstan i Pravitel'stvom Rossijskoj Federacii o sovmestnom ispol'zovanii i ohrane transgranichnyh vodnyh ob"ektov [Agreement between the Government of the Republic of Kazakhstan and the Government of the Russian Federation on the joint use and protection of transboundary water bodies] (podpisano v g. Ust'-Kamenogorsk. RK. 7 sentyabrya 2010 g.). [Electronic resource]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P100000891(date of access: 10.09.2025) [In Russian]
9 Soglashenie mezhdu Pravitel'stvom Rossijskoj Federacii i Pravitel'stvom Respubliki Kazahstan o sovmestnom ispol'zovanii i ohrane transgranichnyh vodnyh ob"ektov [Agreement between the Government of the Russian Federation and the Government of the Republic of Kazakhstan on the joint use and protection of transboundary water bodies] (podpisano v g. Almaty. RK. 27 avgusta 1992 g.) [Electronic resource]. URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/icwc1.pdf (date of access: 10.09.2025) [In Russian]
10 Meteorologicheskaya i gidrologicheskaya bazy dannyh [Meteorological and hydrological databases] [Electronic resource]. URL: https://www.kazhydromet.kz/meteo_db (date of access: 10.08.2025) [In Russian]
11 Otchet o deyatel'nosti ZHajyk-Kaspijskoj bassejnovoj inspekcii po regulirovaniyu ispol'zovaniya i ohrane vodnyh resursov [Report on the activities of the Zhayik-Caspian Basin Inspectorate for the regulation of water use and protection]. RGU «ZHajyk-Kaspijskaya bassejnovaya inspekciya po regulirovaniyu ispol'zovaniya i ohrane vodnyh resursov». Atyrau. 2004-2021. [In Russian]
12 Protokol zasedaniya rabochej gruppy po bassejnu reki Ural [Minutes of the meeting of the working group on the Ural River basin] (g. Kurgan. RF. 16 iyunya 1996 g.). [Elektronnyj resurs]. URL: https://tehranconvention.org/system/files/kazakhstan/azidullinporgpdf.pdf (date of access: 10.08.2025) [In Russian]
13 Kenzhebaeva A.ZH., Magrickij D.V., Efimova L.E., Goncharov A.V. (2021). Sovremennoe gidroekologicheskoe sostoyanie ruslovoj sistemy rukava Kigach (Kazahstan. del'ta Volgi) [The current hydroecological state of the Kigach branch channel system (Kazakhstan, Volga Delta)]. Problemy kompleksnoj bezopasnosti Kaspijskogo makroregiona: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Astrahan'. P. 103-111. [In Russian]
14 Ust'evaya oblast' Volgi: gidrologo-morfologicheskie processy. rezhim zagryaznyayushchih veshchestv i vliyanie kolebanij urovnya Kaspijskogo morya [The Volga estuary: hydrological and morphological processes. Pollutant regime and the impact of Caspian Sea level fluctuations]. M.: GEOS. 1998. 280 p. [In Russian]

ЖАЙЫҚ-КАСПИЙ СУШАРУАШЫЛЫҚ АЛАБЫНДАҒЫ ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ АҒЫНДЫНЫҢ МЕМЛЕКЕТАРАЛЫҚ ҮЛЕСТІРІМІ

Саят Қ. Әлімқұлов г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Альфия Р. Загидуллина*, Гаухар Р. Баспакова PhD

«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; sayat.alimkulov@mail.ru, zagidullina_a_88@mail.ru, sharafedenova@mail.ru
*Автор корреспондент: Альфия Р. Загидуллина, zagidullina_a_88@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

трансшекаралық алап,
су қатынастары,
су бөлісу

АБСТРАКТ

Қазақстандағы трансшекаралық ағындыны мемлекетаралық бөлу мәселесі ерекше маңызға ие. себебі еліміздегі ірі өзендердің басым бөлігі төменгі ағыс (сағалық) бөлігінде орналасқан және шетелден келетін ағындыға тәуелді. Бұл жұмыста Жайық-Каспий су шаруашылығы алабы шегіндегі су нысандарын пайдалану және қорғау жөніндегі Қазақстан Республикасы мен Ресей Федерациясы арасындағы трансшекаралық су ынтымақтастығы мәселесі зерттеледі. Жайық. Қараөзен және Сарыөзен өзендерінің су ресурстарын бірлесіп пайдалану жөніндегі үкіметаралық міндеттемелердің орындалуына бағалау жүргізілді. Қарастырылып отырған трансшекаралық өзендердің жылдық нақты ағынды шамасы бойынша есептік қамтамасыздығын ескере отырып графиктер тұрғызылды. Нақты ағынды шамаларының келісілген көлемдер бойынша сәйкестігіне талдау жасалынып. қорытындылар шығарылды. Жайық өзені бойынша су шаруашылығы жылының басында

Мақала жайында:
Жіберілді: 30.09.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

көктемгі су тасқыны ағынды көлемін және жылдық ағындының негізгі бөлігін құрайтын сәуір айындағы ағындының айлық көлемі Хаттамада көрсетілген шамадан аз екені анықталды. Қараөзен және Сарыөзен өзендері бойынша көршілес мемлекеттен келетін ағынды көлемі көп жағдайларда қажетті су мөлшерінің шегіне жетпейді. Зерттеліп отырған алап шегінде трансшекаралық ағындының мемлекетаралық үлестірім механизмін жетілдіру бойынша ұсыныстар берілді.

INTERSTATE DISTRIBUTION OF TRANSBOUNDARY RUNOFF IN THE ZHAYIK-CASPIAN WATER BASIN

Sayat Alimkulov Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Alfiya Zagidullina, Gaukhar Baspakova PhD

«Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; sayat.alimkulov@mail.ru, zagidullina_a_88@mail.ru, sharafedenova@mail.ru
Corresponding author: Alfiya Zagidullina, zagidullina_a_88@mail.ru

KEY WORDS

transboundary basin,
water relations,
water allocation

ABSTRACT

The problem of interstate distribution of transboundary runoff in Kazakhstan is particularly acute. as the country occupies a low-lying (estuary) position for almost all major rivers and is dependent on the inflow of water from abroad. This paper examines the issue of water cooperation between the Republic of Kazakhstan and the Russian Federation in the field of use and protection of transboundary water bodies within the Zhaiyk-Caspian water basin. The assessment of the fulfillment of intergovernmental obligations on the joint use of water resources of the Zhaiyk. Karaozen and Saryozen rivers was carried out. Graphs of the annual actual inflow of the considered transboundary rivers are constructed with an indication of their estimated availability. conclusions are drawn about the correspondence of the actual values to the agreed volumes. It is shown that along the Zhaiyk River at the beginning of the water management year. the monthly volume of runoff in April. which makes up the bulk of the spring flood runoff and. consequently. the annual runoff. is almost every year less than stipulated by the Protocol. In half of the cases. the inflow from the neighboring state along the Karaozen and Saryozen rivers does not reach the limit of the corresponding water content of the year. Recommendations are given for improving the mechanism of interstate distribution of transboundary runoff in the studied basin.

About article:
Received: 30.09.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 08.10.2025

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

БАДАМ ӨЗЕНІ АҒЫНДЫСЫНЫҢ СОҢҒЫ 10-ЖЫЛДЫҚТАРДАҒЫ ӨЗГЕРІСІН БАҒАЛАУ

Айнур К. Мусина г.ғ.к, қауымдастырылған профессор, Маржан С. Оспанова* PhD, доцент м.а., Әсел С. Абдуллаева PhD, доцент м.а., Гүлжанат Ж. Байдашева

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; Ainur.Musina@kaznu.edu.kz (АКМ), ospanova.marzhan@kaznu.kz (МСО), Abdullayeva.Assel@kaznu.kz (ӘСА),baydashova8@gmail.com (ГЖБ)
Автор корреспондент: Маржан С. Оспанова, ospanova.marzhan@kaznu.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

ағынды тербелісі, гидрологиялық режим, климаттық өзгерістер, антропогендік факторлар, вариация коэффициенті, Ричард-Бейкер индексі (RBI)

АБСТРАКТ

Мақалада Бадам өзенінің соңғы 10 жылдықтардағы ағынды өзгерістері қарастырылады. Зерттеу барысында математикалық-статистикалық талдау әдісі, экстраполяция және корреляция әдістері, интегралды жиынтық және айырымдық қисықтары қолданылып, өзен ағындысының көпжылдық және жылішілік өзгергіштігі Ричард-Бейкер индексі (RBI) арқылы бағаланды. Индекс нәтижелері табиғи (морфометриялық ерекшеліктер, климат, жер бедері) және антропогендік факторлардың (суқойманың салынуы, ирригациялық желілердің дамуы, қала құрылысы) өзеннің гидрологиялық режиміне ықпалын анықтауға мүмкіндік берді. Ағынды тербелісін талдау барысында шағын су жинау алаптарында RBI көрсеткіштерінің жоғары болатыны, ал ірі өзен алаптарында салыстырмалы тұрақтылық байқалатыны анықталды. Бадам өзенінің гидрологиялық режиміне халық санының өсуі, егіншілік пен ирригациялық қызметтің дамуы, сондай-ақ Бадам суқоймасының реттеуші әсері айтарлықтай ықпал ететіні көрсетілді. Зерттеу нәтижелері су ресурстарын тиімді басқару, экожүйелердің тұрақтылығын бағалау және климаттық, антропогендік факторлардың ықпалын анықтау үшін маңызды.

Мақала жайында:
Жіберілді: 02.10.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

Дәйексөз үшін:
Мусина А., Оспанова М., Абдуллаева Ә., Байдашева Г. Бадам өзені ағындысының соңғы 10-жылдықтардағы өзгерісін бағалау // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 121-132.

1. КІРІСПЕ

Өзен ағындысының өзгергіштігі параметрлерін бағалау гидрология саласындағы өзекті мәселелердің бірі болып саналады. Өзен ағындысының өзгергіштігі су жинау алабының морфометриялық параметрлері, жер бедері, климаты сияқты табиғи факторлар, сондай-ақ су қоймалар салу, суды түрлі мақсатта пайдалану үшін бұру сияқты шаралар арқылы көрініс беретін антропогендік факторлар негізінде орын алады. Табиғи өзгерістер өзеннің гидрологиялық режиміне тікелей тәуелді болса, антропогендік өзендер өзен ағындысын реттеумен, ондағы қауіпті құбылыстардан қорғанумен және су пайдалану қажеттіліктерін өтеумен байланысты. Халық санының өсуі, ирригациялық қызметтің және қала құрылысының дамуы өзеннің гидрологиялық режиміне айтарлықтай әсер етеді. Қазақстан аумағында өзен ағындысының өзгергіштігін зерттеу мәселесі соңғы жылдары белсенді түрде дамуда [1...6]. Мұндай зерттеулер су ресурстарын тұрақты басқаруда, стратегиялық жоспарларды әзірлеуде үлкен маңызға ие.

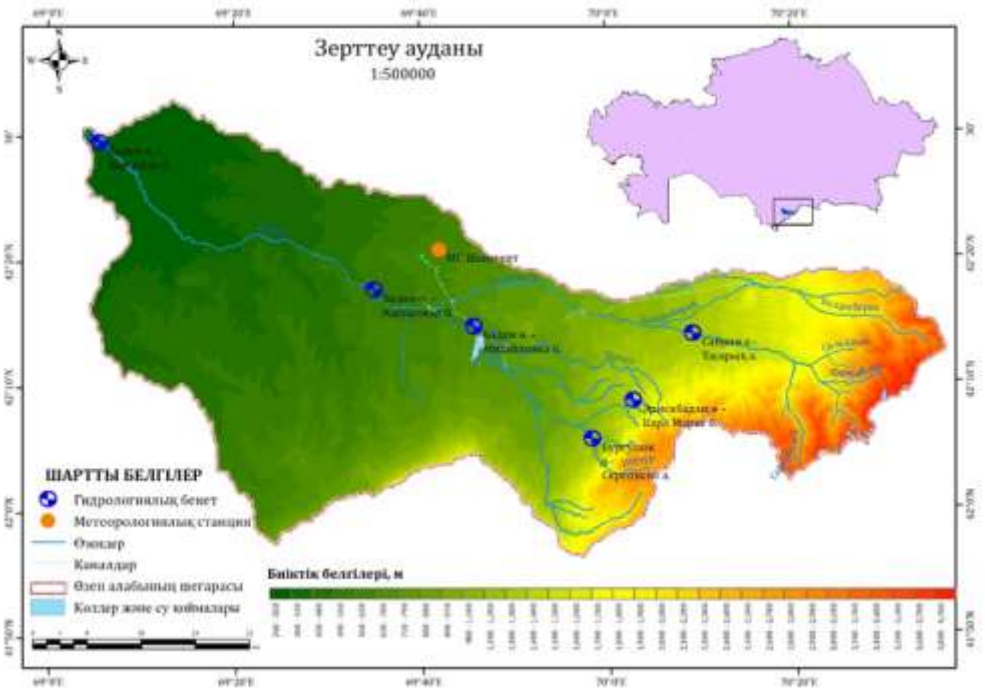
Өзен ағындысының өзгергіштігін бағалау, әдетте бақыланған гидрологиялық мәліметтерді талдауға негізделеді, бақылау мәліметтері жоқ болған жағдайда [7...8] ұсынылған әдістермен бірге, түрлі модельдеу әдістері қолданылады [9...11]. Мақалада өзен ағындысының көпжылдық өзгергіштігі Ричард-Бейкер индексі (RBI) арқылы есептеліп, табиғи және антропогендік факторлардың әсері бағаланады.

Шетелдік әдебиеттерде су жинау алабындағы өзен ағындысының өзгергіштігін сандық тұрғыдан бағалау үшін Ричард-Бейкер индексі (RBI) кеңінен қолданылады [12…14]. Аталған индексті қолдану арқылы қол жеткізілген нәтижелер, оның су жинау алабының өлшемдеріне тәуелді екендігін, атап айтқанда шағын су жинау алаптары жағдайында RBI көрсеткіштері ұлғайып, айқын өзгергіштікке ие болады, керісінше үлкен су жинау алаптарында салыстырмалы түрде өзен ағындысының режимі тұрақтылыққа ие болып, RBI көрсеткіштері төмендейді [15]. Сонымен қатар, RBI көрсеткішінің жоғары болуы, өзен ағындысы өзгергіштігінің айқын әрі жиі екендігін көрсетеді. RBI индексі өзен жүйелерінің динамикасына климаттық өзгерістердің қарқынды дәрежесі туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді. Зерттеліп отырған жұмыстың мақсаты қарапайым гидрологиялық көрсеткіштерді метеорологиялық мәліметтермен үйлестіре талдау негізінде кіші су жинау алабындағы гидрологиялық режимнің өзгергіштігін бағалау. Өзен ағындысының көпжылдық және жылішілік уақыт аралығындағы өзгерістерін зерттеу алаптағы су ресурстарын тиімді басқару, экожүйелердің тұрақтылығын бағалау және ағынды параметрлеріне ықпал ететін климаттық және антропогендік факторлардың өзгеру дәрежесін анықтау үшін маңызды.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Зерттеу ауданы

Зерттеу объектісі ретінде Арал-Сырдария су шаруашылық алабындағы Арыс өзенінің сол жақ саласы Бадам өзені алынды. Бадам өзені Қаржантау жотасының солтүстік батыс беткейінен 2700 м биіктіктегі бұлақтардан бастау алады. Жалпы ұзындығы 141 км, ал су жинау алабы (1-сурет) ауданы 4224...4840 км² [16...18]. Өзеннің орташа жылдық ағындысы шамамен 4.51 м³/с (Қараспан каналы тұсында) құрайды, бірақ ол маусымдық жауын-шашын мен суармалы егіншілік әсерінен айтарлықтай өзгеріп отырады. Өзен жоғары ағысында еріген қар суымен және көптеген бұлақтардан қоректенеді, ал орта ағысына қарай грунт суларымен толығады. Өзен арнасының ені 15 м-ге дейін жетеді, ал тереңдігі 0.5 м құрайды, Арыс өзеніне құяр тұсында ағыс жылдамдығы 0.7 м/с тең. Өзен ағындысы арықтар жүйесімен бау-бақшалар мен егіншілік алқаптарын сумен қамтамасыз ететін Бадам суқоймасы арқылы реттелген.



Сурет 1. *Бадам өзені алабы*

Өзен алабында жауын-шашын мөлшері жылына орта есеппен 150...400 мм аралығында, ал жылдық орташа температура шамамен +11°С құрайды [19]. Ылғалдану коэффициенті төмен, булану мөлшері жауын-шашыннан едәуір жоғары. Бұл жағдай өзен ағындысының режиміне және оның жылішілік өзгергіштігіне айтарлықтай ықпал етеді.

Бадам өзені ағындысының өзгергіштігін бағалау үшін гидрометеорологиялық бақылау мәліметтері «Қазгидромет» РМК желісіне қарасты (https://meteo.kazhydromet.kz/database_hydro/) кадастрлық мәліметтер мен климаттық анықтамалардан алынды. Су өтімі мәндері бақылау ұзақтығы 80 жылдан астам уақытты құрайтын 1 тұстама, 60 жылға жуық уақытты құрайтын 2 тұстама және 40 жылға жуық уақыт аралығын қамтитын 3 тұстама бойынша жиналды (1-кесте). Бадам өзені ағындысының өзгергіштігін бағалау мақсатында алап ауданындағы Шымкент метеостанциясының жауын-шашын және ауа температурасы мәліметтері климаттық анықтамалардан және (https://meteo.kazhydromet.kz/climate_kadastr/) сайтынан алынды.

Кесте 1

Бадам өзені алабындағы гидрологиялық бекеттердің негізгі сипаттамалары

№	Бекеттің атауы	Өзен	Сағадан қашықтығы, км	Су жинау алабы		Зерттелуі	
				F, км^2	$H_{ор.}$, м	Жылдар	Жылдар саны
1	Бадам ө. – Қараспан б.	Бадам	1.5	4370	5.00	1924…1934, 1943…1955, 1957…1968, 1970…1975, 1977…2022	83
2	Бадам ө. – Қызылжар б.	Бадам	65	1970	6.50	1953…1977, 1979…1982, 1984…1991, 1994, 2006…2022	55
3	Бадам ө. – Михайловка б.	Бадам	0.6	586	4.50	1927, 1930, 1937…1942, 1966…1999	39
4	Сайрам ө. – Тасарық а.	Сайрам	42	468	1099.9	1926, 1930, 1963…2022	62
5	Эрмекбадам ө. – Карл Маркс б.	Улучур	48	17.5	851	1947…1986, 1988, 1991…1998	37
6	Бургулюк ө. – Скрепнево а.	Улучур	32	31.5	421	1937…1943, 1947…1958, 1960…1984, 1991…1993	41

Зерттеуде пайдаланылған гидрологиялық бекеттер саны қойылған міндеттерді шешуге қажетті дәлдікпен нәтижелер алуға жеткілікті, әрі таңдап алынған бақылау желісінің қазіргі жағдайларда өзен ағындысының кеңістіктік-уақыттық ерекшеліктерін сенімді бағалауға мүмкіндік береді.

Бадам өзені бойынша ағынды өзгергіштігін бағалау жұмыстары бірнеше кезеңдерді қамтиды. Ең алдымен гидрологиялық бақылау қатарларының бастапқы мәліметтері жиналып, ұқсас өзен әдісі арқылы [20] талаптарына сай, қалпына келтірілді.

Климаттың қазіргі жылынуының өзен ағындысына ықпалын зерттеу үшін соңғы 10-жылдықтардағы кезең 1966...2022 жж. – климаттың жылыну кезеңі бағаланды. Бұл кезең статистикалық сипаттамаларды анықтау және өзен ағындысының тербелісін бағалау үшін ұсынылатын есептік кезең ретінде қабылданды.

Бақылау қатарларының біртектілігі мен стационарлығын бағалау мақсатында жылдық орташа су өтімдерінің уақыттық қатарлары зерттелді. Біртектілік генетикалық және статистикалық талдаулар [21] арқылы айқындалды. Өзен ағындысын сандық бағалау мақсатында оның орташа мәндерінің айырмашылығын бағалау үшін Стьюдент критерийі, ал дисперсияларының біртектілігін тексеру үшін Фишер критерийі қолданылды.

Бадам өзенінің Қараспан, Михайловка және Қызылжар бекеттерінде өзен ағындысы Фишер критерийі бойынша біртекті, ал Стьюдент және Вилькоксон критерийлері бойынша біртекті емес екендігі анықталса, Сайрам өзенінің Тасарық бекетінде аталған барлық критерийлер бойынша ағындының біртекті екендігі расталды. Ал, Бургулюк ө - Скрепнево а. тұстамасында біртекті емес болса, Эрмекбадам ө - Карл Маркс б. тұстамасында Фишер критерийі бойынша біртекті емес, ал Стьюдент және Вилькоксон критерийлері бойынша біртекті екендігі анықталды. Бұл ерекшелік табиғи-климаттық және антропогендік факторлардың ықпалымен түсіндіріледі. Уақыттық қатарларды талдау барысында өткен ғасырдың екінші жартысынан бастап орташа мәндер мен дисперсиялар бойынша статистикалық тұрғыдан мәнді айырмашылықтар анықталды. Қолда бар бақылау қатарларының репрезентативтілігін бағалау үшін орташа квадраттық қателік есептелді. Жүргізілген есептеулер барлық гидрологиялық бекеттер бойынша қателік 20%-дан аспайтынын көрсетті, демек, алынған қатарлар зерттеу үшін жеткілікті дәрежеде репрезентативті болып табылады.

Жалпы зерттеу барысында математикалық-статистикалық талдау әдісі, экстраполяция және корреляция әдістері, интегралды жиынтық және айырымдық қисықтары [22...24], RBI әдісі қолданылды. Бұл әдістер ағындының уақыттық өзгерістерін анықтауда кеңінен қолданылып, зерттеудің ғылыми негізділігін арттырып, климаттық өзгерістер жағдайында өзен ағындысының кеңістіктік-уақыттық өзгерістерін жан-жақты бағалауға мүмкіндік берді.

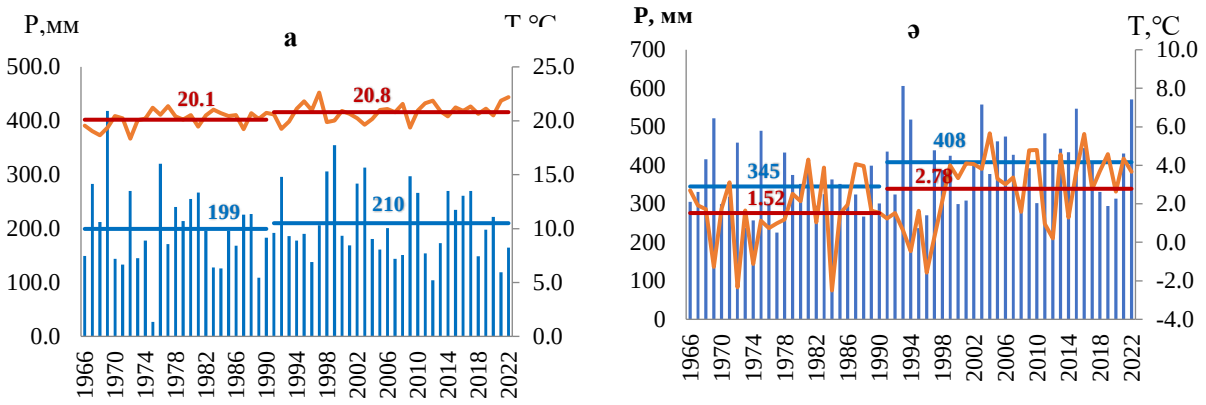
Гидрологиялық режимнің өзгеруінің әсерін сандық түрде бағалау үшін бірнеше әдістер қолданылады. Солардың ішінде Ричард Бейкер индексі (RBI) өзен ағындысының уақыттық өзгерістерінің қарқындылығын сипаттауға мүмкіндік береді. Бұл көрсеткіш өзеннің ағынды режиміндегі тұрақсыздықты бағалап, өзен экожүйелеріне сыртқы әсердің артқан кезеңдерінде (мысалы, гидротехникалық имараттар салынғаннан кейін немесе климаттық өзгерістер жағдайында) тиімді әдіс ретінде қолданылады [13...15].

RBI көрсеткіштері уақыт бойынша өзгергіштікке ие, RBI мәндерінің кейбір тербелістері табиғи климаттық өзгерістерге байланысты орын алады. Қарастырылып отырған аудандағы климаттық өзгерістерді бағалау үшін Шымкент метеостанциясының ауа температурасы мен жауын-шашын мәндері жинақталып, салқын және жылы кезең бойынша топтастырылып, талданды. Жылдың жылы мезгіліндегі (сәуір-қыркүйек) ауа температурасының мәндері 1966...2022 жж. үшін 19.4...23.8 ºС аралығын құрады [25].

Бадам өзені ағындысына климаттық факторлардың әсерін анықтау үшін Шымкент метеостанциясының 1966...2022 жылдар аралығындағы мәліметтері пайдаланылды. Әрбір жыл бойынша ауа температурасының орташа мәні мен жауын-шашын мөлшері жылы (сәуір-қазан) және суық (қараша-наурыз) маусымдар үшін жеке есептелді. Мұндай маусымдық бөлініс өзен ағындысының қалыптасу фазаларына сәйкес келеді. Егер суық кезеңде ылғал қар түрінде жиналып, өзендегі ағынды көлемі азайса, ал жылы кезеңде қардың еруі мен жауын-шашын есебінен негізгі су көлемі қалыптасады. Оңтүстік аудандардағы маусымдар бөлінісінде жылы маусым сәуір-қыркүйек айларымен шектелгендігіне [25...26] қарамастан, қазан айының жылы маусым құрамына қосылуы осы айдағы жауын-шашынның Бадам өзені қоректенуіндегі елеулі мөлшеріне байланысты түсіндіріледі. Климаттық

өзгерістердің ұзақмерзімді тенденцияларын бағалау мақсатында зерттелген уақыт аралығы екі кезеңге бөлінді: 1966...1990 және 1991...2022 жылдар. Есептеулер нәтижесінде екінші кезеңде 2 маусым бойынша орташа ауа температурасы мен жауын шашынның артқаны анықталды. Жылы маусымда ауа температурасы 0.7 °С, ал жауын-шашын мөлшері 10.6 мм артса, салқын маусымдағы өзгерістер айтарлықтай мәнге ие және сәйкесінше 1.3 °С пен 62.1 мм құрайды (2-сурет). Бұл Бадам өзені алабындағы климаттың жылынуын көрсетіп, өзен ағындысының жылішілік таралуына әсер етеді.

Жауын-шашын, ауа температурасы және ағынды Манн-Кендалл тесті арқылы талдау 2..3 кестелерде келтірілген.



2 сурет. *1966...2022 жылдардағы Шымкент метеостанциясының жауын-шашын (Р) және ауа температурасы (Т) көрсеткіштері: а) жылы кезең үшін ә) суық кезең үшін*

Кесте 2

Жауын-шашын және ауа температурасы мәндерін Манн-Кендалл тесті арқылы трендтік талдау

Тренд	Жауын-шашын	Ауа температурасы
Шымкент метеостанциясы, 1966…2022 жылдар аралығындағы жылы кезең үшін		
Z	-0.15836	1.7297
S	-2.400000e+01	7.370000e+02
p-value	0.8742	0.08368
varS	2.109400e+04	1.810510e+05
Шымкент метеостанциясы, 1966…2022 жылдар аралығындағы суық кезең үшін		
Z	2.4852	1.2202
S	3.620000e+02	4.980000e+02
p-value	0.01295	0.2224
varS	2.110067e+04	1.659100e+05

Талдау нәтижелері бойынша Шымкент метеостанциясында жылы маусымдардағы (сәуір-қазан) Манн-Кендалл статистикасы зерттелген кезеңде айтарлықтай өзгеріс байқалмағандығын көрсетті. Z статистикасының теріс мәні (-0.158) жауын-шашынның төмендеуін көрсетеді, бірақ ол статистикалық тұрғыда расталмайды. Ал ауа температурасы үшін Z оң (1.7297), p-value = 0.08368 болып, бұл нәтиже мәнділік деңгейіне ($p < 0.05$) жетпесе де, 0.1 шегінде орналасқандықтан, жылы маусымда температураның көтерілуін, бірақ оның статистикалық мәнділігі шектеулі екендігін көрсетті. Суық маусым (қараша-наурыз) үшін жауын-шашын бойынша Манн-Кендалл тесті статистикалық тұрғыдан мәнді нәтиже көрсетті ($Z = 2.4852$, $p = 0.01295$), сондықтан нөлдік гипотеза H_0 (трендтің жоқтығы) қабылданбайды және

жауын-шашын көлемінің өсуі байқалады. Ал ауа температурасы үшін Z оң (1.2202) болғанымен, p мәні (0.2224) 0.05-тен әлдеқайда жоғары болғандықтан, нөлдік гипотеза жоққа шығарылмайды және сенімді тренд анықталмады.

Манн-Кендалл тестінің нәтижелері бойынша Бадам ө. – Қараспан б. және Бургулюк ө - Скрепнево а. бекеттерінде өзен ағындысының статистикалық тұрғыда мәнді ($p < 0.05$) екендігі және оның өсуі анықталды. Ал, Бадам ө. – Михайловка б., Бадам ө. – Қызылжар б., Сайрам ө.- Тасарық а. және Эрмекбадам ө – Карл Маркс б. бекеттерінде байқалған өзгерістер статистикалық тұрғыда мәнді деп танылмайды. Z мәндері 3-кестеге сәйкес кейбір бекеттерде өсу, кейбірінде төмендеуін көрсетті, бірақ $p > 0.05$ болғандықтан, бұл тенденция сенімді деп есептелмейді.

Кесте 3

Өзен ағындысының орташаланған мәндерін Манн-Кендалл тесті арқылы 1966...2022 жж. аралығы үшін трендтік талдау

Тренд	Су өтімі	Тренд	Су өтімі
Бадам ө. – Қараспан б.		**Сайрам ө.- Тасарық а.**	
Z	2.1084	Z	-0.69995
S	8.610000e+02	S	-2.860000e+02
p-value	0.035	p-value	0.484
varS	1.663783e+05	varS	1.657900e+05
Бадам ө. – Михайловка б.		**Эрмекбадам ө – Карл Маркс б**	
Z	1.3213	Z	0.63456
S	5.390000e+02	S	2.440000e+02
p-value	0.1864	p-value	0.5257
varS	1.657990e+05	varS	1.466433e+05
Бадам ө. – Қызылжар б.		**Бургулюк ө - Скрепнево а.**	
Z	1.4389	Z	2.3422
S	5.880000e+02	S	8.980000e+02
p-value	0.1502	p-value	0.01917
varS	1.664333e+0	varS	1.466727e+05

Бадам өзені алабының 6 гидрологиялық бекеті бойынша 1966...2022 жылдардағы ұзақ мерзімді өзгерістерді талдау үшін ағындының көпжылдық өзгергіштік дәрежесінің Cv [27] және өзгергіштіктің қысқа мерзімді сипатын көрсететін Ричард Бейкер индексі (RBI) есептеліп, қолданылды. Ағындының құбылмалылығы (Cv) Бадам өзені тұстамалары бойынша көпжылдық бақылау қатарының орташа жылдық мәндері үшін есептелді. Өзен ағындысының қысқа мерзімді өзгеру жылдамдығын анықтау үшін қолданылған динамикалық RBI индексі төмендегі формула негізінде анықталды:

$$RB\ Index = \frac{\sum_{i=n}^{n} |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=n}^{n} q_i} \quad (1)$$

мұндағы: q – орташа айлық су өтімдері, i – ай, n = 12, RBI 0 - ден 2 аралығын қамтимын ауқымды өлшемсіз индекс[14...15, 28]. RBI индексі ағындының өзгергіштігін көрсетеді, нөл мәні ағындының салыстырмалы тұрақтылығын көрсетсе, индекстің жоғары мәндері тербелістің қарқындылығын сипаттайды.

RBI және Cv арасындағы байланысты анықтау үшін корреляция коэффициенті (r) қолданылды. Статистикалық есептеулер R және MS Excel кестелік редакторын қолдана отырып жүргізілді.

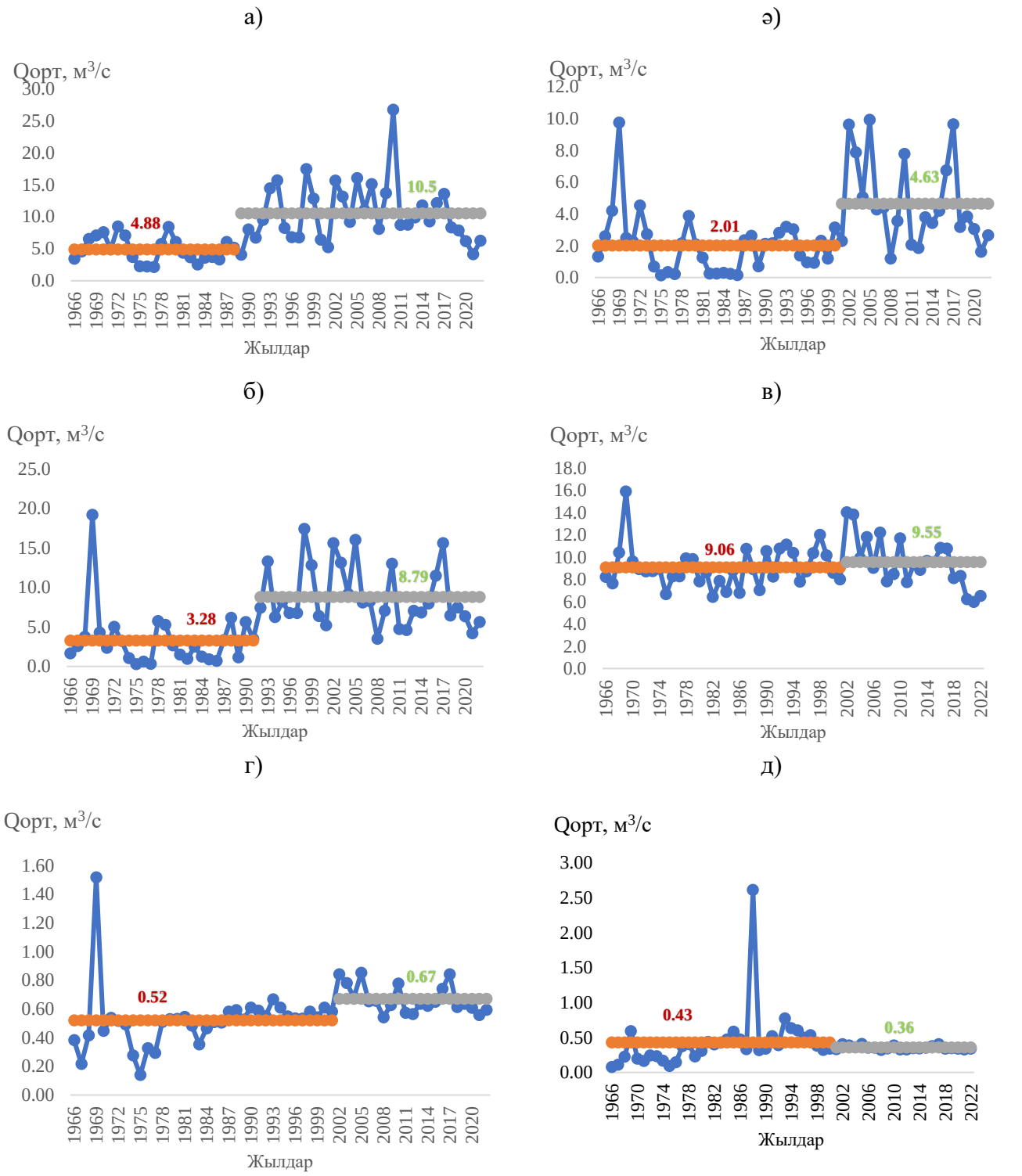
3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Бадам алабы өзендерінің 6 гидрологиялық бекеті бойынша тұрғызылған 1966...2022 жылдардағы су өтімдерінің хронологиялық графигі мынадай қорытынды алуға мүмкіндік берді: Бадам өзенінің Қараспан, Михайловка, Қызылжар бекеттерінде және де Эрмекбадам өзенінің Карл Маркс б. тұстамаларында орташа жылдық су өтімі жүрісінің өзгерісі шамамен 1990 жылдардан бастап байқалатыны анықталды. Ал Бадам өзенінің салалары Сайрам өзенінің Тасарық тұстамасында және Бургулюк өзенінің Скрепнево а. тұстамасында шамамен 2000 жылдардан орташа жылдық су өтімдерінің өзгеріске ұшырайтындығы анықталды (3-сурет). Нақтырақ айтқанда, Бадам өзенінің Қараспан, Михайловка, Қызылжар бекеттерінде 53.5%, 56.5%, 62.7% және Сайрам өзенінің Тасарық тұстамасы мен Бургулюк өзенінің Скрепнево а. бекетінде 22.2 % бен 5.1% аралығындағы ағынды мөлшерінің артқаны байқалса, ал Эрмекбадам өзенінің Карл Маркс б. тұстамасында 16.2 % төмендегенін көрсетті.

1966...2022 жылдар аралығында жүргізілген зерттеу нәтижелері Бадам өзені алабында ауа температурасы мен жауын-шашын мөлшерінің біртіндеп арту үрдісін көрсетті. Бұл факторлар өзен ағындысының маусымдық және жылдық өзгергіштігіне, әсіресе ағындының қысқа мерзімді ауытқуына әсер етті. Бадам өзені ағындысының көпжылдық тербелісін бағалау мақсатында жоғарғы ағысында Михайловка б., орта ағысында Қызылжар б. және төменгі ағысында Қараспан б. тұстамаларында айлық RBI көрсеткіштері екі кезең 1966...1990 жж. және 1991...2022 жж. бойынша есептелді (4-кесте). Жоғарғы ағыста орналасқан Михайловка б. тұстамасында айлық RBI мәндері алдыңғы кезеңмен салыстырғанда 1991...2022 жж. аралығында, әсіресе, сәуір-шілде айларында төмендеген. Бұл құбылыс көктемгі және жазғы су тасқындарының сиреуімен байланысты. Сонымен қатар күзгі айлардағы RBI шамасының өсуі ағынды режиміндегі жаңбырлық тасқындардың әлі де маңызды рөл атқаратынын көрсетеді. Орта ағысындағы Қызылжар б. тұстамасында айлық RBI мәндерінің төмендеуі айқын байқалады. Сәуір-тамыз айларында RBI көрсеткіштерінің 0,5-1,0 бірлікке азаюы ағындының айқын тегістелуін және тасқындық тербелістердің сиреуін көрсетеді. Мұндай өзгерістер өзенде салынған су қоймалары арқылы ағынды реттеу және суармалы егіншілікке суды қарқынды пайдалану әсерімен түсіндіріледі. Төменгі ағыстағы Қараспан б. тұстамасында да RBI мәндерінің төмендеуі байқалады, дегенмен ол өзгерістер орта ағыспен салыстырғанда әлсіздеу. Мұнда ағындының өзгергіштігі шаруашылық қызметпен ішінара реттелгенімен, табиғи гидрометеорологиялық процесстер мен антропогендік ықпалдың әсері әлі де сақталғандығын көрсетеді. Соңғы 10-жылдықтарда Бадам өзені алабында ағындының тербелістері тегістеліп, өзгергіштігі азайғандығы байқалады. Ең айқын өзгерістер орта ағыспен байланысты, мұнда антропогендік факторлар жазғы-күзгі тасқындардың сиреуімен және салқын кезеңдегі жауын-шашындармен ұштасып, өзеннің гидрологиялық режимінің айтарлықтай трансформацияға ұшырағандығын көрсетті.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Соңғы 10-жылдықтардағы Бадам өзенінің ағынды тербелістерін зерттеу климаттық өзгерістер мен су ресурстарын қарқынды шаруашылық мақсатта пайдалану жағдайында өзен режимінің көпжылдық және жылішілік өзгерістерінің заңдылықтарын анықтауға мүмкіндік берді. Алап бойынша 6 гидрологиялық бекет мәліметтері негізінде су өтімі қатарлары қалпына келтіріліп, біртектілігі тексерілді және статистикалық талдаудан өткізілді.



3 сурет. *1966...2022 жылдардағы Бадам алабы өзендерінің орташа жылдық ағындысының жүргісі а) Бадам ө. – Қараспан б.; ә) Бадам ө. – Михайловка б.; б) Бадам ө. – Қызылжар б.; в) Сайрам ө. – Тасарық а.; г) Бургулюк ө. - Скрепнево а., д) Эрмекбадам ө. – Карл Маркс б.*

Кесте 4

Бадам өзенінің негізгі тұстамалары бойынша есептелген айлық RBI мәндері

Өзен-бекет	Кезеңдер	RBI мәндері											
		Айлар											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Бадам-Қараспан	1966...1990	0.37	0.39	0.44	0.70	0.79	1.20	0.83	0.59	0.36	0.46	0.37	0.30
	1991...2022	0.23	0.27	0.41	0.68	0.79	0.88	0.70	0.55	0.38	0.34	0.31	0.30
	Δ	-0.14	-0.12	-0.03	-0.02	0	-0.32	-0.13	-0.04	0.02	-0.12	-0.06	0
Бадам-Михайловка	1966...1990	0.44	0.90	0.91	0.88	0.85	1.30	1.07	0.75	0.77	0.70	0.40	0.54
	1991...2022	0.45	0.52	0.66	0.75	0.84	1.09	0.89	0.78	0.93	0.62	0.47	0.36
	Δ	0.01	-0.38	-0.25	-0.12	-0.01	-0.21	-0.18	0.03	0.16	-0.08	0.07	-0.18
Бадам-Қызылжар	1966...1990	0.44	0.64	1.02	1.24	1.13	1.53	1.70	1.41	1.11	1.02	1.14	0.61
	1991...2022	0.36	0.43	0.48	0.66	0.80	0.91	0.72	0.57	0.51	0.45	0.41	0.32
	Δ	-0.08	-0.22	-0.54	-0.58	-0.33	-0.61	-0.98	-0.84	-0.60	-0.57	-0.73	-0.29

Сонымен қатар ауа температурасы мен жауын-шашын көрсеткіштері талданып, маусымдық бөліністе елеулі өзгерістер бары анықталды. 1966...1990 және 1991...2022 жж. екі кезеңді салыстыру нәтижесінде режимдік сипаттамалардың ығысуы байқалды: көктемгі қар еріген кездегі ағынды үлесі артты, ал жазғы-күзгі сабалық ағындының азаюы байқалды. Жылішілік өзгерістер RBI мәндерімен расталды, екінші кезеңдегі көрсеткіштер бірінші кезеңмен салыстырғанда әлдеқайда төмен, бұл ағынды тербелістерінің тегістелуімен және ағындының антропогендік және климаттық факторлар негізінде трансформациялануымен түсіндіріледі. Соңғы онжылдықтардағы Бадам өзені ағындысындағы өзгерістер кешенді сипатқа ие және климаттық факторлардың (температураның жоғарылауы, жауын-шашынның қайта үлестірілуі) шаруашылық қызметпен (ағындыны реттеу, қарқынды су пайдалану) ұштасуымен анықталуда. Айқындалған процестер су ресурстарын басқару стратегиясын жетілдіру, су пайдалануды жоспарлау, болашақта климаттық өзгерістерді ескеретін бейімделу шараларын қабылдау және Шымкент қаласын сумен жабдықтау жүйесін басқару, сондай-ақ су қоймаларды тиімді пайдалану барысында ескерілуі қажет.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар «Қазгидромет» РМК ашық деректер базасынан алды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – МКА; деректерді басқару – АКМ, ӘСА; Ресми талдау – АКМ, МСО; Әдістеме - ГЖБ; Визуализация – АКМ, ӘСА; Бастапқы жобаны жазу – АКМ; МСО; ГЖБ; Шолу және редакциялау – АКМ, МСО, ӘСА.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Ekolu J., van Wyk G., Tesfamariam S. (2022). Long-term variability in hydrological droughts and floods. Journal of Hydrology. Vol. 610. Article 127964. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127964

2 Clausen B., Biggs B.J.F. (2000). Flow variability indices for riverine environmental studies.Water Resources Research. Vol. 36, № 9. P. 2403–2414. DOI: 10.1029/2000WR900033.

3 Алимкулов С.К., Турсунова А.А., Сапарова А.А. Ресурсы речного стока Казахстана в условиях будущих климатических и антропогенных изменений // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 1. – С. 59–71.

4 Yapiyev V., Ongdas N., Saidaliyeva Z., Zhiyenbek A., Smogulova T., Baigaliyeva M., Prikaziuk E. (2025). Baseline information and regionalization of the large river basins of Kazakhstan. Frontiers in Water. Vol. 7. Article 1601671. DOI: 10.3389/frwa.2025.1601671.

5 Мустафаев Ж., Козыкеева А., Шугайып У., Абдешев К., Турсынбаев Н. Анализ и оценка тенденции изменения гидрологического режима рек в водосборе бассейна реки Нура // Гидрометеорология и экология. – 2025. – № 1. – С. 8–23. – DOI: 10.54668/2789-6323-2025-116-1-8-23.

6 Достай Ж. Д., Алимкулов С. К., Сапарова А.А. Возобновляемые ресурсы поверхностных вод юга и юго-востока Казахстана. – 2012. – Кн. 2. – 360 с.

7 Методическое указание по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановление его характеристик. -1986. – Л. : Гидрометеоиздат.
8 СП-33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Москва, 2004: Госстрой России – 71 с.
9 Westerberg I. K. (2022) Hydrological model calibration with uncertain discharge data: tests with HBV. Hydrological Processes.
10 Нурбацина А.А., Дидовец Ю., Лобанова А.П. Применение модели HBV-light для моделирования стока реки Шарын // Гидрометеорология и экология. – 2019. – № 3. – С. 26–43.
11 Тиллакарим Т.А., Серикбай Н.Т., Сатмурзаев А.А., Саиров С. Моделирование стока горных рек Илейского Алатау с применением модели HBV-light // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. - 2024. – Т. 10, № 1. – С. 1–20. – DOI: 10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/1-20.rus.
12 Johnson B. G., Morris C. S., Mase H. L., Whitehouse P. S., Paradise C. J. (2022) Seasonal flashiness and high frequency discharge events in headwater streams in the North Carolina Piedmont (United States). Hydrological Processes. Vol. 36, № 3.
13 Yao L., Libera D.A., Kheimi M., Sankarasubramanian A., Wang D. (2020). The roles of climate forcing and its variability on streamflow at daily, monthly, annual, and long-term scales. Water Resources Research. Vol. 56. e2020WR027111. DOI: 10.1029/2020WR027111.
14 Baker D. B., Richards R. P., Loftus T. T., Kramer J. W. (2004). A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 40, № 2. P. 503–522. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.
15 Application of the Richards-Baker Flashiness Index to Gaged Michigan Rivers and Streams (2024). Michigan Department of Environmental Quality. Nov 22.
16 Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 14, вып. 1: Бассейны рек Средней Азии. Бассейн реки Сырдарьи. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
17 Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 14, вып. 1: Бассейн реки Сырдарьи. – Л. : Гидрометеоиздат, 1969.
18 Жумабаев А., Шведхельм Х., Марти Б., Рагеттли С., Зигфрид Т. Водные истории из Туркестана: вызовы и возможности для Бадам-Сайрамской водной системы в условиях изменения климата // Центральноазиатский журнал исследований водных ресурсов. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 139–165.
19 Каталог водопользования бассейна реки Сырдарьи в пределах Казахской ССР за 1985 г. – Шымкент, 1987.
20 Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб. : Нестор-История, 2010.
21 Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик.– Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 448 с.
22 СТО ГГИ 52.08.41–2017. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету / ФГБУ «Государственный гидрологический институт». – СПб., 2017. – 46 с.
23 СП-33-101. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М. : Госстрой России, 2003. – 71 с.
24 Сикан, А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации : учебник. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. – 279 с.
25 Наурозбаева, Ж. К. Климатические характеристики осадков и температуры воздуха на территории южного и юго-восточного Казахстана в теплый период // Гидрометеорология и экология. – 2011. – № 3. – С. 95–101.
26 Нысанбаева, А.С., Талипова, Э.К. Өзен ағындысының көпжылдық жүрісіне климаттың заманауи өзгерістерінің тигізетін әсері // Materials International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Farabi alemi». – Алматы : Қазақ университеті, 2020. – С. 69–74.
27 Давлетгалиев, С.К. Статистические методы обработки гидрологической информации : учебник. – Алматы: Қазақ университеті, 2015. – 276 с.
28 Nagy P., Kubiak-Wójcicka K., Káposztásová D., Zeleňákova M., Vranay, F. (2023). Flow characteristics of the Hornád River and the anthropogenic impact of the Ružín dam for the period 1973–2020. Frontiers in Environmental Science. Vol. 11. Article 1203965. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1203965.

REFERENCES

1 Ekolu J., van Wyk G., Tesfamariam S. (2022). Long-term variability in hydrological droughts and floods. Journal of Hydrology. Vol. 610. Article 127964. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127964
2 Clausen B., Biggs B.J.F. (2000). Flow variability indices for riverine environmental studies.Water Resources Research. Vol. 36, № 9. P. 2403–2414. DOI: 10.1029/2000WR900033.
3 Alimkulov, S.K., Tursunova, A.A., Saparova, A.A. (2021). Resursy rechnogo stoka Kazahstana v usloviyah budushchih klimaticheskih i antropogennyh izmenenij [River flow resources of Kazakhstan under future climatic and anthropogenic changes]. Gidrometeorologiya i ekologiya, No 1. P. 59–71.
4 Yapiyev V., Ongdas N., Saidaliyeva Z., Zhiyenbek A., Smogulova T., Baigaliyeva M., Prikaziuk E. (2025). Baseline information and regionalization of the large river basins of Kazakhstan. Frontiers in Water. Vol. 7. Article 1601671. DOI: 10.3389/frwa.2025.1601671.
5 Mustafaev ZH., Kozykeeva A., SHugajyp U., Abdeshev K., Tursynbaev N. (2025). Analiz i ocenka tendencii izmeneniya gidrologicheskogo rezhima rek v vodosbore bassejna reki Nura [Analysis and assessment of trends in changes in the hydrological regime of rivers in the Nura River basin catchment area]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No 1. P. 8–23. DOI: 10.54668/2789-6323-2025-116-1-8-23.
6 Dostaj ZH.D., Alimkulov S.K., Saparova A.A. (2012). Vozobnovlyaemye resursy poverhnostnyh vod yuga i yugo-vostoka Kazahstana [Renewable surface water resources in southern and southeastern Kazakhstan]. Kn. 2. 360 p.
7 Metodicheskoe ukazanie po ocenke vliyaniya hozyajstvennoj deyatel'nosti na stok srednih i bol'shih rek i vosstanovlenie ego harakteristik [Methodological guidelines for assessing the impact of economic activity on the flow of medium and large rivers and restoring its characteristics] (1986). L.: Gidrometeoizdat.
8 SP-33-101 (2003). Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [Determination of basic calculated hydrological characteristics]. Moskva : Gosstroj Rossii. 71 p.
9 Westerberg I. K. (2022) Hydrological model calibration with uncertain discharge data: tests with HBV. Hydrological Processes.
10 Nurbacina, A.A., Didovec, YU., Lobanova, A.P. (2019). Primenenie modeli HBV-light dlya modelirovaniya stoka reki SHaryn // Gidrometeorologiya i ekologiya. No 3. P. 26–43.

11 Tillakarim T.A., Serikbaj N.T., Satmurzaev A.A., Sairov S. (2024). Modelirovanie stoka gornyh rek Ilejskogo Alatau s primeneniem modeli HBV-light [Modeling of mountain river runoff in the Ili Alatau using the HBV-light model]. Central'noaziatskij zhurnal issledovanij vodnyh resursov. Vol. 10, № 1. P. 1–20. DOI: 10.29258/CAJWR/2024-R1.v10-1/1-20.rus.
12 Johnson B. G., Morris C. S., Mase H. L., Whitehouse P. S., Paradise C. J. (2022) Seasonal flashiness and high frequency discharge events in headwater streams in the North Carolina Piedmont (United States). Hydrological Processes. Vol. 36, No 3.
13 Yao L., Libera D.A., Kheimi M., Sankarasubramanian A., Wang D. (2020). The roles of climate forcing and its variability on streamflow at daily, monthly, annual, and long-term scales. Water Resources Research. Vol. 56. e2020WR027111. DOI: 10.1029/2020WR027111.
14 Baker D. B., Richards R. P., Loftus T. T., Kramer J. W. (2004). A new flashiness index: characteristics and applications to Midwestern rivers and streams. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 40, No 2. P. 503–522. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.
15 Application of the Richards-Baker Flashiness Index to Gaged Michigan Rivers and Streams (2024). Michigan Department of Environmental Quality. Nov 22.
16 Resursy poverhnostnyh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. (1965) Gidrologicheskaya izuchennost'. Vol. 14, No 1: Bassejny rek Srednej Azii. Bassejn reki Syrdar'i. L.: Gidrometeoizdat.
17 Resursy poverhnostnyh vod SSSR [Surface water resources of the USSR]. (1969). Vol.14, No. 1: Bassejn reki Syrdar'i. L.: Gidrometeoizdat
18 Zhumabaev A., SHvedhel'm H., Marti B., Ragettli S., Zigfrid T. (2024) Vodnye istorii iz Turkestana: vyzovy i vozmozhnosti dlya Badam-Sajramskoj vodnoj sistemy v usloviyah izmeneniya klimata [Water stories from Turkestan: challenges and opportunities for the Badam-Sairam water system in the context of climate change]. Central'noaziatskij zhurnal issledovanij vodnyh resursov. Vol. 10, No 2. P. 139–165.
19 Katalog vodopol'zovaniya bassejna reki Syrdar'i v predelah Kazahskoj SSR za 1985 g. [Catalogue of water use in the Syr Darya River basin within the Kazakh SSR for 1985] (1987). SHymkent.
20 Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskih harakteristik i opredeleniyu ih raschetnyh znachenij po neodnorodnym dannym [Methodological recommendations for assessing the uniformity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data.] (2010). SPb.: Nestor-Istoriya.
21 Posobie po opredeleniyu raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [Guide to determining calculated hydrological characteristics]. (1984) L. : Gidrometeoizdat. 448 p.
22 STO GGI 52.08.41 (2017). Osnovnye gidrologicheskie harakteristiki pri nestacionarnosti vremennyh ryadov, obuslovlennoj vliyaniem klimaticheskih faktorov. Rekomendacii po raschetu [Key hydrological characteristics in the case of time series non-stationarity caused by climatic factors. Recommendations for calculation.]. FGBU «Gosudarstvennyj gidrologicheskij institut». SPb.: GGI. 46 p.
23 SP-33-101 (2003). Opredelenie osnovnyh raschetnyh gidrologicheskih harakteristik [Determination of basic calculated hydrological characteristics]. M.: Gosstroj Rossii. 71 p.
24 Sikan A.V. (2007) Metody statisticheskoj obrabotki gidrometeorologicheskoj informacii : uchebnik [Methods of statistical processing of hydrometeorological information: textbook]. SPb.: Izd-vo RGGMU. 279 p.
25 Naurozbaeva ZH.K. (2011) Klimaticheskie harakteristiki osadkov i temperatury vozduha na territorii yuzhnogo i yugo-vostochnogo Kazahstana v teplyj period [Climatic characteristics of precipitation and air temperature in southern and southeastern Kazakhstan during the warm season]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No 3. P. 95–101.
26 Nysanbaeva A.S., Talipova E.K. (2020) Өzen ағyndysynyң kөpzhyldyқ zhyrisine klimattyң zamanaui өzgeristerinің tigizetin әseri [The impact of modern climate changes on the long-term course of river flow]. Materials International Scientific Conference of Students and Young Scientists «Farabi alemi». Almaty: Қazaқ universiteti. P. 69–74.
27 Davletgaliev S.K. (2015) Statisticheskie metody obrabotki gidrologicheskoj informacii: uchebnik [Statistical methods of processing hydrological information : textbook]. Almaty: Қazaқ universiteti. 276 p.
28 Nagy P., Kubiak-Wójcicka K., Káposztásová D., Zeleňákova M., Vranay, F. (2023). Flow characteristics of the Hornád River and the anthropogenic impact of the Ružín dam for the period 1973–2020. Frontiers in Environmental Science. Vol. 11. Article 1203965. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1203965.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА РЕКИ БАДАМ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

Айнур К. Мусина к.г.н, ассоциированный профессор, Маржан С. Оспанова* PhD, и.о. доцента,
Әсел С. Абдуллаева PhD, и.о. доцента, Гүлжанат Ж. Байдашева

Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан Ainur.Musina@kaznu.edu.kz, ospanova.marzhan@kaznu.kz, Abdullayeva.Assel@kaznu.kz, baydashova8@gmail.com
Автор корреспондент: Маржан С. Оспанова, ospanova.marzhan@kaznu.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

колебания стока,
гидрологический режим,
климатические изменения,
антропогенные факторы,
коэффициент вариации,
индекс Ричарда-Бейкера (RBI)

АБСТРАКТ

В статье рассматривается изменчивость стока реки Бадам за последние десятилетия. В ходе исследования использовались методы математико-статистического анализа, экстраполяции, корреляции, а также интегральные суммарные и разностные кривые. Многолетняя и внутригодовая изменчивость речного стока оценена с помощью индекса Ричардса-Бейкера (RBI). Результаты расчётов позволили выявить влияние как природных

По статье:
Получено: 02.10.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано:08.10.2025

факторов (морфометрические особенности, климат, рельеф), так и антропогенных факторов (строительство водохранилища, развитие ирригационных сетей, городская застройка) на гидрологический режим реки. Анализ колебаний стока показал, что в малых водосборных бассейнах значения RBI выше, тогда как в крупных речных бассейнах наблюдается относительная стабильность. Установлено, что на гидрологический режим реки Бадам существенно влияют рост численности населения, развитие земледелия и ирригационной деятельности, а также регулирующее воздействие Бадамского водохранилища. Результаты исследования имеют важное значение для эффективного управления водными ресурсами, оценки устойчивости экосистем и выявления влияния климатических и антропогенных факторов.

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE BADAM RIVER RUNOFF OVER THE LAST DECADES

Ainur Mussina Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Marzhan Ospanova*, PhD, Acting Associate Professor, Assel Abdullayeva, PhD, Acting Associate Professor, Gulzhanat Baydasheva

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan Ainur.Musina@kaznu.edu.kz, ospanova.marzhan@kaznu.kz, Abdullayeva.Assel@kaznu.kz, baydashova8@gmail.com
Corresponding author: Marzhan S. Ospanova, ospanova.marzhan@kaznu.kz

KEY WORDS

runoff fluctuations,
hydrological regime,
climate change,
anthropogenic factors,
coefficient of variation,
Richards-Baker Index (RBI)

About article:
Received: 02.10.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published:08.10.2025

ABSTRACT

This article examines the variability of the Badam River runoff over the past decades. In the course of the study, methods of mathematical and statistical analysis, extrapolation, correlation, as well as integral cumulative and residual curves were applied. The long-term and intra-annual variability of river runoff was assessed using the Richards-Baker Index (RBI). The calculation results revealed the influence of both natural factors (morphometric features, climate, relief) and anthropogenic factors (construction of a reservoir, development of irrigation networks, urbanization) on the hydrological regime of the river. Analysis of runoff fluctuations showed that RBI values are higher in small catchments, while relative stability is observed in larger river basins. It was established that the hydrological regime of the Badam River is significantly affected by population growth, the development of agriculture and irrigation activities, as well as the regulating impact of the Badam Reservoir. The research findings are important for effective water resources management, assessment of ecosystem sustainability, and identification of the impact of climatic and anthropogenic factors.

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКОВ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКЕ СЫРДАРЬЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Серик Б. Саиров [1] к.г.н, ассоциированный профессор, Турсын А. Тілләкәрім[1] PhD, Бота Б. Айтымова[1], Мариям Қ. Нүрхан[1,2]*

[1] РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан; sairov_s@meteo.kz (СБС), tillakarim_t@meteo.kz (ТАТ), aitymova_b@meteo.kz (ББА), nurkhan_m@meteo.kz (МҚН)
[2] Евразийский Национальный Университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан; nurkhan_m@meteo.kz (МҚН)
*Автор корреспондент: Мариям Қ. Нүрхан, nurkhan_m@meteo.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вскрытие,
ледостав,
статистический метод,
среднесуточные температуры воздуха,
Казахстан

АБСТРАКТ

В работе представлены результаты обновления методик прогнозирования сроков вскрытия, появления первых ледовых явлений и установления ледостава на реке Сырдарья в пределах Казахстана, полученных методом регрессионного анализа и их апробация. Наибольшее практическое значение имеют прогнозы сроков образования и разрушения льда, которые востребованы широким кругом потребителей. Также прогнозирование сроков установления и разрушения ледостава на р. Сырдарья позволяет оперативно регулировать попуски из Шардаринского водохранилища и тем самым рационально управлять водными ресурсами региона. Особую актуальность такие прогнозы имеют для створов у пгт. Тасбугет и г. Казалинск, расположенных ниже водохранилища. На основе анализа гидрометеорологических данных р. Сырдарья выполнено прогнозирование сроков вскрытия и начала ледовых явлений. Установлено, что использование предиктора «дата перехода максимальной температуры через 0 °С обеспечивает высокую точность прогнозов (погрешность 2...4 дня), а для первых ледовых явлений отмечено практически полное совпадение с фактическими данными и позволяют достигать необходимой заблаговременности (8...12 дней), что повышает их практическую значимость для гидропрогнозной службы.

По статье:
Получено: 06.10.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано:08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Работа водного транспорта, гидротехническое и дорожное строительство, прокладка нефте- и газопроводов в географических зонах, где протекают замерзающие реки, требует обеспечения прогнозами ледовых явлений.

Основные виды ледовых прогнозов для рек и водохранилищ включают: прогнозы сроков появления плавучего льда (сала, шуги, осеннего ледохода); прогноз сроков начала ледостава (образование неподвижного ледяного покрова); прогноз нарастания толщины ледяного покрова; прогноз уменьшения толщины и прочности ледяного покрова; прогноз начала и окончания осеннего ледохода; прогноз особых явлений, возникающих при замерзании и вскрытии рек – зажоров и заторов льда.

Все виды прогнозов подразделяются по заблаговременности на краткорочные (с заблаговременностью до 15 суток) и долгосрочные.

Долгосрочные прогнозы, имеющие обычно заблаговременность 1...2 месяца, используются при планировании открытия и закрытия навигации (включая начало и окончание сплава леса), организации и прекращения работы ледяных переправ и

Для цитирования:
Саиров С., Тілләкәрім Т., Айтымова Б., Нұрхан М. Совершенствование методик прогнозирования сроков ледовых явлений на реке Сырдарья в условиях изменения климата // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 133-149.

зимников, начала и окончания строительных работ с воды и со льда, мероприятий по пропуску весеннего половодья, по борьбе с зажорами и заторами льда и т.д.

Краткосрочные прогнозы служат для принятия конкретных оперативных решений, связанных с осуществлением перечисленных работ и мероприятий [1]. В основе краткосрочных прогнозов ледовых явлений лежит применение не только приближенных физико-статистических зависимостей, но и строгих решений, основанных на использовании уравнения теплового баланса. Долгосрочные прогнозы ледовых явлений базируются на учете закономерностей развития атмосферных процессов и преемственности их изменения в течение последующего периода времени [2]. В работе Б.А. Апполова, Г.П. Калинина, В.Д. Комарова [3] изданном в 1974 году, изложены наиболее распространенные методы прогнозов ледовых явлений. Однако, за последнее время появились новые разработки в этой области, некоторые методики прогнозирования были уточнены и усовершенствованы.

Основы краткосрочных прогнозов ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах разрабатывались в Гидрометцентре СССР. Значительный вклад в решение этого сложного вопроса внесли исследования С.Н. Булатова, В.В. Пиотровича, Л.Г. Шуляковского [4] и других авторов. Методам прогноза сроков замерзания и вскрытия посвящены работы Гинзбурга Б.М. [5], Солдатовой И.И [6,7] и Савченко Е.И [8]. Исследованиями ледовых явлений в низовье Сырдарьи посвящено много работ, из которых следует особо отметить работу В.П. Захарова [9], имеющую обзорный характер.

В Казахстане первые работы по разработке методов прогнозирования сроков начала ледовых явлений, и установления ледостава на исследуемом объекте относятся к 1971 году. Данные исследования заложили основу для дальнейшего совершенствования методических подходов. В последующие годы методика была дороботана и обновлена в 2005 году специалистами Управления Гидропрогнозов РГП «Казгидромет» выпущена методическая записка «Методика прогнозирования сроков появления льда, установления ледостава на р. Сырдарья» [10].

В настоящее время потребность в улучшении качества прогнозов сроков начала осенних ледовых явлений и в увеличении заблаговременности сильно возросла. Практика обслуживания органов сельского хозяйства, речного флота показывает большое значение долгосрочного прогноза с заблаговременностью порядка 1...1.5 месяца [11].

Целью данной работы является обновление методики прогнозирования сроков вскрытия, начала ледовых явлений и установления ледостава на реке Сырдария в условиях меняющегося климата на основе статистических методов прогнозирования.

Для достижения цели выполнены следующие задачи:

- сбор данных и удлинение рядов с целью обеспечения более точных и актуальных прогнозов;
- построение новых зависимостей, используя предикторы, для повышения точности прогноза;
- выбор наиболее эффективных зависимостей с предикторами для создания уравнений, которые были использованы в прогнозировании;
- проведение апробации полученных зависимостей на 2024...2025 гг.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Область исследования

В данной работе прогнозирование сроков вскрытия, первых ледовых явлений и установления ледостава на р. Сырдарья произведены по двум гидрологическим постам: у пгт. Тасбугет и у г. Казалинск.

Ледовый режим на р. Сырдарья в целом отличается неустойчивым характером. В годы с постепенным понижением температуры и отсутствием резких похолоданий сроки появления шуги на различных участках могут различаться более чем на месяц.

Между датами появления ледовых явлений в разных частях реки прослеживается взаимосвязь, однако коэффициенты корреляции остаются относительно невысокими.

Ледостав на р. Сырдарья формируется путем остановки и смерзания в отдельных неподвижных ледяных перемычек, разделенных участками чистой воды, которые в дальнейшем постепенно замерзают, а иногда остаются свободными ото льда или характеризоваться развитием шуговых явления.

Процесс установления ледостава можно схематически разделить на два типа. Первый тип: наблюдается при слабых морозах, когда транзитная шуга длительное время свободно подходит к кромке льда. Происходит медленное движение кромки льда вверх по течению. Второй тип: характерен для резких похолоданий: когда сразу образуется серия ледяных перемычек, что вызывает скачкообразное движение кромки льда вверх по реке. В этом случае большое количество шуги быстро смерзается, формируя прочный ледяной покров.

Сроки установления ледостава колеблются в широких пределах. Строгой последовательности в установлении ледостава по длине реки нет.

Продолжительность периода в году с устойчивым ледоставом на р. Сырдарья составляет в среднем 64…91 дней. Наибольшая продолжительность у пгт. Тасбугет составила 114 дней, у г. Казалинск составила 141 дней. Минимальная продолжительность ледостава в 2016 год 23 дня зафиксировано у ГП пгт. Тасбугет.

В р.Сырдарье, как и в р.Амударье, уровень воды держится высоким от начала ее замерзания до вскрытия. В связи с этим высший (за год) уровень воды чаще всего бывает зимой, а не летом (во время половодья). Так, на Сырдарье у г. Казалинска высший зимний уровень превышал высший летний в 95 %, а у Тюмень-Арыка – в 55% лет наблюдений. В низовьях обеих рек их русла несколько приподняты над окружающей местностью поэтому их выход из берегов нередко сопровождается затоплением населенных пунктов, разрушением транспортных магистралей и других сооружений. Для защиты от наводнений объекты, подверженные затоплению, отгорожены от этих рек дамбами, которые нередко прорываются. На Сырдарье почти каждую зиму имели место выходы воды из берегов, из которых в среднем 7 случаев сопровождалось какими-либо вредными последствиями. Считалось, что опасность выхода реки в зимнее время может быть продиктован заранее с помощью регулирования попусков на плотине Шардаринской ГЭС, так как приточность реки ниже с. Шардары мало. В проекте эксплуатации Шардаринской ГЭС в качестве критических были приняты некоторые определенные расходы в нижнем бьефе водохранилища: большие для периода ледостава и меньшие для периода вскрытия. Предполагалось, что при расходах больших критических в низовьях реки должна возникать опасность выхода реки из берегов и наводнений [12]

В низовьях Сырдарьи температуры воздуха настолько низка, а в верховьях она так высока, что в низовьях река замерзает ежегодно, а верховьях очень редко. Зимой существует такая граница на реке, ниже которой наблюдается ледостав, а выше в зависимости от температуры воздуха или фаза «чисто», или шугоход. Эта граница (или кромка льда, кромка ледостава, как ее называют) не остается на месте, а перемещается по реке: при похолоданиях вверх по течению, а при потеплениях вниз, так что замерзание в отдельном пункте можно рассматривать как подход кромки льда к этому пункту снизу, а вскрытие – как подход ее сверху. Наблюдения на посту Казалинск значительно расходятся с данными других гидропостов. Этот пост находится в нижнем конце заторного участка, поэтому ледостав на нем наступает позже (иногда значительно), чем на вышележащих участках реки [12].

Материалы исследования

В работе использованы данные о ледовых явлениях за период 1980…2021 гг. для ГП у пгт. Тасбугет и за 1969…2021 годы для ГП у г. Казалинск, которые взяты из гидрологических ежегодников [13].

За дату вскрытия принимали первый день подвижки, если после не наступил ледоход, в случае отсутствия подвижки- первый день ледохода. В ежегодных данных о режиме и ресурсах поверхностных вод суши [13] есть случаи, когда подвижка не отмечается, иногда вскрытие наблюдается во время вечернего срока и приводится к следующему дню.

Материалы наблюдений за ледовым режимом по всем гидропостам имеются за весь период наблюдений за исключением отдельных лет, когда вскрытие не происходило, после ледостава сразу устанавливалась чистая вода либо ледовые явления вовсе отсутствовали.

В качестве основных предикторов формирования ледовых явлений использованы метеорологические данные [14] государственной наблюдательной сети по МС Казалинск и Кызылорда (таблица 1).

Таблица 1

Список метеорологических станции

№	Наименование станции	Высота над уровнем моря	Координаты		Годы наблюдений
			Широта	Долгота	
1	Казалинск	66	45° 45'	62° 06'	1936…2022
2	Кызылорда	128	44° 51'	65° 30'	1977…2022

Методика исследования

Одним из широко распространенных методов для прогнозирования временных рядов и выявления зависимостей между климатическими факторами и ледовыми процессами является регрессионный анализ [15…16].

Для описания взаимосвязи между сроками формирования ледовых явлений и метеорологическими характеристиками применён метод линейной регрессии, основанный на предположении о линейной зависимости между датами установления ледовых явлений и соответствующими предикторами (датами перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С, максимальной температуры через 0 °С и среднесуточной температуры через −5 °С).

Для оценки эффективности воспроизведения методики наблюденных данных используются общепринятые статистические критерии: коэффициент корреляции, среднее квадратическое отклонение, процентное системное отклонение, стандартный коэффициент отклонения.

За критерии применимости и качества методики принимается $\overline{S}/\overline{\sigma}$, т.е. отношение средней квадратичной ошибки проверочных прогнозов ($\overline{S}$) к среднему квадратичному отклонению ($\overline{\sigma}$). Также для оценки качества методики необходимо учитывать значение коэффициента корреляции фактически наблюденных и прогнозируемых значений (r). Оба этих критерия даны в таблице 2.

Таблица 2

Критерии применимости методики при числе проверочных прогнозов более 25

S/σ	r	Категория качества
≤0.50	≥0.87	хорошая
0.51...0.80	0.86...0.60	удовлетворительная

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прогноз вскрытия рек

Сроки появления плавучего льда или начало ледовых явлений, даты образования и вскрытия ледяного покрова меняются от года к году в широком диапазоне, так как тесно связан с погодными условиями.

Вскрытие, зависит главным образом от режима температуры воздуха. Поэтому основным аргументом во всех зависимостях принимаются температурные показатели, в том числе даты перехода через 0 °С, за который принимается такой переход, после даты которого без разрыва накапливается сумма положительных температур не менее 15 °С. Во всех зависимостях вскрытие увязывались с первым устойчивым переходом. В процессе выявления приемлемых аргументов для зависимостей прогнозирования сроков вскрытия р. Сырдарья были построены зависимости дат вскрытия от следующих факторов:

а) зависимость даты вскрытия ГП от суммы средней суточной температур от перехода через 0 °С до вскрытия;

б) зависимость даты расчетного перехода максимальной температуры воздуха через 0 °С к положительным значениям, причем такой переход, после которого без перерыва накапливалась сумма положительных температур не менее 15 °С.

Сроки вскрытия р. Сырдарья по гидропосту Казалинск (1969...2021 гг.) и Тасбугет (1981...2022 гг.) характеризуются значительной межгодовой изменчивостью и варьируют в пределах от середины января до начала апреля (рисунок 1).

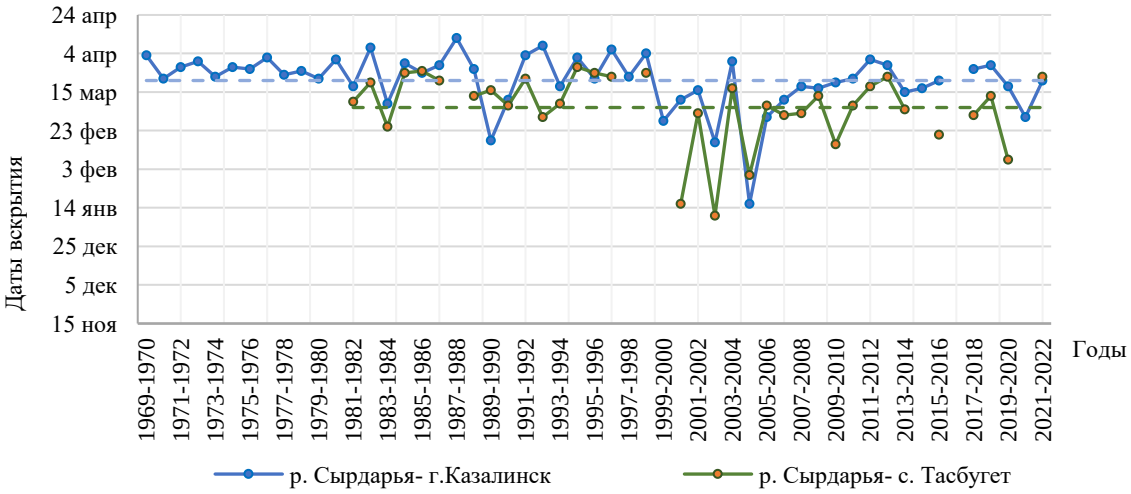


Рисунок 1. *График дат сроков вскрытия р. Сырдарья за период 1969...2021 гг.*

**примечание: по р.Сырдарья – г.Казалинск за период 2016...2017 гг., ледостав не был установлен. По р.Сырдарья – с.Тасбугет данные имеются с 1981...2022 гг., за периоды 1987...1988,1997...1998, 1999...2000, 2014...2015, 2016....2017, 2020...2021 гг., даты вскрытия в рядах наблюдений отсутствуют, что связано с отсутствием ледостава в зимний период*

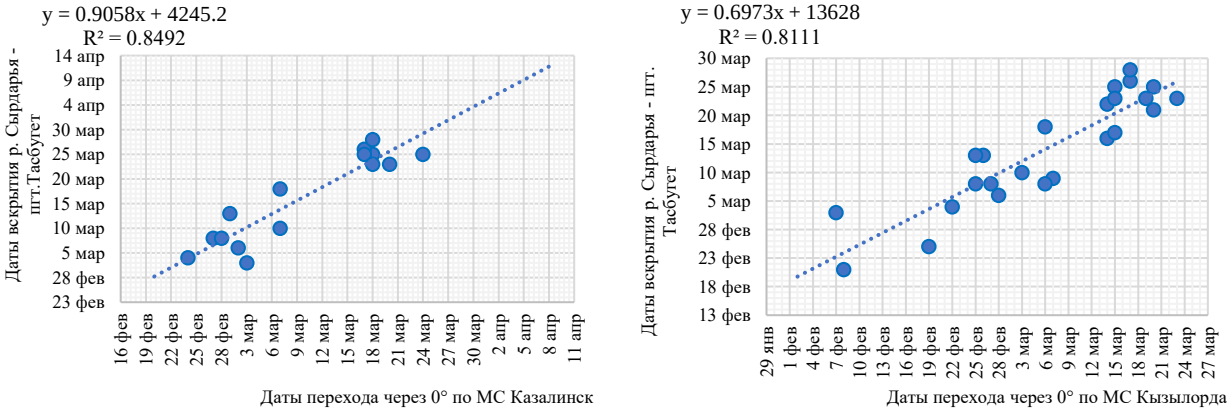
Средние даты вскрытия приходятся на вторую половину марта – начало апреля, при этом на участке Казалинск вскрытие происходит в среднем несколько позже, чем у поста Тасбугет. В разные годы фиксировались как аномально ранние вскрытия (середина января – конец февраля), связанные с мягкими зимами и ранним развитием весеннего стока, так и поздние (первая декада апреля), обусловленные холодными зимами и устойчивым ледоставом.

Связи для прогноза вскрытия рек от дат перехода через 0 °С среднесуточных температур

В ранее разработанной «Методике прогнозирования сроков появления льда и установления ледостава на реке Сырдарья» [10] расчёт и прогноз даты вскрытия реки не рассматривались. В настоящей работе такая зависимость построена для участка у пгт. Тасбугет по данным наблюдений метеостанции Казалинск за период 1980...2021 гг. (рисунок 2а), что позволило уточнить закономерности вскрытия реки в современных климатических условиях.

Проведённый анализ зависимостей сроков вскрытия показал высокую степень согласованности расчётных и фактических значений. Так, по данным МС Казалинск для участка у пгт. Тасбугет получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.92. Допустимая погрешность прогноза составляет ±6 дней при обеспеченности 93 %, а значение отношения среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 0.39) подтверждает устойчивость модели. Такие же результаты выявлены по данным МС Кызылорда: коэффициент корреляции составил 0.90 при допустимой погрешности ±6 дней и обеспеченности 96 %, а величина S/δ = 0.73 указывает на надёжность и практическую применимость зависимости. Таким образом, полученные регрессионные модели могут быть эффективно использованы для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия реки Сырдарья.

а)



б)

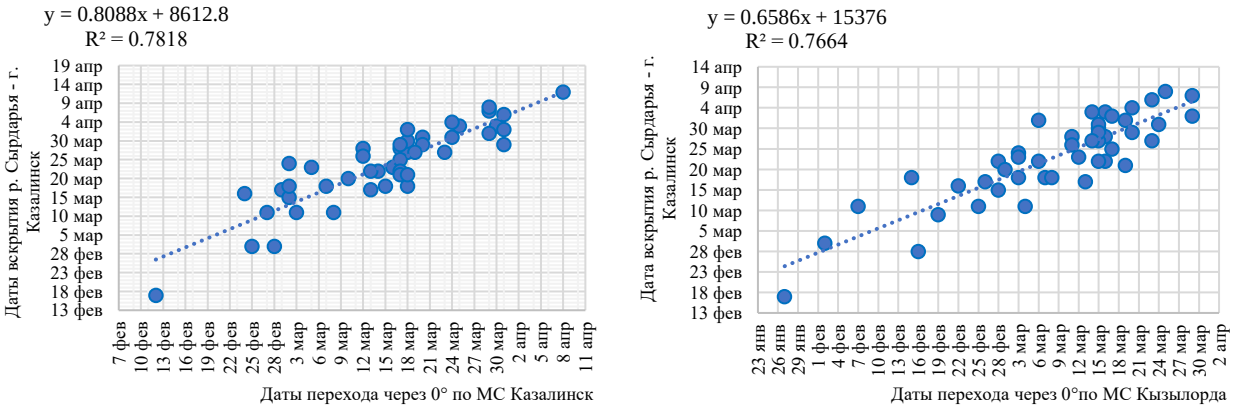


Рисунок 2. *Зависимость даты вскрытия ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° по МС Казалинск и МС Кызылорда*

Результаты построения зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 2 б) по данным наблюдений МС Казалинск за 47-летний период свидетельствуют о высокой точности модели: коэффициент корреляции составил 0.88, допустимая погрешность прогноза равна ±7 дням при обеспеченности 98 %, а значение S/δ = 0.46 подтверждает также ее применимость в целях прогнозирования. Аналогичные характеристики выявлены по наблюдениям МС Кызылорда, на основе которых получена зависимость вскрытия реки в том же створе: коэффициент корреляции также составил 0.88, допустимая погрешность ±7 дней при обеспеченности 98 %, а показатель S/δ равный 0.48 указывает на стабильность

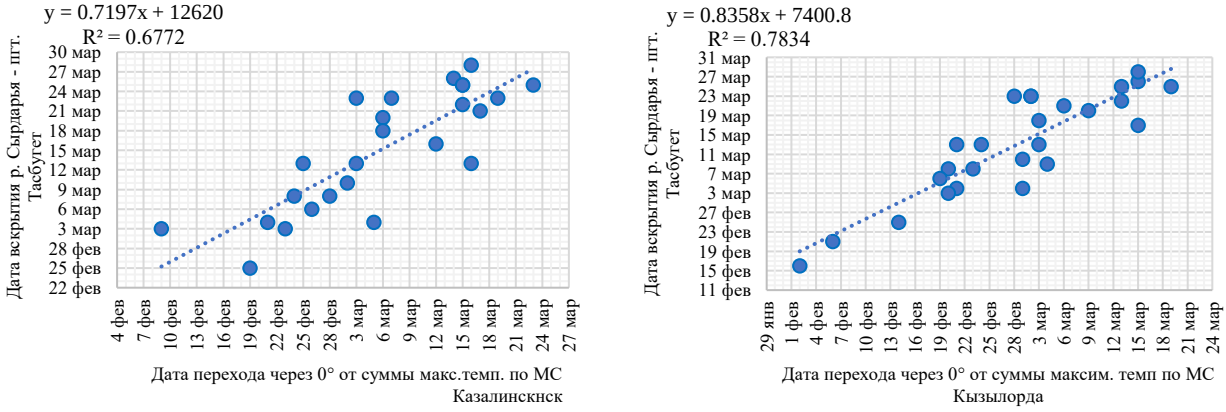
регрессионной модели. Сопоставимость полученных результатов на основе разных рядов наблюдений подтверждает высокую надёжность и воспроизводимость зависимостей, что обосновывает их практическое использование для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия р. Сырдарья.

Связи для прогноза вскрытия рек от дат перехода через 0 °С максимальных температур. Для прогноза даты вскрытия были построены зависимости, которые можно использовать в качестве проверочных к основным зависимостям, для построения их использовались даты расчетного перехода максимальных температур воздуха через 0 °С к положительным значениям.

На рисунке 3а представлены зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у пгт. Тасбугет, построенные на основе наблюдений МС Казалинск и МС Кызылорда, которые характеризуются высокой статистической надёжностью и практической значимостью. По данным МС Казалинск получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.82, допустимой погрешностью прогноза ±6 суток и обеспеченностью 96 %, при этом значение отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке S/δ = 0.58 подтверждает устойчивость результата. По данным МС Кызылорда получена зависимость с более высоким коэффициентом корреляции 0.88, допустимой погрешностью ±7 суток и обеспеченностью 96 %, а показатель S/δ = 0.48 указывает на стабильность результатов.

а) *б)*

ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет



ГП р. Сырдарья – г. Казалинск

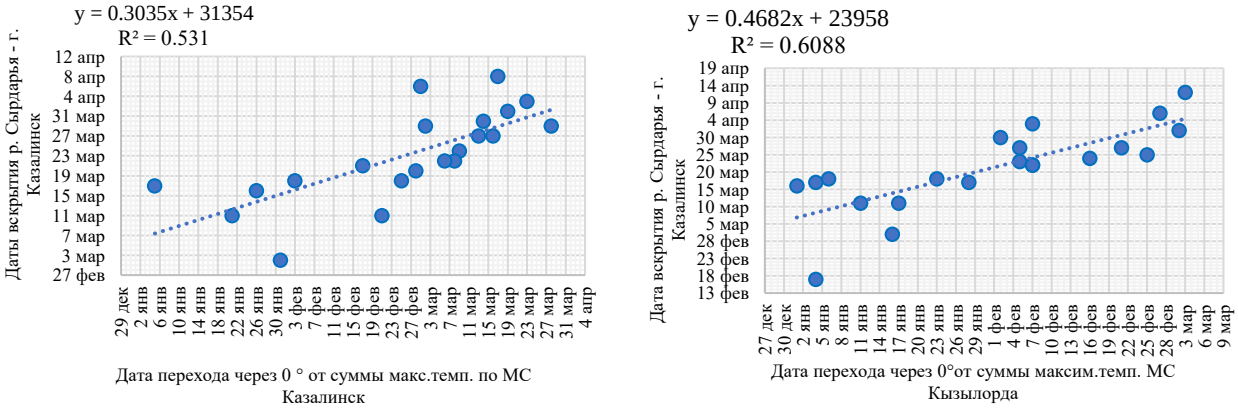


Рисунок 3. *Зависимость даты вскрытия ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск (б) от дат перехода максимальных температур через по МС Казалинск и МС Кызылорда*

Аналогичные зависимости сроков вскрытия р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 3б), построенные так же с использованием метеорологических данных МС Казалинск и МС Кызылорда, показали высокую степень статистической значимости и возможность применения для прогностических целей. По данным МС Казалинск получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.73 при допустимой погрешности ±6 дней, обеспеченности 95 % и отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке S/δ = 0.73, что подтверждает приемлемый уровень точности. Зависимость, рассчитанная по данным МС Кызылорда, характеризуется коэффициентом корреляции 0.78, допустимой погрешностью ±8 дней, обеспеченностью 95 % и значением S/δ = 0.63, что свидетельствует об устойчивости модели.

Совокупность полученных результатов демонстрирует воспроизводимость и надёжность подхода, что подчёркивает научную обоснованность разработанных зависимостей и их практическую значимость для краткосрочного прогнозирования сроков вскрытия.

С использованием разработанных уравнений выполнены расчёты прогнозных дат вскрытия реки за весь период наблюдений. Как видно из рисунка 4, рассчитанные значения удовлетворительно согласуются с фактическими данными, что свидетельствует о достоверности полученных зависимостей и устойчивости связи между рассматриваемыми параметрами.

а) б)

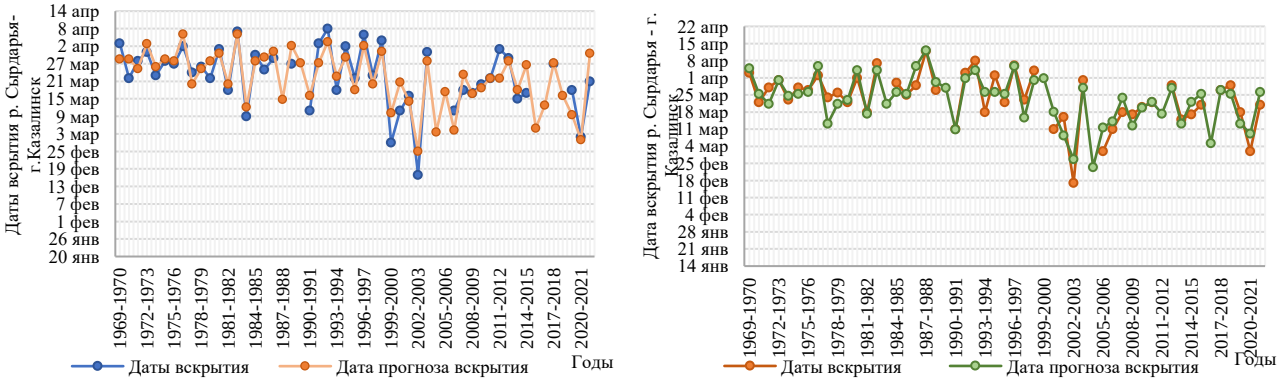


Рисунок 4. *График фактических дат вскрытия и прогнозируемых дат по ГП р.Сырдарья – г. Казалинск: а) МС Казалинск; б) МС Кызылорда*

В 2025 году на основе полученных зависимостей проведено тестирование уравнений для проверки их работоспособности и прогностической надёжности. Результаты прогнозирования даты вскрытия реки и их фактические сроки вскрытия за тот же период приведены в таблице 3.

Сравнение прогнозных и фактических дат за 2025 год показало следующие результаты:

- по р. Сырдарья – пгт. Тасбугет погрешность прогноза составила ±7...8 дней, что соответствует допустимым значениям для сезонных прогнозов и может считаться удовлетворительным результатом. Наилучшая точность достигнута при прогнозировании даты перехода максимальных температур через 0 °С по МС Казалы, погрешность составила всего +4 дня (фактическая дата – 21 февраля, прогнозная дата – 25 февраля);
- по р. Сырдарья – г. Казалинск погрешность прогноза варьировалась от ±2 до 9 дней. Особенно точным оказался прогноз даты перехода по средним и максимальным температурам воздуха через 0 °С – отклонение составило лишь – 2 дня (фактическая дата - 18 марта, прогнозная дата - 16 марта).

Таблица 3

Прогноз и фактические даты вскрытия льда на 2025 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0 °С сред.температура			Дата перехода через 0 °С макс.температура			Факт
			Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	
1	р.Сырдарья - пгт.Тасбугет	Казалы	y = 0.9058x + 4245,2	06.03	13.03	y = 0.7197x + 12620	10.02	25.02	21.02
		Кызылорда	y = 0.6973x + 13628	05.03	14.03	y = 0.8358x + 7400,8	12.02	28.02	
2	р.Сырдарья - г.Казалинск	Казалы	y = 0.8088x + 8612,8	06.03	16.03	y = 0.3035x + 31354	10.02	16.03	18.03
		Кызылорда	y = 0.6586x + 15376	05.03	21.03	y = 0.4682x + 23958	12.02	27.03	

Прогноз сроков появления льда (появление плавучего льда) и установление ледостава

Установлено, что начала появления первых ледовых явлений на реке соответствует понижению температуры воды в ней до 0 °С и переходу температуры воздуха через эту границу. Причем, между этой датой перехода через 0° и датой появления льда на реке отмечается некоторый промежуток времени, тем больший, чем выше отрицательная температура в эти дни.

На рисунке 5 показана межгодовая изменчивость сроков первых ледовых явлений на р. Сырдарья у г. Казалинск (1969...2021 гг.) и у пгт. Тасбугет (1980...2021 гг.). В среднем ледовые явления у Казалинска наступают в конце ноября, а у Тасбугета - в начале декабря. В отдельные годы фиксировались смещения сроков до января, что связано как с климатическими условиями, так и с влиянием регулирования стока.

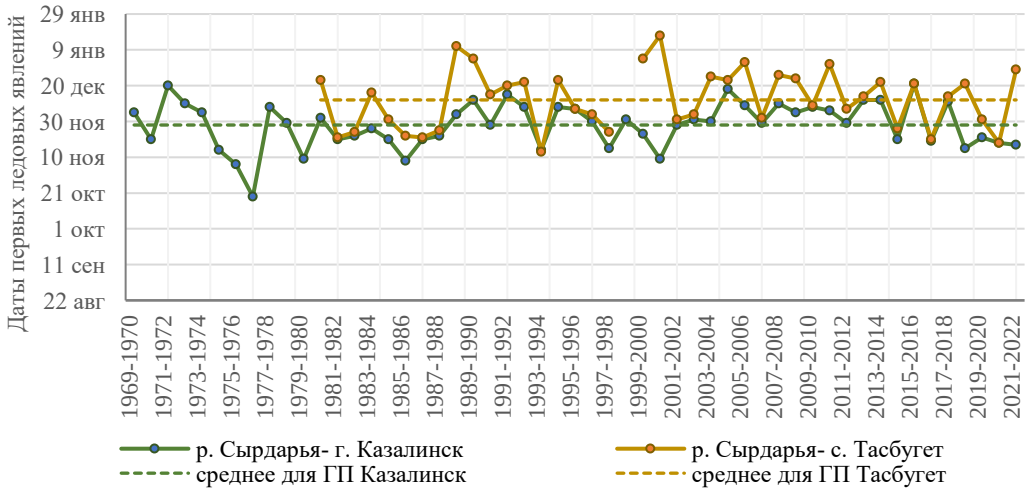


Рисунок 5. *График дат первых ледовых явлений р. Сырдарья.*

**примечание:по По р.Сырдарья – г.Казалинск данные с 1969...2022 гг. , р.Сырдарья – с.Тасбугет данные имеются с 1981...2022 гг., за период 1998...1999 гг. дата первых ледовых явлений не приведены, что связано с отсутствием ледостава*

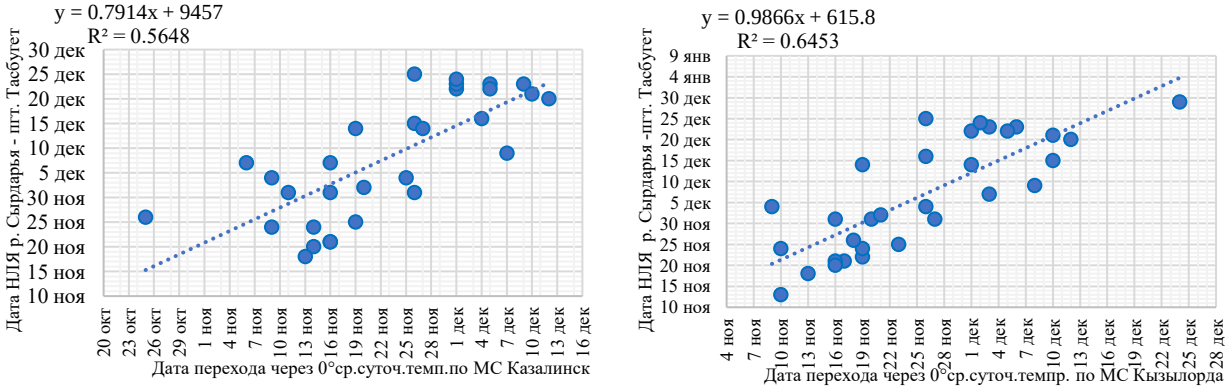
Для получения уравнений с целью прогнозирования дат появления первых ледовых явлений и дат установления ледостава в качестве предикторов были использованы данные даты перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С и -5 °С по МС Казалинск и Кызылорда.

Анализ построенных зависимостей показал, что наилучшая связь получена между датой перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°С и датой появления первых ледовых явлений у створа г. Казалинск. Для прогнозирования дат установления ледостава наиболее надежные результаты показала связь по МС Казалинск.

Связи для прогноза появления первых ледовых явлений на реке от дат перехода через 0° среднесуточных температур. В случае, если по данным МС Казалинск наблюдается переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С в сторону понижения, за дату перехода принимается первый день, после которого в течение последующих пяти суток удерживаются отрицательные температуры воздуха. Переход считается устойчивым, если последующий период положительных температур не превышает по продолжительности предшествующий пятидневный период с отрицательными температурами (рис. 6а).

а) *б)*

ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет



ГП р. Сырдарья – г. Казалинск

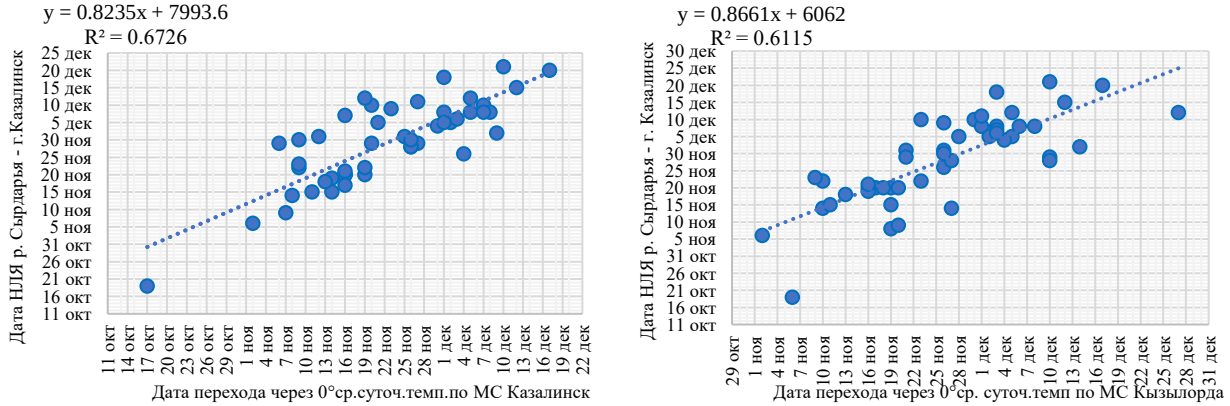


Рисунок 6. *Зависимость даты начала ледовых явлений ГП р. Сырдарья – пгт. Тасбугет (а) и ГП р. Сырдарья – г. Казалинск(б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° до начала ледовых явлений по МС Казалинск и МС Кызылорда*

Для проверки и уточнения прогноза аналогичные зависимости были построены для данного гидропоста с использованием метеорологических данных МС Кызылорда. Схожие зависимости для гидропоста у г. Казалинск приведены на рисунке 6б.

Анализ зависимости даты начала ледовых явлений на р. Сырдарья у пгт. Тасбугет (рис. 6 а) показал, что по данным наблюдений МС Казалинск регрессионная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции 0.75 и допустимой

погрешностью прогноза ±8 суток, при этом отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 1.12) указывает на удовлетворительную устойчивость зависимости. В то же время по данным МС Кызылорда получена более тесная связь между параметрами (коэффициент корреляции 0.80) при погрешности ±9 суток и обеспеченности 97 %. Соотношение S/δ = 0.62 подтверждает более высокую устойчивость зависимости, что позволяет рекомендовать её для практического использования при прогнозировании сроков начала ледовых явлений на данном участке реки.

Проведённый анализ зависимости сроков начала ледовых явлений на р. Сырдарья у г. Казалинск (рисунок 6б) показал, что по данным МС Казалинск за период 1969...2021 гг. получена регрессионная зависимость с коэффициентом корреляции 0.82 и обеспеченностью 98 %. Допустимая погрешность прогноза составляет ±8 суток, при этом отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 0.58) что подтверждает применимость полученной зависимости для прогноза. Аналогичный расчёт, выполненный по данным МС Кызылорда показал несколько более низкую тесноту связи (коэффициент корреляции 0.78) при обеспеченности 98 % и погрешности ±9 суток; отношение S/δ = 0.63 также указывает на надёжность полученной зависимости. Таким образом, обе модели могут быть использованы для практического прогнозирования сроков начала ледовых явлений, однако данные МС Казалинск обеспечивают более точный результат благодаря более высокой корреляции и меньшей погрешности.

После построения зависимостей и получения основных уравнений связи, предназначенных для прогнозирования начала ледовых явлений на р. Сырдарья, были выполнены расчёты и построены графики хода фактических и прогнозируемых дат их начала (рисунок 7). Результаты расчётов показали хорошее соответствие прогнозируемых дат фактическим значениям.

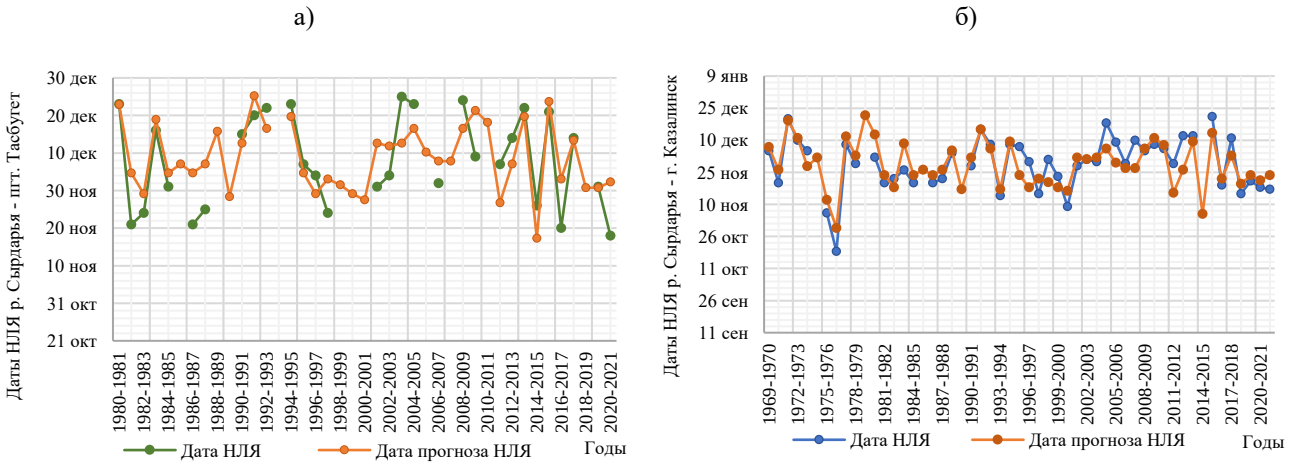


Рисунок 7. *График фактических и прогнозируемых дат начала ледовых явлений по р. Сырдарья: а) пгт. Тасбугет; б) г. Казалинск*

Для проверки надёжности разработанных зависимостей проведено их тестирование. В таблице 4 приведены результаты прогнозов дат начала ледовых явлений на 2024 год, рассчитанные по полученным уравнениям. Для сравнения даны фактические сроки начала ледовых явлений, что позволило оценить точность прогноза и степень совпадения расчётных и наблюдённых значений.

Сопоставление прогнозных значений с фактическими данными за 2024 год показывает высокую точность обновленных уравнений. По р. Сырдарья – пгт. Тасбугет, при использовании уравнения с предиктором дата перехода средних температур через 0 °С по МС Кызылорда, прогнозная дата начала первых ледовых

явлений - 16 декабря, полностью совпала с фактической. По гидропосту у г. Казалинск, наилучший результат показал прогноз также по данным МС Кызылорда — погрешность составила –3 дня (прогнозная дата - 7 декабря, фактическая дата - 10 декабря). Таким образом, полученные уравнения продемонстрировали свою эффективность и высокую точность в прогнозировании ледовых явлений.

Таблица 4

Прогноз и фактические даты начала ледовых явлений на 2024 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0° сред.температура			Факт
			Уравнение	Дата перехода	Дата прогноза	
1	р.Сырдарья – пгт.Тасбугет	Казалы	y = 0.7914x + 9457	23.11	10.12	16.12
		Кызылорда	y = 0.9866x + 615.8	07.12	16.12	
2	р.Сырдарья - г.Казалинск	Казалы	y = 0.8235x + 7993.6	23.11	29.11	10.12
		Кызылорда	y = 0.8661x + 6062	07.12	07.12	

Связи для прогноза дат установления ледостава на реке от дат перехода через 0° среднесуточных температур

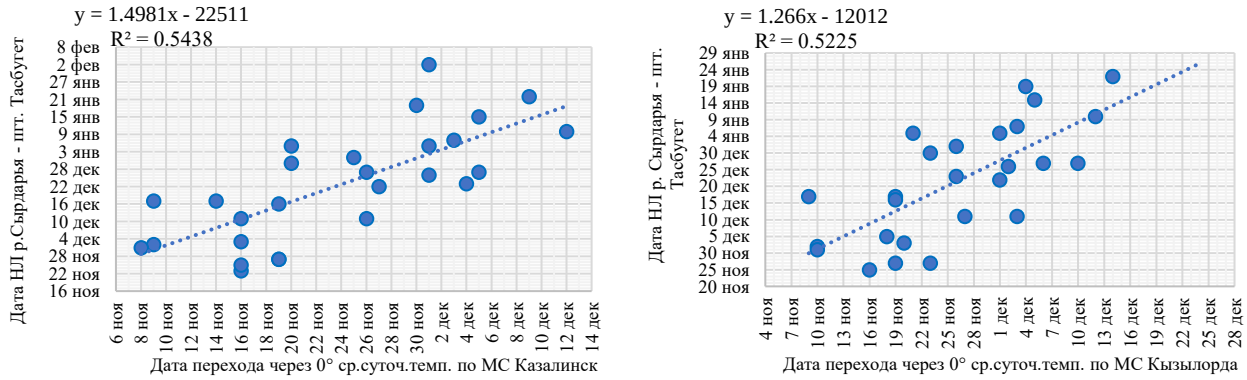
Прогноз дат установления ледостава осуществляется с использованием уравнения зависимости дат ледостава от дат перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С в сторону понижения.

Анализ зависимости для пгт Тасбугет (рисунок 8 а) показал высокую степень согласованности расчётных и фактических значений. Регрессионная зависимость, характеризуется коэффициентом корреляции 0.74, что свидетельствует о тесной связи между рассматриваемыми параметрами. Допустимая погрешность прогноза составляет ±13 суток, при этом обеспеченность данной точности достигает 96 %, что указывает на высокую надёжность метода. Отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 0.67) дополнительно подтверждает устойчивость полученной зависимости и возможность её практического применения для краткосрочного прогнозирования даты установления ледостава на реке. Зависимость, построенная по данным МС Кызылорда отличается высокой степенью надёжности: обеспеченность составляет 96 %, коэффициент корреляции – 0.72, допустимая погрешность прогноза ±12 суток, а отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 0.69) подтверждает стабильность установленной связи и её применимость для практических задач гидропрогнозирования.

Анализ зависимости (рисунок 8 б) показал удовлетворительную согласованность фактических и расчётных сроков ледовых явлений по гидропосту р. Сырдарья – г. Казалинск. Построенная по данным МС Казалинск за период 1970...2021 гг. регрессионная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции 0,77 и обеспеченностью 98 %, что свидетельствует о высокой надёжности полученной связи. Допустимая погрешность прогноза составляет ±9 суток, а отношение среднеквадратического отклонения к средней ошибке (S/δ = 0.66) указывает на устойчивость зависимости и возможность её практического применения. Для аналогичной зависимости, построенной на основе метеоданных МС Кызылорда: коэффициент корреляции составил 0.81, обеспеченность 98 %, при допустимой погрешности прогноза ±10 суток и значении отношения среднеквадратического отклонения к средней ошибке S/δ = 0.57. Совокупность полученных результатов подтверждает достаточную надёжность и устойчивость методики для использования в прогнозах.

а) *б)*

ГП р. Сырдарья– пгт. Тасбугет



ГП р. Сырдарья– г. Казалинск

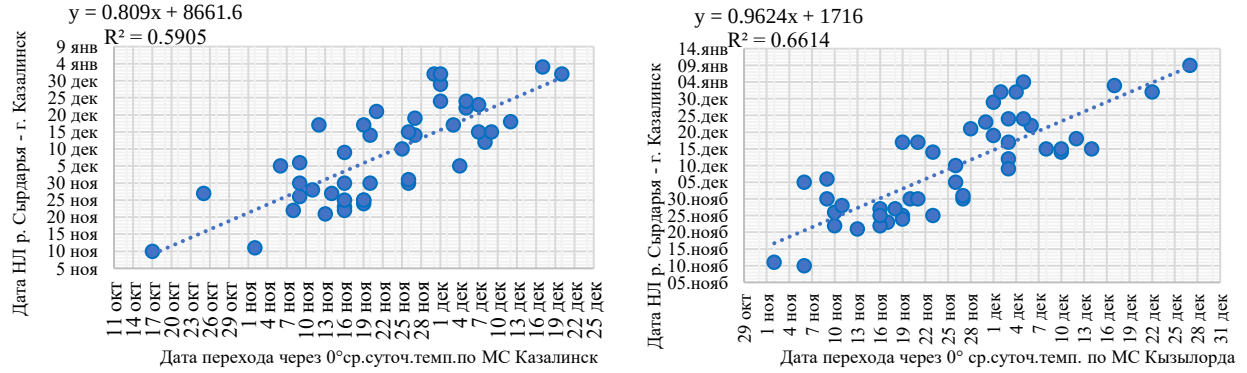


Рисунок 8. *Зависимость даты установления ледостава на ГП р. Сырдарья– пгт. Тасбугет (а) и р.Сырдарья – г.Казалинск (б) от дат перехода среднесуточных температур через 0° до начала ледостава по МС Казалинск и МС Кызылорда*

После определения зависимостей и получения уравнений связи, пригодных для прогнозирования сроков установления ледостава на р. Сырдарья, были выполнены расчёты и построены графики, отражающие динамику фактических и прогнозируемых дат ледостава (рисунок 9). Результаты показали хорошую сходимость и удовлетворительное воспроизведение фактических сроков установления ледостава.

а) б)

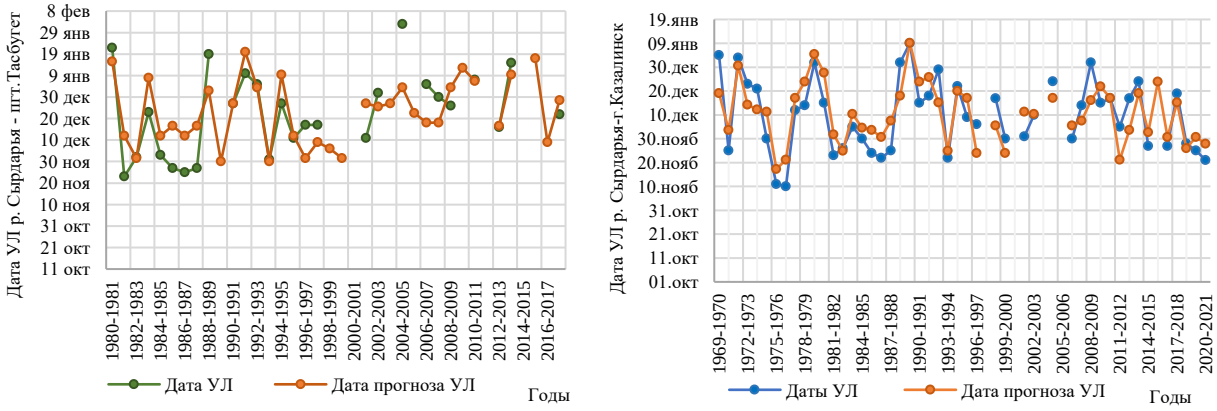


Рисунок 9. *График фактических и прогнозируемых дат начала ледостава по р. Сырдарья: а) пгт. Тасбугет; б) г. Казалинск*

В таблице 5 представлены результаты прогноза дат установления ледостава в 2024 году, рассчитанные по уравнениям, построенным на основе выявленных зависимостей.

Таблица 5

Прогноз и фактические даты установление ледостава на 2024 г.

№	Река-пост	МС	Дата перехода через 0 сред.температура			Факт
			уравнение	дата перехода	дата прогноза	
1	р.Сырдарья -пгт.Тасбугет	Казалы	y = 1.4981x - 22511	23.11	22.12	не установился
		Кызылорда	y = 1.266x - 12012	07.12	05.01	
2	р.Сырдарья -г.Казалинск	Казалы	y = 0.809x+8661.6	23.11	11.12	не установился
		Кызылорда	y = 0.9624x + 1716	07.12	20.12	

Согласно данным наблюдений, в 2024 году устойчивый ледостав не сформировался, это подтверждается обзором РГП «Казгидромет» [17], характеризуя этот год одним их самых теплых за период наблюдений, в особенности теплыми выдались именно зимние месяцы, при которых формирование снежного покрова происходило с опозданием, а его сход отмечался раньше обычного срока.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работы учтены различные синоптические факторы, в том числе среднесуточные и максимальные температуры воздуха, а также даты перехода температуры через 0 °С. Построенные зависимости показали эффективность и могут использоваться как надёжный инструмент при прогнозировании сроков вскрытия, начала ледовых явлений и установления ледостава.

На основе выполненных расчётов установлено следующее:

1. Наиболее достоверные результаты при прогнозировании сроков вскрытия были получены при использовании предиктора «дата перехода максимальной температуры через 0 °С. Так, для р. Сырдарья – пгт. Тасбугет по данным МС Казалы прогнозная дата составила 25 февраля при фактической 21 февраля (погрешность – 4 дня). Для р. Сырдарья – г. Казалинск прогнозная дата составила 16 марта при фактической 18 марта (погрешность 2 дня), что подтверждает надёжность метода.
2. При прогнозировании начала первых ледовых явлений также отмечено хорошее совпадение с фактическими данными. По р. Сырдарья – пгт. Тасбугет по данным МС Кызылорда прогнозная дата совпала с фактической – 16 декабря. Для р. Сырдарья – г. Казалинск прогноз составил 7 декабря при фактической дате 10 декабря, что указывает на высокую точность прогноза.
3. По датам установления ледостава были рассчитаны прогнозные значения, однако по исследуемым пунктам устойчивый ледостав в 2024 году не сформировался вследствие климатических условий.

Проведённые исследования по прогнозированию сроков вскрытия, появления первых ледовых явлений и установления ледостава на р. Сырдарья представляют собой значимый вклад в развитие гидрологических прогнозов. Полученные результаты позволили не только уточнить зависимости для прогноза сроков ледообразования, но и расширить наблюдательный ряд ледовых характеристик по исследуемым створам.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в данном исследовании, были получены авторами из РГП «Казгидромет».

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – СБС, ТАТ; управление данными – ББА, МҚН; формальный анализ – ТАТ, ББА, МҚН,; методология – ББА, МҚН; руководство – СБС, ТАТ; визуализация – ББА,МҚН; написание исходной статьи– ББА, МҚН ; написание и редактирование статьи – ТАТ,ББА, МҚН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – С. 4–5.
2 Георгиевский Ю. М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озёрах и водохранилищах. – Л., 1986.
3 Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. – М.: Гидрометеоиздат, 1974.
4 Шуляковский Л. Г., Еремина В. И. К методике прогноза заторных уровней воды // Метеорология и гидрология. – 1952. – № 1. – С. 46–51.
5 Гинзбург Б. М., Солдатова И. И. Многолетняя изменчивость сроков ледовых явлений на реках как индикатор колебаний климата переходных сезонов // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 11. – С. 99–106.
6 Солдатова И. И. Многолетние изменения сроков наступления ледовых явлений на реках СНГ: дис. … канд. геогр. наук: 11.00.07. – М., 1996. – 131 с.
7 Солдатова И. И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 4. – С. 87–94.
8 Савченко Е. И. Естественные функции полей дат появления льда на реках // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 117. – С. 74–81.
9 Захаров В. П. Ледовый режим низовий рек Средней Азии и вопросы его исследования // Гидрометеорология в помощь народному хозяйству. – Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1954.
10 Методика прогнозирования сроков появления льда, установления ледостава на р. Сырдарья. – Алматы, 2005. – 49 с.
11 Методическая записка по прогнозированию первых ледовых явлений на среднем участке р. Или. – Алма-Ата, 1960.
12 Машуков П. М. Гидрометеорологические условия зимних наводнений на р. Сырдарье. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969.
13 Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Алматы.
14 Система управления базами климатических данных. [Электронный ресурс] URL: http://10.0.2.242/cliware/index.jsp (дата обращения: [01.09.2025 г.]).
15 Дрейпер Н. Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М., 2007. – 912 с.
16 Chatterjee S., Hadi A. S. (2015). Regression Analysis by Example. – Hoboken: John Wiley & Sons.
17 Обзор об особенностях климата на территории Казахстана 2024. – Астана, 2025.

REFERENCES

1 Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 3. Prognoz ledovykh yavlenii na rekakh i vodokhranilishchakh (1989). [Guidelines for hydrological forecasts. Issue 3. Forecast of ice phenomena on rivers and reservoirs]. Leningrad: Gidrometeoizdat, pp. 4–5 [in Russian]
2 Georgievskii Yu. M. (1986). Kratkosrochnye i dolgosrochnye prognozy ledovykh yavlenii na rekakh, ozerakh i vodokhranilishchakh [Short-term and long-term forecasts of ice phenomena on rivers, lakes and reservoirs]. Leningrad [in Russian].
3 Apollov B. A., Kalinin G. P., Komarov V. D. (1974). Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course of hydrological forecasts]. Moscow: Gidrometeoizdat [in Russian].
4 Shulyakovskii L. G., Eremina, V. I. (1952). K metodike prognoza zatornykh urovnei vody [On the method of forecasting ice-jam water levels]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 1, pp. 46–51 [in Russian].
5 Ginzburg B. M., Soldatova I. I. (1997). Mnogoletnyaya izmenchivost' srokov ledovykh yavlenii na rekakh kak indikator kolebanii klimata perekhodnykh sezonov [Long-term variability of ice phenomena on rivers as an indicator of climate fluctuations in transitional seasons]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 11, pp. 99–106 [in Russian].
6 Soldatova I. I. (1996). Mnogoletnie izmeneniya srokov nastupleniya ledovykh yavlenii na rekakh SNG [Long-term changes in the timing of ice phenomena on rivers of the CIS]. PhD dissertation (Geography), Moscow, 131 p. [in Russian].
7 Soldatova I. I. (1996). O srokakh ledovykh yavlenii na rekakh v usloviyakh sovremennogo klimata [On the timing of ice phenomena on rivers in modern climate conditions]. Meteorologiya i gidrologiya, no. 4, pp. 87–94 [in Russian].
8 Savchenko E. I. (1974). Estestvennye funktsii polei dat poyavleniya l'da na rekakh [Natural functions of the fields of ice appearance dates on rivers]. Trudy GGI, vol. 117, pp. 74–81 [in Russian].
9 Zakharov V. P. (1954). Ledovyi rezhim nizovii rek Srednei Azii i voprosy ego issledovaniya [Ice regime of the lower reaches of rivers in Central Asia and issues of its study]. In: Gidrometeorologiya v pomoshch' narodnomu khozyaistvu [Hydrometeorology in aid of the national economy]. Tashkent: AN UzSSR [in Russian].
10 Metodika prognozirovaniya srokov poyavleniya l'da, ustanovleniya ledostava na r. Syrdar'ya [Methodology for forecasting the timing of ice appearance and ice cover establishment on the Syrdarya River]. (2005). Almaty, 49 p. [in Russian].
11 Metodicheskaya zapiska po prognozirovaniyu pervykh ledovykh yavlenii na srednem uchastke r. Ili [Methodological note on forecasting the first ice phenomena on the middle section of the Ili River]. (1960). Alma-Ata [in Russian].
12 Mashukov P. M. (1969). Gidrometeorologicheskie usloviya zimnikh navodnenii na r. Syrdar'e [Hydrometeorological conditions of winter floods on the Syrdarya River]. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
13 Gosudarstvennyi vodnyi kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursakh poverkhnostnykh vod sushi [State water cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters of land]. Almaty [in Russian].
14 Sistema upravleniya bazami klimaticheskikh dannykh. [Electronic resources] URL: http://10.0.2.242/cliware/index.jsp (date access 01 September 2025).
15 Dreiper N. R., Smit G. (2007). Prikladnoi regressionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow, 912 p. [in Russian].
16 Chatterjee S., Hadi A. S. (2015). Regression Analysis by Example. Hoboken: John Wiley & Sons.
17 Obzor ob osobennostyakh klimata na territorii Kazakhstana 2024 [Review on the climate features of Kazakhstan, 2024]. (2025). Astana [in Russian].

КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУІ ЖАҒДАЙЫНДА СЫРДАРИЯ ӨЗЕНІНДЕГІ МҰЗДЫҚ ҚҰБЫЛЫСТАРДЫҢ МЕРЗІМДЕРІН БОЛЖАУ ӘДІСТЕМЕСІН ЖЕТІЛДІРУ

Серик Б. Саиров [1] г.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Турсын А. Тілләкәрім[1] PhD, Бота Б. Айтымова[1], Мариям Қ. Нүрхан[1,2]*

[1] «Қазгидромет» РМК, Астана, Қазақстан; sairov_s@meteo.kz, tillakarim_t@meteo.kz, aitymova_b@meteo.kz, nurkhan_m@meteo.kz
[2] Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; nurkhan_m@meteo.kz
*Автор корреспондент: Мариям Қ. Нүрхан, nurkhan_m@meteo.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

мұз ашылу,
мұз қату,
статистикалық әдіс,
ауа температурасының тәуліктік орташа мәні,
Қазақстан

Мақала жайында:
Жіберілді: 06.10.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Жұмыста Қазақстан аумағындағы Сырдария өзенінде мұздың ашылу мерзімдерін, алғашқы мұз құбылыстарының пайда болуын және мұз қатуының қалыптасуын болжау әдістемелерін жаңарту нәтижелері, регрессиялық талдау әдісімен алынған және олардың апробациясы ұсынылған. Ең үлкен практикалық маңызға мұздың пайда болу және бұзылу мерзімдерін болжау ие, олар тұтынушылардың кең ауқымы арасында сұранысқа ие. Сондай-ақ Сырдария өзенінде мұз жамылғысының қалыптасу және бұзылу мерзімдерін болжау Шардара су қоймасынан су жіберулерді жедел реттеуге және осылайша аймақтың су ресурстарын ұтымды басқаруға мүмкіндік береді. Мұндай болжамдар су қоймасынан төмен орналасқан Тасбугет кенті мен Қазалы қаласы маңындағы гидрологиялық посттар үшін ерекше өзектілікке ие. Сырдария өзенінің гидрометеорологиялық деректерін талдау негізінде мұздың ашылу және алғашқы мұз құбылыстарының басталу мерзімдерін болжау орындалды. «Ең жоғары температураның 0 °С арқылы өту күні» предикторын пайдалану болжамдардың жоғары дәлдігін (қателік 2...4 күн) қамтамасыз ететіні анықталды, ал алғашқы мұз құбылыстары үшін іс жүзіндегі деректермен дерлік толық сәйкес келуі байқалды және қажетті алдын ала мерзімділікке (8...12 күн) қол жеткізуге мүмкіндік береді, бұл олардың гидроболжау қызметі үшін практикалық маңыздылығын арттырады.

IMPROVEMENT OF METHODS FORECASTING THE TIMING FOR OF ICE PHENOMENA ON THE SYRDARYA RIVER UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

Serik Sairov[1] Candidate of Geographical Sciences, associate professor, Tursyn Tillakarim[1] PhD, Bota Aitymova[1], Mariyam Nurkhan[1,2]*

[1] RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; sairov_s@meteo.kz, tillakarim_t@meteo.kz, aitymova_b@meteo.kz, nurkhan_m@meteo.kz
[2] L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; nurkhan_m@meteo.kz
*Corresponding author: Mariyam Nurkhan, nurkhan_m@meteo.kz

KEY WORDS

ice break-up,
freeze-up,
statistical method,
mean daily air temperature,
Kazakhstan

ABSTRACT

The paper presents the results of updating the methods for forecasting the dates of ice break-up, the occurrence of the first ice phenomena, and the establishment of ice cover on the Syrdarya River within Kazakhstan, obtained by the method of regression analysis and their testing. The greatest practical importance is represented by forecasts of the dates of ice formation and break-up, which are in demand among a wide range of consumers. Also, forecasting the dates of establishment and break-up of ice cover on the Syrdarya River makes it possible to promptly regulate releases from the Shardara Reservoir and thereby rationally manage the water resources of the region. Such forecasts are of particular relevance for the sections near the settlement of Tasbuget and the town of Kazalinsk, located downstream of the reservoir. Based on the analysis of hydrometeorological data of the Syrdarya River, forecasting of the

About article:
Received: 06.10.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 08.10.2025

dates of ice break-up and the beginning of ice phenomena was carried out. It was established that the use of the predictor “date of maximum temperature transition through 0 °C ensures high accuracy of forecasts (an error of 2...4 days), and for the first ice phenomena almost complete coincidence with actual data was noted, allowing the achievement of the required lead time (8...12 days), which increases their practical significance for the hydrological forecasting service.

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

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЗЕРБАЙДЖАНСКОГО СЕКТОРА КАСПИЙСКОГО МОРЯ: РАЙОН НЕФТЯНЫХ КАМНЕЙ

Сабир Б. Асадов к.г.н [1] , Гасан И. Мусаев [2]

[1] Научно-исследовательский Проектный Институт «Нефтегаз», Баку, Азербайджан; sasadov@hotmail.com (СБА)
[2] Морской Центр Национальной Гидрометеорологической Службы при МЭПР, Баку, Азербайджан; hasanmusayev7@gmail.com (ГИМ)
Автор корреспондент: Сабир Б. Асадов, sasadov@hotmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Каспийское море, акватория Нефтяных Камней, климатическая изменчивость, температура воздуха, температура воды, атмосферные осадки

АБСТРАКТ

В последние годы нарастание климатических изменений на Земле и наблюдения за их последствиями в разных регионах значительно возросли. Частая повторяемость опасных природный явлений повышает важность детального изучения современных особенностей глобальных климатических изменчивости. В связи с этим очень важно изучить влияние климатической изменчивости на показатели гидрометеорологических параметров в нефтегазоносном Азербайджанском секторе Каспийского моря. В статье на основе многолетних данных наблюдений (1961…2023 гг.) дана оценка влияния изменения климата на гидрометеорологические параметры в акватории Нефтяных Камней, особенно на температуру воздуха и воды, а также атмосферные осадки.

По статье:
Получено: 06.03.2025
Пересмотрено:02.10.2025
Принято: 03.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:
Асадов С., Мусаев Г. Изменение климатических характеристик Азербайджанского сектора Каспийского моря: район Нефтяных Камней // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 150-158.

1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение частоты опасных природных явлений в последние годы повысило значимость детального изучения современных особенностей глобальных изменений климата. Неизбежным стало то, что экономика стран несет значительный ущерб под влиянием изменения климата [1].

Природно-географические условия Каспийского моря и его расположение в различных климатических зонах обусловливают возникновение над морем различных закономерных атмосферных циркуляций. Воздушные массы, формирующиеся над Каспийским морем, различаются по своему происхождению, физическим свойствам и направлению движения. Климатические условия Каспийского региона формируются под влиянием холодных арктических и влажных морей, возникающих над Атлантическим океаном, сухих континентальных пустынь Средней Азии, Средиземного моря и теплых тропических воздушных масс, поступающих из Ирана. Рельеф играет важную роль в формировании климата Каспийского моря и особенно прилегающих к нему регионов. Таким образом, под его влиянием изменяются направление и скорость воздушных масс. Наличие горных хребтов, в том числе Главного Кавказского хребта на южном и юго-западном побережьях моря создает условия для образования и развития атмосферных фронтов. В некоторых случаях над акваторией Каспийского моря формируются свободные морские воздушные массы. Важнейшими параметрами, характеризующими климат, являются температура воздуха и атмосферные осадки. От этих двух элементов в значительной степени зависят и другие гидрометеорологические параметры.

В связи с этим, изучение влияния изменения климата на гидрометеорологические параметры в нефтегазоносных акваториях Нефтяных Камней азербайджанского

сектора Каспийского моря имеет важное значение с точки зрения предотвращения опасных явлений и ущерба экономике, а также охраны окружающей среды в целом [2].

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Территория исследования.

Каспийское море является уникальным замкнутым водоемом земного шара. Оно расположено на границе Европы и Азии. Воды его омывают берега Казахстана, Туркменистана, Азербайджана, России и Ирана.

Каспийское море вытянуто в меридиональном направлении. Протяженность моря по меридиану около 1200 км. По физико-географическим признакам и морфологическим особенностям оно естественно подразделяется Мангышлакским и Апшеронским порогами на три части: северную (мелководную), среднюю и южную (глубоководную). Глубоководная и мелководная части по своему режиму во многом различны. За условную границу между Северным и Средним Каспием обычно принимают линию, соединяющую остров Чечень с мысом Тюб-Караган, а между Средним и Южным Каспием – линию, соединяющую остров Жилой с мысом Кули. В пределах Северного Каспия выделяют также западную и восточную части, где средняя его глубина не превышает 5 м, а наибольшая около 20 м. В средней части Каспия наибольшие глубины составляют 790 м (Дербентская впадина) а средняя 192 м. В южной части моря средняя глубина 345 м, а максимальная доходит до 1025 м (Ленкоранская впадина [3]. Изучаемая территория Нефтяных Камней расположена в азербайджанском секторе Каспийского моря, на границе Среднего и Южного Каспия. Он расположен в 40 км к юго-востоку от Апшеронского полуострова, в 90 км от столицы Баку. Его также называют «морским городом».

Нефтяные камни - первая в мире нефтяная платформа. Причиной образования нефтяных камней в этом районе стала скважина. В июле 1949 года скважина впервые дала нефтяной фонтан. После этого здесь появились Нефтяные Камни.

Влияние глобальных климатических изменений проявляется в гидрометеорологических параметрах, которые играют роль в эффективном развитии месторождений нефти и газа, расположенных в этом районе моря. Несомненно, изменения климата и глобальное повышение температуры атмосферного воздуха оказали влияние на колебание уровня Каспийского моря. Резкое изменение уровня Каспийского моря, в свою очередь, приводит к ряду негативных последствий (затопление прилегающих территорий, береговых технических объектов, ограничение судоходства и усложнение условий навигации, а также снижению биологической продуктивности и другие).

По данным наблюдений морской гидрометеорологической станции Нефтяные Камни среднегодовой уровень в 2023 году составил -28.69 м БС [4].

Данные

Используемые в работе материалы основаны на данных Центра Морской Гидрометеорологической Службы при Министерстве Экологии и Природных Ресурсов, которые проводят гидрометеорологические наблюдения (уровень воды, температура, соленость, цвет, прозрачность, высота волн, количество осадков и по др. показатели) в азербайджанском секторе Каспийского моря.

Для изучения изменения климата были изучены и проанализированы с использованием математических и статистических методов [5…8] многолетние данные наблюдений за температурой воздуха и воды, а также атмосферными осадками, собранные в районе Нефтяных Камней в период с 1991 по 2020 год.

Проведен анализ среднемесячных, сезонных и годовых значений многолетних наблюдений в сравнении с климатической нормой. В связи с изменением климата Всемирная метеорологическая организация рекомендовала принимать в качестве климатических норм не все годы наблюдений, а только данные за последние 30 лет. Для обеспечения взаимного сравнения данных ВМО рекомендован период 1961…1990 гг [6].

Для точного анализа изменения климата наблюдения были разделенные на различные периоды: периоды (1961…1990 гг., 1991…2020 гг., 1991…2000 гг., 2001…2010 гг., 2011…2020 гг.), и были проведены сравнения с климатическими нормами за 2 периода (1961…1990 гг. и 1880…1960 гг.).

Температура воздуха и воды в азербайджанском секторе Каспийского моря, особенно в районах Сумгаит, Пираллахи, Чилов, Баку, Санги-Муган и Нефтяные Камни, подробно исследовалась по сезонам за период наблюдений до 2010 года [9…11]. Температурный режим воздуха в акватории Нефтяных Камней, где расположены основные месторождения нефти и газа, изучался на основе данных наблюдений за последние 33 года (1991…2023 гг.).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В районе Нефтяных Камней среднегодовая температура воздуха составляет 15.3 ^{0}C (рисунок 1). Анализ средней многолетней температуры воздуха на акватории по месяцам показал, что минимальная температура зафиксирована в феврале (5.9 ^{0}C), а максимальная – в августе (26.6 ^{0}C). Среднегодовая температура воздуха соответственно колеблется в пределах от 13.3 ^{0}C (1992 г.) до 16.6 ^{0}C (2023 г.). Абсолютный максимум и абсолютный минимум температуры воздуха наблюдались в августе (36.1 ^{0}C, 2010г.) и феврале (-3.8 ^{0}C, 2000 г.) соответственно. Амплитуда многолетней температуры воздуха в течение года колебалась в пределах 19.9…24.9 ^{0}C.

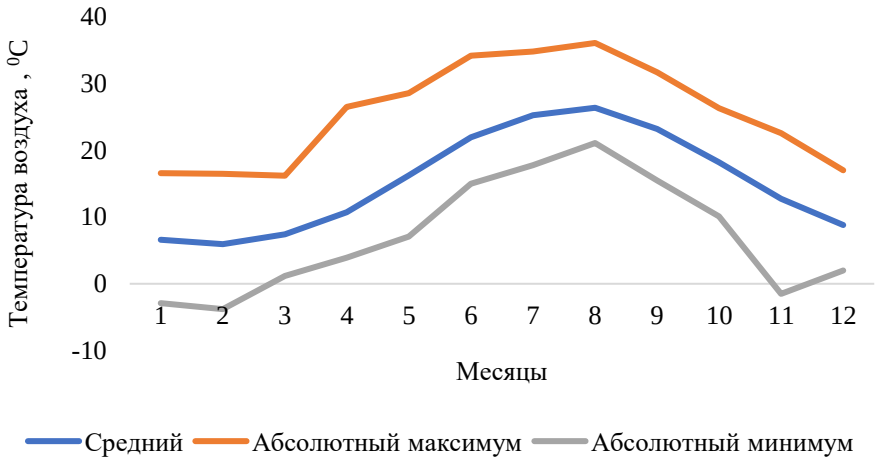


Рисунок 1. *График хода температуры воздуха у Нефтяных Камней*

Меридиональная смена среднегодовой температуры в южной части Каспия происходит интенсивнее, чем в других частях моря [12]. В связи с этим был проведен анализ температуры воды в данной акватории на основе данных станции Нефтяные Камни (1991…2023 гг.).

Среднегодовая температура воды составляет 15.7 ^{0}C (рисунок 2). Если проанализировать среднюю многолетнюю температуру воды в акватории Нефтяных Камней по месяцам, то минимальная температура была зафиксирована в феврале (6.4 ^{0}C), а максимальная – в августе (26.5 ^{0}C). Среднегодовая температура воды соответственно колеблется в пределах 14.2 ^{0}C (1993 г.) до 16.6 ^{0}C (2023 г.). Абсолютный максимум и абсолютный минимум температуры воды наблюдались в августе (32.0 ^{0}C, 2010 г.) и феврале (-3.8 ^{0}C, 2000 г.) соответственно. Амплитуда многолетней температуры воды в течение года колебалась в пределах 18.6…25.3 ^{0}C.

Зависимость средней многолетней температуры воздуха и ее перепадов по месяцам на гистограммах показывает (рисунок 3), что температура в указанные периоды повышается. С 1991 года температура воздуха повышалась в январе в среднем на 0.5 °C каждые 10 лет. По сравнению с нормой (1961…1990 гг.) средняя температура за последние 30 лет составляет 0.7^{0}C, что 1.7°C выше среднего показателя за период

1880…1960 гг. Повышение средней многолетней температуры воздуха в марте составило 1.0 ^{0}C (1.1 ^{0}C), апреле 0.4 ^{0}C (1.5 ^{0}C), мае 0.7 ^{0}C (1.8 ^{0}C), июне 1.2 ^{0}C (1.8 ^{0}C) (рисунок 4).

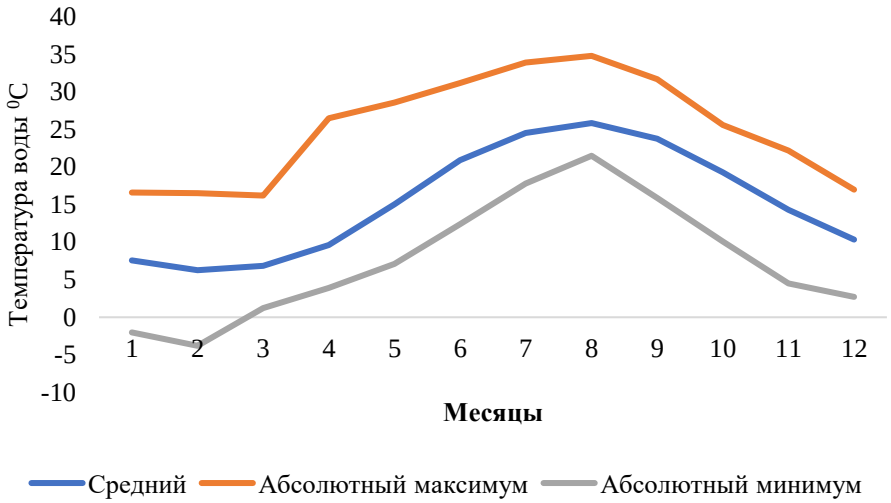


Рисунок 2. *График хода температуры воды у Нефтяных Камней*

Сравнивая последние 30-летние значения температуры воздуха с предыдущими 30-летними значениями, можно увидеть, что температура воздуха увеличилась на 1.2 ^{0}C в октябре и на 0.1 ^{0}C в ноябре. Сравнение трех 10-летних периодов, начиная с 1991 г., показывает, что в октябре и ноябре в 2001…2010 гг. и 1991…2000 гг. средняя многолетняя температура воздуха повысилась на 1.0…1.4 ^{0}C, а за последнее 10-летие температура в эти месяцы снизилась на -0.4…0.9 ^{0}C.

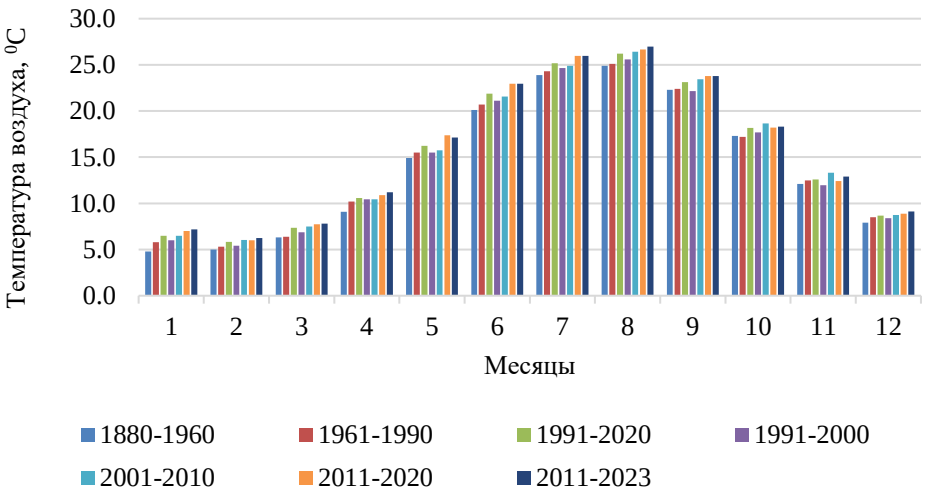


Рисунок 3. *Средние многолетние температуры воздуха в разные периоды у акватории Нефтяных Камней*

Среднегодовая температура воздуха в акватории Нефтяных Камней за разные периоды увеличилась на 0.7 ^{0}C (1991…2020 гг. и 1961…1990 гг.) и 1.1 ^{0}C (1991…2020 гг. и 1880…1960 гг.).

На гистограммах (рисунок 5…6) отчетливо видно повышение температуры за указанные периоды за счет зависимости средней многолетней температуры воды и ее различий по месяцам.

По сравнению со средним значением 1961…1990 гг. среднее значение температуры воды за последние 30 лет увеличилось на 0.2...0.4 ^{0}C зимой, 0.4…1.1 ^{0}C весной, 0.9…1.2 ^{0}C летом и 0.6…0.9 ^{0}C осенью. По сравнению со средним многолетним значением 2001…2010 гг. и 1991…2000 гг. годовое повышение температуры воды

увеличилось на 0.8…1.0 ^{0}C зимой, 0.6…1.4 ^{0}C весной, 0.7…1.5 ^{0}C летом и 0.3…1.0 ^{0}C осенью.

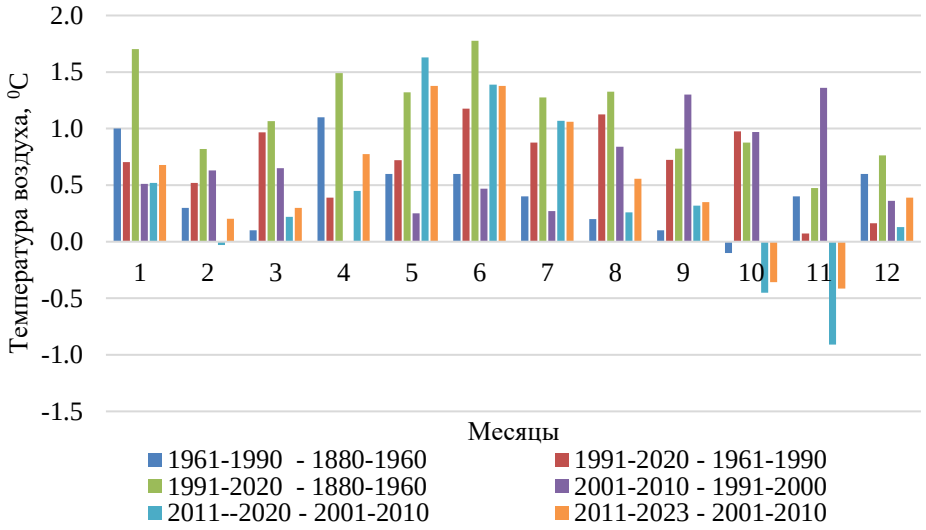


Рисунок 4. *Зависимость средних многолетних перепадов температуры воздуха по месяцам за разные периоды у акватории Нефтяных Камней*

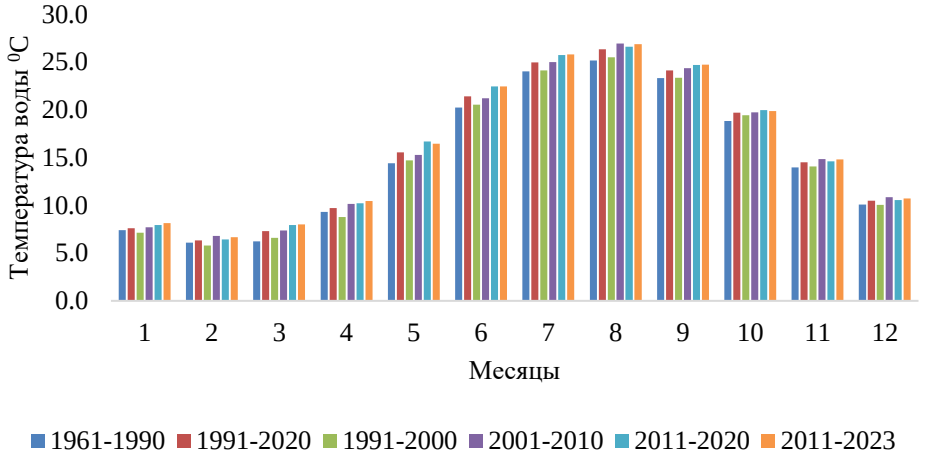


Рисунок 5. *Зависимость средних многолетних температур воды по месяцам за различные периоды у акватории Нефтяных Камней*

Если сравнить среднюю температуру воды за последние 10 лет со средней температурой за предыдущие 10 лет, то максимальный рост зафиксирован в мае (1.4 ^{0}C) и июне (1.2 ^{0}C), тогда как в остальные месяцы наблюдалось снижение на 0.1…0.6 ^{0}C, а также в феврале (-0.4 ^{0}C), августе (-0.3 ^{0}C), ноябре и декабре (-0.3 ^{0}C) (рисунок 6). За исследуемые периоды среднегодовая температура воды в акватории Нефтяных Камней увеличилась на 0.8 ^{0}C (1991…2020 гг., 1961…1990 гг., 2001…2010 гг., 1991…2000 гг.) и на 0.3^{0}C (2011…2020 гг., 2001…2010 гг.).

Наряду с температурой воздуха, атмосферные осадки считаются одним из важнейших параметров, характеризующих климат. Изменение средних месячных показателей осадков можно определить по амплитуде и среднеквадратичному отклонению их экстремальных значений. На основании этих показателей установлено, что наибольшие изменения осадков наблюдаются в осенне-зимний период. Различные физико-географические условия приводят к неравномерному распределению осадков в морской акватории. В прибрежной зоне моря осадков выпадает больше, чем в его центральной и открытой частях. Кроме того, осадки неравномерно распределены в разных частях побережья и в разных районах моря. Количество осадков, выпавших на

поверхность моря, составило 177 мм и 250 мм соответственно [13...15]. Количество осадков, выпадающих на поверхность моря, зависит от времени года. Максимальные показатели осадков отмечаются в осенне-зимний период года, когда их количество составляет до 50 % годовой нормы. Эта ситуация может меняться из года в год.

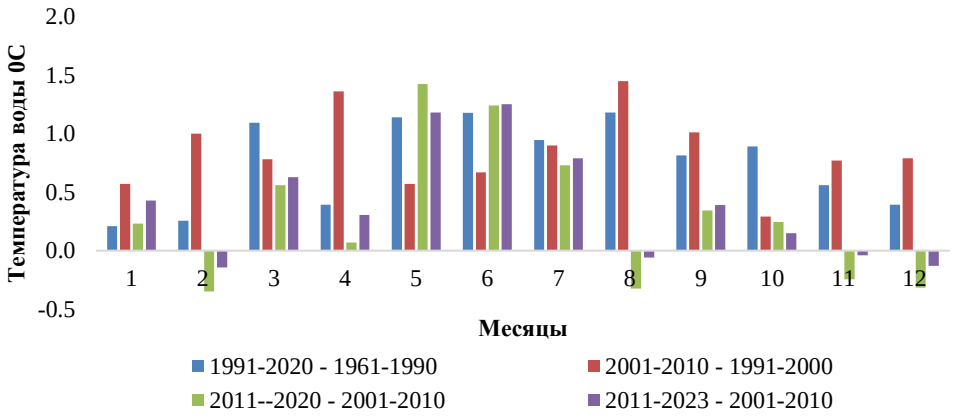


Рисунок 6. *Зависимость многолетних средних разностей температур воды по месяцам за различные периоды у акватории Нефтяных Камней*

В связи с зависимостью средних многолетних значений и разностей атмосферных осадков по месяцам наблюдается убывающая скорость их количества (рисунок 7…8). Так, по сравнению со средним значением за 1961...1990 гг. среднее значение осадков за последние 30 лет уменьшилось зимой на 4.1…7.6 мм, весной на 6.3…7.7 мм и летом на 0.8…3.1 мм. В сентябре и ноябре количество осадков увеличилось на 0.9 мм и 0.3 мм соответственно, в отличие от октября (уменьшилось на 4.5 мм). Из анализа средних значений за месяцы 2001…2010 гг. и средних многолетних значений 1991…2000 гг. видим, что количество осадков уменьшалось в январе (1.5 мм), марте (6.5 мм), октябре (9.1 мм), ноябре (7.7 мм), а в остальные месяцы увеличивалось. Наибольший прирост зафиксирован в декабре (8.4 мм) и феврале (5.7 мм). Если сравнить последнее 10-летнее среднее значение количества осадков в акватории с предыдущим 10-летним средним значением, то из гистограммы видно, что оно уменьшилось за исключением марта, июня, июля и сентября. Среднегодовое значение осадков в акватории Нефтяных Камней за последние 30 лет по сравнению с нормой осадков (1961…1990 гг.) уменьшилось на 47 мм. За последние два десятилетия среднегодовое количество осадков уменьшилось на 16 мм.

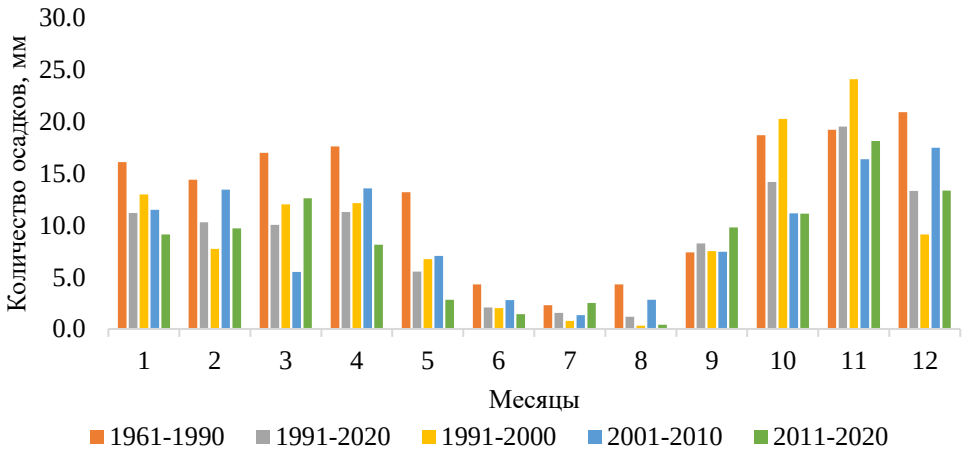


Рисунок 7. *Зависимость средних многолетних значений атмосферных осадков за различные периоды у акватории Нефтяных Камней по месяцам*

Различия в средних многолетних значениях атмосферных осадков на указанной акватории по месяцам показывают, что наибольшее и наименьшее уменьшение осадков по сравнению с нормой наблюдалось в декабре (7.6 мм) и июле (0.8 мм) соответственно. В июле количество осадков в этом районе уменьшилось на 23 мм.

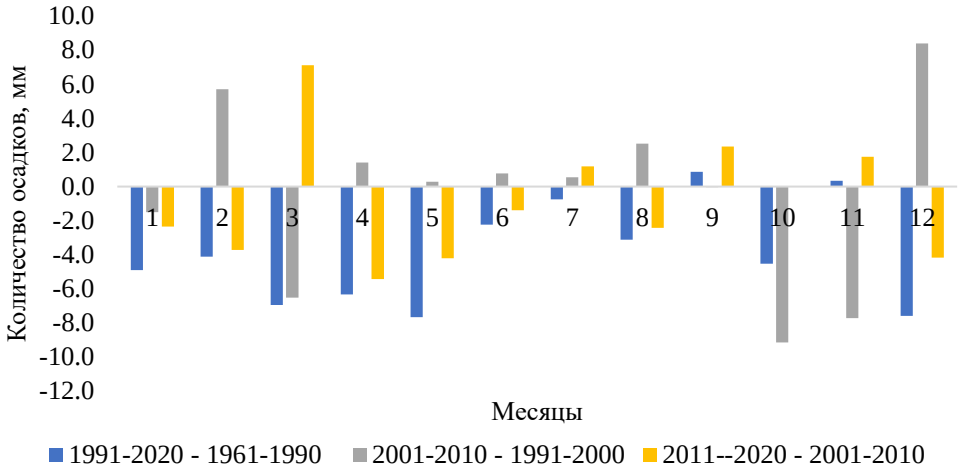


Рисунок 8. *Средние многолетние различия в количестве атмосферных осадков у акватории Нефтяных Камней*

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно отметить, что за последние рассматриваемых 30 лет температура воздуха и атмосферные осадки, которые считаются важнейшими параметрами, характеризующими климат у акватории Нефтяных Камней, где расположены нефтегазовые месторождения, по сравнению с предыдущим периодом увеличились на 0.7 ^{0}C и уменьшились на 47 мм соответственно. Разница температуры воды в разные периоды увеличилась на 0.8 ^{0}C соответственно. Географическое положение моря, теплообмен между морем и атмосферой, кратковременные синоптические процессы, теплообмен между слоями моря, рельефом дна и т. д. влияют на изменение климатических показателей Каспийского моря, особенно акватории Нефтяных Камней. факторы играют важную роль.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены из НГМС Азербайджанской Республики при Министерстве Экологии и природных ресурсов Азербайджана.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – СБА; управление данными – ГИМ; методология – СБА, ГИМ; руководство – СБА; визуализация – СБА, ГИМ; написание исходного текста – СБА; написание и редактирование окончательного текста - СБА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Wildfires and Climate Change. NASA. [Электронный ресурс]. URL: https://science.nasa.gov/wildfires-and-climate-change (дата обращения: 10.02.2025).
2 Сафаров С.Г., Махмудов Р.Н. Современные климатические изменения в Азербайджане. Баку, 2011. – 312 с.
3 Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Проблема 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург, 1992. – 360 с.
4 Периодические колебания уровня Каспийского моря связаны с тем, что он является закрытым водным бассейном. Электронный ресурс]. URL: https://azertag.az/ru/xeber/nachalnik_sluzhby_periodicheskie_kolebaniya_urovnya_kaspiiskogo_morya_svyazany s_tem_chto_on_yavlyaetsya_zakrytym_vodnym_basseinom-3087450 (дата обращения: 10.02.2025).
5 Иманов Ф.А. Статистические методы в гидрометеорологии. Баку, 2011. – 272 с.
6 Ахмедов Я.Э., Асадов С.Б. Оценка влияния изменчивости климата на гидрометеорологические параметры Каспийского моря // Журнал нефтяной промышленности Азербайджана. – 2012. – № 6. – С. 36–39.
7 Махмудов Р.Н. Региональные изменения климата и опасные гидрометеорологические явления в Азербайджане. Баку: Издательство Национальной Авиационной Академии, 2022, 210 с.
8 Махмудов Р.Н. Гидрометеорология, изменение климата, стихийные бедствия и жизнь. Баку, 2006, 78 с.

9 Халилов С.Х., Сафаров С.Г. Месячные и годовые нормы температуры воздуха и атмосферных осадков в Азербайджанской Республике (1691–1990 гг.). Баку, 2001. – 229 с.
10 Абдуллаев И.М., Асадов С.Б., Исмаилов В.Х. Изучение гидрометеорологических параметров на акватории Апшеронского полуострова // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Глобальные экономические условия и экономическое географическое положение Азербайджана», посвященной 94-й годовщине со дня рождения общенационального лидера Г.Алиева, Баку. – 2017. - С. 282-285
11 Асадов С.Б., Гасанов Ф.Г., Сафаров Г.Г. Изучение гидрометеорологического режима на месторождении Гюнешли // Азербайджанский Нефтяной Журнал. – 2016. -№ 6. - с. 54-59
12 Абдуллаев И.М., Асадов С.Б., Исмаилов В.Х. Пространственно-временные колебания температуры воды в Среднем и Южном Каспии // Водные проблемы. Наука и технологии. – 2016. - с. 45-51
13 Каспийское море: Гидрология и гидрохимия. -М.: Наука, 1986. – 261 с.
14 Mammadov R.M. Hydrometeorological atlas of the Caspian Sea. –Baku. –2014.
15 Salamov A., Asadov S., Salamov O. (2022). Perspectives on wave power plant use in city energy supply. Kartepe summit 24-27 March 2022, Resilent cities and transformation of the city Resilent cities Kartepe summit 2022 November, Kocaeli. ISBN No: 978-605-72931-2-1 p. 25-36

REFERENCES

1 Wildfires and Climate Change. NASA. [Electronic resources]. URL: https://science.nasa.gov/wildfires-and-climate-change (date of access 10.02.2025).
2 Safarov, S.G., Makhmudov, R.N. (2011). Sovremennye klimaticheskie izmeneniya v Azerbaidzhane [Contemporary climate change in Azerbaijan]. Baku, 312 p. [In Russian].
3 Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas.]. (1992). Vol. 6. Kaspiyskoe more. Problema 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. Saint Petersburg, 360 p. [In Russian].
4 Periodicheskie kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya svyazany s tem, chto on yavlyaetsya zakrytym vodnym basseinom [Periodic fluctuations in the level of the Caspian Sea are due to the fact that it is a closed water basin.]. [Electronic resources]. URL: at:https://azertag.az/ru/xeber/nachalnik_sluzhby_periodicheskie_kolebaniya_urovnya_kaspiiskogo_morya_svyazany_s_tem_chto_on_yavlyaetsya_zakrytym_vodnym_basseinom-3087450 (date of access 10.02.202) [In Russian].
5 Imanov F.A. (2011). Statisticheskie metody v gidrometeorologii [Statistical methods in hydrometeorology]. Baku, 272 p. [In Russian].
6 Ahmedov YA.E., Asadov S.B. (2012). Ocenka vliyaniya izmenchivosti klimata na gidrometeorologicheskie parametry Kaspijskogo morya [Assessment of the impact of climate variability on hydrometeorological parameters of the Caspian Sea]. ZHurnal neftyanoj promyshlennosti Azerbajdzhana. № 6. pp. 36–39. [In Russian].
7 Mahmudov R.N. (2022). Regional'nye izmeneniya klimata i opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya v Azerbajdzhane [Regional climate change and hazardous hydrometeorological phenomena in Azerbaijan]. Baku: Izdatel'stvo Nacional'noj Aviacionnoj Akademii, 210 p. [In Russian].
8 Mahmudov R.N. (2006). Gidrometeorologiya, izmenenie klimata, stihijnye bedstviya i zhizn' [Hydrometeorology, climate change, natural disasters, and life]. Baku, 2006, 78 p. [In Russian].
9 Khalilov S.Kh., Safarov S.G. (2001). Mesyachnye i godovye normy temperatury vozdukha i atmosfernykh osadkov v Azerbaidzhanskoy Respublike (1691–1990 gg.) [Monthly and annual norms of air temperature and atmospheric precipitation in the Republic of Azerbaijan (1691–1990).]. Baku, 229 p. [In Russian].
10 Abdullaev I.M., Asadov S.B., Ismailov V.H. (2017) Izuchenie gidrometeorologicheskih parametrov na akvatorii Apsheronskogo poluostrova [Study of hydrometeorological parameters in the waters of the Absheron Peninsula]. Materialy Respublikanskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Global'nye ekonomicheskie usloviya i ekonomicheskoe geograficheskoe polozhenie Azerbajdzhana», posvyashchennoj 94-j godovshchine so dnya rozhdeniya obshchenacional'nogo lidera G.Alieva, Baku, pp. 282-285 [In Russian].
11 Asadov S.B., Gasanov F.G., Safarov G.G. (2016) Izuchenie gidrometeorologicheskogo rezhima na mestorozhdenii Gyuneshli [Study of the hydrometeorological regime at the Gyuneshli field]. Azerbajdzhanskij Neftyanoj ZHurnal, № 6, pp. 54-5 [In Russian].
12 Abdullaev I.M., Asadov S.B., Ismailov V.H. (2016). Prostranstvenno-vremennye kolebaniya temperatury vody v Srednem i Yuzhnom Kaspii [Spatial and temporal variations in water temperature in the Central and Southern Caspian Sea].Vodnye problemy. Nauka i tekhnologii. pp. 45-51 [In Russian].
13 Kaspijskoe more: Gidrologiya i gidrohimiya [The Caspian Sea: Hydrology and Hydrochemistry] (1986). -M.: Nauka, 261 p. [In Russian].
14 Mammadov R.M. (2014). Hydrometeorological atlas of the Caspian Sea, Baku.
15 Salamov A., Asadov S., Salamov O. (2022). Perspectives on wave power plant use in city energy supply. Kartepe summit 24-27 March 2022, Resilent cities and transformation of the city Resilent cities Kartepe summit 2022 November, Kocaeli. ISBN No: 978-605-72931-2-1 p. 25-36

КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ ӘЗЕРБАЙЖАН СЕКТОРЫНДАҒЫ КЛИМАТТЫҚ СИПАТТАМАЛАРДЫҢ ӨЗГЕРУІ: НЕФТЯНЫЕ КАМНИ АУДАНЫ

Сабир Б. Асадов г.ғ.к [1], Гасан И. Мусаев [2]

[1] «Мұнайгаз» Ғылыми-зерттеу жобалау институты, Баку, Әзербайжан; sasadov@hotmail.com
[2] Әзербайжан Республикасы Экология және табиғи ресурстар министрлігі жанындағы Ұлттық гидрометеорология қызметінің Теңіз орталығы, Баку, Әзербайжан; hasanmusayev7@gmail.com
Автор корреспондент: Сабир Б. Асадов, sasadov@hotmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

АБСТРАКТ

Каспий теңізі,
Нефтяные Камни акваториясы,
климаттың өзгергіштігі,
ауа температурасы,
судың температурасы,
атмосфералық жауын-шашын

Мақала бойынша:
Жіберілді: 06.03.2025
Қайта қаралды: 02.10.2025
Қабылданды: 03.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

Соңғы жылдары Жер бетіндегі климаттың өзгеруі үдерісінің күшеюі және оның түрлі өңірлердегі салдарларын бақылау айтарлықтай артты. Қауіпті табиғи құбылыстардың жиі қайталануы жаһандық климаттық өзгергіштіктің қазіргі ерекшеліктерін жан-жақты зерделеудің маңыздылығын арттырып отыр. Осыған байланысты климаттың өзгергіштігінің гидрометеорологиялық параметрлерге, атап айтқанда мұнай-газға бай Каспий теңізінің Әзербайжан секторындағы көрсеткіштерге әсерін зерттеу өзекті мәселеге айналуда. Мақалада көпжылдық бақылау деректері (1961...2023 жж.) негізінде Нефтяные Камни акваториясында климаттың өзгеруінің гидрометеорологиялық параметрлерге, соның ішінде ауа мен су температурасына, сондай-ақ атмосфералық жауын-шашынға әсері бағаланады.

CLIMATE CHANGE CHARACTERISTICS OF THE AZERBAIJANI SECTOR OF THE CASPIAN SEA: THE NEFTYANYE KAMNEYE AREA

Sabir Asadov[1] Candidate of Geographical Sciences, Hasan Musayev[2]

[1] Scientific Research and Design Institute “Neftegaz”, Baku, Azerbaijan; sasadov@hotmail.com
[2] Marine Center of the National Hydrometeorological Service under the Ministry of Ecology and Natural Resources, Baku, Azerbaijan, hasanmusayev7@gmail.com
Corresponding author: Sabir Asadov, sasadov@hotmail.com

KEY WORDS

Caspian Sea,
Neftyanye Kamneye water area,
climatic variability,
air temperature,
water temperature,
atmospheric precipitation

About article:
Received: 06.03.2025
Revised: 02.10.2025
Accepted: 03.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

In recent years, the increase of climatic changes on the Earth and observations of their consequences in different regions have increased significantly. The frequent recurrence of natural hazards increases the importance of a detailed study of the current features of global climatic variability. In this regard, it is very important to study the influence of climatic variability on the indicators of hydrometeorological parameters in the oil and gas bearing Azerbaijan sector of the Caspian Sea. In the article on the basis of long-term observation data (1961...2023) the impact of climate change on hydrometeorological parameters in the water area of Neftyanye Kamneye, especially on air and water temperature, as well as atmospheric precipitation, is assessed.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СУММАРНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГРОЗ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИКАСПИЯ, С УЧЕТОМ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Жанар К. Наурозбаева*[1] PhD, Александр В. Холопцев[2] д.г.н., Жулдыз Х. Кенжина[1], Нурканат Е. Рахматулла [1]

[1] АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru (ЖКН), kenzhina03@mail.ru (ЖХК), nurkanat.rakhmatulla@mail.ru (НЕР)
[2] Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация; kholoptsev@mail.ru (АВХ)
Автор корреспондент: Жанар К. Наурозбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Каспийское море,
гроза,
атмосферные осадки,
продолжительность гроз,
математическое моделирование
межгодовых изменений

АБСТРАКТ

Изучение грозовой активности Северного Каспия как фактора риска для судоходства, нефтегазовой инфраструктуры, электросетей и сельского хозяйства, а также необходимость совершенствования систем мониторинга и прогнозирования в условиях изменяющегося климата важны для региона. В работе проведён анализ многолетних наблюдений грозовой активности на территории Северного Каспия по данным девяти метеостанций Атырауской области за период 1977…2022 гг. Установлено, что грозы проявляют квазипериодическую структуру с циклами продолжительностью 2…4 лет и 7…10 лет. На примере станции Атырау показано, что суммарная продолжительность гроз для отдельных месяцев достигает экстремальных значений до 20…21 ч, что отражает высокую межгодовую изменчивость явления. С помощью методов статистического моделирования временных рядов оценены тенденции изменения суммарной продолжительности гроз и рассчитаны прогностические значения на ближайшие годы. Результаты исследования показывают тенденцию снижения средней повторяемости и продолжительности гроз в последние десятилетия. Полученные выводы имеют практическое значение для повышения надёжности мониторинга и прогноза опасных атмосферных явлений.

По статье:
Получено: 15.09.2025
Пересмотрено: 03.10.2025
Принято: 05.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения климатических процессов на территории Западного Казахстана в последние годы значительно возрастает, что связано как с глобальными изменениями климата, так и с социально-экономическими особенностями региона. Особое место занимает Атырауская область, играющая ведущую роль в нефтегазовой отрасли страны и обеспечивающая значительный вклад в экономику Казахстана. Устойчивое развитие региона имеет стратегическое значение не только ввиду концентрации в нем крупнейших запасов нефти и газа, но и вследствие его уникального географического положения, что обусловливает как экономические преимущества, так и серьёзные экологические риски [1].

Большое количество объектов промышленной и энергетической инфраструктуры делает регион особенно уязвимым к опасным метеорологическим явлениям, в частности к грозам, которые являются одной из главных угроз.

Грозовые явления представляют собой сложные атмосферные процессы, характеризующиеся электрическими разрядами в атмосфере (молниями),

Для цитирования:

Наурозбаева Ж., Холопцев В., Кенжина Ж., Рахматулла Н. Моделирование межгодовых изменений суммарной продолжительности гроз северной части прикаспия, с учетом вариаций атмосферных осадков// Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 159-176.

сопровождающимися звуковыми явлениями (громом), а также часто ливневыми осадками, шквалистыми ветрами и градом [2]. Причиной возникновения гроз является сильная атмосферная неустойчивость (резкое падение температуры с высотой) и, как следствие, накопление избыточной энергии в кучево-дождевых облаках [3]. Изучение гроз имеет критическое значение, поскольку они способны наносить значительный ущерб инфраструктуре, представлять угрозу безопасности людей и нарушать экономическую деятельность, особенно в регионах с развитой морской и нефтегазовой промышленностью.

Каспийское море, являясь крупнейшим внутренним водоемом планеты, обладает уникальными климатическими характеристиками.

Каспийское море выступает не просто как источник влаги, но и как динамический фактор, который, благодаря своим термическим свойствам, создает необходимые условия для атмосферной неустойчивости и конвекции, способствуя формированию гроз как в теплый, так и в холодный периоды года. Температура воды в море меняется медленнее, чем температура воздуха, что может приводить к значительным температурным градиентам, особенно при вторжении холодных воздушных масс. Эти градиенты усиливают термическую конвекцию, делая Каспийское море уникальным "генератором" гроз в условиях континентального климата.

Грозовые явления связаны со штормами на море и представляют угрозу для судоходства. Интенсивные атмосферные осадки в сочетании с сильными ветрами, вызывающими штормовые нагоны, могут приводить к подтоплению его берегов. Скорость ветра на Каспии достигает в порывах 35…40 м/с. При грозах возможно выпадение града, способного уничтожать посевы.

В условиях континентального климата Прикаспийского региона, несмотря на наличие моря как источника влаги, существует повышенная вероятность возникновения так называемых «сухих гроз». Эти грозы характеризуются наличием молний, но либо полным отсутствием осадков, достигающих поверхности земли, либо их незначительным количеством, которое испаряется до достижения почвы. Это явление особенно опасно, поскольку молнии могут инициировать степные пожары в регионе.

Удары молнии в суда могут приводить к повреждениям навигационного и электронного оборудования, такого как магнитные приборы и компасы, вызывать сильные радиопомехи, затрудняющие связь и радиопеленгование, а в некоторых случаях – к ранениям или даже гибели членов экипажа.

Как правило, очень часто грозы сопровождаются сильным шквалистым ветром, ливневыми осадками и градом. Оперативное определение ее местоположения, интенсивности, направления и скорости перемещения имеет большое практическое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности человека [4]. Грозы способны вызывать значительные разрушения наземной инфраструктуры и электросетей, повреждения линий электропередач, систем связи, зданий, что приводит к пожарам, сбоям в электроснабжении. Кроме того, неравномерное распределение осадков и риски засух в регионе повышают риски для сельского хозяйства.

Существующие научные работы по Каспийскому морю в значительной степени сосредоточены на изучении его ветрового режима, штормовых нагонов и волн.

Например, в исследованиях Павловой, Архипкина и Сурковой [5] проведен анализ штормовых нагонов и ветровых волн в Каспийском море за период с 1979 по 2020 год. В работе отмечается отсутствие значимых трендов в общей штормовой активности, но прогнозируется статистически значимое увеличение повторяемости штормовых волн в XXI веке.

Представлены также исследования, посвященные влиянию меридиональных атмосферных процессов на формирование конвективной облачности. Так, В.П. Горбатенко показал, что в Западной Сибири и Казахстане грозы преимущественно фронтального происхождения и связаны с циклонами различного генезиса, их развитие определяется крупномасштабной циркуляцией [6].

Эту идею развивают С.И. Пряхина и А.А. Котова [7], которые на основе современных наблюдений подтвердили доминирование фронтальных гроз в северных районах Западной Сибири. Они выявили при этом рост внутримассовых гроз к югу под влиянием прогрева поверхности и орографической неоднородности.

Расширяя региональную перспективу, иранские исследователи внесли значимый вклад в изучение климатических рисков в районе Каспия и сопредельных территорий.

М. Солтани, С. Бабаголзаде и А. Лахиджани [8] проанализировали циклоны южного побережья Каспия, выявив их сезонные закономерности и основные источники влаги.

Интерес представляют работы, посвященные изучению гроз в Восточной Азии. Так Дин Цзясинь, Чжэн Донг и другие продемонстрировали контраст в структуре гроз и молниевой активности между сушей и морем в Южном Китае, акцентируя определяющую роль термодинамической нестабильности [9].

Сопоставление региональных результатов позволяет глубже осмыслить механизмы атмосферной циркуляции и факторы, формирующие экстремальные погодные явления в различных климатических зонах.

Е. Воскресенская и коллеги, на основе моделирования CMIP6 показали, что в бассейне Средиземного и Чёрного морей, при общем снижении числа зимних циклонов, усиливаются отдельные экстремальные случаи, сопровождающиеся ростом конвективной активности [10].

Согласно исследованиям И.В. Пащенко, акватория Каспийского моря выступает зоной пересечения устойчивых траекторий атмосферных возмущений, таких как Чёрное море – Каспийское море, то есть с запада на восток и Ближний Восток – Северный Каспий, то есть, с юго-запада на северо-восток [11]. В связи с этим формируется трансрегиональный характер циркуляционных процессов, что может быть одной из причин возникновения конвективной облачности, штормов над акваторией.

Ввиду вышесказанного, целью данного исследования выступает обзор динамики изменения грозовых явлений в северной части Прикаспия и моделирование межгодовых изменений суммарной продолжительности гроз (далее СПГ) для месяцев с мая по июль, с учетом вариаций месячных сумм атмосферных осадков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Грозовая активность характеризуется высокой вариабельностью как во временном, так и в пространственном масштабе. Во временном отношении она изменяется от десятилетних колебаний до продолжительности отдельных грозовых ячеек, существование которых нередко ограничивается одним часом и менее. Пространственная изменчивость охватывает диапазон от континентального и океанического уровня до локальных масштабов, измеряемых несколькими километрами. Для количественной оценки грозовой активности обычно используются такие показатели, как годовое число грозовых дней и годовое число грозовых часов [12].

В исследовании рассмотрены пространственно-временные характеристики грозовой активности, включая среднее и максимальное число дней с грозой, а также их продолжительность, как основных количественных показателей. Был проведён статистический анализ, позволивший оценить суммарное количество гроз, в годовом и месячном разрезе, на основе чего выявлены многолетние тенденции их повторяемости и показатели продолжительности явления.

Использовались данные многолетних наблюдений грозовой активности, полученные в рамках гидрометеорологического мониторинга, проводимого РГП «Казгидромет». Рассмотренный период охватывает 1977…2022 гг. и включает материалы девяти метеостанций региона: Атырау, Ганюшкино, Индерборский, Кульсары, Карабау, Махамбет, Новый Уштаган, Пешной и Сагиз , расположения которых показано на рисунке 1.

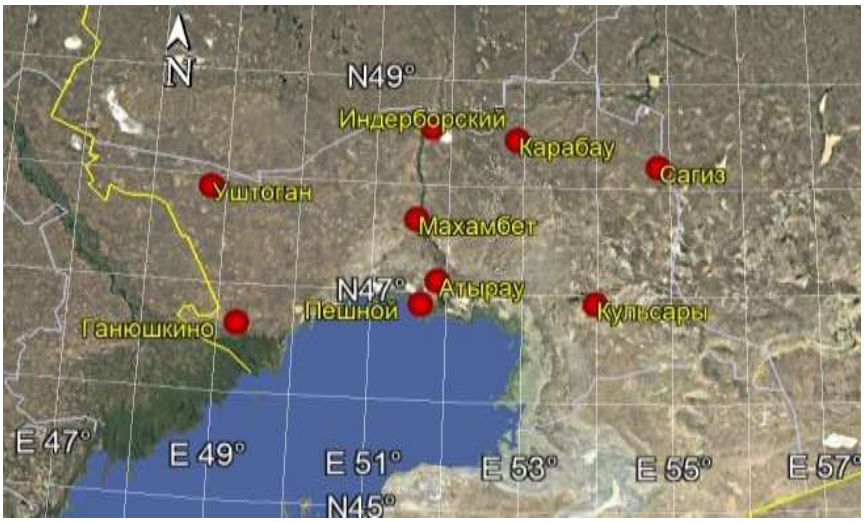


Рисунок 1. *Расположение метеорологических станций северного Прикаспия*

В ходе обработки метеорологических данных нередко выявляются систематические расхождения между фактическими наблюдениями и математическим модельным расчетом. При моделировании межгодовых изменений СПГ использована математическая модель процесса, для этих целей использовано уравнение линейной множественной регрессии:

$$У_к = C_0 + C_1 P_1(k) + C_n P_n(k), \quad (1)$$

где $У_к$ – прогнозируемое значение рассматриваемого показателя (k-год, изменяющийся в пределах от 1979 +Δ до 2008+Δ); Δ - целое число изменяющееся в пределах от 0 до 12; C_0 – свободный член (действительная константа); $C_1 \dots C_n$ – действительные константы, определяемые с использованием программы множественной регрессии; $P_n(k)$ – один из предикторов модели (отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом).

Рассматривалось две модели, для которых n (количество случаев с грозами) изменяются в пределах от 1 до 6 и от 1 до 10.

Как предикторы, рассматривались временные ряды месячных сумм атмосферных осадков, выпадающих в том же месяце на тех участках территории изучаемого региона Казахстана, где их корреляция с моделируемым процессом с достоверностью не менее 0.99 в современном климатическом периоде (1991…2020 гг.) признавалась значимой.

Как показатели качества моделирования оценивались его относительные погрешности (%), а также значения коэффициента корреляции его результатов с фактическими изменениями СПГ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе анализа собранные данные о повторяемости и продолжительности грозовых явлений над исследуемым регионом сформированы в единую базу. В связи с разнообразием орографических условий станции объединены в микрорайоны со

схожими физико-географическими характеристиками, что позволило более наглядно отразить особенности динамики процессов.

К первому микрорайону отнесены станции Ганюшкино и Новый Уштаган, граничащему с территорией России, занимаемые северо-западной части Атырауской области, где в равнинной территории прикаспийской зоны частота гроз определяется в большей степени влиянием западных, северных и северо-западных воздушных масс [13].

Ко второму микрорайону, территориально охватывающему северо-восточную часть Атырауской области, отнесены станции Индерборский, Карабау и Сагиз, для которых характерны более континентальные условия и удалённость от акватории Каспийского моря.

Третий микрорайон охватывает южную часть Атырауской области – Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары, расположенные ближе к прибрежным районам Каспийского моря, что формирует благоприятные условия для конвективной деятельности.

На рисунке 2 представлено суммарное количество гроз на станциях по микрорайонам за исследуемый период.

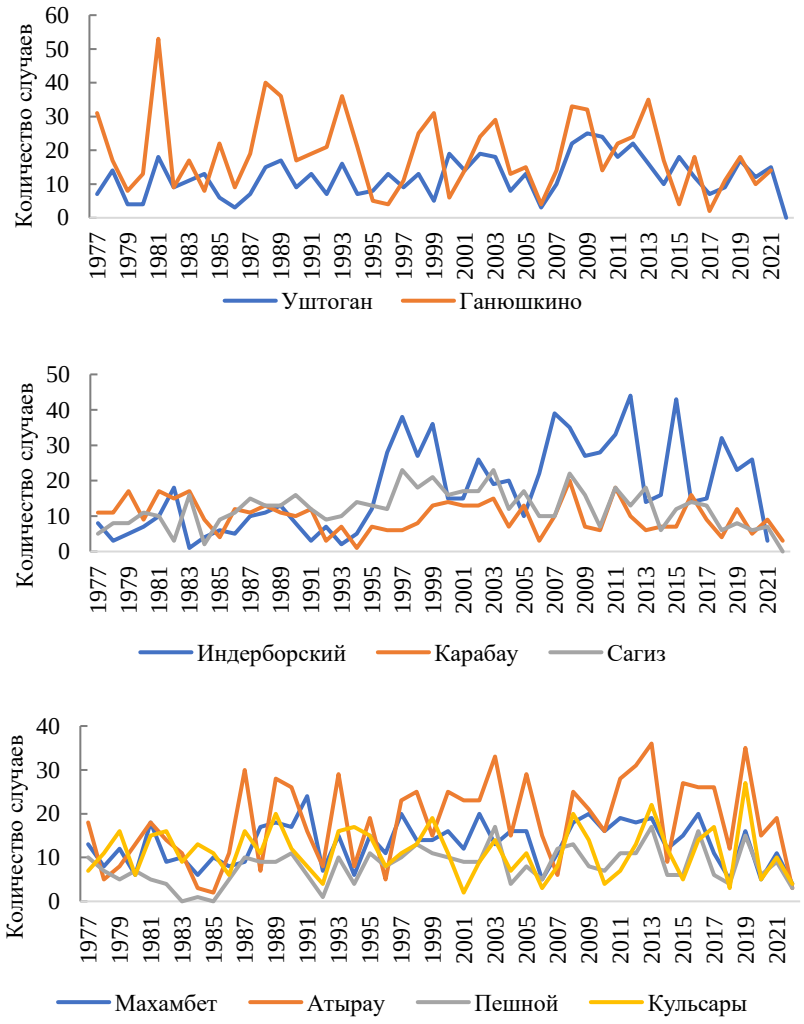


Рисунок 2. *Количество грозовых явлений на исследуемых станциях с 1977 по 2022 гг.*

Из рисунка 2 видно, что в последние десятилетия на большинстве станций региона наблюдается тенденция к увеличению количество повторяемости грозовых

явлений, особенно в начале XXI века. Так, если в 1980-е гг. количество случаев составляло в среднем 10…15 в год, то в 21 веке их число достигало 20…30. Особо можно отметить станцию Ганюшкино, где в отдельные годы конца XX века, количество гроз превышало 50 случаев. В XXI в. здесь лишь трижды за год было зафиксировано более 30 гроз – в 2008, 2009 и 2013 гг.

Во втором микрорайоне, на станции Индерборский также наблюдается существенный рост повторяемости гроз. Если в 1977...1995 гг. здесь количество гроз не превышало 10 случаев за год, то в последующий период гроз стало существенно больше – в среднем 23…25 случаев в год. Ежегодно происходило не менее 10 гроз. На станциях Сагиз и Карабау, по сравнению с концом XX века, выявлено увеличение числа грозовых явлений на 5…6 случаев в год.

Аналогичная тенденция характерна и для станций Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары (3-й микрорайон). Здесь повторяемость грозовых явлений в современном периоде была стабильно выше, чем в предыдущие десятилетия. Наибольшая активность характерна для станции Атырау, где годы, в которые отмечалось более 30 гроз, были зафиксированы 5 раз. На станции Махамбет наблюдались более умеренные значения повторяемости гроз. Количество гроз за год здесь не превышает 25, тогда как на станции Пешной оно не превышали 12…15 случаев.

Различия в динамике грозовой активности между станциями можно объяснить физико-географическими особенностями их расположения.

Станция Индерборский находится в зоне прохождения атмосферных фронтов и адвекции влаги с прикаспийской акватории, что создаёт благоприятные условия для формирования конвективной облачности.

Станции Сагиз и Карабау расположены восточнее, в более континентальной и засушливой части региона, где выраженный дефицит влаги существенно ограничивает развитие конвективных процессов, вследствие этого количество грозовых явлений здесь значительно ниже, чем в северо-западных районах области.

Что касается прикаспийских станций (Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары) (рисунок 3), они характеризуются более выраженной межгодовой изменчивостью. Для Махамбета выделяется выраженный пик в 1991 году, тогда как остальные станции (Кульсары, Атырау, Пешной) демонстрируют схожую динамику: рост показателей до начала 2000-х годов с последующей стабилизацией.

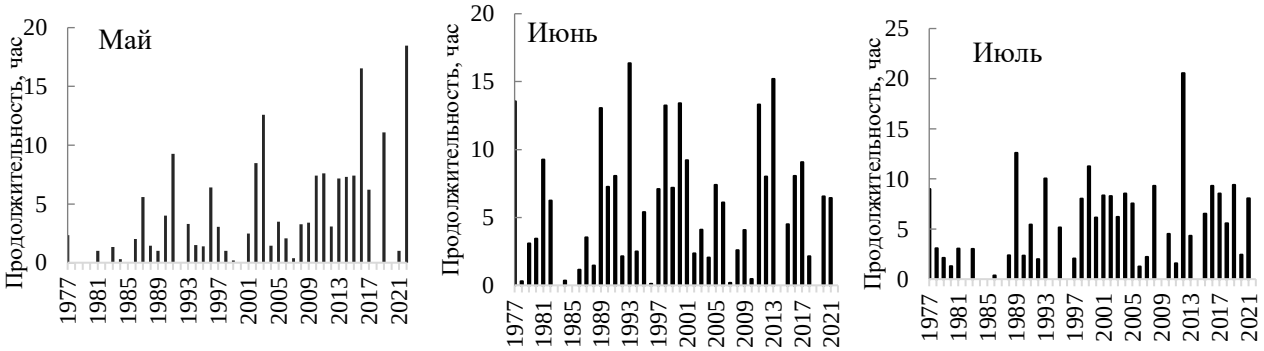


Рисунок 3. *Изменения СПГ (час.) для некоторых летних месяцев на станции Атырау*

В последние годы внимание исследователей всё чаще обращены к изучению колебательных процессов в атмосфере, отражающих как локальные, так и глобальные закономерности климатической системы. В этом контексте особый интерес представляет анализ квазипериодических структур грозовой активности.

Международные исследования Zhang, Fang и Yu [14] подтверждают наличие подобных структур в конвективных процессах. Эти процессы обусловлены неравномерным накоплением влаги, радиационными эффектами и обратными связями «конвекция–циркуляция», что приводит к закономерному чередованию фаз усиления и ослабления конвективной облачности.

Учитывая данные выводы, в настоящем исследовании так же проанализирована динамика грозовой активности и выделены признаки квазипериодической структуры.

Наиболее отчётливо прослеживаются два цикла колебаний гроз. Краткосрочные циклы с длительностью в 2…4 года (1983…1984 гг., 1991…1993 гг., 2004…2006 гг. и 2011…2013 гг.); и долгосрочные циклы порядка 7…10 лет, которые характеризуются фазами общего увеличения числа гроз и последующего его спада (максимумы в конце 1980-х, середине 1990-х и в 2005…2012 гг.).

Известно, что около 68 % гроз формируются в областях пониженного давления, 30 % в условиях малоградиентного поля давления и лишь 2 % в антициклоне. Данное явление объясняется тем, что в циклонах и ложбинах формируются крупномасштабные восходящие вертикальные потоки, интенсивность которых возрастает с высотой в нижней тропосфере и эти потоки способствуют накоплению термической неустойчивости в течение времени, что, в свою очередь, ведёт к развитию конвективных гроз [15], таким образом можно сказать, что общая атмосферная циркуляция играет ключевую роль в формировании пространственно-временной структуры грозовой активности. В регионах, где влияние Каспия сочетается с динамикой крупных воздушных масс, инициируются процессы циклоногенеза.

До 90 % всех гроз в изучаемом регионе приходится на тёплое полугодие (апрель-сентябрь). В качестве примера рассмотрим станцию Атырау, где детально проанализированы изменения показателя суммарной продолжительности гроз (далее СПГ) для месяцев май-июль, показанные на рис. 3.

Из рисунка 3 видно, что в мае в Атырау прослеживается тенденция к увеличению продолжительности гроз, что связано с повышенной атмосферной неустойчивостью и достаточным влагосодержанием. Последнее обеспечивается как за счёт прикаспийской акватории, так и за счёт прохождения фронтальных систем. В этом месяце проявлялись наиболее устойчивые и продолжительные грозовые процессы: в начале 1990-х и 2000-х годов их СПГ достигала 9…13 часов (1991, 2003…2004 гг.). В последующие десятилетия интенсивность усилилась: фиксировались экстремальные значения СПГ, достигающей 16…19 часов (2016, 2022 гг.).

Месяц июнь, напротив, демонстрирует более локализованные, но порой весьма значительные пики. Наиболее показательным является 1994 год, когда СПГ гроз достигала 16…17 часов.

Подобные случаи указывают на усиление контрастов в сезонной циркуляции и рост потенциала конвективных процессов в регионе.

Месяц июль обычно отличается меньшей СПГ, однако в рассматриваемый период встречаются экстремальные значения, которые не свойственны для него. В отдельные годы (1989, 2000, 2009 гг.) СПГ почти достигала суточных значений. Абсолютный максимум СПГ был зафиксирован в 2012 г., в котором значение этого показателя составило 20 часов 55 минут.

Результаты анализа климатических данных свидетельствует о выраженной межгодовой и междекадной вариабельности грозовой активности. Наибольшая интенсивность и повторяемость грозовых явлений характерны для 1980…1990-х гг., тогда как в последние десятилетия прослеживается тенденция к снижению как их частоты, так и СПГ. Конечно, отмечаются отдельные годы с большим количеством гроз, такие как 10-е годы 21 века, но на начало 20-х годов отмечается некоторое его снижение.

В таблицах 1-2 представлены значения коэффициентов и характеристик предикторов математической модели (1-2) учитывающей 6 и 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау.

Таблица 1

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 6 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау

1981...2010 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			2.20227	4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.92757
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	0.32949	5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.76620
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-1.16154	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.04814
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.62813	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			2.09388	4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.77836
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	0.28230	5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.71191
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-1.01991	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.02449
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.72422	-	-	-	-

Примечание: n – временной отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_n - регрессионный коэффициент

Таблица 2

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау

1981...2010 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			1.719227	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.095625
1	47° с.ш.	48.5°в.д.	-0.913302	7	46.75° с.ш.	48.25° в.д.	0.159991
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	0.681321	8	46.75° с.ш.	48.5° в.д.	0.290071
3	47° с.ш.	49°в.д.	-0.316047	9	46.75° с.ш.	49.5° в.д.	0.176207
4	47° с.ш.	49.25° в.д.	-0.049700	10	46.75° с.ш.	49.75° в.д.	-0.626935
5	47° с.ш.	49.5° в.д.	0.507500	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			2.02933	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.04814
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	1.40192	7	46.75° с.ш.	48.25° в.д.	-0.02770
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-2.35470	8	46.75° с.ш.	48.5° в.д.	-0.33252
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.96871	9	46.75° с.ш.	49.5° в.д.	0.42512
4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.77836	10	46.75° с.ш.	49.75° в.д.	0.14685
5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.71191	-	-	-	-

Примечание: n – временной отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, Cn - регрессионный коэффициент

Так, фактические изменения СПГ для мая в Атырау, которые происходили в периоды 1981…2010 гг. и 1991…2020 гг., а также результаты их моделирования с

применением обеих моделей, представлены на рисунке 4. Значения коэффициентов и характеристики предикторов этих моделей приведены в таблицах 1...2.

Далее на рисунке 4 представлены фактические изменения СПГ для мая у города Атырау в периоды 1981…2010 гг. и 1991…2020 гг. и результаты их моделирования для случаев учитывающей 6 и 10 предикторов. Согласно которым модельные значения хорошо совпадают с фактическими данными за все рассмотренные промежутки времени, но лучшее совпадение по 10 предикторам. Это говорит о том, что чем больше временных отрезков заложено в модель, тем лучше модель сопоставима с фактическими данными наблюдениями.

Из рисунка 4 видно, что зависимость от времени результатов моделирования межгодовых изменений СПГ для мая в Атырау, которые получены с применением обеих моделей, для рассматриваемых периодов времени качественно соответствует изучаемому процессу. Усложнение модели к существенному повышению точности моделирования не приводит, так как значения коэффициента корреляции выбранных предикторов превышают 0.9, а в некоторых случаях 0.95.

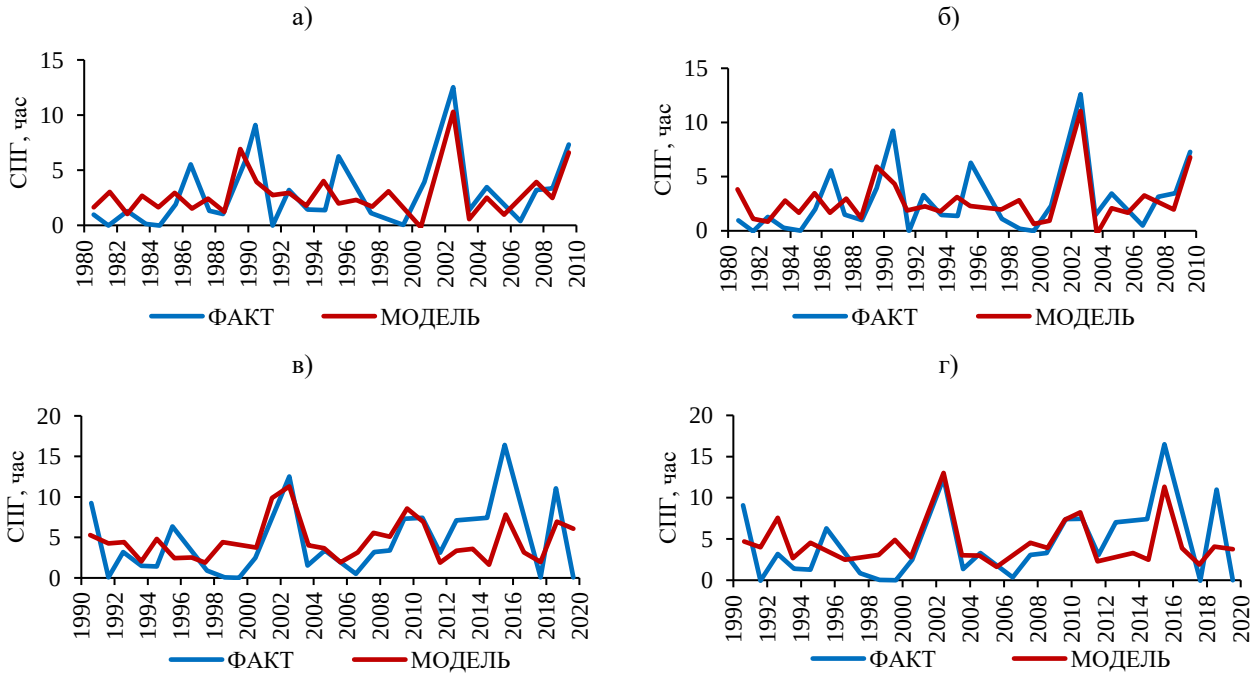


Рисунок 4. *Фактические изменения СПГ для мая у города Атырау в периоды 1981…2010 гг. и 1991…2020 гг. и результаты их моделирования для случаев а) n=6, 1981…2010 гг.; б) n=10, 1981…2010 гг.; в) n=6, 1991…2020 гг.; г) n=10, 1991…2020 гг.*

Далее на рисунке 5 отображены зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет характеристик качества моделирования и изменчивости СПГ для мая в Атырау.

Из рисунка 5 следует, что амплитуда изменчивости СПГ для города Атырау, соответствующая маю, возрастает. В результате этого относительная погрешность моделирования изучаемого процесса повышается, а коэффициент его корреляции с результатами моделирования несколько снижается. Вместе с тем достоверность вывода об адекватности разработанной модели, содержащей 6 предикторов превышает 0.95. Для модели, содержащей 10 предикторов, он превышает 0.99 (поскольку количество степеней свободы изучаемого процесса равно 30).

Полученные результаты позволяют обе модели, верифицированные для скользящего окна 1992…2021 гг., применить для оценки значений СПГ,

соответствующих 2022, 2023 и 2024 гг. Предикторы упомянутых моделей не изменились, а вычисленные значения их коэффициентов приведены в таблице 3.

Полученные с применением обеих моделей оценки СПГ для мая в Атырау, за период 2022…2024 гг. приведены в таблице 4.

Учитывая, что значения среднеквадратического отклонения результатов моделирования для интервала 1992…2021 гг. равны 3 час. (для модели с 10 предикторами) и 3.4 час. (для модели с 6 предикторами).

Очевидно, что отклонения фактических значений СПГ для указанных лет в таблице 4, с вероятностью менее 0.01, соответственно на величину 9 и 10.2 часа.

Далее на рисунке 6 представлены временные ряды фактических значений изменения СПГ, а также результаты математического моделирования, которые рассчитаны за два периода: а) 1981…2010 гг., б) 1991…2020 гг.

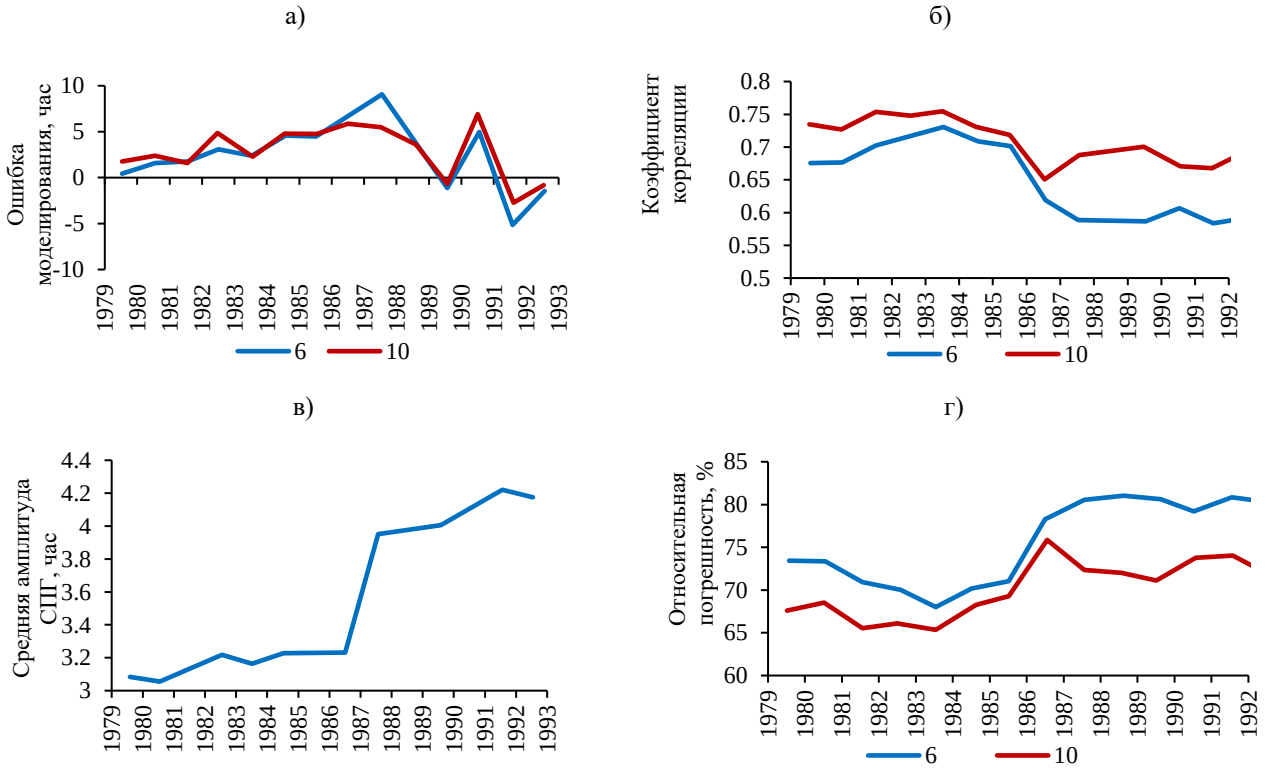


Рисунок 5. *Зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет значений характеристик качества моделирования и изменчивости СПГ для мая в Атырау. а) ошибки моделирования в конце этого окна; б) коэффициента корреляции соответствующих рассматриваемого окну отрезков временных рядов изучаемого процесса и результатов его моделирования, в) средней амплитуды изучаемого процесса, оцененной для изучаемого окна; г) относительной погрешности моделирования межгодовых изменений СПГ (%)*

Согласно рисунку 6 фактические временные ряды СПГ показывают выраженную межгодовую изменчивость с чередованием активных и пассивных грозовых сезонов. Сравнение показывает, что моделирование адекватно описывает общую направленность наблюдаемых изменений, особенно во второй половине исследуемого периода. Для периода 1981…2010 гг. характерна умеренная грозовая активность с плавными колебаниями и без ярко выраженного тренда. Модельные

данные относительно близки к наблюдениям, что говорит о стабильности атмосферной конвекции в тот период.

Во второй период с 1991 по 2020 годы отмечается незначительное сокращение суммарной продолжительности гроз. Модельная кривая подтверждает наличие нисходящего тренда, что указывает на сокращение конвективной активности в современный период.

Таблица 3

Значения коэффициентов моделей межгодовых изменений СПГ в 1992…2021гг. для мая, соответствующих городу Атырау, содержащих 6 и 10 предикторов

Модель, содержащая 6 предикторов							
N	**Cn**	**n**	**Cn**	**n**	**Cn**	**n**	**Cn**
0	1.95872	2	-1.04597	4	0.79430	6	-0.09510
1	0.31002	3	0.69205	5	-0.58536	-	-
Модель, содержащая 10 предикторов							
0	2.01529	3	1.07153	6	-0.32187	9	0.39195
1	1.69162	4	1.49875	7	-0.12243	10	0.26532
2	-2.74604	5	-1.34106	8	-0.29959	-	-

Примечание: n – отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_n - регрессионный коэффициент

Таблица 4

Оценки СПГ (час) для мая 2022…2024 гг., полученные с применением обеих моделей

Модель	**2022**	**2023**	**2024**
6 предикторов	6.842616	3.085931	0.440938
10 предикторов	7.834981	1.679373	1.258368

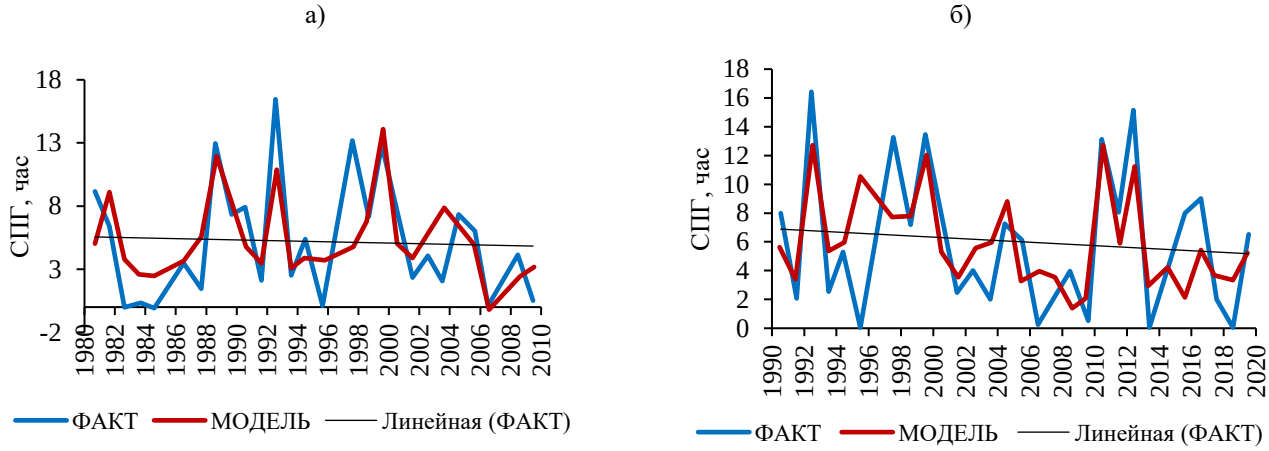


Рисунок 6. *Фактические изменения СПГ для июня в Атырау, а также результаты их моделирования для модели с n=10 для периодов времени: а) 1981…2010 гг.; б) 1991…2020 гг.*

Это согласуется с наблюдаемым повышением температуры приземного воздуха, сокращением влагоёмкости атмосферы. Вероятное объяснение - усиление термической конвекции и уменьшение влажности в нижних слоях атмосферы вследствие регионального потепления.

Согласно таблице 5, во временном отрезке 1981–2010 гг. $C_0 = 2.44$ — базовый уровень СПГ (т.е условно ≈ 2.4 ч гроз в июне). Среди предикторов выделяются несколько положительных (n = 2, 5, 6, 7, 8, 9) и отрицательных (n = 1, 3, 4, 10) влияний. Наибольший положительный коэффициент: $C_2 = +0.94$, указывающий, что грозовая активность теснее связана с предикторами, расположенными севернее (48.25° с. ш.) и западнее (51.25° в. д.).

Отрицательные значения (например, $C_1 = -0.64$; $C_3 = -0.32$) отражают компенсацию или противоположное влияние барических аномалий. В целом структура коэффициентов чередуется по знаку, что типично для процессов с волновыми и пространственными корреляциями. Это свидетельствует о умеренно стабильной грозовой активности в регионе: локальные барические колебания уравновешивают друг друга. В период 1991…2020 гг. $C_0 = 2.03$ – базовый уровень снижается по сравнению с предыдущим периодом, что говорит о некотором уменьшении средней продолжительности гроз. Коэффициенты приобретают более контрастные значения: Сильные положительные: $C_1 = +1.40$, $C_5 = +1.01$, $C_7 = +1.09$. Сильные отрицательные: $C_2 = -2.35$, $C_6 = -1.20$, $C_8 = -0.58$. Это указывает на усиление пространственно-временной неоднородности и более выраженную зависимость СПГ от региональных барико-циркуляционных факторов. Таким образом, в отличие от предыдущего периода, соотношение положительных и отрицательных коэффициентов стало более полярным, что отражает рост амплитуды конвективных процессов — чередование сезонов с аномально высокой и низкой грозовой активностью. Снижение C_0 указывает на уменьшение среднего числа часов гроз в июне — вероятно, вследствие смещения их активности на более ранние или поздние месяцы при общем изменении сезонного цикла конвекции. Отрицательные C_n во втором периоде отражают влияние антициклональной циркуляции и усиления сухих континентальных масс с юга, что может подавлять грозовую активность в отдельные годы. Положительные C_n (особенно C_1, C_5, C_7) указывают на зоны максимального вклада влагонасыщенных воздушных масс, поступающих с запада и северо-запада.

Таблица 5

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для июня в Атырау

1981...2010 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			2.44139	6	47.5° с.ш.	51.75° в.д.	0.095625
1	48.25° с.ш.	51° в.д.	-0.64019	7	47.25° с.ш.	51.75° в.д.	0.159991
2	48.25° с.ш.	51.25° в.д.	0.94173	8	47.25° с.ш.	52° в.д.	0.290071
3	48.25° с.ш.	51.5° в.д.	-0.316047	9	47.25° с.ш.	52.25° в.д.	0.176207
4	48° с.ш.	51.5° в.д.	-0.049700	10	47° с.ш.	52.25° в.д.	-0.626935
5	47.75° с.ш.	51.5° в.д.	0.507500	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
n	**широта**	**долгота**	**Cn**	**n**	**широта**	**долгота**	**Cn**
0			2.02933	6	47.5° с.ш.	51.75° в.д.	-1.19956
1	48.25° с.ш.	51° в.д.	1.40192	7	47.25° с.ш.	51.75° в.д.	1.08978
2	48.25° с.ш.	51.25° в.д.	-2.35470	8	47.25° с.ш.	52° в.д.	-0.58409
3	48.25° с.ш.	51.5° в.д.	-0.22976	9	47.25° с.ш.	52.25° в.д.	0.28871
4	48° с.ш.	51.5° в.д.	-0.47262	10	47° с.ш.	52.25° в.д.	0.14685
5	47.75° с.ш.	51.5° в.д.	1.01090	-	-	-	-

Примечание: n - отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_n - регрессионный коэффициент

На рисунке 7 приведены зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет характеристики моделирования и изменчивости СПГ по станции Атырау на примере июня.

Согласно рисунку 7 наблюдается нестабильность грозовых явлений в разные периоды, ошибки то снижаются, то возрастают. Это говорит о том, что модель неравномерно воспроизводит климатическую изменчивость СПГ. Коэффициент корреляции для некоторых окон дает низкие или средние значения корреляции, что указывает на слабое совпадение межгодовых колебаний СПГ модельных рядов с фактическими. Амплитуда СПГ показывает, что фактические значения колебаний часто выше, чем в моделировании, то есть модель «сглаживает» изменчивость. Относительная погрешность в отдельные периоды ошибки достигают высоких значений, что связано с систематическим недоучётом межгодовой изменчивости. Как показывает сопоставление результатов моделирования СПГ с фактическими их значениями над городом Атырау для июня показали, что относительные погрешности моделирования не превышают 55 %, что для практики считается не совсем удовлетворительным.

Из полученных результатов следует, что проведённый анализ соответствует существующим представлениям физики гроз [2], а также особенностям климата Прикаспийского региона Казахстана [5]. Это подтверждает, что грозы в данном регионе формируются под влиянием сложного взаимодействия континентального климата и уникальных гидрометеорологических особенностей Каспийского моря. Выявленные особенности межгодовых изменений СПГ в 1...3 микрорайонах Прикаспийского региона Казахстана, характерны для рассматриваемых летних месяцев.

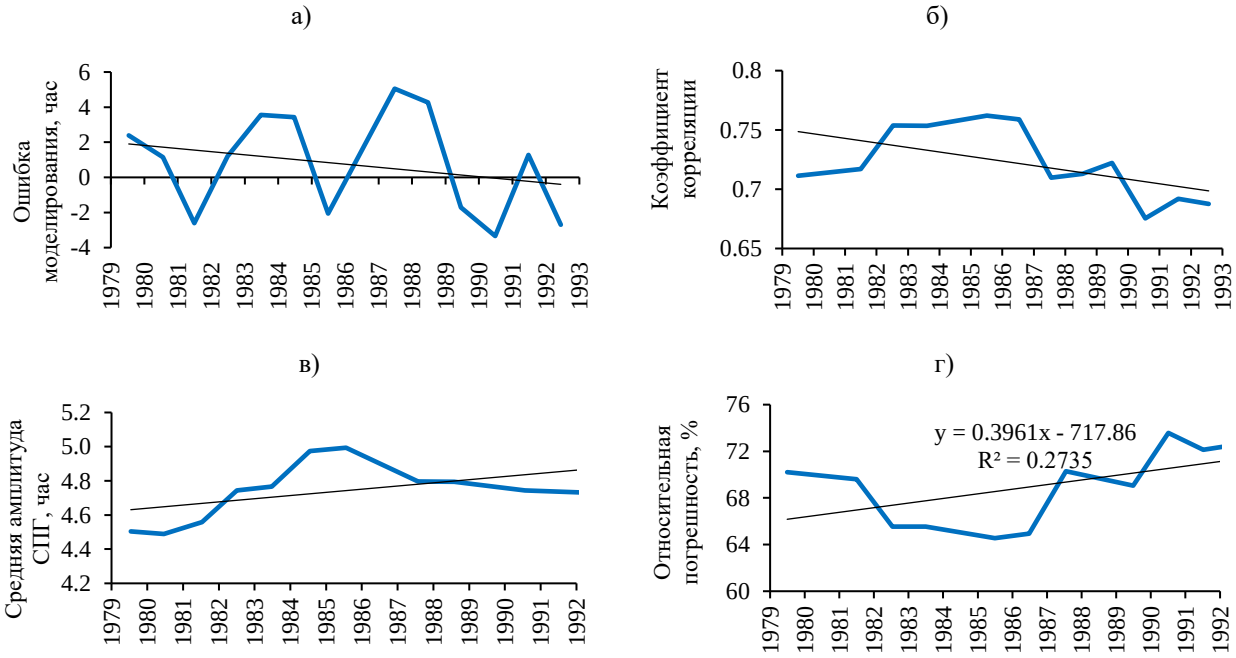


Рисунок 7. *Зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет значений характеристики моделирования и изменчивости СПГ для июня по станции Атырау.*

а) ошибки моделирования в конце этого окна; б) коэффициента корреляции соответствующих рассматриваемого окну отрезков временных рядов изучаемого процесса и результатов его моделирования; в) средней амплитуды изучаемого процесса, оцененной для изучаемого окна; г) относительной погрешности моделирования межгодовых изменений СПГ (%)

Далее в таблице 6 представлены значения коэффициентов модели межгодовых изменений СПГ в 1992…2021 гг. для июня, соответствующих городу Атырау, содержащей 10 предикторов.

Согласно таблице 6 видно, что половина коэффициентов положительные, половина отрицательные, что отражает высокую изменчивость и противодействие атмосферных процессов.

$C_3 = -0.12$ - слабое отрицательное влияние локальных антициклонов, $C_6 = +0.13$ - незначительное усиление гроз при усилении влажных переносов, $C_9 = -2.86$ - сильное торможение грозовой активности при господстве континентальных воздушных масс, $C_1 = +0.22$ - слабое положительное влияние при западных ветровых режимах, $C_4 = +0.55$ - рост вероятности гроз при прохождении циклонов с Каспия, $C_7 = -1.86$ - подавление грозовых процессов в условиях устойчивого антициклона, $C_{10} = +1.17$ - вклад южных тёплых потоков, повышающих конвекцию, $C_2 = -0.23$ - слабое отрицательное влияние северных ветров, понижение активности при охлаждении нижней тропосферы, $C_8 = +3.39$ - наиболее сильный положительный фактор — усиление конвективной неустойчивости и влагосодержания воздуха.

Таблица 6

Значения коэффициентов модели межгодовых изменений СПГ в 1992…2021гг. для июня, соответствующих городу Атырау, содержащей 10 предикторов.

Модель, содержащая 10 предикторов							
0	2.72388	3	-0.12051	6	0.13381	9	-2.86285
1	0.21553	4	0.54748	7	-1.86235	10	1.17484
2	-0.22720	5	-0.23312	8	3.38788	-	-

Наибольший вклад в рост СПГ вносят предикторы C_8 и C_{10} (тёплые и влажные воздушные массы), а уменьшение - C_9 и C_7 (антициклональные периоды). Рост C_8 и C_{10} - результат усиления регионального потепления, увеличения влагосодержания и частоты дней с неустойчивой стратификацией.

Отрицательные C_7 и C_9 указывают на значимость антициклонов и вторжений сухого континентального воздуха, которые в отдельные годы ограничивают развитие конвекции. Модель демонстрирует, что грозовая активность в Атырау находится под сильным влиянием термодинамических факторов, усиливающихся при повышении температуры приземного воздуха. Межгодовые колебания СПГ соответствуют чередованию фаз активных и пассивных грозовых сезонов, связанных с крупномасштабными циркуляционными изменениями над Каспием и Западным Казахстаном.

А в таблице 7 представлены Оценки СПГ (час) для июня 2022…2024 гг., соответствующие городу Атырау, которые получены с применением разработанной модели. Согласно таблице 7, резкий рост в 2024 г. может указывать на потенциальный экстремальный год по конвективной активности, связанный с усилением термической неустойчивости и притоком влажного воздуха с Каспийского моря. Колебания 2022–2023 гг. отражают типичную межгодовую изменчивость при слабых барико-циркуляционных контрастах.

Таблица 7

Оценки СПГ (час) для июня 2022…2024 гг., соответствующие городу Атырау, которые получены с применением разработанной модели

Модель	**2022**	**2023**	**2024**
10 предикторов	3.768595	2.48405	18.53405

Современный период характеризуется ростом амплитуды межгодовых колебаний СПГ, что свидетельствует об увеличении частоты экстремальных грозовых явлений в регионе. Прогноз на 2024 г. указывает на возможность аномально высокого уровня грозовой активности, требующего усиленного мониторинга и уточнения по фактическим наблюдениям.

Использованная математическая модель для оценки СПГ в различных пунктах Прикаспийского региона, показала относительную погрешность в более 50 % случаев. Возможные причины ошибок, в том, что имеется недостаточная пространственная детализация модели. Локальные особенности грозовой активности, то есть влияние Каспийского моря либо орографии местности, плохо отражаются в региональных моделях. Качество исходных данных также влияют на результаты, которые не учитывают локальные метеофакторы. Нельзя забывать, что процесс грозовой активности зависит от конвективных процессов, которые трудно корректно параметризовать в моделях.

На основании проведенного анализа и выявленных пробелов, предлагаются следующие рекомендации по дальнейшим научным исследованиям и мониторингу:

1) Разработать описание комплексного подхода физиологии возникновения гроз для выявления закономерностей изменения характеристик гроз над Прикаспийским регионом Казахстана и казахским сектором Каспия при различных сценариях дальнейших изменений его климата.

2) Выполнить оценку влияния моря на температурный режим Каспийского моря и испарения влаги с его поверхности на формирование гроз в изучаемых микрорайонах Прикаспийского региона.

3) Провести анализ последствий происходящих изменений грозовой активности в изучаемом регионе для судоходства в казахстанском секторе Каспия, нефтегазовой и другой критически важной инфраструктуры, а также сельского хозяйства Прикаспийского региона Казахстана.

4) Разработка и верификация региональных метеорологических моделей с высоким разрешением для более точного прогнозирования гроз, включая "сухие грозы", и их потенциальных последствий. Это позволит улучшить системы раннего предупреждения и минимизировать ущерб.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия в регионе наблюдается рост повторяемости грозовых явлений, особенно в начале XXI века: если в 1980-е годы фиксировалось в среднем 10…15 гроз в год, то в XXI веке их количество увеличилось до 20…30. При этом отмечается выраженная межгодовая изменчивость.

Региональные различия показали, что северо-запад (Ганюшкино, Новый Уштаган) имеют максимальные значения в отдельные годы конца XX века превышали 50 гроз. В XXI веке – заметное снижение, более 30 случаев в год отмечались лишь несколько раз. Индерборский: резкий рост после 1995 г. – до 23…25 случаев в год благодаря влиянию фронтов и влаги с Каспия. Сагиз и Карабау: увеличение на 5…6 случаев, но уровень ниже из-за сухости и континентальности климата. Прикаспийские станции (Атырау, Махамбет, Пешной, Кульсары): высокая изменчивость. В Атырау несколько лет зафиксировано более 30 гроз, в Пешной максимум не превышал 12…15.

Сезонные особенности показали что в мае – наибольшая продолжительность гроз (до 16…19 часов), связана с неустойчивостью атмосферы и влагой Каспия, в июне наблюдаются – локальные, но сильные пики (до 16…17 часов в 1994 г.).В июле – обычно меньше гроз, но возможны экстремумы (до 20 ч 55 мин в 2012 г.).

Таким образом тенденции показывают, что наибольшая активность гроз приходилась на 1980…1990-е годы. В XXI веке, несмотря на отдельные экстремальные годы, наблюдается тенденция к снижению как частоты, так и суммарной продолжительности гроз (СПГ). Различия объясняются физико-

географическими особенностями (влияние Каспия, фронтальные процессы, континентальность климата). Долгосрочные колебания указывают на усиление контрастов сезонной циркуляции и рост конвективного потенциала, но с последующим снижением активности в последние годы.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЖКН; управление данными – АВХ; формальный анализ – ЖХК; методология – АВХ; программное обеспечение – НЕР; отслеживание – ЖКН; визуализация – ЖХК; гаписание исходного проекта – АВХ; написание и редактирование – ЖКН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2025-2027 годы Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан: «Динамика ледового режима Каспийского моря и реки Жайык в условиях климатических изменений» (№ ИРН: AP26199145).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Крылова В. С., Маканова А. У., Токмагамбетова Р. Ю. Эколого-экономическое состояние Атырауской области // Гидрометеорология и экология. – 2009. – №4 (55). [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-sostoyanie-atyrauskoy-oblasti
2 Мучник В. М. Физика грозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 456 с.
3 Бэр А. Опасные явления погоды и их прогноз // КиЯ. – 2011. – №1 (229). – С. 82–85.
4 Аджиева А. А., Керефова З. М., Гятов Р. А. Поражаемость территории и объектов Северного Кавказа молниями // Наука. Инновации. Технологии. – 2020. – №3.
5 Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. (2022). Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate. Civil Engineering Journal. Vol. 8, No. 11. P. 2353–2377. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-11-01.
6 Горбатенко В. П. Синоптические условия образования и развития гроз над территорией Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского государственного университета. – 2001. – №274. – С. 148–154.
7 Пряхина С. И., Котова А. А. Синоптические условия образования гроз с выпадением ливневых осадков над территорией Западной Сибири // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2023. – Т. 23, №4. – С. 250–254. – DOI: 10.18500/1819-7663-2023-23-4-250-254.
8 Molanejad M., Soltani M., Saadat Abadi R., Babu C. A., Sohrabi M. M., Mathew M. (2015). Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea. No. 9. P. 117–132.
9 Ding J., Zhang W., Zheng D. (2025). Thunderstorm Structure and Lightning Properties in South China and over the South China Sea: A Comparative Study. Journal of Meteorological Research. Vol. 39. P. 415–430.
10 Voskresenskaya E., Maslova V., Lubkov A., Zhuravskiy V. (2022). Present and Future Changes in Winter Cyclonic Activity in the Mediterranean–Black Sea Region in the 21st Century Based on an Ensemble of CMIP6 Models. Atmosphere. Vol. 13. Article 1573. DOI: 10.3390/atmos13101573.
11 Pashchenko I. V. (2020). Cyclonic Activity over the Caspian Sea and Its Impact on Regional Weather Patterns. Russian Meteorology and Hydrology. Vol. 45, No. 6. P. 401–410. DOI: 10.3103/S1068373920060055.
12 Rakov V. A., Uman M. A. (2003). Lightning: Physics and Effects. – Cambridge: Cambridge University Press.
13 Булгеков Н. Режим пыльных бурь на территории Атырауской области // Гидрометеорология и экология. – 2023. – №2. – С. 34–39. – URL: https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/912.
14 Zhang X., Fang J., Yu Z. (2022). Characteristics of the Quasi-Periodic Outbreaks of Deep Convection during Tropical Cyclone Genesis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 127. e2021JD035312. DOI: 10.1029/2021JD035312.
15 Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. – 752 с.

REFERENCES

1 Krylova V. S., Makanova A. U., Tokmagambetova R. Yu. (2009). Ekologo-ekonomicheskoe sostoyanie Atyrauskoy oblasti [The ecological and economic state of the Atyrau region]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No. 4 (55). [Electronic resource]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-sostoyanie-atyrauskoy-oblasti. [in Russian]
2 Muchnik V. M. (1974). Fizika grozy [The Physics of Thunderstorms]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 456 p. [in Russian]
3 Ber A. (2011). Opasnye yavleniya pogody i ikh prognoz [Dangerous weather phenomena and their forecast]. KiYa. No. 1 (229). P. 82–85. [in Russian]
4 Adzhieva A. A., Kerefova Z. M., Gyatov R. A. (2020). Porazhaemost territorii i ob"ektov Severnogo Kavkaza molniyami [Lightning strikes in the North Caucasus region and its facilities]. Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. No. 3. [in Russian]
5 Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. (2022). Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate. Civil Engineering Journal. Vol. 8, No. 11. P. 2353–2377. DOI: 10.28991/CEJ-2022-08-11-01.
6 Gorbatenko V. P. (2001). Sinopticheskie usloviya obrazovaniya i razvitiya groz nad territoriey Zapadnoy Sibiri i Kazakhstana [Synoptic conditions for the formation and development of thunderstorms over Western Siberia and Kazakhstan]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta.No. 274. P. 148–154. [in Russian]

7 Pryakhina S. I., Kotova A. A. (2023). Sinopticheskie usloviya obrazovaniya groz s vypadeniyem livnevykh osadkov nad territoriey Zapadnoy Sibiri [Synoptic conditions for the formation of thunderstorms with heavy rainfall over Western Siberia]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle. Vol. 23, No. 4. P. 250–254. – DOI: 10.18500/1819-7663-2023-23-4-250-254. [in Russian]
8 Molanejad M., Soltani M., Saadat Abadi R., Babu C. A., Sohrabi M. M., Mathew M. (2015). Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea. No. 9. P. 117–132.
9 Ding J., Zhang W., Zheng D. (2025). Thunderstorm Structure and Lightning Properties in South China and over the South China Sea: A Comparative Study. Journal of Meteorological Research. Vol. 39. P. 415–430.
10 Voskresenskaya E., Maslova V., Lubkov A., Zhuravskiy V. (2022). Present and Future Changes in Winter Cyclonic Activity in the Mediterranean–Black Sea Region in the 21st Century Based on an Ensemble of CMIP6 Models. Atmosphere. Vol. 13. Article 1573. DOI: 10.3390/atmos13101573.
11 Pashchenko I. V. (2020). Cyclonic Activity over the Caspian Sea and Its Impact on Regional Weather Patterns. Russian Meteorology and Hydrology. Vol. 45, No. 6. P. 401–410. DOI: 10.3103/S1068373920060055.
12 Rakov V. A., Uman M. A. (2003). Lightning: Physics and Effects. – Cambridge: Cambridge University Press.
13 Bultekov N. (2023). Rezhim pyl'nykh bur' na territorii Atyrauskoy oblasti [Dust storm conditions in the Atyrau region]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No. 2. P. 34–39. URL: https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/912. [in Russian]
14 Zhang X., Fang J., Yu Z. (2022). Characteristics of the Quasi-Periodic Outbreaks of Deep Convection during Tropical Cyclone Genesis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 127. e2021JD035312. DOI: 10.1029/2021JD035312.
15 Matveev L. T. (1984). Osnovy obshchey meteorologii. Fizika atmosfery [Fundamentals of General Meteorology. Physics of the Atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 752 p. [in Russian]

КАСПИЙ МАҢЫНЫҢ СОЛТҮСТІК БӨЛІГІНДЕГІ НАЙЗАҒАЙЛАРДЫҢ ЖАЛПЫ ҰЗАҚТЫҒЫНЫҢ ЖЫЛДАР АРАСЫНДАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН-ШАШЫН ВАРИАЦИЯЛАРЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП МОДЕЛЬДЕУ

Жанар К. Наурозбаева*[1]PhD, Александр В. Холопцев[2] г.ғ.д., Жулдыз Х. Кенжина[1], Нурканат Е. Рахматулла[1]

[1] «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, kenzhina03@mail.ru, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru
[2] Н.Н. Зубов атындағы Мемлекеттік океанографиялық институты» Севастополь бөлімшесі, Севастополь, Ресей Федерациясы; kholoptsev@mail.ru
Автор корреспондент: Жанар К. Наурозбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Каспий теңізі,
найзағай,
атмосфералық жауын-шашын,
найзағайдың ұзақтығы,
жылдар арасындағы өзгерістердің математикалық модельдеуі

Мақала жайында:
Жіберілді: 15.09.2025
Қайта қаралды: 03.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Солтүстік Каспийдегі найзағайлық белсенділікті кеме қатынасы, мұнай-газ инфрақұрылымы, электр желілері және ауыл шаруашылығы үшін қауіп факторы ретінде зерттеу, сондай-ақ өзгермелі климат жағдайында мониторинг пен болжам жүйелерін жетілдірудің қажеттілігі өңір үшін маңызды. Жұмыста 1977...2022 жж. аралығында Атырау облысының тоғыз метеостанциясы бойынша жүргізілген көпжылдық найзағай белсенділігін бақылау деректері талданды. Найзағай құбылыстарының ұзақтығы 2...4 және 7...10 жылдық циклдері бар квазипериодтық құрылымға ие екені анықталды. Атырау станциясының мысалында кейбір айларда найзағайдың жиынтық ұзақтығы 20...21 сағатқа дейін жететіні көрсетілді, бұл құбылыстың жоғары жылдар арасындағы өзгергіштігін көрсетеді. Уақыттық қатарларды статистикалық модельдеу әдістері арқылы найзағайдың жалпы ұзақтығының өзгеру үрдістері бағаланып, алдағы жылдарға болжамдық мәндері есептелді. Зерттеу нәтижелері соңғы онжылдықтарда найзағайдың орташа қайталануы мен ұзақтығының төмендеу үрдісін көрсетеді. Алынған тұжырымдар қауіпті атмосфералық құбылыстарды мониторингтеу мен болжаудың сенімділігін арттыру үшін практикалық маңызға ие.

MODELING OF INTERANNUAL VARIATIONS IN THE TOTAL DURATION OF THUNDERSTORMS IN THE NORTHERN CASPIAN REGION, CONSIDERING ATMOSPHERIC PRECIPITATION VARIABILITY

Zhanar Naurozbayeva*[1] PhD, Alexander Kholoptsev[2] Doctor of Geographical Sciences, Zhuldyz Kenzhina[1], Nurkanat Rakhmatulla[1]

[1] JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, kenzhina03@mail.ru, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru
[2] Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russian Federation; kholoptsev@mail.ru
Corresponding author: Zhanar Naurozbayeva, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

KEY WORDS

Caspian Sea,
thunderstorm,
atmospheric precipitation,
thunderstorm duration,
mathematical modeling of interannual variations

About article:
Received: 15.09.2025
Revised: 03.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

The study of thunderstorm activity in the Northern Caspian as a risk factor for navigation, oil and gas infrastructure, power grids, and agriculture, as well as the need to improve monitoring and forecasting systems under changing climate conditions, is of great importance for the region. This paper analyzes long-term observations of thunderstorm activity in the Northern Caspian based on data from nine meteorological stations in Atyrau Region for the period 1977...2022. It was established that thunderstorms exhibit a quasi-periodic structure with cycles lasting 2...4 and 7...10 years. Using the example of the Atyrau station, it was shown that the total duration of thunderstorms in certain months reaches extreme values of up to 20...21 hours, reflecting the high interannual variability of the phenomenon. Statistical time-series modeling methods were applied to assess trends in the total duration of thunderstorms and to calculate forecast values for the coming years. The results indicate a decreasing trend in the average frequency and duration of thunderstorms in recent decades. The findings have practical significance for improving the reliability of monitoring and forecasting of hazardous atmospheric phenomena.

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

РЕЖИМ ПРИЗЕМНОГО ВЕТРА В КАЗАХСТАНЕ

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

РГП «Казгидромет», Астана, Казахстан; zhezdibayeva_b@meteo.kz (БТЖ), abilkadi_a@meteo.kz (АӘӘ), smagulova_ak@meteo.kz (АБС), zhaksybayeva_a@meteo.kz (АЕЖ)
*Автор корреспондент: Акмарал Б. Смагулова, smagulova_ak@meteo.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

скорость ветра,
максимальная скорость ветра,
аномалия,
линейный тренд,
статистический значимый.

АБСТРАКТ

В данной работе рассматриваются пространственно-временные особенности ветрового режима на территории Республики Казахстан, на основе данных наземных метеорологических станций, а также с использованием современных методов анализа климатических параметров. Казахстан, обладая обширной территорией с разнообразным рельефом – от равнин и степей до горных массивов – демонстрирует значительную вариативность скоростей и направлений ветра. Эта вариативность обусловлена как крупномасштабными климатическими процессами, так и локальными орографическими особенностями. Проведённый анализ позволил выделить устойчивые ветровые зоны, определить характерные сезонные колебания, а также выявить многолетние тенденции изменения ветровых характеристик. Полученные результаты представляют практическую ценность для проектирования ветроэнергетических установок, строительства объектов, чувствительных к ветровой нагрузке, а также для разработки региональных стратегий адаптации к изменению климата.

По статье:
Получено: 29.09.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 06.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Ветер является важной климатической компонентой, поскольку ветром обусловлен перенос тепла, влаги, аэрозоля и различных примесей. Климатические характеристики скорости ветра в пограничном слое необходимы для различных задач, как исследовательских, так и прикладных [1]. Ветровой режим, как правило, формируется под влиянием атмосферной циркуляции, местных барико-циркуляционных и термических условий моря. И, соответственно, изменения в поле ветра могут указывать об изменениях в циркуляционных процессах [2].

Изменения ветрового режима могут служить индикаторами климатических сдвигов. В условиях глобального потепления перераспределение температур и изменение циркуляции атмосферы могут сопровождаться как усилением, так и ослаблением приземных ветров, что, в свою очередь, отражается на режимах осадков, частоте экстремальных погодных явлений и влаговом балансе территории [3]. Эти изменения особенно важны для оценки климатических рисков, в том числе риска засух, опустынивания и разрушительных штормов [4].

С точки зрения эрозионных процессов, ветер играет ведущую роль в переносе почвенных частиц, особенно в зонах с пониженной увлажненностью и ослабленным растительным покровом. Нарушение структуры землепользования может приводить к усилению ветровой эрозии, что требует проведения мониторинга и внедрения защитных мероприятий [5].

Ветровой режим также представляет собой ключевой ресурс для ветроэнергетики. Определение средней и экстремальной скорости ветра, устойчивости направлений и суточной изменчивости позволяет оценивать энергетический потенциал территории. При этом важна не только высокая

Для цитирования:
Жездибаева Б., Әбілқади А., Смагулова А., Жаксыбаева А. Режим приземного ветра в Казахстане // Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 177-189.

среднегодовая скорость ветра, но и его стабильность, что напрямую влияет на эффективность и рентабельность ветряных электростанций [6].

Не менее важен ветер и в контексте урбанистики и охраны окружающей среды. В условиях плотной городской застройки слабые ветры могут приводить к застою воздуха и ухудшению экологической обстановки. Напротив, чрезмерно сильные ветровые потоки создают риски для инфраструктуры и безопасности. Таким образом, планирование городской среды требует учета характеристик ветрового режима при проектировании зданий, улично-дорожной сети и озеленения [7]. Определение неблагоприятных направлений и скоростей ветра, при которых создаются наиболее высокие уровни загрязнения атмосферного воздуха в изучаемых районах, рассматривается как ключевой этап оценки экологической ситуации и разработки мер по улучшению качества воздуха. Анализ таких ветровых условий позволяет выявить зоны наибольшего накопления загрязняющих веществ и способствует эффективному планированию мониторинга и управления загрязнением атмосферы [8].

В ряде исследовательских работ рассматривается проблема мониторинга опасных ветровых нагрузок на сооружения, подчеркивается важность учета скорости и длительности воздействия ветра при проектировании и эксплуатации зданий и инженерных объектов, а также необходимость обновления нормативной базы с учетом современных методов наблюдений [9...10].

Таким образом, ветер – это многофакторный климатический элемент, значение которого охватывает широкий спектр направлений: от устойчивого развития энергетики до предотвращения деградации земель и оценки климатической изменчивости. Его системное изучение и мониторинг являются важными составляющими национальной климатической и экологической политики.

В связи с изложенным целью настоящего исследования является анализ характеристик приземного ветра на территории Казахстана, выявление основных закономерностей его распределения и тенденций изменения, а также определение перспективных зон для развития ветроэнергетики и минимизации климатических рисков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ ветровой активности на территории Республики Казахстан проведен на основе данных о приземной скорости ветра за 2024 год, с учетом оценки многолетних изменений, начиная с 1979 года. В качестве исходного материала использованы данные наблюдений скорости приземного ветра, полученные с наземных метеорологических станций государственной наблюдательной сети РГП «Казгидромет» за период 1979…2024 гг. Скорость и направление ветра на метеостанциях регистрируются с помощью анеморумбометра М-63, установленного на мачте на высоте 10…12 метров над уровнем поверхности земли. Высота установки датчика выбрана в соответствии с международными стандартами для минимизации влияния поверхности и обеспечения репрезентативности измерений в приземном слое атмосферы.

В рамках исследования были рассчитаны основные характеристики ветрового режима, включая максимальную скорость ветра, аномалии скорости ветра, число дней с сильным ветром (определяемым как скорость ветра, превышающая 15 м/с), а также 95-й процентиль скорости ветра и числа дней с сильным ветром, что позволило оценить экстремальные ветровые события [11].

Аномалия вычислялась как разность между фактическим значением за 2024 год и соответствующей климатической нормой за период 1991…2020 гг. Число дней с сильным ветром рассчитывалось на основе ежедневных данных о скорости

ветра, при этом учитывались только те дни, когда максимальная скорость ветра превышала установленный порог.

Для оценки многолетней изменчивости и выявления тенденций изменения каждого из рассматриваемых показателей применялся метод линейной регрессии с использованием метода наименьших квадратов. Данный подход позволяет оценить скорость изменений во временных рядах данных, выявляя положительные или отрицательные тренды в различных регионах и по сезонам. Статистическая значимость выявленных трендов проверялась с помощью статистических тестов, с использованием стандартного уровня достоверности $p < 0.05$. Это обеспечивает уверенность в том, что обнаруженные изменения не являются случайными, а имеют системный характер. Аналогичная методология применялась в ряде предшествующих климатических исследований, посвященных анализу изменений ветрового режима, таких как: расчетные оценки ветровой нагрузки с заданной обеспеченностью для различных регионов России [12], исследование многолетних трендов скорости ветра в Китае [13], оценка глобальных изменений приземной скорости ветра с использованием данных повторного анализа [14], а также анализ тенденций ветровой активности в Турции [15].

Динамика средней многолетней скорости ветра за период 1979…2024 гг. была оценена на основе агрегированных данных метеорологических станций по территории Казахстана. Для каждого года рассчитывалось среднее значение скорости ветра по всем доступным станциям, что позволило получить единый временной ряд, отражающий пространственно осредненные изменения ветрового режима в регионе.

Для наглядного представления и пространственного анализа результатов были построены карты распределения рассчитанных показателей и выявленных трендов с применением геоинформационных систем. Построенные карты обеспечивают наглядную оценку региональных особенностей и динамики изменений.

Итоговые значения трендов и их статистическая значимость были сгруппированы по сезонам года (зима, весна, лето, осень) и представлены в виде сводных таблиц, что облегчает сравнение сезонных различий и региональных особенностей ветровой активности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пространственное распределение максимальной скорости ветра за 2024 год показал выраженные региональные различия, обусловленные как климатическими особенностями, так и орографическими условиями страны (таблица 1). В 2024 году на метеостанциях Республики Казахстан экстремальный ветер наблюдался преимущественно в северных, центральных и юго-восточных регионах страны. На представленных метеостанциях максимальная скорость ветра достигала 30 м/с и выше, что соответствует категории очень сильного и штормового ветра, способного оказывать стихийное гидрометеорологическое воздействие на инфраструктуру и экосистемы. В таблице 1 представлены метеостанции, на которых были зафиксированы скорости ветра 30 м/с и выше.

Наибольшее значение скорости ветра – 40 м/с было зарегистрировано на метеостанции Жаланашколь (область Жетысу), что свидетельствует о наличии в данной зоне экстремальных ветровых условий. Такие экстремальные ветровые условия обусловлены климато-орографическими особенностями данного региона. Жаланашколь расположен в зоне с выраженным влиянием горного рельефа, который способствует усилению ветровых потоков за счет эффекта ускорения воздушных масс при прохождении через горные перевалы и ущелья. Особенно значимым фактором является расположение метеостанции в районе Жетысуских

ворот – узкого межгорного прохода между хребтами Жетысуского Алатау и Тарбагатая, где формируется аэродинамический эффект, способствующий усилению и устойчивости сильных ветров. При этом исторический максимум скорости ветра, зафиксированный на данной метеостанции в период с 1979 по 2024 гг., составляет 60 м/с и наблюдался в 1979, 1982 и 1983 годах. Это подчёркивает устойчивую склонность региона к возникновению сильных и опасных ветров. В целом область Жетысу характеризуется высокой ветровой активностью. В 2024 году на значительной части территории наблюдались сильные ветры со скоростью свыше 15 м/с. Особенно интенсивные ветровые условия за 2024 год зафиксированы в восточной и юго-восточной части области – на метеостанциях Алаколь, Жаркент и Сарыозек, где максимальные скорости достигали 25 м/с.

Таблица 1

Максимальные значения скорости ветра ≥ 30 м/с, зарегистрированные на метеостанциях Республики Казахстан в 2024 году

№	Метеостанция	Область	Скорость ветра, м/с
1	Есиль	Акмолинская	30
2	Жалтыр	Акмолинская	30
3	Родниковка	Актюбинская	30
4	Аксенгир	Алматинская	30
5	Ертис	Павлодарская	30
6	Актогай	Павлодарская	30
7	Баянауыл	Павлодарская	31
8	Ерейментау	Акмолинская	33
9	Тайынша	Северо-Казахстанская	33
10	Тараз	Жамбылская	34
11	Родниковское	Карагандинская	34
12	Корнеевка	Карагандинская	34
13	Шарбакты	Павлодарская	34
14	Чкалово	Северо-Казахстанская	34
15	Шокпар	Жамбылская	36
16	Жаланашколь	Жетысу	40

Для оценки однородности временного ряда максимальных значений скорости ветра метеостанции Жаланашколь за период 1979…2024 гг. был применён непараметрический тест Петита, предназначенный для выявления статистически значимых структурных сдвигов в ряде. В ходе анализа подсчитано количество изменений знаков разностей между соседними наблюдениями и рассчитана соответствующая статистика теста. Полученное значение статистики показало значимое отклонение от гипотезы однородности, что свидетельствует о наличии структурных разрывов и неоднородности временного ряда. В ряде наблюдается выраженный спад в 2023 году.

Скорости в диапазоне 34...36 м/с были отмечены преимущественно в Северо-Казахстанской, Карагандинской, Жамбылской и Павлодарской областях, тогда как экстремумы 30 м/с фиксировались также в Актюбинской, Акмолинской, Алматинской и Павлодарской областях.

Анализ аномалий среднегодовой скорости приземного ветра за 2024 год по отношению к климатической норме за период 1991…2020 гг. позволил выявить

особенности пространственного распределения и характера отклонений ветрового режима на территории Республики Казахстан (рисунок 1).

Значения максимальных положительных аномалий (усиление ветра по сравнению с нормой) варьировали от +0.5 до +2.0 м/с.

Наибольшие положительные отклонения были зафиксированы в Северо-Казахстанской области (+2.0 м/с), а также в областях Абай (+1.6 м/с), Улытау (+1.2 м/с), Алматинской (+1.3 м/с) и Павлодарской областях (+1.1 м/с). Это свидетельствует о наличии устойчивой тенденции к усилению среднегодового ветра в северных и восточных регионах страны, а также в ряде южных и центральных территорий.

В то же время, в ряде регионов наблюдались отрицательные аномалии, отражающие ослабление среднегодовой скорости ветра. Наиболее выраженные из них отмечены в области Жетысу (-1.4 м/с), Западно-Казахстанской (-1.3 м/с), а также в Жамбылской, Павлодарской и Северо-Казахстанской областях, где значения составили до -1.1 м/с. Такие значения указывают на снижение ветровой активности в отдельных южных и западных регионах.

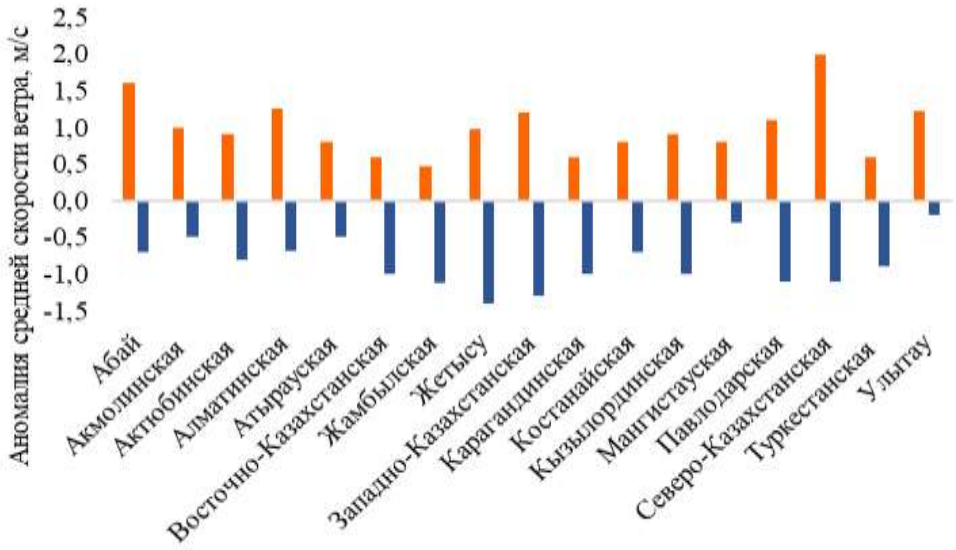


Рисунок 1. *Региональные вариации аномалий среднегодовой скорости приземного ветра в Республике Казахстан за 2024 г.*

Согласно полученным данным за 2024 год определено максимальное число дней с приземной скоростью ветра ≥15 м/с, зафиксированное на метеостанциях в пределах каждой административной области Республики Казахстан. Эти значения позволяют оценить интенсивность и потенциальную повторяемость сильных ветров в региональном разрезе, а также служат индикатором ветровой нагрузки (рисунок 2).

Максимальные значения варьируются от 31 дня (Туркестанская область) до 177 дней (область Жетысу), что указывает на существенную пространственную неоднородность условий, способствующих формированию сильного ветра.

Наибольшее число дней с приземной скоростью ветра ≥15 м/с в 2024 году зафиксировано в области Жетысу (177 дней), Кызылординской (163 дня), Северо-Казахстанской (156 дней) и Акмолинской (126 дней) областях, тогда как минимальные значения отмечены в Туркестанской (31 день), Мангистауской (41 день) и Жамбылской (46 дней) областях.

Сезонный анализ аномалий средней скорости ветра и числа дней с превышением 95-го процентиля показал, что положительные аномалии средней

скорости ветра преобладали зимой, тогда как весной наблюдались в основном отрицательные аномалии, а число дней со скоростью ветра выше 95-го процентиля, аналогично было максимальным зимой и минимальным весной (рисунок 3). Исходя из этого, в холодное время года наблюдалось повышение частоты сильных ветров, тогда как весенний сезон характеризовался снижением ветровой активности.

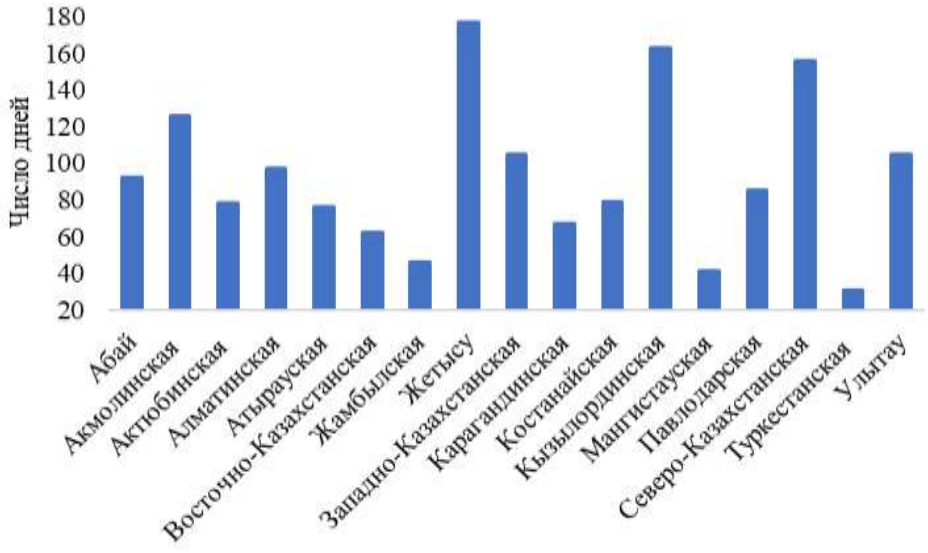


Рисунок 2. *Максимальное число дней со скоростью ветра ≥15 м/с по административным областям Республики Казахстан в 2024 г.*

В зимний период значения аномалий колебались от -3.0 до +2.4 м/с. Наибольшее положительное отклонение зафиксировано на метеостанции Жолболды в Павлодарской области (+2.4 м/с), а наибольшее отрицательное – на метеостанции Жаланашколь области Жетысу (-3,0 м/с). В этот период на метеостанциях Капчагай и Есик (Алматинской область) зарегистрировали соответственно 34 и 26 дней со скоростью ветра выше 95-го процентиля.

Весной аномалии средней скорости ветра колебались в диапазоне от +1.9 до -1.7 м/с. Наибольшая положительная аномалия была зарегистрирована на метеостанции Чкалово в Северо-Казахстанской области (+1.9 м/с), тогда как наибольшее отрицательное значение наблюдалось на метеостанции Жаланашколь области Жетысу (-1.7 м/с). В указанный период максимальное число дней с превышением порога 95-го процентиля зафиксировано на метеостанциях Сергеевка Северо-Казахстанской области (23 дня), Есик Алматинской области (21 день).

В летний период аномалии средней скорости ветра изменялись от положительных значений на метеостанции Чкалово Северо-Казахстанской области (+2.2 м/с) до отрицательных на метеостанции Злиха Кызылординской области (-1.6 м/с), что свидетельствует о значительных колебаниях метеоусловий в разных регионах страны. На метеостанциях Капчагай и Аксенгир Алматинской области за данный период отмечалась высокая частота дней со скоростью ветра превышавшей 95-й процентиль, составляющая соответственно 36 и 33 дня. Аналогично, на метеостанции Сергеевка Северо-Казахстанской области отмечалось 32 дня с превышением 95-го процентиля скорости ветра, что отражает широкое распространение экстремальных ветровых явлений в данной области летом.

Осенью диапазон аномалий составил от +2.1 м/с до -1.3 м/с. Максимальное положительное отклонение было зафиксировано на метеостанции Баршатас области Абай (+2.1 м/с), тогда как минимальные значения наблюдались на метеостанциях Саумалколь Северо-Казахстанской области и Аксай Западно-Казахстанской области (-1.3 м/с), что также подчеркивает региональные различия

в изменении ветрового режима. В этот период максимальное число дней скорости ветра, превышавшей 95-й процентиль, отмечалось на метеостанции Капчагай (38 дней), также значительные показатели отмечены на метеостанциях Есик (26 дней) и Аксенгир (24 дня) Алматинской области, что отражает высокую интенсивность ветровой активности в данном регионе.

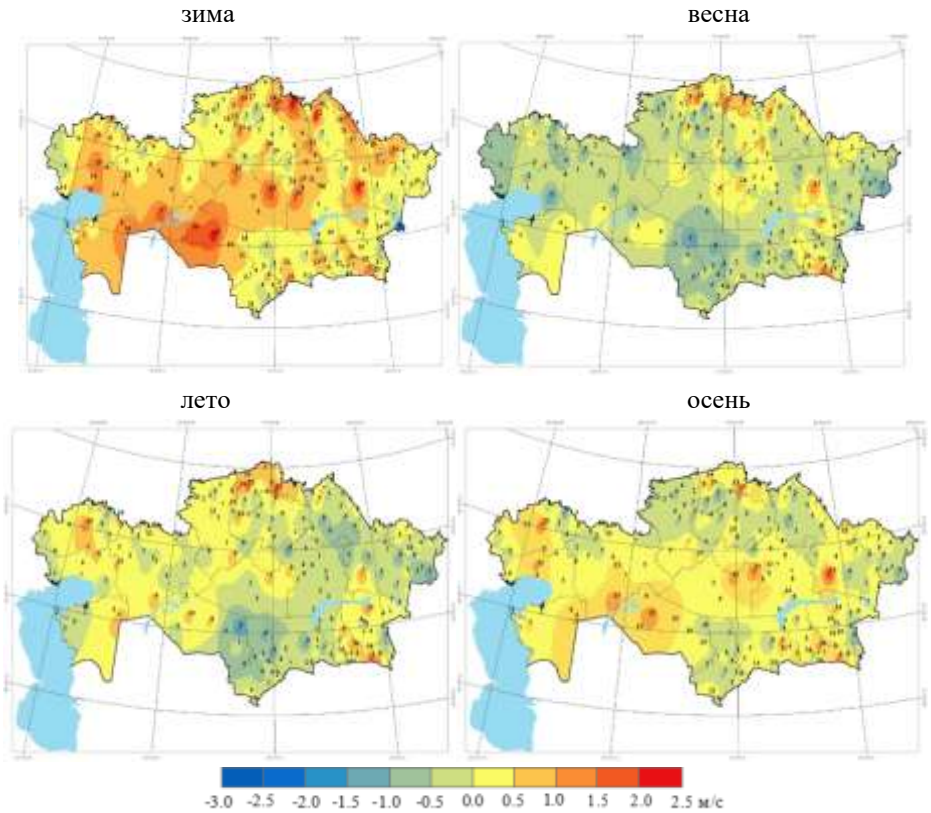


Рисунок 3. *Аномалии средней скорости ветра и число дней скорости ветра превышавшей 95-й перцентиль по сезонам.*

Пространственное распределение коэффициенты линейного тренда (день/10 лет) в рядах числа дней со скоростью больше 15 м/с по сезонам представлено на рисунке 4.

Наименьшие значения коэффициентов линейного тренда в рядах числа дней со скоростью больше 15 м/с заметны в зимний период, наибольшие в весенний. В Кызылординской, Северо-Казахстанской, Павлодарской, на юге Актюбинской, на границе между Алматинской области и области Жетысу преобладают положительные коэффициенты линейного тренда. А в Карагандинской, Мангистауской, Жамбылской и на юге Костанайской области напротив стабильны отрицательные значения коэффициента.

Особенно стоит отметить станцию Джусалы в Кызылординской области, где отмечается самое высокое положительное значение коэффициента линейного тренда количества дней со скоростью 15 м/с за 10 лет (11 дней). На станции Шокпар в Жамбылской области напротив отмечается наибольшее отрицательное значение коэффициента линейного тренда количества дней со скоростью 15 м/с за 10 лет (-7 дней).

В таблице 2 представлены значения линейных трендов по сезонной средней приземной скорости ветра (м/с за 10 лет) и числу дней с ветром ≥15 м/с (дней за 10 лет), усредненные по административным областям Республики Казахстан за период 1979…2024 гг. Статистически значимые тренды на уровне достоверности $p < 0.05$ выделены жирным шрифтом.

Наиболее заметное увеличение ветровой активности наблюдается в Северо-Казахстанской области, где статистически значимое увеличение средней скорости ветра зафиксировано весной (+0.18 м/с/10 лет) и летом (+0.11 м/с/10 лет). Существенно возросло и количество дней с сильным ветром: зимой – на +4,37 дней/10 лет, осенью – на +2.45 дней/10 лет. Подобные тенденции частично прослеживаются и в Жамбылской области, где отмечены положительные тренды скорости ветра весной (+0.24 м/с/10 лет) и летом (+0.21 м/с/10 лет), при этом в зимний и осенний сезоны наблюдается снижение количества сильных ветреных дней.

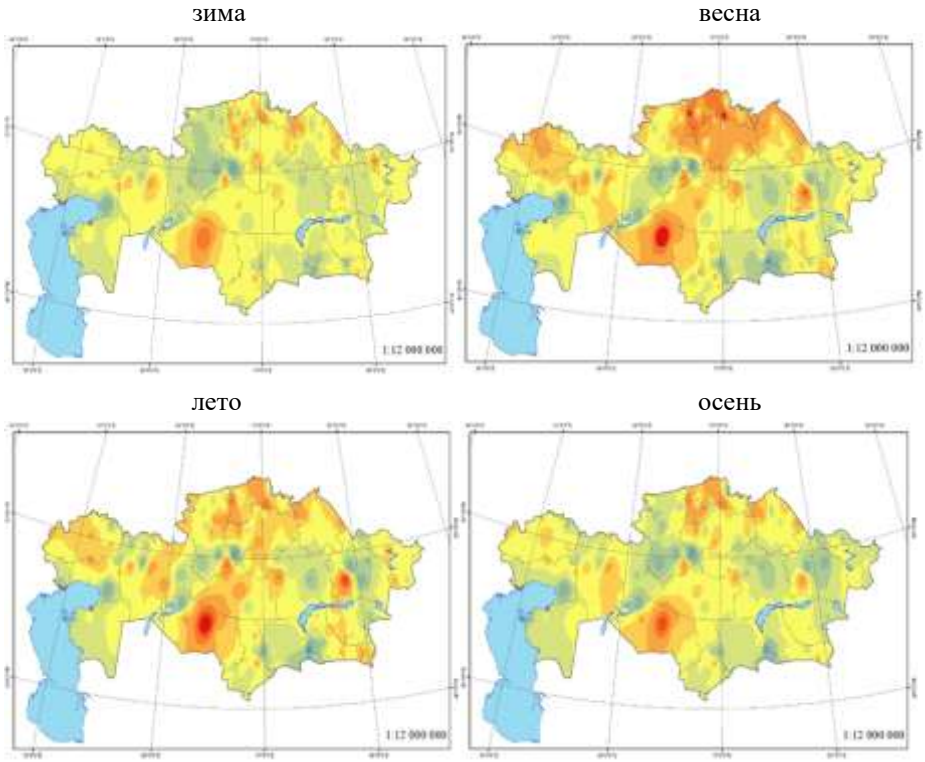


Рисунок 4. *Коэффициенты линейного тренда (день/10 лет) в рядах числа дней со скоростью больше 15 м/с 1979...2024 гг.*

Восточные регионы Казахстана, включающие Восточно-Казахстанскую область, область Абай и Карагандинскую область, характеризуются в целом слабыми и преимущественно статистически незначимыми трендами. Например, в Восточно-Казахстанской области значения трендов скорости ветра по сезонам колеблются в пределах ±0,1 м/с/10 лет, не демонстрируя устойчивой направленности изменений. В области Абай также не выявлено выраженных тенденций, за исключением незначительного роста в летний период (+0.07 м/с/10 лет). В Карагандинской области положительные тренды скорости ветра наблюдаются весной и летом, однако их значения близки к порогу значимости.

Снижение ветровой активности преимущественно фиксируется в западных регионах страны, особенно зимой. Так, в Атырауской и Мангистауской областях зарегистрировано уменьшение средней скорости ветра до -0.21 м/с/10 лет, сопровождаемое также снижением числа дней более 15 м/с. Отрицательные сезонные тренды, наблюдаются и в ряде северо-западных и центральных областей (Акмолинская, Актюбинская).

Для южных регионов (Алматинская, Туркестанская области, область Жетысу) характерны слабо выраженные, преимущественно незначимые тренды. Однако в

Кызылординской области наблюдается рост средней сезонной скорости ветра в весенне-летний период, что может указывать на локальное усиление ветровой активности.

По результатам анализа представлена временная зависимость осредненных значений средней многолетней скорости ветра за период 1979…2024 гг. по совокупности метеорологических наблюдений (рисунок 5). Пунктирной линией на графике показана линейная трендовая аппроксимация, выполненная методом наименьших квадратов. Данная линия отражает общую направленность изменения исследуемого показателя во времени и позволяет количественно оценить долгосрочные климатические тенденции. Осреднение по годам соответствует стандартам Всемирной метеорологической организации (ВМО) и позволяет выявить долгосрочные тенденции.

Таблица 2

Оценки линейного тренда (жирный шрифт-статистически значимые на увеличение 5 %-м уровне значимости) регионально осредненных характеристик ветра для областей Казахстана за 1979...2024 гг.

№	Область	Средняя сезонная скорость ветра, (м/с) / 10 лет				Число дней со скоростью ветра больше 15 м/с (дни/10 лет)			
		зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
1	Северо-Казахстанская	-0.06	0.18	0.11	0.09	1.1	**4.37**	**2.48**	**2.45**
2	Акмолинская область	-0.52	-0.41	-0.35	-0.42	-0.34	**1.75**	**0.83**	0.21
3	Костанайская область	-0.31	-0.12	-0.08	-0.2	-1.26	0.69	**0.7**	-0.57
4	Павлодарская область	-0.19	-0.04	-0.07	-0.09	0.54	**2.19**	**1.25**	**0.98**
5	Восточно-Казахстанская	-0.06	-0.06	-0.08	-0.08	-0.13	0.07	0.39	-0.17
6	Область Абай	-0.08	-0.04	-0.07	-0.07	-0.52	0.03	-0.19	-0.27
7	Карагандинская область	-0.12	-0.11	-0.08	-0.1	-0.16	-0.13	0.07	-0.28
8	Область Улытау	**0.12**	0.04	**0.13**	0.13	**0.93**	**1.63**	**1.75**	**1.08**
9	Западно-Казахстанская	-0.04	**0.1**	**0.08**	0.05	0.14	**1.51**	**0.85**	0.58
10	Атырауская область	-0.21	-0.19	-0.14	-0.17	-0.37	0.08	0.14	-0.19
11	Мангистауская область	0.0	-0.02	0.02	0.0	-0.91	-0.71	-0.76	-1.23
12	Актюбинская область	-0.17	-0.11	-0.07	-0.13	-0.32	0.68	**0.58**	0.33
13	Кызылординская область	-0.13	-0.18	-0.14	-0.12	**0.81**	**1.41**	**1.44**	**1.12**
14	Туркестанская область	-0.03	-0.05	-0.07	-0.06	0.2	0.43	0.26	0.01
15	Жамбылская область	-0.17	-0.24	-0.21	-0.2	-0.41	-.1,12	-1.03	-0.82
16	Алматинская область	-0.04	-0.01	0.01	-0.02	-0.09	0.4	**0.64**	0.08
17	Область Жетысу	-0.13	-0.08	-0.03	-0.09	0.11	0.43	**0.4**	0.0

Наблюдается устойчивая тенденция к снижению средней скорости ветра в течение рассматриваемого периода, особенно выраженная в 1990-х – начале 2000-х годов. Несмотря на частичное восстановление значений в последние годы, общее направление изменений остается нисходящим.

Результаты подтверждают выводы, ранее полученные в ряде региональных и глобальных исследований, касающихся снижения приземной скорости ветра в последние десятилетия [13…15].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данного исследования за 2024 год экстремальные скорости ветра, превышающие 30 м/с, были зарегистрированы преимущественно в северных,

центральных и юго-восточных регионах страны. Максимальное значение скорости ветра, равное 40 м/с, зафиксировано на метеостанции Жаланашколь.

Анализ аномалий среднегодовой приземной скорости ветра за 2024 год выявил максимальные положительные отклонения (+0.5…+2.0 м/с) в Северо-Казахстанской области, областях Абай, Улытау, Алматинской и Павлодарской областях, свидетельствующие об усилении ветровой активности. Одновременно отрицательные аномалии до -1.4 м/с отмечены в области Жетысу, Западно-Казахстанской, Жамбылской и ряде других областей, что указывает на снижение скорости ветра в южных и западных регионах страны.

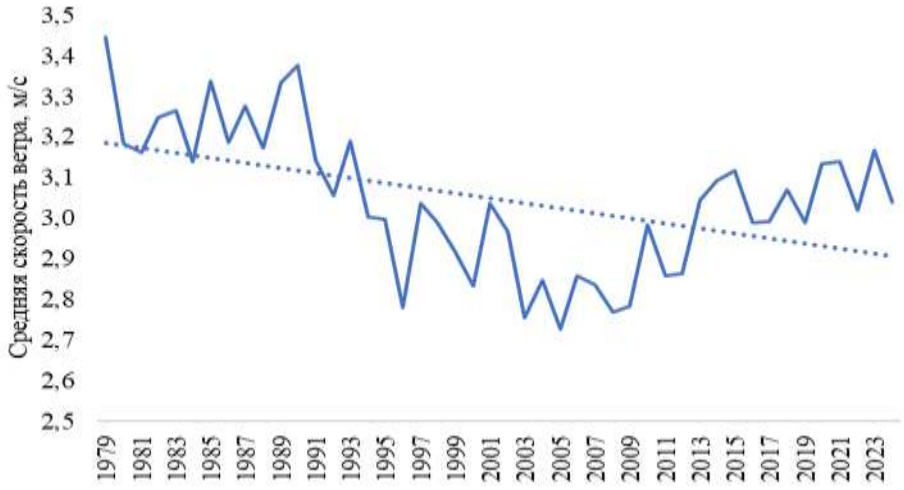


Рисунок 5. *Динамика средней многолетней скорости ветра за период 1979...2024 гг.*

По числу дней с приземной скоростью ветра ≥15 м/с в 2024 году выявлена значительная пространственная неоднородность ветровой активности. Максимальные показатели зарегистрированы в области Жетысу, Кызылординской, Северо-Казахстанской и Акмолинской областях, что свидетельствует о высокой частоте сильных ветров в этих регионах. Минимальные значения наблюдались в Туркестанской, Мангистауской и Жамбылской областях, указывая на более низкую ветровую активность.

Сезонный анализ аномалий средней скорости ветра и числа дней с превышением 95-го процентиля показал, что зимой наблюдается усиление ветровой активности с положительными аномалиями и максимальным числом экстремальных дней, тогда как весной – снижение скорости ветра и минимальное число таких дней. Зимой аномалии колебались от -3.0 до +2.4 м/с, число экстремальных дней достигало 26…34 на отдельных метеостанциях. Весной аномалии были в диапазоне от -1.7 до +1.9 м/с, максимальное число экстремальных дней – до 23. Летом аномалии варьировали от -1.6 до +2.2 м/с, число дней с сильным ветром доходило до 36, а осенью аномалии – от -1.3 до +2.1 м/с, с максимумом в 38 экстремальных дней. Экстремальные ветры наиболее часты зимой и реже весной с заметными региональными различиями.

Анализ коэффициентов линейного тренда числа дней со скоростью ветра ≥ 15 м/с показал, что наибольшее усиление ветровой активности отмечается весной, особенно в Кызылординской, Северо-Казахстанской и Павлодарской областях. В то же время снижение числа таких дней наблюдается преимущественно в Карагандинской, Жамбылской и Мангистауской областях.

Статистически значимое усиление ветровой активности выявлено преимущественно в Северо-Казахстанской области, особенно в весенне-летний период, как по средней скорости ветра, так и по числу дней с превышением порога

≥15 м/с. Наиболее устойчивое снижение показателей ветрового режима зафиксировано в западных регионах страны, включая Атыраускую и Мангистаускую области.

Анализ временного ряда за 1979…2024 гг. показал устойчивую тенденцию к снижению средней скорости приземного ветра на территории Казахстана. Несмотря на частичное восстановление в последние годы, общий линейный тренд остается отрицательным, что согласуется с результатами региональных и глобальных исследований.

Полученные результаты расширяют представления о пространственно-временной изменчивости ветрового режима и могут быть использованы для климатических справочников, энергетики, строительства и адаптационных стратегий.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

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

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация, управление данными – БТЖ, формальный анализ, методология – АӘӘ, руководство – БТЖ, визуализация – АЕЖ, написание исходного текста – АБС, написание и редактирование окончательного текста – АБС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Хохлова А. В. Повторяемость слабых и сильных ветров в пограничном слое атмосферы на территории Российской Федерации, оцененная по данным многолетних аэрологических наблюдений // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2023. – Т. 9. – № 4. – С. 506–519.
2 Наурозбаева Ж. К. Изменение ветрового режима Северного и Среднего Каспия в холодное полугодие // Гидрометеорология и экология. – 2023. – № 4. – С. 36–45.
3 Salkinov V., Talanov Y., Polyakova S., Assylbekova A., Kauazov A., Bultekov N., Musraliniva G., Kisebayev D., Beldeubayev Y. (2023). An assessment of the present trends in temperature and precipitation extremes in Kazakhstan. Climate.Vol. 11. No 2. P. 33.https://doi.org/10.3390/cli11020033
4 Papalexiou S. M., Montanari A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. Water Resources Research. Vol. 55. No 6. P. 4899–4918.
5 Koza M., Funk R., Pöhlitz J., Conrad C., Shibistova O., Meinel T., Akshalov K., Schmidt G. (2024). Wind erosion after steppe conversion in Kazakhstan. Soil and Tillage Research.Vol. 240. P. 105455.
6 Курбанбеков Ш. Р., Насирова Н. М. Исследование перспектив развития ветроэнергетики в Казахстане // Известия Международного казахско-турецкого университета имени Х.А. Ясави. Математика. – 2021. – Т. 4. – № 19. – С. 43–50.
7 Dedova T., Balakay L., Zakarin E., Bostanbekov K., Abdimanap G. (2024). High-Resolution WRF Modeling of Wind and Thermal Regimes with LCZ in Almaty, Kazakhstan. Atmosphere. Vol. 15. No. 8. P. 966.
8 Ляпкало А. А., Дементьев А. А., Цурган А. М. Влияние скорости и направления ветра на уровень загрязнения атмосферного воздуха города продуктами сгорания топлива // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 7-1. – С. 125–129.
9 Пчелкин В. И. Проблема мониторинга опасных ветровых нагрузок на сооружения и пути ее решения // Технологии гражданской безопасности. – 2012. – Т. 9. – № 4 (34). – С. 44–47.
10 Краснощеков Ю. В., Заполева М. Ю. Расчетные значения ветровой нагрузки с заданной обеспеченностью // Вестник СибАДИ. – 2015. – № 2 (42). – С. 89–94.
11 Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – М.: Росгидромет, 2023. – С. 76–80.
12 Жабелов С. Т., Хоконов И. М., Кадырова А. А., Ниязов И. А. Комплексный анализ временных рядов ветра // European Science. – 2020. – № 5 (54). – С. 20–23.
13 Wu J., Shi Y. (2021). Changes in surface wind speed and its different grades over China during 1961-2020 based on a high-resolution dataset. International Journal of Climatology. Vol. 42. No. 7. P. 3954–3967.
14 Fan W., Liu Y., Chappell A., Dong L., Xu R., Ekstrom M., Fu T., Zeng Z. (2021). Evaluation of global reanalysis land surface wind speed trends to support wind energy development using in situ observation. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 60. No 1. P. 33–50.
15 Dadaser-Celik F., Cengiz E. (2013). Wind speed trends over Turkey from 1975 to 2006. International Journal of Climatology. Vol. 34. No 6. P. 1913–1927.

REFERENCES

1 Khokhlova A. V. (2023). Povtoryaemost’ slabykh i sil’nykh vetrov v pogranichnom sloe atmosfery na territorii Rossiyskoy Federatsii, otsenennaya po dannym mnogoletnikh aerologicheskikh nablyudeniy [Frequency of weak and strong winds in the atmospheric boundary layer over the Russian Federation based on long-term aerological observations]. Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya, 9(4), 506–519 [in Russian]
2 Naurozbayeva Zh. K. (2023). Izmenenie vetrovogo rezhima Severnogo i Srednego Kaspiya v kholodnoe polugodie [Change in the wind regime of the Northern and Middle Caspian in the cold half-year]. Gidrometeorologiya i Ekologiya, 4, 36–45 [in Russian]

3 Salnikov V., Talanov Y., Polyakova S., Assylbekova A., Kauazov A., Bultekov N., Musralinova G., Kissebayev D., Beldeubayev Y. (2023). An assessment of the present trends in temperature and precipitation extremes in Kazakhstan. Climate, 11(2), 33. https://doi.org/10.3390/cli11020033
4 Papalexiou S. M., Montanari A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. Water Resources Research, 55(7). https://doi.org/10.1029/2018WR024067
5 Koza M., Funk R., Pöhlitz J., Conrad C., Shibistova O., Meinel T., Akshalov K., Schmidt G. (2024). Wind erosion after steppe conversion in Kazakhstan. Soil and Tillage Research.Vol. 240. P. 105455.
6 Kurbanbekov Sh. R., Nasirova N. M. (2021). Issledovanie perspektiv razvitiya vetroenergetiki v Kazakhstane [Study of wind energy development prospects in Kazakhstan]. Izvestiya Mezhdunarodnogo kazakh-turetskogo universiteta imeni Kh.A.Yasavi. Matematika, 4(19), 43–50 [in Russian]
7 Dedova T., Balakay L., Zakarin E., Bostanbekov K., Abdimanap G. (2024). High-Resolution WRF Modeling of Wind and Thermal Regimes with LCZ in Almaty, Kazakhstan. Atmosphere. Vol. 15. No. 8. P. 966.
8 Lyapkalo A. A., Dement'ev A. A., Tsurgan A. M. (2013). Vliyanie skorosti i napravleniya vetra na uroven' zagryazneniya atmosfernogo vozdukha goroda produktami sgoraniya topliva [Influence of wind speed and direction on urban air pollution by fuel combustion products]. Fundamental'nye issledovaniya, 7(1), 125–129 [in Russian]
9 Pchelkin V. I. (2012). Problema monitoringa opasnykh vetrovykh nagruzok na sooruzheniya i puti ee resheniya [The problem of monitoring hazardous wind loads on structures and ways to solve it]. Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti, 9(4[34]), 44–47 [in Russian]
10 Krasnoshchekov,Yu. V., Zapoleva, M. Yu. (2015). Raschetnye znacheniya vetrovoy nagruzki s zadannoy obespechennost'yu [Design values of wind load with specified exceedance probability]. Vestnik SibADI, 2(42) [in Russian]
11 Roshydromet. (2023). Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2022 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2022]. pp. 76–80. Roshydromet [in Russian]
12 Zhabelov S. T., Khokonov I. M., Kadyrova A. A., Niyazov I. A. (2020). Kompleksnyy analiz vremennykh ryadov vetra [Comprehensive analysis of wind time series]. European Science, 5(54), 20–23 [in Russian]
13 Wu J., Shi Y. (2021). Changes in surface wind speed and its different grades over China during 1961-2020 based on a high-resolution dataset. International Journal of Climatology. Vol. 42. No. 7. P. 3954–3967.
14 Fan W., Liu Y., Chappell A., Dong L., Xu R., Ekstrom M., Fu T., Zeng Z. (2021). Evaluation of global reanalysis land surface wind speed trends to support wind energy development using in situ observation. Journal of Applied Meteorology and Climatology. Vol. 60. No 1. P. 33–50.
15 Dadaser-Celik F., Cengiz E. (2013). Wind speed trends over Turkey from 1975 to 2006. International Journal of Climatology. Vol. 34. No 6. P. 1913–1927.

ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ЖЕР БЕТІ ЖЕЛІНІҢ РЕЖИМІ

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

«Қазгидромет» РМК, Астана, Казахстан; zhezdibayeva_b@meteo.kz, abilkadi_a@meteo.kz, smagulova_ak@meteo.kz, zhaksybayeva_a@meteo.kz
*Автор корреспондент: Акмарал Б. Смагулова, smagulova_ak@meteo.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

жел жылдамдығы
максималды жел жылдамдығы
аномалия
сызықтық тренд
статистикалық маңызды

Мақала жайында:
Жіберілді: 29.09.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 06.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Бұл мақалада Қазақстан Республикасы аумағындағы жел режимінің кеңістіктік және уақыттық ерекшеліктері жерүсті метеорологиялық станциялар деректері мен климаттық параметрлерді талдаудың заманауи әдістеріне сүйене отырып қарастырылады. Аумағы кең әрі жер бедері әртүрлі – жазықтар мен далалардан бастап таулы аймақтарға дейін созылып жатқан Қазақстанда жел жылдамдығы мен бағыты айтарлықтай өзгеріп отырады. Бұл өзгерістер ірі ауқымды климаттық үдерістермен қатар, жергілікті орографиялық ерекшеліктерге де байланысты. Жүргізілген талдау нәтижесінде тұрақты жел аймақтары, маусымдық тербелістер, сондай-ақ жел сипаттамаларының ұзақмерзімді өзгеру үрдістері анықталды. Алынған нәтижелер жел энергетикалық қондырғыларды жобалау, жел жүктемесіне сезімтал нысандарды салу, сондай-ақ климаттың өзгеруіне бейімделу бойынша аймақтық стратегияларды әзірлеу үшін практикалық маңызға ие.

SURFACE WIND REGIME IN KAZAKHSTAN

Bakhyt Zhezdibayeva, Aruzhan Abilkadi, Akmaral Smagulova*, Aizat Zhaxybayeva

RSE «Kazhydromet», Astana, Kazakhstan; zhezdibayeva_b@meteo.kz, abilkadi_a@meteo.kz, smagulova_ak@meteo.kz, zhaksybayeva_a@meteo.kz
*Corresponding author: Akmaral Smagulova, smagulova_ak@meteo.kz

KEY WORDS

wind speed
maximum wind speed
anomaly
linear trend
statistically significant

About article:
Received: 29.09.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

This article examines the spatial and temporal characteristics of wind patterns across the territory of the Republic of Kazakhstan, based on data from ground-based meteorological stations and using modern methods for analyzing climate parameters. Kazakhstan, with its vast territory and diverse terrain – ranging from plains and steppes to mountain ranges – demonstrates significant variability in wind speeds and directions. This variability is influenced by both large-scale climatic processes and local orographic features. The conducted analysis made it possible to identify stable wind zones, determine characteristic seasonal fluctuations, and reveal long-term trends in wind patterns. The results obtained are of practical value for the design of wind energy installations, the construction of structures sensitive to wind loads, as well as for the development of regional strategies for adaptation to 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

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАГРЯЗНЕННОГО УЧАСТКА РЕКИ ШАГАН

Арай Е. Темиржанова[1]*, Жанат А. Байгазинов[2], Нурлан Ж. Мухамедияров[3], Медет Р. Актаев[4], Касым К. Дускаев[1]

[1] Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; temirzhanova.aray@mail.ru (АЕТ), kduskaev@gmail.com (ККД)
[2] АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан; zh.baigazinov@gmail.com (ЖАБ)
[3] НАО «Университет имени Шакарима», Семей, Казахстан; nurlan.eventumlab@gmail.com (НЖМ)
[4] ТОО «Baiterek Engineering», Астана, Казахстан; medet_aktaev@mail.ru (МРА)
*Автор корреспондент: Арай Е. Темиржанова, temirzhanova.aray@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

река,
загрязнение,
химические элементы,
донные отложения,
индекс геоаккумуляции

АБСТРАКТ

Проблема радиоактивного и химического загрязнения природных водных объектов сохраняет свою актуальность в районах, подвергавшихся испытаниям ядерного оружия. Одним из таких объектов является река Шаган, расположенная на территории Семипалатинского испытательного полигона. Особое значение имеет участок русла реки «старое русло», где зафиксирована разгрузка загрязненных подземных и трещинных вод в поверхностный водоток.

Цель исследования заключается в выявлении особенностей накопления химических элементов в донных отложениях «старого русла» реки Шаган.

Научная и практическая значимость работы состоит в уточнении представлений о процессах миграции и аккумуляции химических элементов в условиях локализованных источников радиационного загрязнения. Полученные данные позволяют выявить общие закономерности трансформации геохимического фона рек, подверженных длительному техногенному воздействию, что важно для разработки систем мониторинга и прогноза экологического состояния подобных территорий.

Методология исследования включала полевые работы с отбором проб, лабораторные исследования с применением количественных методов анализа (атомно-абсорбционная спектрометрия, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой), статистическую обработку данных и построение тематических карт в ГИС. Загрязнение донных отложений химическими элементами определялось на основе индекса геоаккумуляции (Igeo) и сопоставления концентраций элементов с их кларковыми значениями.

Основные результаты показали, что в пределах исследуемого участка «старого русла» по кларкам концентраций установлены геохимические ряды, отражающие превышение среднего содержания элементов в верхней части континентальной коры (Sr>U>Ca) и в глинистых сланцах (Sr>Ca>U>Na>Mg). Анализ по индексу геоаккумуляции (Igeo) показал, что донные отложения р. Шаган варьируют от «незагрязненных» до «сильно загрязненных: по содержанию Li, Mg, K, Fe они отнесены к 0 классу, по Na и U - к классам 1 и 2 (от незагрязненных до умеренно загрязненных), тогда как по Ca и Sr - к 3 классу (от умеренно до сильно загрязненных).

Ценность исследования заключается во внесении нового фактического материала о геохимических особенностях радиоактивно загрязненных речных систем, а также в создании базы для последующих работ по оценке риска для экосистем и человека. Практическое значение полученных итогов заключается в возможности их применения при организации природоохранных мероприятий и долгосрочного экологического мониторинга.

МРНТИ 87.15.91 https://doi.org/10.54668/2789-6323-2025-119-4-190-204 УДК 504.4.054

По статье:
Получено: 30.09.2025
Пересмотрено:03.10.2025
Принято: 05.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

Для цитирования:
Темиржанова А., Байгазинов Ж., Мухамедияров Н., Актаев М., Дускаев К. Химические элементы донных отложений загрязненного участка реки Шаган// Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 190-204.

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия выполнено значительное число комплексных исследований, посвященных радиоэкологической оценке компонентов р. Шаган [1…6]. Тем не менее, научный интерес к этой реке остается высоким. Одной из ключевых причин является наличие участков с концентрациями техногенного радионуклида 3H, превышающими нормативные значения в десятки раз, что обусловливает актуальность и обоснованность выбора данной темы.

В частности, в работе [7] были выделены зоны с аномально высоким уровнем радиоактивности. К ним относятся район разгрузки загрязненных подрусловых и трещинных вод на поверхностные воды реки (участок на 5-м км); отрезок между 8 и 14 км, где трещинные воды поступают в грунтовые воды поймы р. Шаган и далее разгружаются в поверхностный водоток, а также сегмент «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро» также с разгрузкой загрязненных подрусловых и трещинных вод на поверхностные воды реки (рисунок 1).



Рисунок 1. *Основные участки загрязнения вод р. Шаган*
Примечание – составлено авторами

Вместе с тем, наряду с изучением радиоактивных компонентов, актуальной остается проблема оценки элементного состава воды и донных отложений, который в значительной мере определяет геохимический фон данного региона. Несмотря на проведенные работы, систематический мониторинг химического состояния экосистемы р. Шаган отсутствует. Изучение содержания загрязняющих элементов [8…10], формирующих характерный «геохимический портрет» реки, носило фрагментарный характер и проводилось в рамках отдельных научно-исследовательских проектов. При этом наиболее уязвимые участки водотока, описанные выше и подверженные постоянному поступлению загрязненных подземных вод, остаются недостаточно охарактеризованными.

Ситуация осложняется хозяйственной деятельностью в пойме р. Шаган и изменениями климата, особенно заметными для малых рек [11…14]. Река Шаган, являясь малой и выступая притоком более крупного водотока р. Ертис, изначально представляет собой хрупкую экосистему, особенно уязвимую в условиях аридного

климата степной зоны в пределах Казахского мелкосопочника. В условиях дефицита пресной воды на аридных территориях проблема качества таких водных объектов приобретает особую значимость. Поддержание их экологической устойчивости требует постоянного мониторинга, предотвращения дальнейшего засоления и загрязнения, а также разработки мер по восстановлению для минимизации риска деградации экосистем изучаемого региона.

Объектом исследования является загрязненный участок р. Шаган, подверженные радиоактивному и химическому воздействию. Предмет исследования – содержание химических элементов в составе донных отложениях и их пространственное распределение.

Цель данного исследования заключается в установлении концентрации химических элементов в донных отложениях уязвимого участка р. Шаган зоны разгрузки загрязненных трещинных и подрусловых вод сегмента «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро» и их оценке качества на основе геохимических и критериев (сопоставление значений с геохимическим фоном, геохимические классы качества по литературе [15]).

Задачи исследования включают следующие этапы: проведение полевых работ и отбор проб донных отложений; лабораторно-аналитический анализ - определение микро- и макроэлементов состава донных отложений; камеральная обработка данных - статистический анализ, интерпретация результатов с применением ГИС-технологий, расчет по геохимическим критериям, основанным на содержании химических элементов в донных отложениях зонах разгрузки подземных вод на участке «старого» русла.

В исследовании применяются полевые методы отбора проб, лабораторно-аналитические методы для определения состава воды, статистический и ГИС-анализ для обработки и интерпретации данных, а также применение геохимических критериев.

Гипотеза исследования заключается в том, что пространственное распределение химических элементов в воде и донных отложениях р. Шаган определяется сочетанием геохимических процессов и влиянием радиоактивного загрязнения, что позволяет использовать их как индикаторы состояния экосистемы. В настоящее время исследования по концентрациям химических элементов в донных осадках в значительной степени связаны с оценкой потенциального экологического риска и токсичности [16…18]. Для этого применяются различные подходы: геохимический, позволяющий определить степень загрязнения по сравнению с естественным, региональным фоном и индекс геоаккумуляции (Igeo) [19].

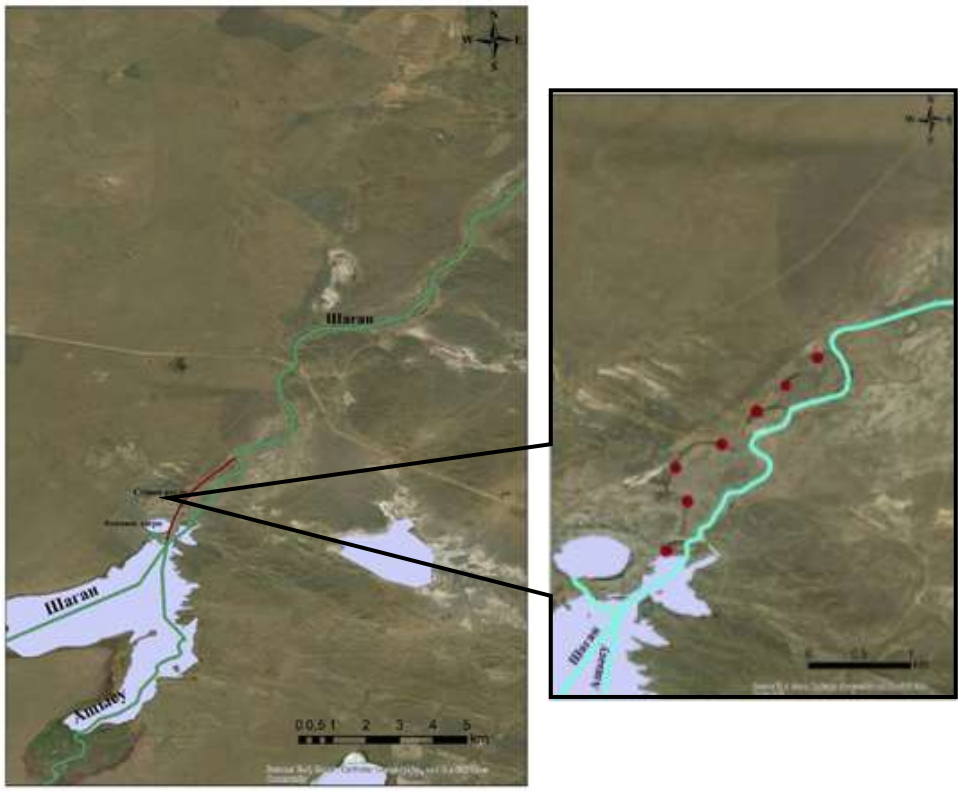
Предлагаемое исследование обладает научной новизной, так как направлено на уточнение роли геохимических процессов в формировании химического состава донных отложений в условиях радиоактивного воздействия. Его значимость заключается в расширении фактической базы данных о радиоэкологически трансформированных речных системах и создании основы для разработки систем долгосрочного мониторинга и природоохранных мероприятий для подобных экосистем.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб.

Река Шаган является важным природным объектом, характеризующимся сочетанием современного и «старого» русел, что делает ее удобной моделью для изучения процессов накопления и миграции загрязняющих веществ. Такой подход позволяет более полно отразить текущее состояние водоема и получить данные для последующего сравнения с аналогичными объектами региона. В основу исследования легли результаты полевых работ, проведенных в сентябре 2024 года на участках

«старого русла» р. Шаган. Точки отбора проб были привязаны к координатам с использованием GPS-навигатора Garmin eTrex. В ходе экспедиции собраны образцы донных отложений на заранее обозначенных участках исследуемого русла, где ранее проводили отбор проб воды. Интервал между точками отбора составлял около 20...30 м и корректировался в зависимости от особенностей берегового рельефа. Всего было выделено 7 точек, где осуществлялся отбор проб. Отбор проб донных отложений проводился в «условных» пределах «старого» русла реки, из верхнего слоя донных отложений на глубине 0–10 см (рисунок 2).



а) б)

Рисунок 2. *Участок исследования р. Шаган (а), точки отбора проб по «старому» руслу (б)*

Примечание – составлено авторами

Донные отложения для элементного анализа отбирались в местах пробоотбора воды методом укола. Оборудование изготовлено из инертного материала, что обеспечивало достоверность и чистоту отбора. Каждая проба донных отложений массой около 200 г помещалась в контейнеры из инертных материалов во избежание вторичного загрязнения и транспортировались в лабораторию с соблюдением температурного режима, исключающего их разложение или изменение состава. Соблюдение стандартов позволило сохранить исходные характеристики проб и обеспечить достоверность полученных аналитических данных.

Пробоподготовка.

Пробы донных отложений высушивались при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Высушенные образцы просеивались через полиамидные сита различного диаметра, после чего методом квартования делились на пять частей. Из каждой части отбирались равные порции, для формирования объединенной пробы, массой около 10 г, которая дополнительно просеивалась через сито с диаметром ячеек <1 мм. Полученные фракции измельчались до пудрообразного состояния и гомогенизировались. Навески массой 1 г получались методом квартования, после чего

из каждой пробы взвешивались по 0.2 мг на аналитических весах с точностью ±0.0001 г.

Подготовка образцов к элементному анализу проводилась методом автоклавного разложения с применением фтористоводородной (HF), соляной (HCl) и азотной (HNO_3) концентрированных кислот марки «осч». Для удаления органической составляющей дополнительно использовалась концентрированная перекись водорода (H_2O_2). Минерализация выполнялась в герметичных автоклавах при температуре 160 ± 5 ^{0}C в течение 2.5…4 ч, в зависимости от полноты разложения (до полного растворения силикатной матрицы). В каждой партии вместе с анализируемыми растворами проводят разложение 1 контрольного образца, а также одного стандартного образца (если иное не указано в ТЗ). Полученные растворы разбавлялись 1% HNO^3 в соотношении 1:10 и передавались на анализ.

Лабораторный анализ.

Содержание микроэлементов в составе донных отложений определялось с использованием метода атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Были использованы приборы SavantAA производства GBC Scientific Equipment, Австралия и SUPEC 7000, производства EXPEC TECHNOLOGY, Китай. Калибровка проводилась с использованием сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов (Perkin Elmer, Inorganic Ventures, США). Для контроля воспроизводимости результатов и учета потерь при пробоподготовке дополнительно применялись стандартные образцы твердого состава (БИЛ-1). Метод изотопных меток с использованием изотопов Yb позволил повысить точность количественного анализа. Значения относительного стандартного отклонения (RSD) не превышали 10 %. Качество измерений контролировалось по контрольному раствору, который анализировали после каждых десяти проб; при отклонении калибровочного графика на 8…10 % выполнялась повторная калибровка прибора. Измерения исследуемых проб выполнялись по методике ГОСТ Р 57162-2016 (ISO 15586:2003, NEQ).

Вариационно-статистический и корреляционный анализ полученных данных был проведен с применением методов математической описательной статистики с использованием программного обеспечения Statistica 13.0 и Microsoft Excel. На основании полученных результатов содержания химических элементов в образцах донных отложений были рассчитаны ключевые эколого-геохимические показатели - кларк концентрации (Kk) [15], индекс геоаккумуляции (Igeo) [19], позволяющий оценить уровень техногенного воздействия относительно геохимического фона.

Кларк концентрации (Kk)

$$K_k = \frac{C_{\text{проба}}}{C_{\text{кларк}}} \quad (1)$$

где, $C_{\text{проба}}$ - концентрация элемента в исследуемом образце (мг/кг); $C_{\text{кларк}}$ - средняя концентрация этого элемента в земной коре (мг/кг) [15]

Индекс геоаккумуляции (Igeo)

$$Igeo = log_2 \frac{C_n}{1.5 x B_n} \quad (2)$$

где, C_n - концентрация анализируемого элемента в донных отложениях, B_n - геохимический фон для анализируемого элемента [15], 1.5 - коэффициент, учитывающий литологическую изменчивость водосбора.

Построение карт-схем и пространственная визуализация результатов были выполнены с применением методов геоинформационного анализа. Обработка данных осуществлялась в программной среде ArcGIS 10.8 for Desktop (ESRI) с

использованием дополнительных модулей Geostatistical Analyst и инструментов Xtools. Проведённые методы статистической и пространственной обработки позволили выявить закономерности распределения химических элементов в исследуемой среде и установить статистически значимые взаимосвязи между их содержанием и факторами окружающей среды.

Таблица 1

Классификация донных осадков по Ige

Значение Igeo	Класс	Степень загрязнения
<0	0	Не загрязнено
0…1	1	От незагрязненного до умеренно загрязненного
1…2	2	Умеренно загрязнено
2…3	3	От умеренно до сильно загрязненного
3…4	4	Сильно загрязнено
4…5	5	От сильно до очень сильно загрязненного
>5	6	Очень сильно загрязнено

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью оценки текущего гидрохимического состояния и уточнения ранее полученных данных по р. Шаган [9…10] проведен анализ элементного состава донных отложений на загрязненном участке. В таблице 2 представлены данные о содержаниях группы химических элементов в донных отложениях, отобранных на участке сегмента «старого» русла с водопроявлениями из зоны навалов «Атомное озеро», которое имеет выход затем в поверхностный водоток основного русла р. Шаган. Степень загрязнения донных отложений изучаемыми группами элементов исследуемого участка р. Шаган определяли с использованием таких показателей, как кларк концентрации (K_k) и индекс геоаккумуляции (Igeo) [19…20].

Таблица 2

Содержание химических элементов в донных отложениях загрязненного участка р.Шаган, мг/кг n=7

№ пробы	Li	Na	Mg	K	Ca	Fe	Sr	U
1	8.1	14500	15100	7500	226000	16700	2360	12.0
2	15.0	16100	19300	7500	274000	23200	3030	43.0
3	9.2	12100	14800	4360	230000	18000	2270	35.0
4	15.8	26000	18900	13900	173000	32600	2240	8.5
5	15.7	26000	18700	13900	170000	32300	2240	8.4
6	11.0	18000	13900	8150	141000	27200	1580	28.0
7	9.7	19000	20900	3500	245000	93300	2900	14.0
X̄±SEM	12.1±1.2	18800±2040	17400±1030	8400±1600	208600±18000	34800±10000	2400±180	21.0±5.3
Me	11.0	17900	18700	7500	226000	27200	2300	14
σ	3.2	5400	2700	4100	48000	26600	490	14
Min	8.1	12100	13900	3500	141000	16700	1580	8.4
Max	15.8	26000	20900	13900	274000	93300	3030	43
C_V, %	27	29	16	49	23	76	21	65

Примечание: X̄ - среднее арифметическое; SEM - стандартная ошибка среднего; σ -стандартное отклонение; Min - минимум; Max - максимум; Me - медиана; C_V - коэффициент вариации.

Концентрации исследованных химических элементов в донных отложениях исследуемого участка р. Шаган распределяются в убывающем порядке следующим образом: Ca > Fe > Na > Mg > K > Sr > U > Li. Проведенный расчет коэффициента вариации показал, что изменчивость содержания химических элементов в донных отложениях находилась в пределах 16...76 %, охватывая диапазон от низкой до высокой вариабельности. Значения, близкие к нижней границе (до 20 %), свидетельствуют о достаточно однородном распределении Mg в пространстве, тогда как показатели, превышающие 40 % K (49 %), U (65 %), Fe (76 %), отражают существенную неоднородность и локальные различия в накоплении этих элементов. Подобная картина может указывать на различия в интенсивности внешних источников поступления химических элементов, а также на влияние локальных гидродинамических и геохимических условий, формирующих пространственную неоднородность донных отложений. Также выделена группа элементов (Sr, Ca, Li, Na) с коэффициентом вариации от 20...30 %. Данные значения свидетельствует о том, что пространственное распределение концентраций Sr, Ca, Li, Na в донных отложениях отличается менее выраженной неоднородностью и может быть охарактеризовано как средняя степень изменчивости.

Также был проведен сравнительный анализ (рисунок 3) содержания исследуемых групп химических элементов в составе донных отложений с литературными данными, в частности со средними концентрациями в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15]. Согласно приведенным значениям, для верхней части континентальной коры характерны следующие показатели (мг/кг): Li - 33, Na - 20700, Mg - 17700, K - 22300, Ca - 38900, Fe - 40600, Sr - 270, U - 2,5 а для глинистых сланцев эти величины составляют соответственно: Li - 54, Na - 10 200, Mg - 16 500, K - 27 300, Ca - 22 100, Fe - 47 100, Sr - 240, U - 4,3. Если показатели верхней континентальной коры отражают глобальный геохимический фон твердой оболочки Земли, то глинистые сланцы используются как более адекватный эталон для осадочных пород, близких по генезису к донным отложениям. Сопоставление с этими ориентирами позволяет выявить степени обогащения или обеднения элементов и тем самым оценить как естественные геохимические особенности исследуемой территории, так и возможное антропогенное влияние.

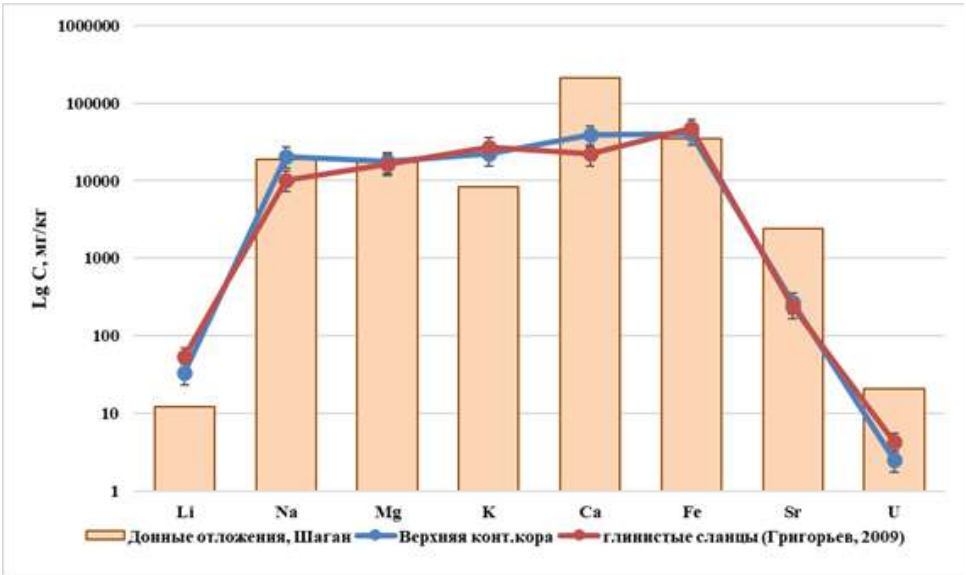


Рисунок 3. *Сравнение средних концентраций химических элементов в верхней части континентальной коры, глинистых сланцах и донных отложениях р. Шаган. Примечание – составлено авторами по данным Григорьева Н.А., 2009*

Анализ представленных данных указывает на различия в распределении исследуемых групп химических элементов в составе донных отложений р. Шаган. Так, при сравнении с содержанием элементов в составе верхней части континентальной коры геохимический ряд их накопления в донных отложениях выстраивается в следующей последовательности: $Sr_{8,9}>U_{8,4}>Ca_{5,4}$ (в индексе указана кратность превышения кларка). Тогда как при сопоставлении с содержанием элементов в глинистых сланцах геохимический ряд выстраивается несколько иначе – $Sr_{10}>Ca_{9,4}>U_{4,9}>Na_{1,8}>Mg_{1,1}$. Сопоставление с глинистыми сланцами имеет особое значение, поскольку именно они отражают специфику осадочных пород, наиболее близких по генезису к донным отложениям. Такой подход позволяет более корректно оценить особенности химического состава исследуемого материала и выявить возможные отклонения, связанные как с природными условиями седиментации, так и с техногенным влиянием. Таким образом такая геохимическая тенденция может свидетельствовать о наличии дополнительного источника поступления Sr, Ca и U. В отношении концентраций Li, K и Fe установлено, что содержание Fe находится на уровне его кларкового значения, тогда как концентрации Li и K не превышают соответствующих кларковых величин. Такой результат свидетельствует об отсутствии выраженного обогащения донных отложений данными элементами и указывает на их близость к фоновым геохимическим значениям.

Рассчитанные индексы геоаккумуляции показали значительную изменчивость, находясь в диапазоне от -2.76 до 2.74 (таблица 3).

Таблица 3

Геохимический индекс (Igeo), рассчитанный для образцов донных отложений

Химические элементы	Значение геохимического индекса (Igeo)	Классификация по Igeo
Li	-2.76	0
Na	0.30	1
Mg	-0.51	0
K	-2.29	0
Ca	2.65	3
Fe	-1.02	0
Sr	2.74	3
U	1.70	2

Наименьшее значение получено для Li (-2.76), что указывает на отсутствие загрязнения донных отложений р. Шаган данным элементом. Показатель индекса геоаккумуляции для K, Fe и Mg также оказался минимальным и соответствует классу 0, что отражает природный фон данных элементов в донных отложениях. Низкое значение показателя также установлено для Na (0.30), что соответствует 1 классу и характеризует степень как «от незагрязненных до умеренно загрязненных». Значения индекса Igeo для химического элемента U отнесли его к 2-му классу, соответствующему умеренно загрязненным отложениям. Значение индекса геоаккумуляции для Ca (2.65) и Fe (2.74) отнесено к 3-му классу, характеризующему состояние донных отложений как «от умеренно до сильно загрязненных».

Результаты корреляционного анализа, представленные в таблице 4, показывают, что взаимосвязи между отдельными микроэлементами в донных отложениях могут быть обусловлены их геохимической сопряженностью и отражать особенности источников и путей поступления металлов.

В донных отложениях загрязненного участка р. Шаган была выявлена сильная корреляция между содержанием Li и Na (0.78), очень сильная между концентрацией

Li и K (0.80), Na и K (0.84), а также Ca и Sr (0.96), что может подтверждать их общее происхождение от одного или нескольких источников. Анализ показал, что концентрация U в донных отложениях характеризуется очень слабыми либо отрицательными взаимосвязями с содержанием остальных изученных элементов, тогда как с Ca зафиксирована корреляция средней силы.

Таблица 4

Коэффициенты корреляции Спирмена между исследованными показателями

	Li	Na	Mg	K	Ca	Fe	Sr	U
Li	1.00							
Na	**0.78**	1.00						
Mg	0.49	0.53	1.00					
K	**0.80**	**0.84**	0.15	1.00				
Ca	-0.29	-0.56	0.37	-0.62	1.00			
Fe	-0.12	0.22	**0.67**	-0.34	0.20	1.00		
Sr	0.04	-0.13	**0.75**	-0.34	**0.89**	0.45	1.00	
U	-0.11	-0.67	-0.24	-0.51	0.46	-0.31	0.18	1.00

В системах мелководных поверхностных водотоков ключевую роль в формировании потока питательных веществ и продуктивности экосистемы играет интенсивный обмен материалом между донными отложениями и водой [21…22]. Основным природным источником поступления микроэлементов в донные отложения рек являются процессы выветривания и эрозии горных пород и почв, при этом количество химических элементов, переносимых данным путем, определяет их содержание в конкретной территории и формирует так называемый локальный геохимический фон. Оценка природного уровня содержания металлов в донных отложениях рек для определенного региона имеет важное значение, так как служит исходной величиной при определении степени загрязнения.

При выборе критериев оценки степени загрязнения были выделены условные «индикаторные» элементы (Li, Fe, Sr, U), ранее определенные в литературе как основные загрязнители водной среды р. Шаган [9, 10]. Их включение было обусловлено зафиксированными высокими концентрациями в пробах воды. В рамках настоящего исследования для установления поступления данных групп элементов, а также макрокомпонентов (Na, Mg, K, Ca) из донных отложений проведена их количественная характеристика с оценкой средних содержаний. Как показали результаты, химические элементы по величине средних концентраций формируют следующий ряд: $Ca_{208600} > Fe_{34800} > Na_{18800} > Mg_{17400} > K_{8400} > Sr_{2400} > U_{21} > Li_{12}$, что в целом отражает естественный характер распределения.

Сопоставление полученных данных со средними концентрациями элементов в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15] показало наличие отклонений от фоновых значений. По кларкам концентраций установлены геохимические ряды: $Sr_{8,9}>U_{8,4}>Ca_{5,4}$ (превышение среднего содержания в верхней части континентальной коры) и $Sr_{10}>Ca_{9,4}>U_{4,9}>Na_{1,8}>Mg_{1,1}$ (превышение в глинистых сланцах). Эти результаты косвенно подтверждают поступление соответствующих элементов в водную среду р. Шаган и согласуются с гипотезами, ранее высказанными другими исследователями относительно Sr и U [10; 9]. Следует учитывать содержание отдельных макрокомпонентов (Ca, Na, Mg), так как их повышенные концентрации в донных отложениях могут способствовать росту содержания этих элементов в воде. Вместе с тем, принимая во внимание их широкое распространение в природе, нельзя однозначно утверждать, что выявленные превышения связаны именно с

антропогенным воздействием - они могут быть обусловлены и особенностями геологического строения.

В результатах другого исследования [8] было выявлено, что в донных отложениях р. Шаган основными загрязнителями являются Mn, Sr, U, As. При этом следует учитывать, что в указанной работе анализ проводился по кислоторастворимым формам элементов (экстракция в 1 н HCl), тогда как в настоящем исследовании представлены данные по валовому содержанию. Тем не менее, наблюдается совпадение результатов по содержанию Sr, U, что подтверждает их ключевую роль как основных загрязнителей донных отложений р. Шаган. Более высокие концентрации щелочноземельных элементов (Ca и Sr) могут указывать на вклад локальных геологических источников, тогда как вариации содержания U чаще связаны с техногенным воздействием.

Для оценки степени загрязнения донных отложений химическими элементами многие исследователи используют геохимические критерии относительно геохимического фона, то есть содержания элементов, присутствующих в осадках при естественных условиях (геохимический индекс и коэффициент загрязнения) [20, 23…25]. Полученные значения индекса Igeo для отдельных микроэлементов, аккумулированных в донных отложениях исследуемой р. Шаган, указывают как на природные (выветривание горных пород), так и на антропогенные (поступление загрязнителей с загрязненных навалов грунта «Атомное озеро» и поступление элементов с подземными водами по тектоническим разломам) источники выявленных элементов [9]

В донных отложениях загрязненного участка р. Шаган значения индексов Igeo были различные и по значениям различных химических элементов относятся к категории от «незагрязненных» до «сильно загрязненных» осадков. Высокие значения индекса геоаккумуляции для Sr (2.74), Ca (2,65) и U (1.70) указывает на необходимость незамедлительных мер по снижению загрязнения и предотвращению деградации водосбора, при этом следует отметить, что умеренная степень загрязнения донных отложений отмечена по U.

В донных отложениях р. Шаган выявлены сильные положительные корреляции между содержанием Li-Na, Li-K, Na-K, а также Ca-Sr. Подобные связи отражают их схожие геохимические свойства и указывают на общий источник поступления. Щелочные элементы (Li, Na, K) характеризуются высокой подвижностью и склонны к совместной миграции в водных системах [26…27]. Корреляция Ca-Sr объясняется их геохимической близостью, поскольку Sr часто изоморфно замещает Ca в карбонатах и сульфатах, что подтверждается результатами исследований по различным речным системам [28].

В отличие от макроэлементов и Li, U демонстрирует слабые либо отрицательные взаимосвязи с большинством элементов, что указывает на иной механизм поступления. Зафиксированная корреляция средней силы с Ca может быть связана с образованием уранил-карбонатных комплексов в окислительных условиях, что отмечается в работах по гидрогеохимии U [29]. Учитывая известную техногенную природу источников U на исследуемой территории, можно предположить, что его аккумуляция в донных отложениях имеет преимущественно антропогенный характер, тогда как Na, K, Ca и Sr поступают в основном за счет природных геологических процессов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показали, что донные отложения «старого русла» р. Шаган характеризуются загрязнением рядом химических элементов. Средние концентрации большинства из них (Na, Mg, Ca, Sr, U) превышают геохимический фон, то есть их среднее содержание в глинистых сланцах, за исключением Li, K и Fe.

Сопоставление полученных данных со средними концентрациями элементов в верхней части континентальной коры и глинистых сланцах [15] выявило отклонения от фоновых значений. По кларкам концентраций установлены геохимические ряды, отражающие превышение среднего содержания элементов в верхней части континентальной коры ($Sr_{8,9}$>$U_{8,4}$>$Ca_{5,4}$) и в глинистых сланцах (Sr_{10}>$Ca_{9,4}$>$U_{4,9}$ >$Na_{1,8}$>$Mg_{1,1}$). Полученные результаты косвенно указывают на поступление соответствующих элементов в водную среду р. Шаган. Такой подход позволяет комплексно охарактеризовать геохимическую специфику исследуемой территории и определить вклад как природных, так и антропогенных факторов в формирование химического состава донных отложений.

Анализ степени загрязнения донных осадков с использованием геохимического индекса (Igeo) показал, что донные отложения р. Шаган относятся к 0 классу (незагрязненные донные отложения) по содержанию Li, Mg, K, Fe. Для Na и U рассчитанный индекс Igeo отнес эти осадки к 1 классу (от незагрязненных до умеренно загрязненных осадков) и 2 классу (умеренно загрязненных осадков). Тогда как для Ca и Sr Igeo – к 3 классу, что соответствует степени от умеренно загрязненных до сильно загрязненных осадков.

Таким образом, результаты анализа подтверждают, что часть загрязняющих элементов (Na, K, Sr, Ca) поступает в донные отложения преимущественно за счет геологических процессов, тогда как U демонстрирует иной, вероятно, антропогенный путь миграции. Это подчеркивает необходимость дифференциации геогенных и техногенных факторов при интерпретации состава донных отложений и оценке экологического состояния р. Шаган.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами по проведенным полевым, камеральным испытаниям.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - АЕТ, НЖМ; управление данными - АЕТ, ЖАБ; формальный анализ - АЕТ, ЖАБ, НЖМ; методология - АЕТ, МРА, ДКК; программное обеспечение - АЕТ; мониторинг - АЕТ, НЖМ; визуализация - АЕТ; написание первоначального проекта - АЕТ; написание обзора и редактирование - НЖМ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта «Комплексное радиоэкологическое исследование бассейна р. Шаган и разработка рекомендаций по минимизации негативного влияния на окружающую среду и население» (ИРН AP22783154) при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A. K., Timonova L. V., Larionova N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. PLOS ONE, 19, e0300971. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971

2 Timonova L. V., Lyakhova O. N., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Kabdyrakova A. M., Serzhanova Z. B. (2020). Tritium distribution in soil in the area of “Atomic” Lake near the Semipalatinsk Test Site. Eurasian Soil Science, 53(3), 355–361. https://doi.org/10.1134/S1064229320030096

3 Айдарханов А. О., Актаев М. Р., Есимбеков А. Ж., Анисимов В. С. Определение и локализация каналов поступления ^{3}H в воды р. Шаган // Радиация и риск. – 2013, - №22(4), - С. 66-73. ISSN 0131-3878.

4 Комлев А. В., Зеленский К. Л., Кокежанов Б. А., Кириллов А. В. Изучение возможных путей миграции трития в бассейн р. Шаган // Вестник НЯЦ РК. – 2013, - №4, - С. 96 -101.

5 Айдарханов А. О., Лукашенко С. Н., Субботин С. Б., Эдомин В. И., Генова С. В., Топорова А. В., Ларионова Н. В., Пестов Е. Ю. Состояние экосистемы р. Шаган и основные механизмы ее формирования // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана / под ред.. – Вып. 2. – Семипалатинск: Дом печати, 2010. – С. 9–55. – URL: https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf

6 Субботин С. Б., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ларионова Н. В., Яковенко Ю. Ю. Радиоактивное загрязнение техногенными радионуклидами компонентов экосистемы реки Шаган // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2010, – № 3 (14), – С. 106–114.

7 Актаев М. Р., Лукашенко С. Н., Айдарханов А. О., Ляхова О. Н. Характер загрязнения тритием вод р. Шаган в районе «Атомного» озера // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – Т. 4, № 2. – С. 5–8.

8 Дюсембаева М.Т. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона / М. Т. Дюсембаева, Н. Ж. Мухамедияров, Г. М. Есильканов, А. Ж. Ташекова, А. О. Айдарханов. – Курчатов : ИД «Интеллект», 2023. – 268 с.
9 Gorlachev I., Kharkin P., Dyussembayeva M., Lukashenko S., Gluchshenko G., Matiyenko L., Zheltov D., Kitamura A., Khlebnikov N. (2020). Comparative analysis of water contamination of the Shagan River at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides. Journal of Environmental Radioactivity, 213, 106110. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106110
10 Ташекова А. Ж., Лукашенко С. Н., Койгельдинова М. Т., Мухамедияров Н. Ж. Характеристика элементного состава воды р. Шаган // Вестник КрасГАУ. – 2016, – № 12, – С. 141–146.
11 Yan X., Yang W., Pu Z., Zhang Q., Chen Y., Chen J., Xiang W., Chen H., Cheng Y., Zhao Y. (2025). Responses of typical riparian vegetation to annual variation of river flow in a semi-arid climate region: Case study of China's Xiliao River. Land, 14(1), 198. https://doi.org/10.3390/land14010198
12 Xing J., Wang L., Zhao J., Zhai T. (2024). Hydrochemical variation characteristics and driving factors of surface water in arid areas—a case study of Beichuan River in Northwest China. Frontiers in Environmental Science, 12, 1493390. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1493390
13 Al-Dabbas M., Al-Shamma'a A., Ghafel K. (2018). Evaluation of Gharraf River water for different uses, South Iraq. Iraqi Journal of Science, 59(3C), 1697–1709. https://doi.org/10.24996/ijs.2018.59.3C.15
14 Xue Y., Song J., Zhang Y., Kong F., Wen M., Zhang G. (2016). Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. Water, 8(8), 328. https://doi.org/10.3390/w8080328
15 Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. – 383 с.
16 Kulbat E., Sokołowska A. (2019). Methods of assessment of metal contamination in bottom sediments (Case study: Straszyn Lake, Poland). Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 77(3), 465–478. https://doi.org/10.1007/s00244-019-00662-5
17 Liu P., Zheng C., Wen M., Luo X., Wu Z., Liu Y., Chai S., Huang L. (2021). Ecological risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Chagan Lake, Northeast China. Water, 13(7), 894. https://doi.org/10.3390/w13070894
18 Zhao S., Li Y., Liu D., Li B., Xiao H., Cheng W., Li A., Chong J. (2016). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for nutrients and heavy metals in surface sediments from Tangxun Lake, Wuhan, Central China. Nature Environment and Pollution Technology, 15(4), 1417–1425.
19 Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2(1), 108–118.
20 Ostrovsky I., Tęgowski J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. Geo-Marine Letters, 30(3–4), 261–269. https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4
21 Middelburg J. J., Levin L. A. (2009). Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences Discussions, 6(3), 3655–3706. https://doi.org/10.5194/bgd-6-3655-2009
22 Sidoruk M. (2023). Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bottom sediments: A case study of eutrophic Bukwałd Lake located in an agricultural catchment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3), 2387. https://doi.org/10.3390/ijerph20032387
23 Świercz A., Tomczyk-Wydrych I., Bąk Ł. (2022). Quality of bottom sediments of Sołtmany Lake (Masurian Lake District, Poland) in the light of geochemical and ecotoxicological criteria—Case study. Water, 14(13), 2045. https://doi.org/10.3390/w14132045
24 Alieva E., Abdykadyrova R., Totubaeva, N. (2025). Assessment of contamination and accumulation of heavy metals in sediments of Lake Issyk-Kul. Grassroots Journal of Natural Resources, 8(1), 874–893. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080137
25 Sarker P., Rahaman M. S., Kabir M. M., Al Mamun A., Maruo M. (2021). Evaluation of contamination and accumulation of heavy metals in the Dhaleswari River sediments, Bangladesh. International Journal of Environment, 10(1), 62–75. https://doi.org/10.3126/ije.v10i1.38399
26 Liu C.-Y., Wilson D. J., Hathorne E. C., Xu A., Pogge von Strandmann P. A. E. (2023). The influence of river-derived particles on estuarine and marine elemental cycles: Evidence from lithium isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 361, 183–199. https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.08.015
27 Ma Y., Qin X., Pan T., Chen J., Jiang Z., Ding C., Zhang D., Zhang,F., Feng N., Liu C., Li Q., Ren E. (2024). Sedimentary environment and source analysis of sedimentary lithium deposits in Dezong Mahai Salt Lake, Qaidam Basin. Sustainability, 16(23), 10561. https://doi.org/10.3390/su162310561
28 Goldhaber M., Morrison J., Holloway J., Wanty R., Helsel D., Smith D. (2009). A regional soil and sediment geochemical study in northern California. Applied Geochemistry, 24(8), 1482–1499. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.018
29 Langmuir D. (1997). Aqueous environmental geochemistry (601 p.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

REFERENCES

1 Aktayev M., Subbotin S., Aidarkhanov A., Aidarkhanova A. K., Timonova L. V., Larionova N. (2024). Characterization of geological and lithological features in the area proximal to tritium-contaminated groundwater at the Semipalatinsk test site. PLOS ONE, 19, e0300971. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300971
2 Timonova L. V., Lyakhova O. N., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Kabdyrakova A. M., Serzhanova Z. B. (2020). Tritium distribution in soil in the area of "Atomic" Lake near the Semipalatinsk Test Site. Eurasian Soil Science, 53(3), 355–361. https://doi.org/10.1134/S1064229320030096
3 Aidarkhanov A. O., Aktaev M. R., Esimbekov A. Zh., Anisimov V. S. (2013). Opredelenie i lokalizatsiya kanalov postupleniya ^{3}H v vody r. Shagan [Determination and localization of ^{3}H inflow channels into the waters of the Shagan river]. Radiatsiya i risk [Radiation and Risk], 22(4), 66–73. [In Russian]
4 Komlev A. V., Zelensky K. L., Kokezhanov B. A., Kirillov A. V. (2013). Izuchenie vozmozhnykh putei migratsii tritiya v basseyn r. Shagan [Study of possible tritium migration pathways in the Shagan River basin]. Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin], 4, 96–101. https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/KUJvRiwBXS.pdf [In Russian]
5 Aidarkhanov A. O., Lukashenko S. N., Subbotin S. B., Edomin V. I., Genova S. V., Toporova A. V., Larionova N. V., Pestov E. Yu. (2010). Sostoyanie ekosistemy r. Shagan i osnovnye mekhanizmy yeye formirovaniya [The state of the Shagan River ecosystem and the main mechanisms of its formation]. In S. N. Lukashenko (Ed.), Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana [Current issues of radioecology in Kazakhstan] (Vol. 2, pp. 9–55). Dom Pechati. ISBN 978-601-7112-32-5. https://irse.nnc.kz/wp-content/uploads/2018/10/Vypusk_2_rus.pdf [In Russian]
6 Subbotin S. B., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Larionova N. V., Yakovenko Y. Y. (2010). Radioaktivnoe zagryazneniye tekhnogennymi radionuklidami komponentov ekosistemy reki Shagan [Radioactive contamination of ecosystem components of the

Shagan river with artificial radionuclides]. Problemy biogeokhimii i geokhimicheskoy ekologii [Problems of Biogeochemistry and Geochemical Ecology], 3(14), 106–114. [In Russian]
7 Aktaev M. R., Lukashenko S. N., Aidarkhanov A. O., Lyakhova O. N. (2017). Kharakter zagryazneniya tritiem vod r. Shagan v rayone «Atomnogo» ozera [Characteristics of tritium contamination in the Shagan river near the «Atomic» lake]. Vestnik NYaTs RK [NNC RK Bulletin], 4(2), 5–8. https://www.nnc.kz/media/bulletin/files/t4iXY1FxQr.pdf [In Russian]
8 Dyusembaeva M. T., Mukhamediyarov N. Zh., Esilkanov G. M., Tashekova A. Zh., Aidarkhanov A. O. (2023). Ekologo-geokhimicheskie osobennosti nekotorykh vodnykh ob''ektov Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona [Ecological and geochemical features of some water bodies of the Semipalatinsk Test Site]. Kurchatov: Intellekt Publishing House. 268 p. [In Russian]
9 Gorlachev I., Kharkin P., Dyussembayeva M., Lukashenko S., Gluchshenko G., Matiyenko L., Zheltov D., Kitamura A., Khlebnikov N. (2020). Comparative analysis of water contamination of the Shagan River at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides. Journal of Environmental Radioactivity, 213, 106110. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106110
10 Tashekova A. Zh., Lukashenko S. N., Koygeldinova M. T., Mukhamediyarov N. Zh. (2016). Kharakteristika elementnogo sostava vody r. Shagan [Characteristics of the elemental composition of Shagan River water]. Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasGAU], (12), 141–146. [In Russian]
11 Yan X., Yang W., Pu Z., Zhang Q., Chen Y., Chen J., Xiang W., Chen H., Cheng Y., Zhao Y. (2025). Responses of typical riparian vegetation to annual variation of river flow in a semi-arid climate region: Case study of China's Xiliao River. Land, 14(1), 198. https://doi.org/10.3390/land14010198
12 Xing J., Wang L., Zhao J., Zhai T. (2024). Hydrochemical variation characteristics and driving factors of surface water in arid areas—a case study of Beichuan River in Northwest China. Frontiers in Environmental Science, 12, 1493390. https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1493390
13 Al-Dabbas M., Al-Shamma'a A., Ghafel K. (2018). Evaluation of Gharraf River water for different uses, South Iraq. Iraqi Journal of Science, 59(3C), 1697–1709. https://doi.org/10.24996/ijs.2018.59.3C.15
14 Xue Y., Song J., Zhang Y., Kong F., Wen M., Zhang G. (2016). Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. Water, 8(8), 328. https://doi.org/10.3390/w8080328
15 Grigor'ev N. A. (2009). Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinental'noi kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN. 383 p. [In Russian]
16 Kulbat E., Sokołowska A. (2019). Methods of assessment of metal contamination in bottom sediments (Case study: Straszyn Lake, Poland). Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 77(3), 465–478. https://doi.org/10.1007/s00244-019-00662-5
17 Liu P., Zheng C., Wen M., Luo X., Wu Z., Liu Y., Chai S., Huang L. (2021). Ecological risk assessment and contamination history of heavy metals in the sediments of Chagan Lake, Northeast China. Water, 13(7), 894. https://doi.org/10.3390/w13070894
18 Zhao S., Li Y., Liu D., Li B., Xiao H., Cheng W., Li A., Chong J. (2016). Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for nutrients and heavy metals in surface sediments from Tangxun Lake, Wuhan, Central China. Nature Environment and Pollution Technology, 15(4), 1417–1425.
19 Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. GeoJournal, 2(1), 108–118.
20 Ostrovsky I., Tęgowski J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. Geo-Marine Letters, 30(3–4), 261–269. https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4
21 Middelburg J. J., Levin L. A. (2009). Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences Discussions, 6(3), 3655–3706. https://doi.org/10.5194/bgd-6-3655-2009
22 Sidoruk M. (2023). Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the bottom sediments: A case study of eutrophic Bukwałd Lake located in an agricultural catchment. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(3), 2387. https://doi.org/10.3390/ijerph20032387
23 Świercz A., Tomczyk-Wydrych I., Bąk Ł. (2022). Quality of bottom sediments of Sołtmany Lake (Masurian Lake District, Poland) in the light of geochemical and ecotoxicological criteria—Case study. Water, 14(13), 2045. https://doi.org/10.3390/w14132045
24 Alieva E., Abdykadyrova R., Totubaeva, N. (2025). Assessment of contamination and accumulation of heavy metals in sediments of Lake Issyk-Kul. Grassroots Journal of Natural Resources, 8(1), 874–893. https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080137
25 Sarker P., Rahaman M. S., Kabir M. M., Al Mamun A., Maruo M. (2021). Evaluation of contamination and accumulation of heavy metals in the Dhaleswari River sediments, Bangladesh. International Journal of Environment, 10(1), 62–75. https://doi.org/10.3126/ije.v10i1.38399
26 Liu C.-Y., Wilson D. J., Hathorne E. C., Xu A., Pogge von Strandmann P. A. E. (2023). The influence of river-derived particles on estuarine and marine elemental cycles: Evidence from lithium isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 361, 183–199. https://doi.org/10.1016/j.gca.2023.08.015
27 Ma Y., Qin X., Pan T., Chen J., Jiang Z., Ding C., Zhang D., Zhang,F., Feng N., Liu C., Li Q., Ren E. (2024). Sedimentary environment and source analysis of sedimentary lithium deposits in Dezong Mahai Salt Lake, Qaidam Basin. Sustainability, 16(23), 10561. https://doi.org/10.3390/su162310561
28 Goldhaber M., Morrison J., Holloway J., Wanty R., Helsel D., Smith D. (2009). A regional soil and sediment geochemical study in northern California. Applied Geochemistry, 24(8), 1482–1499. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.018
29 Langmuir D. (1997). Aqueous environmental geochemistry (601 p.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

ШАҒАН ӨЗЕНІНІҢ ЛАСТАНҒАН УЧАСКЕСІНДЕГІ ТҮП ШӨГІНДІЛЕРІНДЕГІ ХИМИЯЛЫҚ ЭЛЕМЕНТТЕР

Арай Е. Темиржанова[1]*, Жанат А. Байгазинов[2], Нурлан Ж. Мухамедияров[3], Медет Р. Актаев[4], Касым К. Дускаев[1]

[1] әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; temirzhanova.aray@mail.ru, kduskaev@gmail.com
[2] «Ядролық технологиялар паркі» АҚ,. Курчатов, Қазақстан; zh.baigazinov@gmail.com
[3] «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан, nurlan.eventumlab@gmail.com
[4] «Baiterek Engineering» ЖШС, Астана, Қазақстан, medet_aktaev@mail.ru
*Автор корреспондент: Арай Е. Темиржанова, temirzhanova.aray@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

өзен,
ластану,
химиялық элементтер,
түп шөгінділері,
геохимиялық индекс

АБСТРАКТ

Ядролық қару сынақтарынан өткен аудандардағы табиғи су объектілерінің радиоактивті ластану мәселесі бүгінгі күнге дейін өзектілігін сақтап отыр. Осындай объектілердің бірі — Семей ядролық сынақ полигоны аумағында орналасқан Шаған өзені. Ерекше назар «ескі арнаға» аударылады, мұнда ластанған жерасты сулары ашық су ағысына шығатыны анықталған.

Зерттеудің мақсаты - Шаған өзенінің «ескі арнасындағы» түптік шөгінділерде химиялық элементтердің шоғырлану ерекшеліктерін анықтау.

Ғылыми және тәжірибелік маңызы – жергілікті радиациялық ластану жағдайында химиялық элементтердің миграциясы мен аккумуляциясы туралы түсініктерді нақтылау. Алынған деректер ұзақ мерзімді техногендік әсерге ұшыраған өзендердің геохимиялық фонының өзгеру заңдылықтарын айқындап, мониторинг пен экологиялық болжау жүйелерін жетілдіруге негіз болады.

Зерттеу әдістемесі түп шөгінділері үлгілерін далалық жинау, зертханалық талдау (атомдық-абсорбциялық спектрометрия, индуктивті байланысқан плазмалы масс-спектрометрия), статистикалық өңдеу және ГИС-картографияны қамтыды. Шаған өзені түп шөгінділерінің ластану деңгейі геоаккумуляция индексі (Igeo) және элементтердің кларк мәндері бойынша бағаланды.

Нәтижелер бойынша келесі геохимиялық қатарлар анықталды: кейбір элементтердің мөлшері континенттік қыртыстың жоғарғы бөлігінің (Sr>U>Ca) және сазды сланецтердің (Sr>Ca>U>Na>Mg) орташа құрамынан артықшылығы байқалды. Igeo индексі бойынша түптік шөгінділер «ластанбағаннан» «қатты ластанғанға» дейін өзгереді. Li, Mg, K, Fe элементтерінің құрамдық мөлшеріне байлансыты түп шөгінділер ластанбаған сыныпқа тиесілі (0 сынып), Na мен U мөлшері бойынша латсанбағаннан – қалыпты ластанған деңгейге жатады (1 - 2 сынып), ал Ca мен Sr мөлшері бойынша қалыпты ластанғаннан – өте қатты ластанған деңгейге жатады (3 сынып).

Зерттеудің маңыздылығы - радиоактивті ластанған өзен жүйелерінің геохимиялық ерекшеліктері туралы жаңа фактілік материал енгізу және экожүйелер мен адамдар үшін қауіп-қатерді бағалау бойынша кейінгі жұмыстарға база жасау. Алынған нәтижелердің практикалық мәні - оларды табиғатты қорғау шараларын ұйымдастыруда және ұзақ мерзімді экологиялық мониторингте қолдануға мүмкіндік беруінде.

Мақала жайында:
Жіберілді: 30.09.2025
Қайта қаралды: 03.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

CHEMICAL ELEMENTS IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE POLLUTED SECTION OF THE SHAGAN RIVER

Aray Temirzhanova[1], Janat Baigazinov[2], Nurlan Mukhamediyarov[3], Medet Aktayev[4], Kasym Duskayev[1]

[1] Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; temirzhanova.aray@mail.ru, kduskaev@gmail.com
[2] JSC «Park of Nuclear Technologies», Kurchatov, Kazakhstan, zh.baigazinov@gmail.com
[3] NJSC «Shakarim University», Semey, Kazakhstan,nurlan.eventumlab@gmail.com
[4] LLC «Baiterek Engineering», Astana, Kazakhstan, medet_aktaev@mail.ru
* Corresponding author: Aray Temirzhanova, temirzhanova.aray@mail.ru

KEY WORDS

river,
pollution,
chemical elements,
bottom sediments,
geoaccumulation index

ABSTRACT

The issue of radioactive and chemical pollution of natural water bodies remains relevant in regions affected by nuclear weapons testing. One such object is the Shagan River, located within the Semipalatinsk Test Site. Of particular concern is the «old channel», where contaminated groundwater and fracture water discharge into the surface flow.

The aim of this study is to identify the patterns of chemical element accumulation in the bottom sediments of the «old channel» of the Shagan River.

About article:
Received: 30.09.2025
Revised: 03.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

The scientific significance lies in clarifying migration and accumulation processes of chemical elements under conditions of localized radioactive contamination. The results provide insights into the transformation of the geochemical background in rivers exposed to long-term technogenic impact, supporting the development of monitoring and forecasting systems.

The methodology included field sampling, laboratory analyses (atomic absorption spectrometry, inductively coupled plasma mass spectrometry), statistical data processing, and GIS-based mapping. Contamination of bottom sediments was assessed using the geoaccumulation index (Igeo) and comparison with Clarke values.

The results showed geochemical series indicating elevated element concentrations in the upper continental crust (Sr > U > Ca) and clay shales (Sr > Ca > U > Na > Mg). According to Igeo, bottom sediments of the Shagan River ranged from unpolluted to heavily polluted: Li, Mg, K, and Fe corresponded to class 0, Na and U to classes 1–2 (unpolluted to moderately polluted), while Ca and Sr fell into class 3 (moderately to heavily polluted).

This study contributes new empirical data on the geochemical characteristics of radioactively contaminated river systems and establishes a basis for further research on ecological and human health risks. The findings also have practical value for environmental protection and the development of long-term monitoring programs.

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

АНАЛИЗ БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОСАДКОВ В ШУ-ТАЛАССКОМ БАССЕЙНЕ (КАЗАХСТАН)

Жанар К. Наурозбаева*PhD, Гульсара Е. Монкаева, Макпал А. Жунисова, Еркебулан Е. Белдеубаев, Нурканат Е. Рахматулла, Жулдыз Х. Кенжина

[1] АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru (ЖКН), gulsara.monkayeva@mail.ru (ГЕМ), makpal80@mail.ru (МАЖ), kenzhina03@mail.ru (ЖХК), nurkanat.rakhmatulla@mail.ru (НЕР)
Автор корреспондент: Жанар К. Наурозбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Шу-Таласский бассейн, ансамбль моделей CMIP6, сценарии климата SSP3-7.0, SSP5-8.5, температура воздуха, атмосферные осадки

АБСТРАКТ

Проведен анализ ожидаемого изменения температуры воздуха и атмосферных осадков Шу-Таласского бассейна до конца XXI века по ансамблю климатических моделей CMIP6 на основе данных Интерактивного атласа МГЭИК. В казахстанской части Шу-Таласского бассейна в период 2021…2040 гг. ожидается что среднегодовая температура повысится на 1.4…1.7 °C, осадки увеличатся на 3…7 %. В среднесрочной перспективе (2041…2060 гг.) потепление составит 2.4…3.0 °C, а прирост осадков достигнет 6…12 % по сценарию SSP3-7.0. В долгосрочной перспективе 2081…2100 гг. при сценарии SSP3-7.0 температура вырастет на 4.5…5.0 °C, а при SSP5-8.5 до 6.0…6.5 °C, осадки могут возрасти на 15…23 %. Эти изменения будут способствовать росту межгодовой изменчивости и трансформации гидрологического режима региона. Научная значимость работы позволит расширить представление о региональных проявлениях глобального потепления в Центральной Азии, а практическая значимость позволит использовать результаты для адаптации от изменения климата в водохозяйственном и аграрном секторе.

По статье:
Получено: 24.09.2025
Пересмотрено: 06.10.2025
Принято: 07.10.2025
Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Шу-Таласский бассейн, расположенный на территории Кыргызстана и Казахстана, представляет собой важный трансграничный водный объект. Его гидрологическое и климатическое состояние оказывает значительное влияние на водную безопасность региона, сельское хозяйство и экосистемы [1]. Шу-Таласский бассейн сформирован реками Шу, Талас и Аса, его площадь – 64,3 тыс. км² (часть территории находится в Кыр-гызстане). В казахстанской части на территории Жамбылской области проживают 980 тыс. человек [2].

Поверхностный сток Шу-Таласского бассейна составляет 6.11 км³, что в 3.6 раза меньше, чем в Арало-Сырдарьинском бассейне. Подземные сток составляет около 1.65 км³, это 27 % от общего объёма, что также больше, чем в Арало-Сырдарьинском бассейне. Из поверхностных источников – 59 % приходится на реки, 8 % - на водохранилища, 6 % – на озёра. Около 73 % территории бассейна занимают пустыни и полупустыни, 14 % – горные отроги Тянь-Шаня, 13 % предгорные степи, которые считаются наиболее ценными для сельского хозяйства. В бассейне рек Шу и Талас насчитывается 204 малых рек (140 из них в бассейне Шу, 20 – Таласа, 64 – Асы), 35 озёр и 3 крупных водохранилища. На территории Кыргызстана расположены Орто-Токойское (0.42 км³) и Кировское (0.55 км³) водохранилища. Сток рек Шу, Талас и Асы полностью зарегулирован и используется преимущественно для ирригации [3].

Таким образом, Шу-Таласский бассейн характеризуется как бассейн который аккумулирует основную влагу в высокогориях для засушливых предгорных равнин,

Для цитирования:

Наурозбаева Ж., Монкаева Г., Жунисова М., Бельдеубаев Е., Кенжина Ж., Рахматулла Н. Анализ будущих изменений температуры и осадков в Шу-Таласском бассейне (Казахстан)// Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 205-2020.

что определяет его водные ресурсы и их неравномерное распределение во времени и пространстве.

Исследование гидрометеорологических условий бассейна актуально в контексте изменения климата, роста антропогенной нагрузки и трансграничного водопользования [4]. Несмотря на то, что Шу-Таласский бассейн неоднократно становился объектом научных исследований, необходимость комплексного изучения влияния географических особенностей территории на формирование его водных ресурсов остаётся высокой. Шу-Таласский бассейн расположен на стыке горных и равнинных территорий, со сложной орографией и гидро-климатическими условиями [4]. Горные районы обеспечивают основное питание рек за счёт снега и ледников, в то время как равнинные территории испытывают дефицит влаги. Это создает сильную пространственную неоднородность распределения водных ресурсов, требующую детального анализа. На водный режим рек непосредственное влияние, из природно-естественных факторов, оказывают количество выпадающих атмосферных осадков, состояние снежного покрова и степень оледенения, испаряемость, а также характер почвенно-растительного покрова [5]. В условиях глобального потепления изменения в ледниковом питании, режимах снеготаяния и частоте экстремальных осадков особенно остро проявляются в бассейнах с выраженной орографией. Шу-Таласский бассейн – именно такой регион, где географические особенности делают систему крайне чувствительной к изменениям климата [6]. Кроме того, воды бассейна являются источником для орошения, энергетики и водоснабжения около 3 млн человек. По-нимание факторов, влияющих на формирование стока необходимо для прогностической информации в целях водной безопасности региона, устойчивого развития и предотвращения конфликтов вододеления [7].

Таким образом, целью данного исследования является анализ современного климатического состояния Шу-Таласского бассейна и оценка изменения климата на перспективу на основе интерактивного атласа МГЭИК.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных были использованы сведения метеорологических станции применяемых для мониторинга наблюдении в РГП «Казгидромет», которые представлены в таблице 1. А также использовались климатические данные: 1) ряды суточных и месячных значении температуры воздуха и атмосферных осадков за период с 1961 по 2023 гг.[8], 2) сценарные данные были взяты по данным из портала МГЭИК [9].

Первые метеорологические станции на казахстанской территории Шу-Таласского бассейна открыты в основном в период с 1870 по 1950 годы. В настоящее время на его территории действует 11 метеорологических станций (таблица 1).

На рисунке 1 представлена карта расположении метеорологических станции Шу-Таласского бассейна на территории Казахстана. Шу-Таласский бассейн занимает большую часть Жамбылской области, на западе граничит с Туркестанской областью, а на востоке с Алматинской областью, на севере граничит с Карагандинской и Улытауской областью.

Метеостанции Шу-Таласского бассейна расположены в основном в равнинной местности, 6 станции из 11 расположены на высотах до 500 м н.у.м, 4 станции расположились на возвышенно- равнинной территории и лишь 1 станция Кордай в предгорной зоне (таблица 1).

При формировании базы данных проведены проверки на однородность суточных данных с помощью программы RHtestV4 [10], на примере двух станции Шу-Таласского бассейна (Кордай, Мойынкум) представлена проверка на однородность, а в последующем суточные данные собраны при помощи сводных таблиц в месячные ряды, согласно которым уже проведены статистические расчеты (коэффициент линейного тренда, коэффициент детерминации). В программе RHtestV4 для оценки

однородности эмпирических рядов метеорологических параметров используются критерии Стьюдента и Фишера [11].

Таблица 1

Основные сведения о метеорологических станциях Шу-Таласского бассейна

№	Название станции	Широта	Долгота	Период наблюдений	Высота, м
1	Кордай	43°19'17.08"	74°55'48.05"	1939…2023	1141
2	Кулан	42°55'09.61"	72°43'50.42	1931…2023	682
3	Мойынкум	44°16'29.29"	72°56'50.93"	1929…2023	351
4	Саудакент	43°44'41.25"	69°55'54.85"	1936…2023	337
5	Тараз	42°52'03.57"	71°17'36.75"	1870…2023	651
6	Толе би	43°41'45.00"	73°44'51.45"	1950…2023	455
7	Уюк	43°46'38.23"	70°57'01.95"	1931…2023	373
8	Хантау	44°13'44.06"	73°48'26.43"	1960…2023	552
9	Шокпар	43°49'02.01"	74°22'16.47"	1931…2023	769
10	Тасты	44°47'60"	69°09'33"	1948…2023	192
11	Шолаккорган	43°45'15"	69°10'15"	1935…2023	480

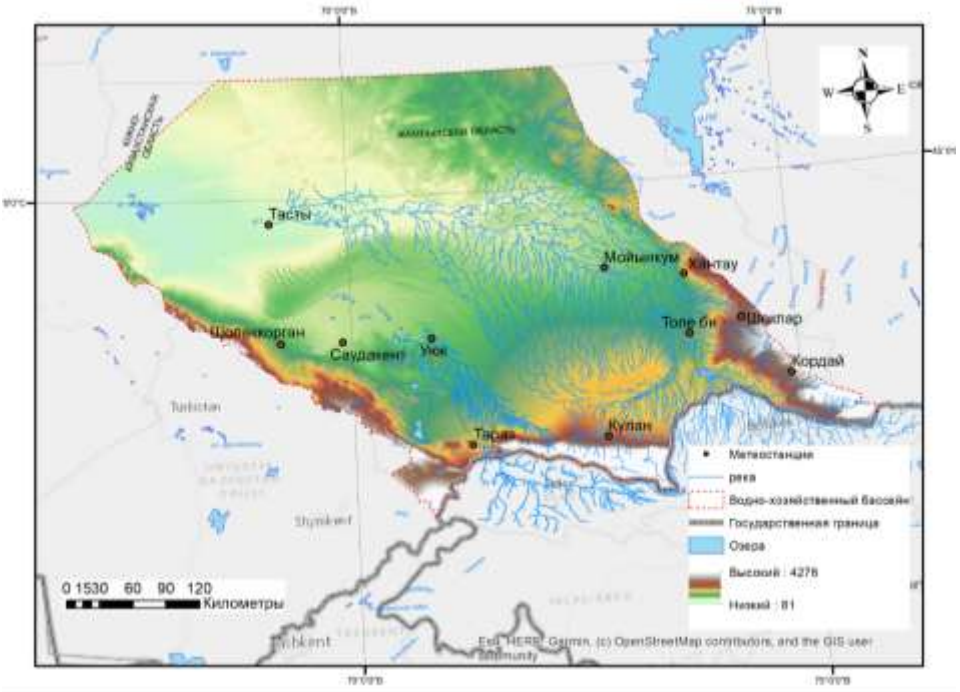


Рисунок 1. *Карта расположении метеорологических станции казахстанской части Шу-Таласского бассейна*

На рисунке 2 представлены результаты проверки на однородность месячных рядов максимальной температуры воздуха по станции Кордай в виде графиков временного хода. Станция Кордай представлена в качестве примера проверки на однородность рядов, в связи с тем, что это предгорная станция, а в горной местности в основном могут возникнуть условия не стационарности климатических условии. На рисунке 3 представлена проверка на однородность данных уже по равнинной станции Мойынкум.

а б

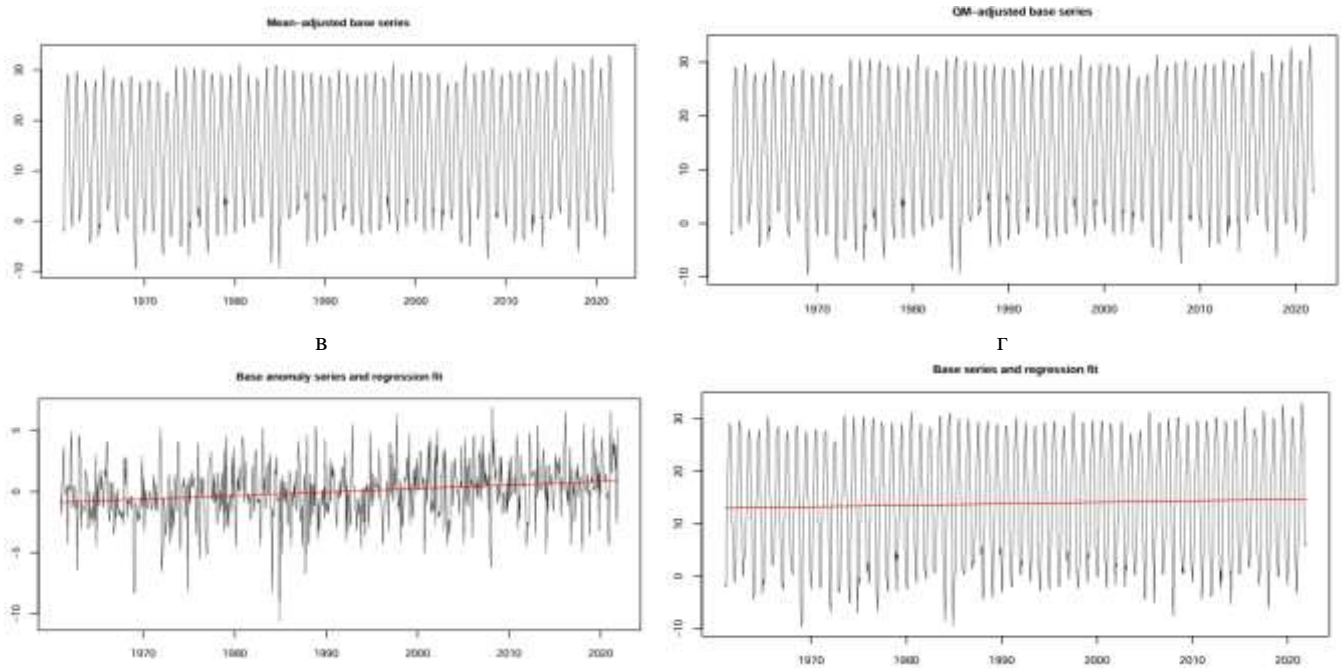


Рисунок 2. *Графики временного хода месячных данных максимальной температуры воздуха по станции Кордай за период 1961…2023 годы, где а – ряды среднего значения максимальной температуры; б - ряд после применения корректировки квантильного соответствия (QM); в - исходный ряд аномалий Tmax относительно среднего за 1961…1990 базовый период; г - временной ряд и регрессионная проверка*

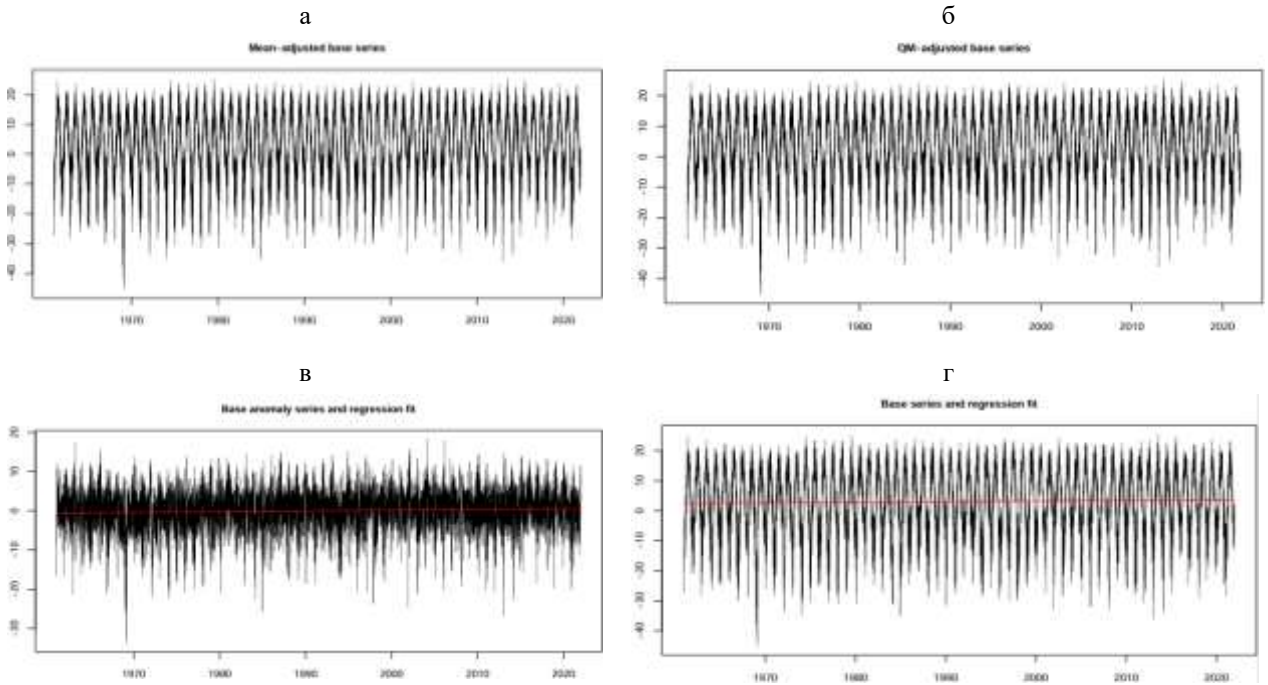


Рисунок 3. *Графики временного хода месячных данных минимальной температуры воздуха по станции Мойынкум за период 1961…2023 годы, где а - базовый ряд, скорректированный по средней минимальной температуре ; б - ряд после применения корректировки квантильного соответствия (QM); в - исходный ряд аномалий Tmin относительно среднего за 1961…1990 базовый период; г - временной ряд и ее регрессионная проверка*

Аналогично представленным примерам, были проверены и все другие станции казахстанской части Шу-Таласского бассейна. В ходе проверки на однородность, можно сказать, что ряды суточных и месячных наблюдений станции Шу-Таласского

бассейна имеют однородный ряд, как таковых выраженных сдвигов в рядах температуры воздуха не обнаружено.

Согласно проведенной проверке на однородность (рисунок 2), можно сказать, что в месячных данных Tmax отсутствуют структурные сдвиги в наблюдениях, видно, что с конца 1990-х годов наблюдается устойчивое повышение значений максимальной температуры, указывающее на потепление. Линия регрессии показывает положительный тренд, но без резких скачков, что указывает на относительную однородность временного ряда.

Согласно рисунку 3 видно, что наблюдается тенденция к повышению минимальных температур после 1990-х гг., а отдельные колебания связаны с природной межгодовой изменчивостью, но без резких скачков. Различия с исходным рядом минимальны, что подтверждает отсутствие системных ошибок или неоднородностей. В рядах отсутствуют статистически значимые разрывы, что указывает на однородность данных.

Для оценки будущих значений таких метеорологических элементов как температура и атмосферные осадки были использованы климатические модели, разработанные МГЭИК, то есть в работе применены данные ансамблей 34 моделей, список моделей представлен в таблице 2 [12]. По рекомендациям МГЭИК использовались периоды:

1) 2021…2040 годы, которые определяются как среднесрочный прогноз, он позволяет оценить ближайшие изменения климата;

2) 2041…2060 годы или долгосрочный прогноз, который подходит для анализа устойчивых трендов и для оценки будущих сценариев изменения климата;

3) период 2080…2100 или конец XXI века, который используется для стратегического планирования и оценки сценариев глобального потепления [9]. Общее количество моделей, которые использовались в CMIP6 более 30 [12].

Ансамблевый подход выбран потому, что он используется во множествах климатических моделях (например, CMIP6) для построения усреднённого и статистически устойчивого прогноза, ведь такой подход позволяет учесть неопределённости, связанные с физическими параметризациями, разрешением, сценариями эмиссий и локальными особенностями региона. Преимущества ансамблевого подхода в том, что использование ансамбля моделей позволяет компенсировать ошибки и смещения отдельных моделей. Среднее значение по ансамблю (ensemble mean) сглаживает экстремальные отклонения и даёт более устойчивую оценку тенденций изменения климата.

Ансамбль моделей позволяет определить не только «средний сценарий», но и диапазон возможных климатических изменений (например, минимальные и максимальные значения температуры и осадков), что особенно важно при разработке адаптационных стратегий для Казахстана, где климатические контрасты крайне выражены. Разные модели используют различные параметризации атмосферных и океанических процессов. Совокупное использование множества моделей даёт более полную физическую картину климата и позволяет выявить устойчивые закономерности, наблюдаемые в независимых моделях. При усреднении ансамбля исключается влияние специфических ошибок моделей, плохо воспроизводящих, например, влияние орографии Тянь-Шаня или континентальности климата, что делает прогнозы по Центральной Азии более реалистичными.

К примеру в 7-м Национальном сообщений, а также в 8-м Национальном сообщений РК и в 4-5-м Двухгодичных докладах Республики Казахстан Рамочной Конвенции ООН об Изменении Климата применены ансамблевые подходы оценки ожидаемого изменения климата для территорий Казахстана[13…14], но количество применяемых ансамблей в них было более 21 моделей. Верификация и проверки на погрешности моделей CMIP6 проведены во многих работах, в таких исследованиях

как [15…17], которые приводят, что ансамбль моделей CMIP6 в целом лучше воспроизводит оценку ожидаемых изменений чем предыдущие версии CMIP4 и CMIP5.

Таблица 2

Основные климатические модели CMIP6 и их ключевые характеристики

№	Название модели, страна	Описание климатической модели
1	ACCESS-CM2 (Australia)	Австралийская общая климатическая модель (усовершенствованная атмосфера и океан), применяется для региональных и глобальных сценариев.
2	ACCESS-ESM1-5 (Australia)	модель системы Earth System от CSIRO/BoM с биогеохимическими компонентами (углеродный цикл).
3	AWI-CM-1-1-MR (Germany)	модель Alfred Wegener Institute с высокой разрешающей способностью океана и атмосферы, ориентирована на океанические и полярные процессы.
4	BCC-CSM2-MR (China)	модель Beijing Climate Center с улучшенной атмосферной динамикой и средней пространственной детализацией.
5	CAMS-CSM1-0 (China)	модель Центра атмосферных и экологических исследований Китая; интегрирует атмосферную химию и климат.
6	CanESM5 (Canada)	модель Канадского центра климатических исследований с полной системой океан–атмосфера и биогеохимией.
7	CAS-ESM2-0 (China)	Earth System Model Китайской академии наук; включает углеродную и химическую схемы.
8	CESM2 (USA)	Community Earth System Model (NCAR), универсальная ESM с детальной биофизикой и химией атмосферы.
9	CESM2-WACCM (USA)	версия CESM2 с детализацией верхней атмосферы (Whole Atmosphere Community Climate Model).
10	CIESM	новая китайская модель, ориентированная на океанические процессы
11	CMCC-CM2-SR5 (Italy)	модель CMCC с усовершенствованным океанским компонентом и сезонным/среднесрочным разрешением (SR = seasonal/resolution).
12	CMCC-ESM2 (Italy)	модель Earth System от CMCC с биогеохимическими циклами.
13	E3SM-1-1 (USA)	Energy Exascale Earth System Model (US DOE) — фокус на процессах суши-океана и физике облаков.
14	E3SM-1-1-ECA (USA)	ветвь E3SM с улучшенной динамикой и параметризацией аэрозолей/облаков.
15	EC-Earth3 (Europe / consortium)	европейская модель (EC-Earth consortium) с переносом ECMWF/IFS компонент, ориентирована на многофункциональные климатические исследования.
16	EC-Earth3-Veg (Europe)	вариант EC-Earth с продвинутой биофизикой вегетационных условии для суши.
17	FGOALS-f3-L (China)	китайская модель FGOALS (лед/океан/атмосфера) с акцентом на океанскую компоненту.
18	FGOALS-g3 (China)	одна из конфигурации модели FGOALS с отличиями в океанической и морской ледовой модулях.
19	FIO-ESM-2-0 (China)	Earth System Model от First Institute of Oceanography (FIO), включает океанские процессы и биогеохимию.
20	GFDL-CM4 (USA)	климатическая модель Геофизической факультета прогнозов океана и атмосферы (GFDL), с модернизированной атмосферой/океаном.
21	GFDL-ESM4 (USA)	вариант GFDL с расширенной системой биогеохимических циклов (Earth System).
22	INM-CM4-8 (Russia)	модель Института атмосферной физики и климатологии (INM) с особенностями для регионального климата Евразии.
23	INM-CM5-0 (Russia)	следующая версия INM с улучшенной физикой атмосферы/океана.
24	IPSL-CM6A-LR (France)	модель IPSL (Institute Pierre-Simon Laplace), LR — низкое разрешение; сильна в химии атмосферы и океаники.

25	KACE-1-0-G (Korea)	модель Корейского метеоцентра (Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems / KMA) с национальным развитием атмосферы/океана.
26	MIROC6 (Japan)	модель Университета Тохоку/Кёдо (MIROC) с балансом атмосфера-океан и хорошей региональной проработкой Азии.
27	MPI-ESM1-2-HR (Germany)	высокоразрешающая версия Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM).
28	MPI-ESM1-2-LR (Germany)	низкоразрешающая конфигурация MPI-ESM; широко используется в мульти-модельных ансамблях.
29	MRI-ESM2-0 (Japan)	модель Meteorological Research Institute (MRI) с акцентом на атмосферную физику и экстремы.
30	NESM3 (China / Korea consortium)	North-East model system (в инвентарях встречается как NESM3) — модель описывает региональные особенности для Северо-Восточной Азии.
31	NorESM2-LM (Norway)	Norwegian Earth System Model, LM — низкоразрешающая версия, сильна в океанских и полярных процессах.
32	NorESM2-MM (Norway)	версия с другим океаническим решением (multimodel / medium-resolution).
33	IPS L-CM5A2-INCA	новые ветви французской модели IPSL
34	TaiESM1 (Taiwan)	модель Тайваньского института

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Климатические условия бассейна контрастны: горные районы отличаются прохладным и влажным климатом с годовым количеством осадков до 800…1000 мм, тогда как равнинные и предгорные территории характеризуются засушливостью (200…300 мм осадков в год). Среднегодовые температуры изменяются от +6…+8 °С в предгорьях до −2…−4 °С в высокогорьях [18].

Лето в Шу-Таласском бассейне преимущественное жаркое, средняя температура июля в пределах от 21 до 25 °С, максимальные температуры достигали 45…48 °С. Средняя температура января составляет −8...−12 °С в северной части Шу-Таласского бассейна, а на южной части бассейна температуры января составляют −4...−7 °С. Зимой на южные части проникают арктические воздушные массы, которые и вызывают сильные морозы, достигающие редко до −45 или −50 °С (абсолютный минимум). Период, когда средняя суточная температура воздуха выше 0 °С довольно продолжителен, к примеру, на северной части бассейна он составляет 240…250 дней, в центральных районах 260…270 дней. В целом осадков в области выпадает мало, особенно на равнинной территории около 140…220 мм/год. Малое количество осадков – 135 мм/год отмечается на северо-востоке бассейна, в сторону побережья оз. Балхаш. В предгорных районах количество осадков увеличивается до 210…330 мм. В горных районах Кыргызского Алатау выпадает около 400…500 мм осадков. Распределение осадков по сезонам неравномерное, большая часть их приходится на зимне-весенний период. Направление ветра по всей территории бассейна преобладает восточное и северо-восточное, и только на юге преобладают ветры южного и юго-восточного направления, средняя скорость ветра в бассейне 2.5…3.5 м/с [18].

На рисунке 4 представлены временные ряды аномалии сезонных температур воздуха и атмосферных осадков осредненных по казахстанской части территории Шу-Таласского бассейна за период 1961…2023 гг., линейный тренд аномалий рассчитан относительно периода 1976…2023 гг., аномалии рассчитаны относительно базового периода 1991…2020 гг.

Зима

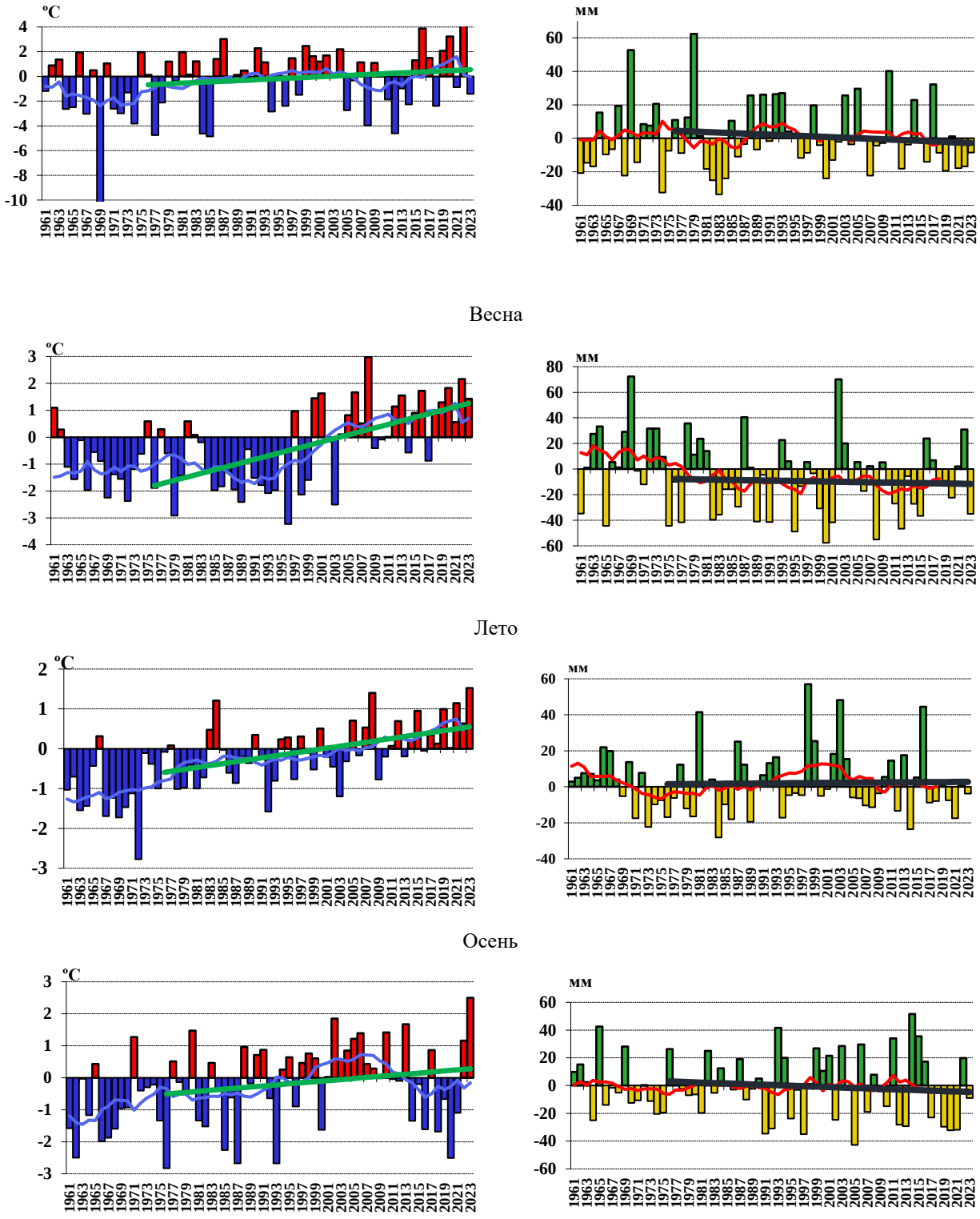


Рисунок 4. *Временные ряды аномалий сезонной температуры и осадков в казахстанской части Шу-Таласского бассейна (1961…2023 гг.) с линейным трендом рассчитанным за 1976…2023 гг.*

Во все сезоны наблюдается устойчивая положительная тенденция аномалий температуры. Тренд особенно заметен весной и осенью, более умеренный наблюдается зимой и летом.

Аномалии осадков показывают высокую межгодовую изменчивость и сезонно-различия, но в целом видна тенденция к уменьшению осадков в холодно-тёплый переходный период (весна) и частично - летом; зима и осадки остаются более

переменными (локальные положительные выбросы), но общий тренд осадков по результатам рисунка выглядит слабее выраженным, чем тренд температуры [19].

Зимой отрицательные аномалии наблюдались в период 1960…1980 гг., а рост положительных аномалий фиксируется в последние 30 лет, линейный тренд положительный. Потепление в зимний период связано с глобальными процессами в атмосфере, а также региональными изменениями циркуляции.

В последние годы наблюдаются ослабления влияния Сибирского антициклона, холодные арктические воздушные массы часто не доходят до южных регионов Казахстана - подобные изменения имеют существенное влияние на термический режим Шу-Таласского бассейна [20].

Весенний период отличается заметной положительной динамикой температуры: переход от преимущественно отрицательных аномалий в середине XX века к устойчиво положительным после ~1990…2000 гг. Кроме того, с начала текущего века увеличивается повторяемость раннего схода снежного покрова весной, даты перехода температуры воздуха через 0 °C, 10 °C весной смещаются на более ранние даты [21].

Летний период также отмечается положительным трендом, но в отличие от весеннего и осеннего периодов амплитуда аномалий меньше. Атмосферные осадки отмечаются небольшим трендом к уменьшению. Стоит отметить, что летний период характеризуется ярким проявлением увеличения температуры воздуха и снижении выпадения осадков на потенциальную испаряемость в регионе, так, даже при незначительном колебании этих параметров может наблюдаться усиление дефицита воды.

Осенью, как и весной, фиксируются положительные тренды в ходе термического режима, но осадки проявляют некоторое снижение.

В таблице 3 представлены характеристики линейного тренда температуры воздуха осредненных за период 1986…2023 гг., данный период взят потому, что он совпадает с современной климатической нормой и позволяет отразить последние 3…4 десятилетия, когда глобальное потепление усилилось. С середины 1980-х годов на региональном уровне фиксируется явный переход от преобладания отрицательных аномалий температуры (холодных лет) к устойчивому тренду положительных аномалий. Это подтверждается данными и по Центральной Азии, и по Казахстану в целом. А также период с конца 1980-х годов совпадает с резким ускорением глобальных выбросов CO_2 и других парниковых газов.

Согласно таблице 3, годовые тренды для всех станций показывают положительный рост температуры воздуха (0.2…0.5 °C/10 лет), что подтверждает устойчивое потепление в последние десятилетия. Наиболее значительный рост отмечен на станции Тасты (0.5 °C/10 лет), минимальный – на станции Хантау (0.2 °C/10 лет). Значения коэффициента детерминации (R^2) от 15 до 40 % указывают на статистическую значимость тренда. Зимой тренды близки к нулю (0.0…0.3 °C/10 лет) с очень низким R^2. Весной регистрируется умеренный рост (0.6…1.1 °C/10 лет). Высокие R^2 (35…47 %) говорят о значимости весеннего тренда. Летом во всех пунктах фиксируется рост от 0.3 до 0.5 °C/10 лет с достаточно высокими коэффициентами детерминации, что указывает на вероятное увеличение продолжительности жаркого периода. Осенью незначительный рост – 0.0…0.2 °C/10 лет, в отдельных случаях отрицательные значения, как в Хантау −0.1 °C/10 лет. Осенний период наиболее нестабильный сезон.

Таблица 3

Характеристики линейного тренда температуры воздуха осредненных по казахстанской территории Шу-Талассского бассейна за период 1986…2023 гг.

Станция	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2
Кордай	0,4	38,52	0,0	0,01	1,0	47,23	0,5	41,84	0,1	0,42
Кулан	0,4	37,38	0,3	2,32	0,9	47,70	0,4	33,31	0,2	3,16
Мойынкум	0,3	22,81	0,0	0,00	0,9	41,36	0,3	28,56	0,1	0,72
Саудакент	0,3	14,37	0,0	0,00	0,9	40,79	0,2	10,69	0,0	0,04
Тараз	0,3	32,40	0,3	2,72	0,6	35,46	0,3	26,56	0,1	1,86
Толе би	0,3	0,30	0,0	0,00	0,8	0,80	0,4	0,40	0,0	0,00
Уюк	0,4	24,95	0,0	0,00	1,0	43,45	0,4	44,22	0,1	0,87
Хантау	0,2	9,05	−0,3	1,92	0,8	35,75	0,3	25,79	−0,1	0,98
Шокпар	0,3	22,47	−0,1	0,85	0,9	40,68	0,4	32,75	0,0	0,03
Тасты	0,5	30,95	0,3	1,33	1,1	41,57	0,4	30,31	0,2	2,27
Шолаккорган	0,4	25,59	0,1	0,04	1,0	44,35	0,4	32,08	0,1	0,70

Примечание: a – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет, R^2 – коэффициент детерминации, %

В таблице 4 представлены характеристики линейного тренда атмосферных осадков осредненных по казахстанской территории Шу-Талассского бассейна за период 1986…2023 гг.

Таблица 4

Характеристики линейного тренда атмосферных осадков осредненных по казахстанской территории Шу-Талассского бассейна за период 1986…2023 гг.

Метеостанция	Год		Зима		Весна		Лето		Осень	
	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2	a	R^2
Кулан	-1,4	0	-1,2	0	4,9	1	-6,3	5	0,8	0
Кордай	-33,6	9	-3,2	1	-7,9	2	-12,7	10	-9,1	5
Мойынкум	-0,9	0	-0,9	0	0,2	0	0,3	0	-0,9	0
Уюк	-17,3	14	-6,4	13	-4,8	4	-1,7	2	-4,0	4
Жамбыл	-8,8	2	-3,8	1	2,7	0	-2,7	1	-4,5	2
Саудакент	-3,5	0	-1,2	0	0,4	0	-0,8	0	2,3	1
Шокпар	-17,2	7	-5,5	6	-0,6	0	-2,1	1	-5,7	4
Шолаккорган	-1,3	0	-3,3	4	2,9	1	-3,5	5	2,4	1
Тасты	6,9	3	-0,2	0	7,0	11	0	0	1,2	0
Жетысай	-16,9	6	-10,7	9	-2,9	0	-1,5	2	1,3	0
Кызылкум	-5,8	3	-3,4	5	-5,0	5	-0,9	1	2,6	4
Толе би	9,5	2	-0,1	0	7,1	6	-0,9	0	3,4	1
Хантау	3,8	0	-0,1	0	1,8	0	2,9	3	-0,3	0
Чиганак	6,7	3	0,7	0	1,6	1	2,1	2	2,0	2

Примечание: a – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет, R2 – коэффициент детерминации

Согласно таблице 4 на большинстве станций отмечается отрицательный годовой тренд (уменьшение осадков), особенно заметно в Кордай (−33.6 мм/10 лет), Уюк (−17.3 мм/10 лет), Шокпар (−17.2 мм/10 лет), Жетысай (−16.9 мм/10 лет). На отдельных пунктах фиксируются положительные значения (Тасты +6.9 мм/10 лет, Толе би +9.5 мм/10 лет, Чиганак +6.7 мм/10 лет), но они не являются

доминирующими. Зимой в ряде станций сокращение зимних осадков (например, Уюк −6.4 мм/10 лет, Жетысай −10.7 мм/10 лет), что может быть связано с изменением циркуляционных процессов. Весной отрицательные тренды на большинстве станций (Кордай −7.9 мм/10 лет, Кызылкум −5 мм/10 лет), что указывает на снижение весеннего увлажнения — критически важного для аграрного сектора. Летом часть станций показывает положительные тренды (Тасты +7 мм/10 лет, Толе би +7.1 мм/10 лет), но для большинства тенденции отрицательные или слабые. Осенью наблюдается сильное уменьшение осадков в Кордай (−9.1 мм/10 лет), Шокпар (−5.7 мм/10 лет), но есть и положительные значения (Кызылкум +2.6 мм/10 лет, Шолаккорган +2.4 мм/10 лет).

Таким образом, из вышеизложенного следует, что за период 1986…2023 гг. в Шу-Таласском бассейне чётко проявляется потепление приземного воздуха, которое наиболее выраженно весной и летом (+0.8...1.1 °C/10 лет). Зимние и осенние тренды температуры слабо выражены и имеют низкую статистическую значимость.

Осадки, в свою очередь, демонстрируют преимущественно отрицательный тренд, особенно в зимне-весенний сезон (−5…−15 мм/10 лет в ряде станций). В целом фиксируется усиление аридизации климата бассейна: рост температуры в сочетании с сокращением весенних осадков создаёт угрозу дефицита воды для сельского хозяйства и водных ресурсов региона.

Для формирования научной основы по разработке мер адаптации к климатическим изменениям в будущем в водохозяйственном секторе и предотвращения дефицита водных ресурсов были использованы данные ансамблей указанных ранее климатических моделей (таблица 2) для выявления изменений среднегодовой температуры воздуха (°C) и годовых сумм осадков (%) для выбранного региона по трём временным промежуткам: 2021…2040, 2041…2060 и 2081…2100. В работе представлены результаты только двух сценариев климатического воздействия, которые наиболее вероятны в ближайшем будущем: SSP3-7.0 (умеренно-высокий) и SSP5-8.5 (высоко-эмиссионный). Рассматривать сценарий SSP1-2.6 и SSP2-4.5, является не актуальным, так как данные сценарий не является приоритетными, поскольку они отражают маловероятные условия устойчивого мирового развития в будущем, не соответствующие текущим социально-экономическим тенденциям Казахстана и Центральной Азии. Их использование может привести к заниженной оценке будущих климатических рисков и ослаблению эффективности адаптационных мер.

Согласно данным таблицы 5, на всех станциях исследуемого региона ожидается рост среднегодовой температуры. По сценарию SSP5…8.5 отмечается ярко выраженный рост. Так, для станции Кордай увеличение температуры составляет: +1.4 °C (2021…2040), +2.4 °C (2041…2060), +4.8 °C (2081…2100) при SSP3-7.0 и +1.7; +3.0; +6.2 °C при SSP5-8.5 соответственно. Подобная динамика характерна для всех перечисленных станций (Кулан, Мойынкум, Саудакент, Тараз и др.).

Сценарий SSP3-7.0 показывает умеренное увеличение годовых сумм осадков в пределах +2…+8 % к концу XXI в., причём более крупные относительные приросты до 6…8 % будут наблюдаться в некоторых пунктах уже в среднесрочной перспективе. SSP5-8.5 показывает существенно сильные изменения: на некоторых станциях к периоду 2081…2100 ожидаются увеличения, достигающие от 18 до 23 % (например, Хантау +23.3 %, Мойынкум +22.6 %). Для периода 2021…2040 гг. прирост осадков при SSP5-8.5 также выше, до +5...7 % по сравнению с SSP3-7.0. Ввиду небольшой территориальной площади региона и относительной близости расположения станций, наблюдается относительное сходство трендов: рост температуры происходит почти одинаково по всем точкам, а изменения осадков имеют те же направления (как правило – увеличение), но различаются по величине к концу 21 века, причём

максимальные проценты при SSP5-8.5 концентрируются в ряде пунктов (Мойынкум, Хантау, Шокпар и др.).

Таблица 5

Ожидаемое изменение среднегодовой температуры воздуха и сумм атмосферных осадков по сценариям SSP3-7.0, SSP5-8.5 рассчитанная относительно базового периода 1981…2010 гг. на перспективу за периоды: 1- 2021…2040, 2- 2041…2060 и 3- 2081…2100 гг.

Станция	Среднегодовая температура воздуха, °С			Среднегодовая сумма атмосферных осадков, %		
	2021…2040	2041…2060	2081…2100	2021…2040	2041…2060	2081…2100
сценарий SSP3-7.0						
Кордай	1.4	2.4	4.8	3.3	7.4	7.7
Кулан	1.4	2.4	4.8	3.0	5.9	5.9
Мойынкум	1.5	2.5	4.9	2.6	6.8	4.8
Саудакент	1.4	2.4	4.8	2.9	4.8	4.8
Тараз	1.4	2.4	4.8	2.5	4.7	3.9
Толе би	1.4	2.4	4.8	2.9	6.8	7.4
Уюк	1.4	2.4	4.7	2.8	4.8	4.8
Хантау	1.5	2.5	4.9	2.6	7.1	5.0
Шокпар	1.4	2.4	4.8	3.3	7.7	7.7
Тасты	1.5	2.5	4.9	2.1	4.8	4.8
Шолаккорган	1.4	2.4	4.8	2.9	4.8	4.8
сценарий SSP5-8.5						
Кордай	1.7	3.0	6.2	6.8	11.6	21.3
Кулан	1.7	3.0	6.3	6.0	10.7	18.1
Мойынкум	1.8	3.1	6.4	7.4	12.2	22.6
Саудакент	1.7	3.0	6.2	5.9	10.5	18.7
Тараз	1.7	3.0	6.2	5.7	10.9	17.4
Толе би	1.7	3.0	6.2	6.6	11.6	20.9
Уюк	1.8	3.0	6.2	6.4	11.0	19.4
Хантау	1.8	3.1	6.4	7.1	12.4	23.3
Шокпар	1.8	3.0	6.2	6.8	11.6	21.3
Тасты	1.8	3.1	6.4	5.7	10.0	18.6
Шолаккорган	1.7	3.0	6.2	5.9	10.5	18.7

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в Шу–Таласском бассейне к концу XXI века прогнозируется устойчивое повышение температуры воздуха и рост атмосферных осадков, особенно при сценарии SSP5-8.5, а также можно сделать основные выводы согласно ожидаемым изменениям по обоим сценариям:

1. Потепление в казахстанской части Шу-Таласского бассейна наиболее интенсивно проявляется весной и летом согласно характеристикам линейного тренда, эти условия могут привести к сдвигу сроков снеготаяния и изменению водного баланса региона.

2. Наибольшие увеличения осадков наблюдаются в горных районах, где усиливаются конвективные процессы. Рост годовых осадков не всегда компенсирует потери ледникового питания, так как часть влаги выпадает в виде дождей или

смещается по сезонам. Это подтверждает необходимость комплексного подхода к прогнозированию гидрологических процессов с учётом сезонных сдвигов и пространственной неоднородности.

3. Климатические изменения приведут к перестройке гидрологического режима и увеличению межгодовой изменчивости стока. В краткосрочной перспективе это может вызывать рост весеннего стока, однако в долгосрочной – сокращение летнего питания рек вследствие деградации ледников.

4. Для региона необходима реализация адаптационных и митигационных мер, направленных на устойчивое водопользование и климатоориентированное планирование в сельском хозяйстве.

Полученные результаты имеют важное значение для водохозяйственного и аграрного секторов Казахстана. Рост температуры и изменчивость осадков требуют пересмотра стратегий управления водными ресурсами и разработки адаптационных мер к изменению климата.

Предлагаются следующие адаптационные рекомендации: 1) усилить мониторинг за снежным покровом/ледниками и сезонного стока; вести автоматизированные измерения стока и снега; 2) адаптировать режимы работы водохранилищ (запасы для летне-осеннего периода), развивать меры водосбережения в ирригации; 3) разработка системы раннего предупреждения по каналам связи для населения и бесплатная рассылка в виде смс по ожидаемым волнам тепла.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из РГП «Казгидромет» МЭПР РК и из базы интерактивного атласа МГЭИК.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЖКН; управление данными – МГЕ, методология – МАЖ; формальный анализ – МГЕ; программное обеспечение - РНЕ; визуализация – Б ЕЕ; написание исходного проекта - МГЕ, ЖКН; написание и редактирование обзора - ЖКН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета Науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме: «Водная безопасность Республики Казахстан: трансграничный Шу-Таласский бассейн в условиях климатических изменений и хозяйственной деятельности на период до 2050 года» (ИРН: BR287006/0225).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Safina, A. River runoff resources of the Shu-Talas water management basin in the context of climate change / Engineering Journal of Satbayev University, (2023). - 145(3), p. 25–30. https://doi.org/10.51301/ejsu.2023.i3.04

2 Water resources of Kazakhstan. (n.d.). Retrieved from https://paperzz.com/doc/7618350/water-resources-of-kazakhstan

3 Электронный ресурс: https://www.cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/docs/fiziko_geog_kharack_kazakhstan.html

4 Достай, Ж. Д., Кулебаев, К. М., & Камалиев, А. М. (2018). Гидрологический мониторинг на реках Шу-Таласского бассейна и его развитие. Гидрометеорология и экология, (1), с. 84–91.

5 Мусина, А. К., Шайбек, А. Д., Нарбаева, К. Т., & Әлімбай, А. М. (2021). Assessment of the intra-annual flow distribution of the Shu-Talas river basin over the past decade. Хабаршы. География сериясы 2, с. 8. https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v61.i2.08

6 Kaliyeva, K., Punys, P., & Zhaparkulova, Y. (2021). The Impact of Climate Change on Hydrological Regime of the Transboundary River Shu Basin (Kazakhstan–Kyrgyzstan): Forecast for 2050. Water, 13(20), 2800. https://doi.org/10.3390/w13202800

7 Давлетгалиев С.К., Казакбаева Т.М. Восстановление годового стока рек бассейна Шу-Талас // Материалы XXIV международной научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке» 3 часть. – Х.: научно информационный центр «Знание», 2017. – Б. 5-14.

8 База данных для открытого использования результатов наблюдений на метеорологических станциях РГП «Казгидромет»: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/

9 https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information#

10 Wang, X. L., & Feng, Y. (2013). RHtestsV4 User Manual: Manual for RHtestsV4, software for assessing the homogeneity of climate data series. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada.
Retrieved from https://etccdi.pacificclimate.org/software.shtm

11 Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: изд. РГГМУ. – 2008. – 408 с.

12 Eyring V., Bony S., Meehl G. A., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9, 1937–1958.

13 Seventh National Communication of the Republic of Kazakhstan under the United Nations Framework Convention on Climate Change (2017). [7-е национальное сообщение Республики Казахстан]. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. https://ecogosfond.kz/wp-content/uploads/2022/08/NDMJeK-1.2017_compressed-1.pdf
14 United Nations Development Programme. (n.d.). Eighth National Communication and Fifth Biennial Update Report of the Republic of Kazakhstan under the United Nations Framework Convention on Climate Change [8-е национальное сообщение и 5-й двухгодичный доклад Республики Казахстан]. https://www.undp.org/ru/kazakhstan/publications/8-e-nacionalnoe-soobschenie-i-5-y-dvukhgodichnyy-doklad-respubliki-kazakhstan-ramochnoy-konvencii-oon-ob-izmenenii-klimata
15 Boyles, R., Nikiel, K. A., Miller, B. W., Littell, J., Terando, A. J., Rangwala, I., Alder, J. R., Rosendahl, D. H., & Wootten, A. M. (2024). Approaches for using CMIP projections in climate model ensembles to address the “hot model” problem (Open-File Report 2024-1008). U.S. Geological Survey, in cooperation with the University of Colorado and the University of Oklahoma. https://doi.org/10.3133/ofr20241008
16 Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. Weather and Climate Extremes, 29, 100269. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269
17 Gutiérrez, J. M., & Treguier, A.-M. (Eds.). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Annex II: Models. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/
18 Климат Казахстана по областям 2023. – Астана: РГП «Казгидромет» – С.1-2.
19 Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана 2023. – Астана: РГП «Казгидромет» – С.65.
20 Podnebesnykh, N. V., & Ippolitov, I. I. (2019). The relationship of climatic characteristics with anticyclonic activity in the winter period over Siberia in 1976–2011. Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics], 32(12). https://doi.org/10.15372/AOO20191202
21 Обзор об особенностях климата Казахстана на 2024 г. – Астана: РГП «Казгидромет» – С.17-24.

REFERENCES

1 Safina A. River runoff resources of the Shu–Talas water management basin in the context of climate change // Engineering Journal of Satbayev University. – 2023. – Vol. 145, No. 3. – P. 25–30. – DOI: 10.51301/ejsu.2023.i3.04.
2 Water resources of Kazakhstan. (n.d.). – URL: https://paperzz.com/doc/7618350/water-resources-of-kazakhstan.
3 Fiziko-geograficheskaya kharakteristika Kazakhstana. – URL: https://www.cawater-info.net/bk/water_land_resources_use/docs/fiziko_geog_kharack_kazakhstan.html.
4 Dostay Zh. D., Kulebaev K. M., Kamaliev A. M. Gidrologicheskiy monitoring na rekakh Shu–Talasskogo basseyna i ego razvitie // Gidrometeorologiya i ekologiya. – 2018. – No. 1. – P. 84–91. [in Russian]
5 Musina A. K., Shaibek A. D., Narbayeva K. T., Alimbai A. M. Assessment of the intra-annual flow distribution of the Shu–Talas river basin over the past decade // Khabarshy. Geography Series. – 2021. – No. 2(61). – P. 8. – DOI: 10.26577/JGEM.2021.v61.i2.08. [in Russian]
6 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, No. 20. – Article 2800. – DOI: 10.3390/w13202800. [in Russian]
7 Davletgaliyev S. K., Kazakbayeva T. M. Vosstanovlenie godovogo stoka rek basseyna Shu–Talas // Materialy XXIV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Razvitie nauki v XXI veke”. – Ch. 3. – Kharkov: Nauchno-informatsionnyy tsentr “Znanie”, 2017. – P. 5–14. [in Russian]
8 Baza dannykh dlya otkrytogo ispol’zovaniya rezultatov nablyudeniy na meteorologicheskikh stantsiyakh RGP “Kazgidromet”. – URL: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/. [in Russian]
9 IPCC Interactive Atlas. – URL: https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information#. [in Russian]
10 Wang, X. L., & Feng, Y. (2013). RHtestsV4 User Manual: Manual for RHtestsV4, software for assessing the homogeneity of climate data series. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada.
11 Malinin V. N. Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii. – St. Petersburg: Izd. RGGMU, 2008. – 408 p. [in Russian]
12 Eyring V., Bony S., Meehl G. A., et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. – 2016. – Vol. 9. – P. 1937–1958.
13 Seventh National Communication of the Republic of Kazakhstan under the United Nations Framework Convention on Climate Change (2017). [7-е национальное сообщение Республики Казахстан]. Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. https://ecogosfond.kz/wp-content/uploads/2022/08/NDMJeK-1.2017_compressed-1.pdf
14 United Nations Development Programme. (n.d.). Eighth National Communication and Fifth Biennial Update Report of the Republic of Kazakhstan under the United Nations Framework Convention on Climate Change [8-е национальное сообщение и 5-й двухгодичный доклад Республики Казахстан]. https://www.undp.org/ru/kazakhstan/publications/8-e-nacionalnoe-soobschenie-i-5-y-dvukhgodichnyy-doklad-respubliki-kazakhstan-ramochnoy-konvencii-oon-ob-izmenenii-klimata
15 Boyles, R., Nikiel, K. A., Miller, B. W., Littell, J., Terando, A. J., Rangwala, I., Alder, J. R., Rosendahl, D. H., & Wootten, A. M. (2024). Approaches for using CMIP projections in climate model ensembles to address the “hot model” problem (Open-File Report 2024-1008). U.S. Geological Survey, in cooperation with the University of Colorado and the University of Oklahoma. https://doi.org/10.3133/ofr20241008
16 Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. Weather and Climate Extremes, 29, 100269. https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269
17 Gutiérrez, J. M., & Treguier, A.-M. (Eds.). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Annex II: Models. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

18 Klimat Kazakhstana po oblastyam 2023. – Astana: RGP “Kazgidromet”, 2023. – P. 1–2. [in Russian]
19 Ezhegodnyy byulleten’ monitoringa sostoyaniya i izmeneniya klimata Kazakhstana 2023. – Astana: RGP “Kazgidromet”, 2023. – P. 65. [in Russian]
20 Podnebesnykh N. V., Ippolitov I. I. The relationship of climatic characteristics with anticyclonic activity in the winter period over Siberia in 1976–2011 // Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]. – 2019. – Vol. 32, No. 12. – DOI: 10.15372/AOO20191202.
21 Obzor ob osobennostyakh klimata Kazakhstana na 2024 g. – Astana: RGP “Kazgidromet”, 2024. – P. 17–24. [in Russian]

ШУ–ТАЛАС (ҚАЗАҚСТАН) БАССЕЙНІНДЕГІ АУА ТЕМПЕРАТУРА МЕН ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ БОЛАШАҚТАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН ТАЛДАУ

Жанар К. Наурозбаева*PhD, Гульсара Е. Монкаева, Макпал А. Жунисова, Еркебулан Е. Белдеубаев, Нурканат Е. Рахматулла, Жулдыз Х. Кенжина

«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, gulsara.monkayeva@mail.ru, makpal80@mail.ru, yerkebulanyerkebulan@gmail.com, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru, kenzhina03@mail.ru
Автор корреспондент: Жанар К. Наурозбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Шу-Талас бассейні,
CMIP6 ансамблі,
SSP3-7.0, SSP5-8.5 климаттық сценарийлер,
ауа температурасы,
атмосфералық жауын-шашын

Мақала жайында:
Жіберілді: 24.09.2025
Қайта қаралды: 06.10.2025
Қабылданды: 07.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

CMIP6 климаттық модель ансамблін және IPCC интерактивті атлас деректерін пайдалана отырып, 21 ғасырдың соңына қарай Шу-Талас бассейніндегі ауа температурасы мен жауын-шашынның күтілетін өзгерістеріне талдау жүргізілді. Шу-Талас бассейнінің қазақстандық бөлігінде 2021...2040 жылдар аралығында орташа жылдық температура 1.4...1.7 °C және жауын-шашын мөлшері 3...7%-ға артуы күтілуде. Орта мерзімді перспективада (2041...2060 ж.) жылыну 2.4...3.0 °C және жауын-шашын мөлшері 2.4...3.0 °C және жауын-шашын мөлшері 2021...2040 жж. Ұзақ мерзімді перспективада (2081...2100 ж.), SSP3-7.0 сценарийі бойынша температура 4.5...5.0°C, ал SSP5-8,5 кезінде 6.0...6.5°C жоғарылайды, жауын-шашын ықтималдылығы 15...23% өседі. Бұл өзгерістер жыл аралық өзгермеліліктің артуына және аймақтың гидрологиялық режимінің өзгеруіне ықпал етеді. Бұл зерттеудің ғылыми маңыздылығы Орталық Азиядағы жаһандық жылынудың аймақтық көріністері туралы түсінігімізді кеңейтеді, ал оның практикалық маңыздылығы нәтижелерді су шаруашылығы мен ауыл шаруашылығы секторларында климаттың өзгеруіне бейімделу үшін пайдалануға мүмкіндік береді. Сондай-ақ зерттеуде Шу-Талас бассейнінің табиғи ресурстарын тұрақты басқару бойынша ұсыныстар берілген.

ANALYSIS OF FUTURE CHANGES IN TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE SHU-TALAS BASIN (KAZAKHSTAN)

Zhanar Naurozbayeva*PhD, Gulsara. Monkayeva, Makpal Zhunissova, Erkebulan Beldeubayev, Nurkanat Rakhmatulla, Zhuldyz Kenzhina

JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, gulsara.monkayeva@mail.ru, makpal80@mail.ru, yerkebulanyerkebulan@gmail.com, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru, kenzhina03@mail.ru
Corresponding author: Zhanar Naurozbayeva, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

KEY WORDS

Shu-Talas basin,
CMIP6 model ensemble,
climate scenarios SSP3-7.0, SSP5-8.5,
air temperature,
atmospheric precipitation

ABSTRACT

An analysis of expected changes in air temperature and precipitation in the Shu-Talas basin by the end of the 21st century was conducted using the CMIP6 climate model ensemble and data from the IPCC Interactive Atlas. In the Kazakh part of the Shu-Talas basin, the average annual temperature is expected to increase by 1.4...1.7 °C and precipitation by 3...7% between 2021 and 2040. In the medium

About article:
Received: 24.09.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 07.10.2025
Published: 08.10.2025

term (2041...2060), warming is expected to be 2.4...3.0 °C and precipitation will increase by 6...12% under the SSP3-7.0 scenario. In the long term (2081...2100), Under the SSP3-7.0 scenario, temperatures will increase by 4.5...5.0°C, and under SSP5-8.5, by 6.0...6.5°C, with precipitation potentially increasing by 15...23%. These changes will contribute to increased interannual variability and transformation of the region's hydrological regime. The scientific significance of this study will expand our understanding of the regional manifestations of global warming in Central Asia, while its practical significance will allow the results to be used for adaptation to climate change in the water management and agricultural sectors. The study also provides recommendations for the sustainable management of the Shu-Talas basin's natural resources.

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