

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



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ

Ежеквартальный
научно-технический журнал

АСТАНА

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ ЖӘНЕ ЭКОЛОГИЯ

«Қазгидромет» РМК

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И HYDROMETEOROLOGY

ЭКОЛОГИЯ

AND ECOLOGY

РГП «Қазгидромет»

RSE «Kazhydromet»

2026

№1 (121) шығарылым

Выпуск №1 (121)

Issue №1 (121)

1995 жылдан бастап шығады

Издается с 1995 года

Founded in 1995

Жылына 4 рет шығады

Выходит 4 раза в год

Published 4 times a year

Астана –Астана –Astana

БАС РЕДАКТОР

Алимбаева Д.К., Бас директор

БАС РЕДАКТОР ОРЫНБАСАРЫ

Қалиев Ә.С., Бас директордың бірінші орынбасары

РЕДАКЦИЯ

Базарбай Л.Б., жетекші ғылыми қызметкер

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

Жаксыбаева А.Е., жетекші ғылыми қызметкер

Кужагельдина Н.У., басқарма бастығы

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)

Елтай А.Ф. (Астана, Қазақстан)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Қазақстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Қазақстан)

Опн К. (Марбург, Германия)

Островская Е.В. (Астрахань, Ресей)

Полякова С.Е. (Алматы, Қазақстан)

Саиров С.Б. (Тараз, Қазақстан)

Сальников В.Г. (Алматы, Қазақстан)

Степанов Б.С. (Алматы, Қазақстан)

Терехов А.Г. (Алматы, Қазақстан)

Тілләкәрім Т.А. (Астана, Қазақстан)

Чередниченко А.В. (Алматы, Қазақстан)

Яфязова Р.К. (Алматы, Қазақстан)

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

E-mail: hydromet.journal@gmail.com

Сайт: <https://journal.kazhydromet.kz>

Меншік иесі: «Қазгидромет» РМК

Қазақстан Республикасы ақпарат және қоғамдық даму министрлігімен тіркелген 15.05.2023 ж. № **KZ13VPY00070023** қайта есепке қою туралы куәлігі.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Алимбаева Д.К., Генеральный директор

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Калиев А.С., Первый заместитель генерального директора

РЕДАКЦИЯ

Базарбай Л.Б., ведущий научный сотрудник

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

Жаксыбаева А.Е., ведущий научный сотрудник

Кужагельдина Н.У., начальник управления

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)

Елтай А.Ф. (Астана, Казахстан)

Муртазин Е.Ж. (Алматы, Казахстан)

Мустафаев Ж.С. (Алматы, Казахстан)

Опп К. (Марбург, ФРГ)

Островская Е.В. (Астрахань, Россия)

Полякова С.Е. (Алматы, Казахстан)

Саиров С.Б. (Тараз, Казахстан)

Сальников В.Г. (Алматы, Казахстан)

Степанов Б.С. (Алматы, Казахстан)

Терехов А.Г. (Алматы, Казахстан)

Тілләкәрім Т.А. (Астана, Казахстан)

Чередниченко А.В. (Алматы, Казахстан)

Яфязова Р.К. (Алматы, Казахстан)

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

E-mail: hydromet.journal@gmail.com

Сайт: <https://journal.kazhydromet.kz>

Собственник: РГП «Казгидромет»

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

CHIEF EDITOR

Alimbayeva D., General Director

DEPUTY CHIEF EDITOR

Kaliev A., First Deputy General Director

EDITORIAL STAFF

Bazarbay L., Leading Researcher

Dyussenova Zh., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher

Kuzhageldina N., 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)

Yeltay A. (Astana, Kazakhstan)

Murtazin E. (Almaty, Kazakhstan)

Mustafayev Zh. (Almaty, Kazakhstan)

Opp C. (Marburg, Germany)

Ostrovskaya E. (Astrakhan, Russia)

Polyakova S. (Almaty, Kazakhstan)

Sairov S. (Taraz, Kazakhstan)

Salnikov V. (Almaty, Kazakhstan)

Stepanov B. (Almaty, Kazakhstan)

Terekhov A. (Almaty, Kazakhstan)

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.

МАЗМҰНЫ

ҒЫЛЫМИ МАҚАЛА

Жумахан С. Мустафаев, Канат Ж. Мұстафаев ӨЗЕН АҒЫНЫ МЕН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ АҒЫННЫҢ ЕҢ ЖОҒАРЫ РҰҚСАТ ЕТІЛГЕН АЛУ КӨЛЕМІН КЕШЕНДІ БАҒАЛАУ ӘДІСТЕМЕСІН ӨЗІРЛЕУ	8
Равиль И. Мухамедиев, Валентин В. Смурыгин, Кирилл Д. Гизатулин, Адилхан Сымагулов, Алексей Г. Терехов, Елена Л. Мухамедиева, Фарид Н. Абдолдина АЛМАТЫ ОБЛЫСЫНЫҢ СУ ҚОЙМАЛАРЫНДАҒЫ ОПТИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ КОМПОНЕНТТЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ	24
Александр А. Волчек, Сергей И. Парфомук, Светлана В. Сидак, Николай Н. Шешко, Наталья Н. Шпендик СВЕТЛОГОРСК СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ РЕЖИМІН БАҒАЛАУ	43
Дияр К. Бармаков, Егор Г. Язиков АЛТЫНДЫ СКВАЖИНАЛЫҚ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ- ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕЛЕРІ	60
Шынар К. Шынгысбаева, Алим Т. Мылқайдаров, Гулнар О. Орынбасарова, Акерке М. Нурпейсова, Светлана Ж. Ерекеева, Лаура М. Рысқұлбекова, Айгерим Б. Сансызбаева ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ӨңІРІНДЕГІ ТАБИҒИ-КЛИМАТТЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДЫҢ ХАЛЫҚТЫҢ ҚОНЫСТАНУЫНА ЫҚПАЛЫ	71
Асанәлі. Қабдулмәжитұлы, Асель К. Мурзалимова, Жанар Рахымжан, Румия М. Тазитдинова, Айна А. Рысмагамбетова ТҰЗДЫ КӨЛДЕР МАҢЫНДАҒЫ ТОПЫРАҚТАРДЫҢ ТҰЗДАНУ ДЕҢГЕЙІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ СИПАТТАМАСЫ (ҚАЗАҚСТАН МЫСАЛЫНДА)	86
Равиль И. Мухамедиев, Валентин В. Смурыгин, Людмила А. Городецкая, Диас Құсайын, Адилхан Сымагулов, Надия Р. Юничева ӨСІМДІКТЕРДІ АНЫҚТАУ ҮЛГІЛЕРІН РЕТТЕУГЕ АРНАЛҒАН АННОТАЦИЯЛАНҒАН СОЯ АЛҚАБЫ КЕСКІНДЕРІНІҢ ЖИНАҒЫ	100
М.Т. Жайлыбаева, Р.М. Тазитдинова, Ж. Рахымжан, Г.Т. Кыздарбекова БҰРЫНҒЫ СЕМЕЙ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНЫҢ АТОМ КӨЛІ АУДАНЫНДАҒЫ ТОПЫРАҚ ПЕН ӨСІДІКТЕРДІҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ	110
Айнур С. Бегимбетова, Жанна К. Мусаева, Светлана Е. Мананбаева, Куралай А. Сағытаева, Акбота К. Лепесбай ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРДІ АЗАЙТУ МАҚСАТЫНДА АЛМАТЫ ЖЭС ЖАҢҒЫРТУ НҰСҚАЛАРЫН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ БАҒАЛАУ	124
Гульзира А. Гатаулина, Ерболат Х. Мендыбаев, Тургут Тузун Онай АҚМОЛА ОБЛЫСЫ ЕРЕЙМЕНТАУ АУДАНЫНЫҢ ҚҰРҒАҚ ДАЛА ЭКОЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ТОПЫРАҚТАРЫН ГЕОХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ	133
Аманкүл Д. Ақбасова, Гулмира Б. Кезембаева, Алмас С. Жұмағұлов, Александр В. Логвиненко, Үмбеталы Қ. Сәрсембин, Дархан Е. Муратов, Әлішер М. Избакиев. АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУА САПАСЫН ЖӘНЕ ОНЫҢ ХАЛЫҚ ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ	145
Сактагуль У. Кузбулова, Нургуль Е. Рамазанова МАҚАТ АУДАНЫНДАҒЫ ВЕГЕТАЦИЯНЫҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ ЖАЙЫ: ТЕХНОГЕНДІК ИНФРАҚҰРЫЛЫМ ЖӘНЕ КЛИМАТТЫҚ ФОН (2000–2024 жж.)	163
ШОЛУ	
Жанат З. Төлеубекова, Забида Н. Курманғалиева, Тамерлан Курманғалиев СУ ТАСҚЫНЫНА МОНИТОРИНГ ЖАСАУДЫҢ КЕШЕНДІ ТӘСІЛІ	176

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Жумахан С. Мустафаев, Канат Ж. Мустафаев РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОБЪЕМА ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМОГО ИЗЪЯТИЯ РЕЧНОГО И ПРОПУСКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА	8
Равиль И. Мухамедиев, Валентин В. Смурыгин, Кирилл Д. Гизатулин, Адилхан Сымагулов, Алексей Г. Терехов, Елена Л. Мухамедиева, Фарид Н. Абдолдина СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВОДОЕМАХ АЛМААТИНСКОЙ ОБЛАСТИ	24
Александр А. Волчек, Сергей И. Парфомук, Светлана В. Сидак, Николай Н. Шешко, Наталья Н. Шпендик ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩА СВЕТЛОГОРСКОЕ	43
Дияр К. Бармаков, Егор Г. Язиков ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА	60
Шынар К. Шынгысбаева, Алим Т. Мылкайдаров, Гулнар О. Орынбасарова Акерке М. Нурпейсова, Светлана Ж. Ерекеева, Лаура М. Рыскулбекова, Айгерим Б. Сансызбаева ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОГО РЕГИОНА НА РАССЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ	71
Асанали Кабдулмажитулы, Асель К. Мурзалимова, Жанар Рахымжан, Румия М. Тазитдинова, Айна А. Рысмагамбетова СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЕЙ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ ВБЛИЗИ СОЛЕННЫХ ОЗЕР (НА ПРИМЕРЕ КАЗАХСТАНА)	86
Равиль И. Мухамедиев, Валентин В. Смурыгин, Людмила А. Городецкая, Диас Құсайын, Адилхан Сымагулов, Надия Р. Юничева НАБОР АННОТИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОЕВОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАСТЕНИЙ	100
М.Т. Жайлыбаева, Р.М. Тазитдинова, Ж. Рахымжан, Г.Т. Кыздарбекова БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РАЙОНЕ АТОМНОГО ОЗЕРА БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ПОЛИГОНА	110
Айнур С. Бегимбетова, Светлана Е. Мананбаева, Жанна К. Мусаева, Куралай А. Сагытаева, Акбота К. Лепесбай ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ АЛМАТИНСКОЙ ТЭЦ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ	124
Гульзира А. Гатаулина, Ерболат Х. Мендыбаев, Тургут Тузун Онай, ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВ СУХОСТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЕРЕЙМЕНТАУСКОГО РАЙОНА АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ	133
Аманкул Д. Акбасова, Гульмира Б. Кезембаева, Алмас С. Жумагулов, Александр В. Логвиненко, Умбеталы К. Сарсембин, Дархан Е. Муратов, Алишер М. Избакиев ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА АЛМАТЫ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ	145
Сактагуль У. Кузбулова, Нургуль Е. Рамазанова ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МАКАТСКОГО РАЙОНА: ТЕХНОГЕННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА И КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФОН (2000–2024 гг.).	163
ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ	
Жанат З. Толеубекова, Забида Н. Курмангалиева, Тамерлан Курмангалиев КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ПАВОДКОВ	176

CONTENT



SCIENTIFIC ARTICLE

Zhumakhan Mustafayev, Kanat Mustafayev DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR AN INTEGRATED ASSESSMENT OF THE VOLUME OF MAXIMUM PERMISSIBLE WITHDRAWAL OF RIVER AND ECOLOGICAL FLOW	8
Ravil I. Mukhamediev, Valentin V. Smurygin, Kirill D. Gizatulin, Adilkhan Symagulov, Alexey G. Terekhov, Elena L. Mukhamedieva, Farida N. Abdoldina MONITORING COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOTE METHODS FOR MONITORING OPTICALLY ACTIVE COMPONENTS IN WATER BODIES OF THE ALMATY REGION	24
Aleksandr A. Volchek, Sergey I. Parfomuk, Svetlana V. Sidak, Nikolay N. Sheshko, Natalia N. Shpendik ASSESSMENT OF THE SVETLOGORSKOYE RESERVOIR HYDROLOGICAL REGIME	43
Diyar Barmakov, Yegor Yazikov GEOLOGICAL AND GEOMECHANICAL CONDITIONS FOR IMPLEMENTING IN-SITU LEACHING TECHNOLOGY FOR GOLD EXTRACTION	60
Shynar K. Shyngysbayeva, Alim T. Mylkaidarov, Gulnar O. Orynbasarova, Akerke M. Nurpeysova, Svetlana Zh. Erekeyeva, Laura M. Ryskulbekova, Aigerim B. Sansyzybayeva THE INFLUENCE OF THE NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS OF THE EAST KAZAKHSTAN REGION ON THE SETTLEMENT OF THE POPULATION	71
Asanali Kabdulmazhituly, Asel K. Murzalimova, Zhanar Rakhimzhan, Rumiya M. Tazitdinova, Aina A. Rysmagambetova COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOIL SALINITY LEVELS NEAR SALT LAKES (ON THE EXAMPLE OF KAZAKHSTAN)	86
Ravil I. Mukhamediev, Valentin V. Smurygin, Lyudmila A. Gorodetskaya, Dias Qusain, Adilkhan Symagulov, Nadiya R. Yunicheva ANNOTATED IMAGE SET OF SOYBEAN FIELDS FOR TRAINING PLANT DETECTION MODELS	100
Meruyert T. Zhailybayeva, Rumiya M. Tazitdinova, Zhanar Rakhymzhan, Gulmira T. Kyzdarbekova BIOGEOCHEMICAL FEATURES OF SOILS AND VEGETATION IN THE AREA OF THE ATOMIC LAKE OF THE FORMER SEMIPALA-TINSK NUCLEAR TEST SITE	110
Ainur S. Begimbetova, Svetlana E. Mananbaeva, Zhanna K. Musaeva, Kuralai A. Sagytayeva, Akbota K. Lepesbay ECOLOGICAL ASSESSMENT OF OPTIONS FOR MODERNIZATION OF THE ALMATY THERMAL POWER PLANT WITH THE AIM OF MINIMIZING THE ENVIRONMENTAL IMPACT	124
Gulzira Gataulina, Yerbolat Mendybaev, Turgut Tüzün Onay GEOCHEMICAL ANALYSIS OF SOILS OF DRY STEPPE ECOSYSTEMS OF THE EREYMENTAU DISTRICT OF THE AKMOLA REGION	133
Amankul D. Akbassova, Gulmira B. Kezembayeva, Almas S. Zhumagulov, A.V. Logvienkov, Umbetaly K. Sarsembin, Darkhan E. Muratov, Alisher M. Izbakiyev ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN ALMATY AND ITS IMPACT ON POPULATION HEALTH	145
Saktagul Kuzbulova, Nurgul Ramazanova SPATIOTEMPORAL STATE OF VEGETATION IN THE MAKAT DISTRICT: TECHNOGENIC INFRASTRUCTURE AND CLIMATIC BACKGROUND (2000–2024)	163
REVIEW ARTICLE	
Zhanat Toleubekova, Zabida Kurmangalieva, Tamerlan Kurmangaliyev A COMPREHENSIVE APPROACH TO FLOOD MONITORING	176



Scientific article

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR AN INTEGRATED ASSESSMENT OF THE VOLUME OF MAXIMUM PERMISSIBLE WITHDRAWAL OF RIVER AND ECOLOGICAL FLOW

Zhumakhan Mustafayev^{1*}  Doctor of Technical Sciences, professor, Kanat Mustafayev²  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

water resources, river basin, irrevocable withdrawal of flow, environmental flow, quadratic equation, methodology.

ABSTRACT

Distinctive features of the modern approach to solving the problem of assessing the maximum permissible withdrawal of river flow and the release of environmental flow include consideration of the nature and scale of water resource use and their impact on the natural environment, as well as an assessment of their effects on ecology, the economy, and society within river basin catchment areas. *The aim* of the study is to develop a methodological approach to assessing the maximum permissible withdrawal of river flow and the release of environmental flow, taking into account geo-ecological constraints. *Materials and methods.* The research methodology includes two approaches to substantiating the volumes of these quantities, based on the development of mathematical models of hydrological–ecological and economic activity of river basin catchment areas. The study used statistical data from government agencies of the Republic of Kazakhstan and the Kyrgyz Republic. *Results.* General principles, criteria, parameters, and methods for regulating the maximum permissible withdrawal of river flow and the release of environmental flow are proposed, based on modeling natural and anthropogenic processes in river basins. An algorithm for approbation within the framework of calculating standards of permissible impact for specific river basins is presented. *Conclusions.* The use of mathematical models makes it possible to carry out a more in-depth hydrological, ecological, and economic justification, contributing to the improvement of the socio-ecological situation within river basin catchment areas.

About article:

Received: 31.10.2025

Revised: 11.02.2026

Accepted: 20.03.2026

Published: 01.04.2026

For citation:

Mustafayev Zh., Mustafayev K. Development of a methodology for an integrated assessment of the volume of maximum permissible withdrawal of river and ecological flow // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 8-23.

1. INTRODUCTION

River basins are key natural systems that form the spatial basis for population distribution and natural resource management. Their significance is expressed through the interaction of ecological, economic, and social functions that determine environmental quality and human well-being. The uniqueness of river basin catchments results from their formation under highly dynamic hydrological and climatic conditions and their development in accordance with the law of geographical zonation. This necessitates regulation of their functioning, including the assessment of permissible irreversible water withdrawal and the establishment of environmental flow to support ecosystem conservation and restoration.

The conducted analysis of studies devoted to the problem of standardization of activities and environmental services of river basins, as well as consideration of the concept of «irrigation capacity of a river» in the works of A.N. Kostyakov and V.A. Kutergin [1], K.I. Shavva [2], L.M. Rex [3], I.M. Panasenko, A.K. Zaurbekov and T.I. Narbaev [4], A.K. Zaurbekov [5], M.G. Golchenko and E.A. Stelmakh [6], showed that there are no special, generally accepted algorithms for assessing, analyzing and forecasting the water resource potential of catchment areas of river

basins. This indicates the need to develop mathematical tools based on predictive models that are highly accurate.

The most important element of environmental regulation of the activities and environmental services of river basin catchments is the concept of «ecologically acceptable withdrawal of water resources», reflected in the works of D. Ya. Ratkovich [7], A. V. Yatsyk [8], B. V. Fashchevsky [9], V. S. Kovalevsky [10], I. P. Aidarov, E. V. Venetsianov and D. Ya. Ratkovich [11]. These studies are based on integral parameters reflecting the relationships between components and general patterns of development of natural systems.

One of the fundamental areas of assessing the activities and environmental services of river catchments is the approach based on the law of tolerance by W. Shelford [12], which was developed in the works: «Survival Diagram» by R. Ricklefs [13], «Diagram of bioproductivity of floodplain meadow grass stand and reproduction of fish stocks» by M.Zh. Burlibaev [14], «Diagram of the life cycle of a river basin» by Zh.S. Mustafayev, L.Zh. Mustafayeva, K.B. Koybagarova and K.Zh. Mustafayev [15], as well as «Graph of the dependence of the ecological and economic activity of a natural system on the intensity of use of natural resources» by Zh.S. Mustafayev and K.Zh. Mustafayev [16]. The specified models, which have the form of irregularly shaped ellipsoids with limited domains of definition of functions depending on the intensity of natural and natural - technogenic processes, can be used to develop a theoretical and methodological basis for assessing the maximum permissible level of water resource use and establishing the value of environmental flow.

Various principles, methods, and techniques for calculating the maximum permissible withdrawal of river flow and the release of environmental flow do not provide a single, aggregated algorithm.

To assess the ecologically acceptable irrevocable withdrawal of river flow in river basins, V.G. Dubinina developed the «Methodological principles of environmental regulation of irrevocable withdrawal of river flow and establishment of environmental flow (release)» [17], based on the analysis of hydrological time series characterizing the optimal, normal and critical conditions for the functioning of aquatic and near-water (mainly floodplain) ecosystems:

$$\begin{aligned} VPIWRF_i &= VRCSAF_i - HMVR_i \rightarrow \\ PIWRF_i &= VPIWRF_i \cdot (NFVDA_i / AANFVDP_i), \end{aligned} \quad (1)$$

where $VPIWRF_i$ is the average long-term volume of permissible irrevocable withdrawal of river flow; $VRCSAF_i$ is the volume of flow corresponding to the critical state of aquatic ecosystems; $HMVR_i$ is the historically minimum volume of flow in a series of observations or the flow of the year with 99% probability; $PIWRF_i$ - permissible irrevocable withdrawal of river flow in years of varying availability; $NFVDA_i$ - natural flow of a year with varying probability; $ALTNFVDA_i$ - average long-term natural flow in years with varying probability.

A weakness of the methodological approach to regulating irreversible withdrawal of river flow and the release of environmental flow is that it is mainly based on analyzing relationships between characteristics of the hydrological regime (critical flow, historically minimum flow, hydrological flow of various exceedance probabilities) and biological indicators, while the ecological state of river basins is not explicitly taken into account.

Based on the development and deepening of a concept well - known in the hydroecology of aquatic ecosystems, according to which changes in the structural and functional organization of river basins occur within the tolerance limits of the natural stage of hydrogenesis and do not

undermine the ability of natural complexes to self - regulate, Zh.S. Mustafayev and K.Zh. Mustafayev formed a new direction in the field of assessing the environmental regulation of the activities and environmental services of river basin catchments. This direction is based on the principles of environmental and economic efficiency of the use of water and land resources, which is determined by the following formula [18]:

$$\begin{aligned}
 NRURRB_i &= UVNRRBEA_i/PVNRRB_i \rightarrow \\
 CESRB_i &= EIOFNR_i/EIOFNR_i \rightarrow \rightarrow EAC_i = \int(NRURRB_i, CESRB_i) \rightarrow \\
 CEEA_i &= CEA_i \cdot NPVCEA_i + (1 - CEA_i) \cdot NVCEA_i \rightarrow \\
 CEA_i &= (1 - ESNSRB_i) \rightarrow ESEESS_i = \int(EAC, CEEA_i) \rightarrow \\
 CUWLRRB_i &= \int(ESEESS_i, NRURRB_i) \rightarrow \\
 MPIWWRRB_i &= CUWLRRB_i \cdot AVWRRB_i \rightarrow \\
 VEF_i &= (1 - CUWLRRB_i) \cdot AVWRRB_i, \quad (2)
 \end{aligned}$$

where $NRURRB_i$ - coefficient of use of natural resources of river basins; $PVNRRB_i$ - potential volume of natural resources of river basins; $UVNRRBEA_i$ - the volume of natural resources of river basins used for economic activities; $CESRB_i$ - the coefficient of economic sustainability of river basins; $EIOFNR_i$ - economic income obtained from the use of natural resources; $EIOFNR_i$ - potential income obtained from the use of natural resources; EAC_i - economic activity coefficient; $CEEA_i$ - ecological - economic activity coefficient; $NPVCEA_i$ - maximum possible value of the economic activity coefficient; $NVCEA_i$ - minimum value of the economic activity coefficient; CEA_i - coefficient of ecological activity; $ESNSRB_i$ - ecological state of the natural system of river basins; $ESEESS_i$ - expected coefficient of ecological and economic sustainability; $CUWLRRB_i$ - coefficient of use of water and land resources of river basins; $AVWRRB_i$ - available volume of water resources of river basins; $MPIWWRRB_i$ - maximum permissible irrevocable withdrawal of water resources of river basins; VEF_i - volume of environmental flow.

These approaches are based on the principles of ecological and economic efficiency of water resource use; however, they do not consider the characteristics of river hydrological regimes.

The analysis indicates the need to improve the methodological approach to assessing the maximum permissible irreversible withdrawal of river flow and environmental flow releases by introducing mechanisms that take into account anthropogenic impacts on the hydro-ecological state of river basins.

The aim of the study is to develop a methodological approach to assessing the maximum permissible withdrawal of river flow and the release of environmental flow, based on hydrological, ecological, and economic characteristics of river basin catchment areas, making it possible to determine the tolerance threshold, the limits of permissible impact, and to establish the degree of reversibility of the changes that have occurred.

Object of the study. The object of the study is the catchment basin of the transboundary Shu River, formed by glaciers of the Kyrgyz Ala-Too and Terskey Ala-Too ranges on the territory of the Kyrgyz Republic, and the zone of channel losses located in the sands of the Moyynkum Desert on the territory of the Republic of Kazakhstan. The area of the Shu River basin catchment is 62,500 km², and the river length is 1,067 km. The basin covers mountainous, foothill, foothill–plain, and desert geographical zones [19...20].

2. MATERIALS AND METHODS

To form the research database of hydrological and hydrochemical characteristics of the Shu River, materials from the publications «Surface Water Resources...», «State Water Cadastre...», «Main Hydrological Characteristics...» (USSR), as well as «Long-Term Data on the Regime and Resources of Land Surface Waters...» of the Kyrgyz Republic and the Republic of Kazakhstan were used [19...20]. Data on demographic, agricultural, environmental, and industrial components were obtained from long-term materials of the National Statistical Committee of the Kyrgyz Republic and the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan [21]. Information on the territorial organization of water use was compiled based on reports on the activities of the Shu–Talas Basin Inspection for Regulation of Water Use and Protection of Water Resources of the Committee for Water Resources of the Ministry of Water Resources and Irrigation of the Republic of Kazakhstan and the Ministry of Water Resources, Agriculture, and Processing Industry of the Kyrgyz Republic for 1992...2024 [22]. Trend construction for the studied indicators was carried out by processing the corresponding time series in the Microsoft Excel software environment.

Among the approaches and methods proposed to solve the stated tasks aimed at assessing the volume of maximum permissible irreversible withdrawal of river flow and the magnitude of environmental flow release in river basins, the provisions of the materialist theory of scientific cognition were used as fundamental. The methodological basis of the study relies on the application of trend analysis methods, modeling of natural processes, as well as analysis and synthesis of information and statistical databases using trend equatio.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Features of the methodological approach to assessing the volume of maximum permissible irreversible withdrawal of river flow and environmental flow release

River basin watersheds, which perform important environment-forming and ecological functions based on the use of water resources for economic activities aimed at improving human well-being, are subject to the Le-Chatelier-Brown principle only up to a certain level of natural resource management. When this level exceeds a critical threshold, irreversible processes begin to occur in the natural systems of river basins. To preserve the natural properties of river basins and their environment-forming functions, and therefore their ecological significance, it is necessary to regulate the permissible irreversible flow withdrawal and establish an environmental flow rate that ensures the maintenance of a certain type of ecological balance. This, in turn, is a prerequisite for preventing the degradation of aquatic and near-water ecosystems.

The complexity of developing methodological approaches to regulating permissible irrevocable withdrawals of river basin runoff and establishing environmental flow stems from the need to assess them within the context of a triad: ecology (ensuring the quality of the human habitat), economics (increasing the purchasing power of society), and society (improving the well-being of the population). Such an assessment should be based on long-term hydrological,

environmental, and economic indicators characterizing the qualitative and quantitative state of the river basin catchment area [23].

To analyze and evaluate the development features of hydrological processes in the catchment area of river basins, it is necessary to use a time hydrological series, expressed either by water flow (RWF_i) or by water volume (VRW_i), which is characterized by a trend that is a function of time and can serve as a basis for determining their statistical parameters.

The results of the analysis of the dynamics of hydrological processes within the catchment areas of river basins indicate that the average annual water flow (RWF_i) and runoff volume (VRW_i), considered as functions of time, have not only a stochastic component, but also a deterministic component, manifested in the form of multidirectional (positive and negative) trends:

$$RWF_i = \alpha \cdot SNY_i + b; \quad (3)$$

$$VRW_i = \alpha \cdot SNY_i + b; \quad (4)$$

$$RWF_i = -\alpha \cdot SNY_i + b; \quad (5)$$

$$VRW_i = -\alpha \cdot SNY_i + b, \quad (6)$$

where QP_i is the average annual water discharge in the river, m^3/s ; α - is the regression coefficient showing the change in the result with a change in the time series by one unit; b - is the free parameter of the regression equation showing the minimum value of the time series; SNY_i - is the period number or the ordinal number of the year in the forecast period or an independent variable.

Based on the analysis of the relationships between the natural hydrological characteristics of the river, the minimum and maximum values of the average annual water flow (RWF_i) or runoff volume (VRW_i) are determined using the linear trend equations:

- if the linear trend equation is positive, then the minimum value of water flow (RWF_{mini}) or runoff volume (VRW_{mini}) will be equal to the free parameter of the regression equation (b), and their maximum value in the time interval in a given series is determined by the linear trend equation:

$$RWF_{maxi} = \alpha \cdot SNY_i + b; \quad (7)$$

$$VRW_{maxi} = \alpha \cdot SNY_i + b; \quad (8)$$

- if the linear trend equation is negative, then the maximum value of water flow (RWF_{maxi}) or runoff volume (VRW_{maxi}) will be equal to the free parameter of the regression equation (b), and their minimum values in the time interval in a given series are determined by the linear trend equation:

$$RWF_{maxi} = -\alpha \cdot SNY_i + b; \quad (9)$$

$$VRW_{maxi} = -\alpha \cdot SNY_i + b. \quad (10)$$

The historical maximum value of water flow ($HMWV_i$) or runoff volume ($HMFV_i$) is determined on the basis of an analysis of hydrological data for the time interval under consideration of the corresponding series of observations:

- the average arithmetic value of the average annual water flow ($AAWCV_i$) or runoff volume ($AAVAARV_i$) in a time interval in a given series is determined by the formula:

$$AAWCV_i = \sum_{i=1}^N RWF_i / N; \quad (11)$$

$$AAWCV_i = \sum_{i=1}^N VRW_i / N; \quad (12)$$

- the modular coefficient of average annual water consumption ($MCAAVC_i$) or runoff volume ($MCAARV_i$) is determined by the following mathematical expression:

$$MCAAVC_i = RWF_i / AAWCV_i; \quad (13)$$

$$MCAARV_i = VRW_i / AAWCV_i; \quad (14)$$

- the historically maximum value of water flow ($HMWFFV_i$) or runoff volume ($HMFVV_i$) is determined using the maximum value of the modular coefficient of average annual water flow ($MCAAVC_{maxi}$) or runoff volume ($MCAARV_{maxi}$) according to the following formula:

$$HMWFFV_i = MCAAVC_{maxi} \cdot AAWCV_i; \quad (15)$$

$$HMFVV_i = MCAARV_i \cdot AAWCV_i; \quad (16)$$

- the maximum and minimum values of the average annual water consumption coefficient and the volume of runoff are determined by the following mathematical expressions:

$$AAWCC_{maxi} = RWF_{maxi} / HMWFFV_i; \quad (17)$$

$$AAWCC_{mini} = RWF_{mini} / HMWFFV_i; \quad (18)$$

$$CAARV_{maxi} = VRW_{maxi} / HMFVV_i; \quad (19)$$

$$CAARV_{mini} = VRW_{mini} / HMFVV_i, \quad (20)$$

where $AAWCC_{maxi}$ and $CAARV_{maxi}$ - the maximum value of the average annual water flow rate and runoff volume; $AAWCC_{mini}$ and $CAARV_{min}$ - the minimum value of the coefficient of average annual water consumption and runoff volume.

The ecological state of a river basin's catchment area can be assessed based on the quality of atmospheric air and surface water, which are not only vital life - sustaining sources but also sensitive indicators of the well-being of the entire environment.

Various methods based on hydrochemical indicators are used as an integral indicator for assessing the quality of surface river waters and atmospheric air:

- water pollution index (WPI_i) [24] and air pollution index (API_i) [25], which are determined by the following formulas:

$$WPI_i = (1/n_i) \cdot \sum_{i=1}^n AACIW_i / MPCW_i; \quad (21)$$

$$API_i = (1/n_i) \cdot \sum_{i=1}^n AACIA_i / MPCA_i, \quad (22)$$

where n_i - is the number of substances polluting the atmosphere or surface river waters; $AACIA_i$ and $AACIW_i$ - average annual concentration i of the- i th impurity in the air or in surface river waters; $MPCA_i$ and $MPCW_i$ - maximum permissible concentration i - impurities in the air or in surface river waters;

- the coefficient of maximum pollution of water ($WPIC_i$) and atmospheric air ($MAPC_i$), are determined by the following formulas [26]:

$$WPIC_i = WPI_i - 1 = [(1/n_i) \cdot \sum_{i=1}^n AACIW_i / MPCW_i] - 1; \quad (23)$$

$$MAPC_i = API_i - 1 = [(1/n_i) \cdot \sum_{i=1}^n AACIA_i / MPCA_i] - 1; \quad (24)$$

- the integral index of water pollution ($IWPI_i$) and atmospheric air ($IAPI_i$) is determined by the following mathematical expressions [27]:

$$IWPI_i = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N \{1 - \exp[-(AACIW_i / MPCW_i)]\}; \quad (25)$$

$$IAPI_i = (1/N) \cdot \sum_{i=1}^N \{1 - \exp[-(AACIA_i / MPCA_i)]\}. \quad (26)$$

To assess the degree of environmental pollution, one can use generalized indicators of pollution of atmospheric air and surface river waters in the form of a desirability function, which allows one to aggregate 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:

$$GIAWP_i = \sqrt{\prod_{i=1}^n WPI_i \cdot API_i}; \quad (27)$$

$$GCMAWP_i = \sqrt{\prod_{i=1}^n WPIC_i \cdot MAPC_i}; \quad (28)$$

$$GIIAWP_i = \sqrt{\prod_{i=1}^n IWPI_i \cdot IAPI_i}, \quad (29)$$

where $GIAWP_i$ - generalized index of pollution of atmospheric air and surface river waters; $GCMAWP_i$ - generalized coefficient of maximum pollution of atmospheric air and surface river waters; $GIIAWP_i$ - generalized integral index of pollution of atmospheric air and surface river waters.

The ecological state of the catchment area of river basins ($ESRB_i$) can be approximately estimated by the relationship:

$$\begin{aligned} ESRB_i &= 1 - \exp(-GIAWP_i) = 1 - \exp(-GCMAWP_i) = \\ &= 1 - \exp(-GIIAWP_i). \end{aligned} \quad (30)$$

To determine the design value of the ecological state of the territory of river basins, one can use the scale of integrated assessment of the danger of the ecological situation on human health (Table 1) [28].

Table 1

Quantitative assessment of the ecological situation of the natural environment

Index gradations	The nature of biological response	Danger level	$ESRB_i$
0	Death	Extremely dangerous	1.0 - 0.80
1	The presence of a disease in the body	Very dangerous	0.64 - 0.80
2	The presence of physiological diseases	Moderately dangerous	0.48 - 0.64
3	The presence of physiological and other changes	A little dangerous	0.32 - 0.48
4	The appearance of chemical substances in organs and tissues that do not cause any changes	Conditionally dangerous	0.16 - 0.32
5	No signs of adverse effects	Not dangerous	< 0.16

The selection of the design value of the ecological state of the territory of river basins is carried out on the basis of the materialistic theory of scientific knowledge, which considers socio - historical practice as the basis of knowledge and the criterion of truth, within the framework of the principles of equal, reasonable and fair use of natural resources, which are a component of the human habitat.

Based on the Gurvits stability criterion, it is possible to present a mathematical model of the design value of the coefficient of hydrological and ecological activity ($HEARB_i$) of the catchment area of river basins:

$$HEARB_i = (1 - ESRB_i) \cdot AAWCC_{maxi} + ESRB_i \cdot AAWCC_{mini}; \quad (31)$$

$$HEARB_i = (1 - ESRB_i) \cdot CAARV_{maxi} + ESRB_i \cdot CAARV_{mini}. \quad (32)$$

The economic activity of the catchment area of river basins, which are the spatial basis for human economic activity and are based on the use of their natural resources, is to a certain extent a function of the degree of use of water resources. According to the international statistics of the UN – Aquastat FAO [29], in order to assess the current state and efficiency of water resources use, it is recommended to use such general indicators for assessing water resource potential as the volume of withdrawal of renewable water resources ($VWRWR_i$) and the maximum possible gross product of the catchment area of river basins ($MPGDP_i$),

environmental, economic and social damage during the use of water resources ($EESD_i$) and the expected gross product of the catchment area of river basins ($EGDP_i$).

Features of the methodological approach to assessing the volume of maximum permissible irreversible withdrawal of river flow and environmental flow release

Based on statistical data books of the Kirghiz SSR and the Kazakh SSR for 1945...1990, as well as the Kyrgyz Republic and the Republic of Kazakhstan for 1991...2024, and using the methodological approach to pricing in water use developed by A.T. Asanbaev, D.M. Mamatkanov, K.I. Shavva, A.K. Shapar [30], as well as S.R. Ibatullin, Zh.S. Mustafayev and K.B. Koybagarova [31], research databases were formed on the following indicators for the catchment area of the Chu River basin: the volume of withdrawal of renewable water resources ($VWRWR_i$), the maximum possible gross product of the catchment area of river basins ($MPGDP_i$), environmental, economic and social damage from the use of water resources ($EESD_i$) and the expected gross product of the catchment area of river basins ($EGDP_i$).

To assess the ecological status of the Chu River basin catchment area, the natural values of water management indicators were converted into a single scale of dimensionless numerical indicators:

- coefficient of withdrawal of renewable water resources ($CWRWR_i$):

$$CWRWR_i = VWRWR_i / VRWR_i, \quad (33)$$

where $VRWR_i$ - volume of renewable water resources;

- coefficient of the maximum possible gross product of the catchment area of river basins ($CMPGP_i$):

$$CMPGP_i = GPCARD_i / MPGDP_i, \quad (34)$$

where $GPCARD_i$ is the gross product of the catchment area of river basins;

- coefficient of environmental, economic and social damage ($CEESD_i$):

$$CEESD_i = EESD_i / MPGDP_i; \quad (35)$$

- coefficient of expected gross product of the catchment area of river basins ($EGPC_i$):

$$EGPC_i = (GPCARD_i - EESD_i) / MPGDP_i. \quad (36)$$

Based on the analysis and assessment of water management indicators in the Chu River basin catchment area for 1945...2024 and the extrapolation of long-term data, an applied economic activity model implemented in Microsoft Excel was developed to model water resource management. Graphs were constructed using the smallest rectangle method, based on a philosophical approach that ensures the transformation of quantitative changes into qualitative ones (Figure 1).

The most effective tool for systemic analysis of economic processes in the catchment area of river basins can be special mathematical models in the form of a second - order polynomial equation (quadratic equation), which reflect the relationships between their structural and dynamic variables (Figure 1):

- the coefficient of the maximum possible gross product of the catchment area of river basins ($CMPGP_i$), as a function of the coefficient of extraction of renewable water resources ($CWRWR_i$), initially increases with a fairly high intensity up to a certain limit, after which it slows down as the quality of natural resources decreases and, is described by the following equation:

$$CMPGP_i = -1,4972 \cdot CWRWR_i^2 + 2,4349 \cdot CWRWR_i + 0,0013, \\ R^2 = 0,9909; \quad (37)$$

- the coefficient of ecological - economic - social damage ($CEESD_i$), as a function of the coefficient of extraction of renewable water resources ($CWRWR_i$), at the beginning it grows very slowly, and after which it grows sharply with a sufficiently high intensity depending on the quality of the environment and natural resources defined in the spatial-temporal limits and is described by the following equation:

$$CEESD_i = 1,0524 \cdot CWRWR_i^2 - 0,2643 \cdot CWRWR_i + 0,0238, \\ R^2 = 0,9946; \quad (38)$$

- the coefficient of the expected gross product of the catchment area of river basins ($EGPC_i$), as a function of the coefficient of extraction of renewable water resources ($CWRWR_i$), according to the Le-Chatelier-Brown law, initially increases to a certain limit, after which a period of decline occurs within certain spatial-temporal limits and is described by the following equation:

$$EGPC_i = -2,5501 \cdot CWRWR_i^2 + 2,6992 \cdot CWRWR_i - 0,0225, \\ R^2 = 0,9980; \quad (39)$$

- the theoretical curve of well-being of the economic situation ($TWBCES_i$), as a function of the coefficient of extraction of renewable water resources ($CWRWR_i$), which has an irregular ellipsoid shape, which is a modification of the density graph in the form of a Gaussian curve [32], the «survival diagram» of R. Ricklefs [33], the homeostatic curve of B. Fashchevsky [34] and the law of tolerance of W. Shelford [12] and is described by the following equation:

$$TWBCES_i = -2,9988 \cdot CWRWR_i^2 + 3,0070 \cdot CWRWR_i + 0,0421, \\ R^2 = 0,9744. \quad (40)$$

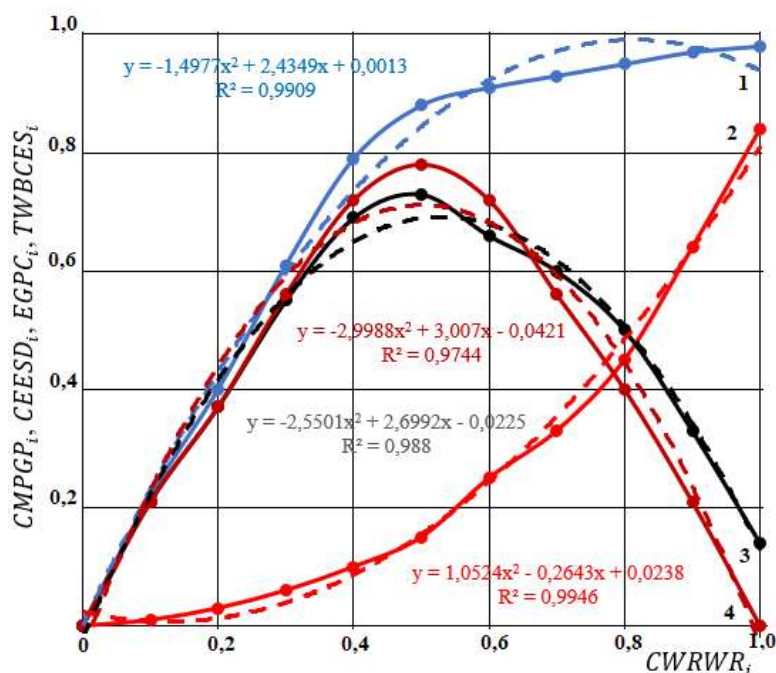


Figure 1. Applied model of economic activity of the catchment area of the Chu River basin (1 - coefficient of the maximum possible gross product of the catchment area of the river basins (CMPGP_i); 2 - coefficient of environmental, economic and social damage (CEESD_i); 3 - coefficient of the expected gross product of the catchment area of the river basins (EGPC_i); 4 - theoretical curve of well-being of the economic situation (TWBCES_i).

The coefficient of hydrological-ecological activity ($HEARB_i$) and the coefficient of expected gross product ($EGPC_i$) or economic activity ($EARB_i = EGPC_i$) of the catchment area of river basins are specific values that allow them to be determined by calculations based on official statistical data using a detailed structured procedure that allows, based on the contribution of each indicator, to determine the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) for human economic activity: $CMPWRWR_i = f(HEARB_i, EARB_i)$.

Thus, the mathematical model of the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) allows us not only to obtain an equation for determining the volume of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($MPWVRWR_i$), but also for the volume of environmental flow (VEF_i):

$$MPWVRWR_i = CMPWRWR_i \cdot VRWR_i; \quad (41)$$

$$VEF_i = (1 - CMPWRWR_i) \cdot VRWR_i = EFVC_i \cdot VRWR_i, \quad (42)$$

The mathematical model of the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) is extremely complex and requires the use of graphical - analytical and analytical solution methods.

The essence of the graph - analytical method for determining the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$), which are a function of economic activity ($EARB_i$) and hydrological-ecological activity ($HEARB_i$) of the catchment area of river basins, is as follows. Initially, when constructing graphs in one Cartesian system, one should first construct a graph of the complex function of ecological activity ($EARB_i$), which has a bell - shaped form and is approximated by a quadratic equation:

$$EGPC_i = EARB_i = -2,5501 \cdot CWRWR_i^2 + 2,6992 \cdot CWRWR_i - 0,0225. \quad (43)$$

Next, it is necessary to construct a graph of the hydrological-ecological activity function ($HEARB_i$) having the following form: $HEARB_i = (1 - ESRB_i) \cdot AAWCC_{maxi} + ESRB_i \cdot AAWCC_{mini}$ or $HEARB_i = (1 - ESRB_i) \cdot CAARV_{maxi} + ESRB_i \cdot CAARV_{mini}$, which, depending on the level of adopted ecological - economic - social decisions, will move along the ordinate axis, intersecting the bell - shaped form of the economic activity function in two places, dividing them into different areas (Figure 2).

In this case, the abscissas of the intersection points of the bell - shaped curves A ($EARB_i, CWRWR_i$) will B ($EARB_i, CWRWR_i$) be the roots of the quadratic equation $EARB_i = -2,5501 \cdot CWRWR_i^2 + 2,6992 \cdot CWRWR_i - 0,0225$, where the maximum value of the coefficient of withdrawal of renewable water resources ($CWRWR_{maxi}$) will be equal to the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$).

The analytical method for determining the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) is based on the classical approach to solving a three - term quadratic equation based on the root formula and Vieta's theorem.

Based on the joint solution of the functions of the coefficient of hydrological-ecological activity ($HEARB_i$) and ecological activity ($EARB_i$) using the root formula, it is possible to determine the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$).

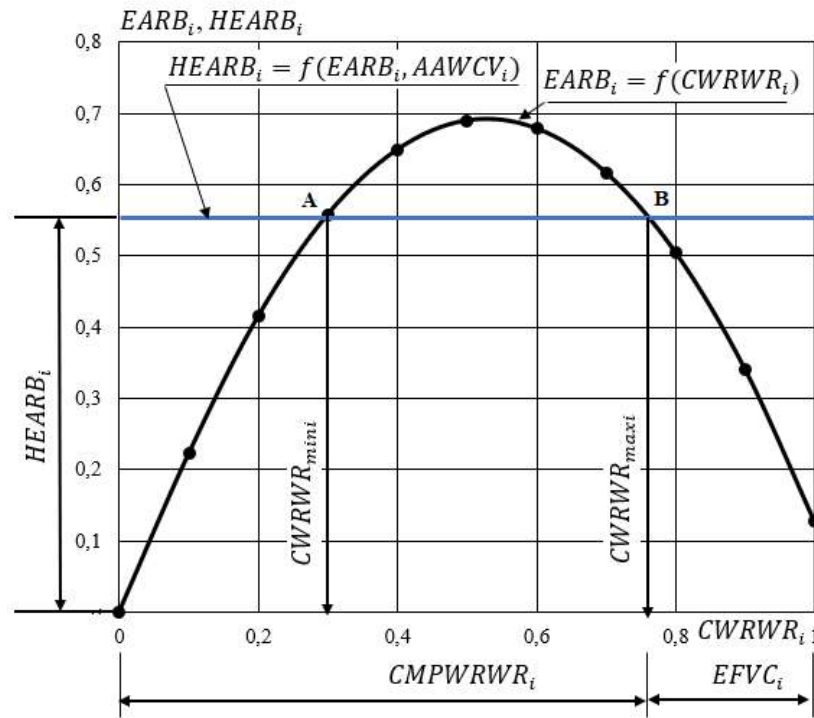


Figure 2. Graphical - analytical determination of the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) and the volume of environmental flow ($EFVC_i$)

The starting point for establishing the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) is the design value of the coefficient of hydrological and ecological activity ($HEARB_i$) adopted on the basis of the strategy and tactics of environmental protection activities in the catchment area of river basins, which is numerically equal to the coefficient of ecological activity ($EARB_i$). In this case, the basic three - term quadratic equation $Y = a \cdot X^2 + b \cdot X + c$ in a particular case has the following form: $EGPC_i = EARB_i = -2,5501 \cdot CWRWR_i^2 + 2,6992 \cdot CWRWR_i - 0,0225$ with constant coefficients $a = - 2.5501$, $b = 2.6992$, $c = - 0.0225$ and $Y = EGPC_i = EARB_i = HEARB_i = 0.5500$.

Then, the three - term quadratic equation for determining the coefficient of maximum permissible withdrawal of renewable water resources ($CMPWRWR_i$) will take the following form:

$$\begin{aligned}
 HEARB_i &= a \cdot CWRWR_i^2 + b \cdot CWRWR_i + c \rightarrow \\
 a \cdot CWRWR_i^2 + b \cdot CWRWR_i - (c + HEARB_i) &= 0 \rightarrow \\
 a \cdot [CWRWR_i + (b/2 \cdot a)]^2 - \{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/4 \cdot a\} &\rightarrow \\
 a \cdot [CWRWR_i + (b/2 \cdot a)]^2 &= \{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/4 \cdot a\} \rightarrow \\
 [CWRWR_i + (b/2 \cdot a)]^2 &= \{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/4 \cdot a^2\}. \quad (44)
 \end{aligned}$$

Since the left side of the last expression is non - negative, then in order for the equation to have roots, it is necessary and sufficient that the right side is also non - negative, and this is possible only in the case when the number $D = [b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]$, the so - called discriminant of a quadratic equation, is greater than or equal to zero, then the quadratic equation will take the following form:

$$CWRWR_i + (b/2 \cdot a) = \pm \sqrt{\{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/4 \cdot a^2\}} \rightarrow$$

$$\begin{aligned}
CWRWR_i &= -(b/2 \cdot a) \pm \sqrt{\{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/4 \cdot a^2\}} \rightarrow \\
CWRWR_i &= -(b/2 \cdot a) \pm \sqrt{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]/2 \cdot a} \rightarrow \\
CWRWR_i &= \{-b \pm \sqrt{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]}\}/2 \cdot a \rightarrow \\
D &= \sqrt{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]} \rightarrow \\
CWRWR_i &= (-b \pm \sqrt{D})/2 \cdot a. \tag{45}
\end{aligned}$$

Thus, equation (35) as an equation for the coefficient of economic and ecological activity of the catchment area of river basins ($EGPC_i = EARB_i$) reflects the following properties:

- $CWRWR_{si} = -b/2 \cdot a = -2,6992/2 \cdot (-2,5501) = 0,5292$ – the axis of symmetry of the bell - shaped curves characterizing the economic and environmental activity of the catchment area of river basins (Figures 2);

$$\begin{aligned}
EGPC_i = EARB_i &= (4 \cdot a \cdot c - b^2)/4 \cdot a = \\
&= [4 \cdot (-2,5501) \cdot (-0,0225) - 2,6992^2]/4 \cdot (-2,5501) = \\
&= (0,2295 - 7,2857)/(-10,2004) = 0,692
\end{aligned}$$

- the top of the bell - shaped curves characterizing the economic and environmental activity of the catchment area of river basins (Figure 2);

$$\begin{aligned}
-D &= \sqrt{[b^2 - 4 \cdot a \cdot (c + HEARB_i)]} = \sqrt{2,6992^2 - 4 \cdot 1,4599} = \\
\sqrt{2,6992^2 - 4 \cdot 1,4599} &= \sqrt{7,2857 - 5,8397} = \sqrt{1,4460} = 1,2025 \text{ – discriminant} \\
&\text{of a quadratic equation characterizing the economic and environmental activity of the catchment} \\
&\text{area of river basins;}
\end{aligned}$$

- the abscissa of the intersection points of the bell - shaped curves, characterizing the ecological and economic activity of the catchment area of the river basins with the axis $CWRWR_i$ is the root of a square trinomial:

$$\begin{aligned}
CWRWR_{mini} &= (-b + \sqrt{D})/2 \cdot a = (-2,6992 + 1,2005)/(-5,1002) = 0,2935 \text{ and} \\
CWRWR_{maxi} &= (-b - \sqrt{D})/2 \cdot a = (-2,6992 - 1,2005)/(-5,1002) = 0,7646 \\
&\text{(Figure 2).}
\end{aligned}$$

Therefore, the maximum permissible volume of water resource withdrawal from river basins will be the maximum value of the abscissa according to the points of intersection of the Pythagorean bell-shaped watershed curves, which represent the economic activity ($CWRWR_{maxi}$), characterizing the irreversible ecological period, then the environmental flow ($EFVC_i$) will be equal to: $EFVC_i = 1 - CWRWR_{maxi} = 1 - 0,7646 = 0,2354$.

To determine an integrated assessment of the maximum permissible withdrawal of renewable water resources in river basin catchment areas, a system of indicator metrics has been developed, presented as mathematical models of hydrological, ecological, and economic activity coefficients. Each coefficient characterizes a specific aspect of the quantitative or qualitative state of the natural environment surrounding humans and can be used to manage environmental safety and rational nature management.

The key features of the proposed relationship between the hydrological-ecological and economic activity coefficient ($HEARB_i, EARB$) and the extraction of renewable water resources ($CWRWR_i$) are that, for minor impacts on the water intake area of river basins, its response is disproportionately small (due to adaptation); then, the impact is proportional to the impact; and finally, for very strong impacts that destroy the natural system of river basins, their further increase has little effect on the degradation process. The proposed methodology for assessing the maximum permissible withdrawal of renewable river flow and the magnitude of environmental flow release

within river basin catchment areas is based on a developed mathematical model of economic activity described by a logistic curve in the form of a quadratic equation, as well as on a model of hydrological and ecological activity represented by a system of multiparameter linear equations. These models reflect the laws, principles, rules, and hypotheses of environmental management science and are consistent with the requirements of existing regulatory documents governing environmental quality standards.

4. CONCLUSION

The proposed methodology for assessing the maximum permissible withdrawal of renewable water resources and environmental flow within river basin catchment areas is distinguished by its basis in that it is based on a developed mathematical model of economic activity, described by a logistic curve in the form of a quadratic equation, and hydrological and ecological activity, represented by a system of multiparameter linear equations reflecting the laws, principles, rules, and hypotheses of environmental science, as well as current regulatory documents on environmental performance standards.

The analysis and assessment of the regulation of maximum permissible irreversible withdrawal of river flow and environmental flow release in the basin of the transboundary Shu River showed that they are based on indicators of the territorial organization of water use, grounded in the fundamental principles of environmental management. At the same time, the catchment area is considered not only as a spatial basis of the natural environment surrounding humans, but also as a tool for managing economic activity within the framework of the sustainable development triad: ecology (ensuring the quality of the human living environment), economy (increasing the level of economic development and purchasing power of society), and society (improving the well-being of the population).

Updating the methodological provisions предусматривает consideration of climatic, hydrological, hydrochemical, and water management changes under conditions of global climate change, as well as their impact on the values of maximum permissible river flow withdrawal and environmental flow release. This is aimed at ensuring sustainable conditions for the development and functioning of river basin ecosystems that perform important environment-forming and ecological functions.

DATA AVAILABILITY

The data used in this study were obtained by the authors from the following sources: data from Hydrological Yearbooks («Resources...») and the State Water Cadastre), as well as materials from state statistical collections.

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. Kostyakov A.N., Kutergin V.A. Estimated irrigation availability // Principles and methods of complex use of water resources of small basins. - M.: USSR Academy of Sciences, 1950. - P. 3 - 70. [in Russian].
2. Shavva K.I. Determination of optimal parameters of water management facilities and rational schemes for the use of water resources. – Frunze: Kyrgyzstan, 1972. – 251 p. [in Russian].
3. Rex L.M. Systematic studies of melioration processes and systems. – Moscow: 1995. – 192 p. [in Russian].

4. Panasenko I.M., Zaurbekov A.K., Narbaev T.I. Water resources of the foothill zone of the Dzhambul region and their irrigation capacity // Design and construction of hydraulic structures on irrigation systems. - Tashkent: 1976. - P. 105 - 114. [in Russian].
5. Zaurbekov A.K. Scientific Foundations of Rational Use and Protection of Water Resources of a River Basin: diss... Dr. Tech. Sciences / A.K. Zaurbekov. Almaty, 1998. 311 p. [in Russian].
6. Golchenko M.G., Stelmakh E.A. Methodological recommendations for determining the estimated irrigation availability in Belarus. - Gorki: BelSKHI, 1978. - 58 p. [in Russian].
7. Ratkovich D.Ya. Hydrological foundations of water supply. - M.: IWP RAS, 1993. - 428 p. [in Russian].
8. Yatsyk A.V. Ecological foundations of rational water use. - Kyiv: Geneza, 1997. - 640 p. [in Russian].
9. Fashchevsky, B.V. Problems of environmental regulation of the water regime of rivers Text. /B.V. Fashchevsky // Land reclamation and water management. - M.: MGUP, 1993. - №5. - P. 17 - 19. [in Russian].
10. Koval'skiy V.S. Combined use of surface and groundwater resources. - M.: Scientific World, 2001. - 321 p. [in Russian].
11. Aidarov I.P., Venetsianov E.V., Ratkovich D.Ya. On the problem of ecological revival of river basins // Water resources. - 2002. - Vol. 29. - No. 2. - P. 240 - 252. [in Russian].
12. Reimers, N. F. Ecology: theories, laws, rules, principles and hypotheses. - M.: Young Russia, 1994. - 367 p. . [in Russian].
13. Ricklefs R. Fundamentals of General Ecology / Translated from English by N.O. Fomina. Ed. by N.N. Kartashev - Moscow: Mir, 1997. - 424 p. [in Russian].
14. Burlibaev M.Zh. Theoretical foundations of sustainability of ecosystems of transzonal rivers of Kazakhstan. - Almaty: Kanagat, 2007. - 516 p. [in Russian].
15. Mustafayev Zh.S., Mustafayev K.Zh., Koybagarova K.B., Mustafayeva L.Zh. Methodology for assessing the ecological and economic efficiency of environmental management of agricultural landscapes // Bulletin of the Altai State Agrarian University. - Barnaul, 2007. - No. 6 (32). - P. 24 - 28. [in Russian].
16. Mustafayev Zh.S., Mustafayev K.Zh., Koybagarova K.B., Mustafayeva L.Zh. On the ecological and economic efficiency of environmental management // Abstracts of reports of the VII Republican scientific conference / Actual environmental problems of the Republic of Tatarstan. - Kazan, 2007. - P. 128 - 130. [in Russian].
17. Dubinina V.G. Methodological foundations of environmental regulation of irrevocable withdrawal of river flow and establishment of environmental flow (release). Moscow: Economics and Information Technology, 2001. - 118 p. [in Russian].
18. Mustafayev Zh.S., Mustafayev K.Zh. Methodological foundations for assessing the maximum permissible use of natural resources (Analytical review). - Taraz, 2011. - 45 p. [in Russian].
19. Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Dauletbay S.D. Hydrological profile of the catchment of the transboundary Shu River basin // Hydrometeorology and Ecology, 2022, No. 2 (105), pp. 32–46. (RSCI – Science Index) [in Russian].
20. Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Abdeshev K.B., Dauletbay S.D. Geochemical profile of the catchment of the transboundary Shu River basin // International Technical and Economic Journal, 2022, No. 1, pp. 76–89. (RSCI – Science Index) [in Russian].
21. Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Dauletbay S.D. Comprehensive assessment of the indirect impact of anthropogenic human activity on the catchment of the Shu River basin // Hydrometeorology and Ecology, 2022, No. 1 (104), pp. 50–64. (RSCI – Science Index)
22. Mustafayev Zh.S., Kozykeyeva A.T., Kireicheva L.V., Dauletbay S.D. Ecological profile of drainage in the Shu River basin under anthropogenic activity // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences, Vol. 1, No. 445 (2021), pp. 106–113.
23. Mustafayev Zh.S. Integrated water management of transboundary rivers: concepts, theory and methods. - Chisinau: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2022. - 299 p. (eng.)
24. Methodological recommendations for establishing maximum permissible concentrations. - Moscow: VNIRO, 1998. 145 p. [in Russian].
25. RD 52.04.186 - 89. Guidelines for the Control of Atmospheric Pollution. - Moscow: USSR State Committee for Hydrometeorology - USSR Ministry of Health. 1991. 691 p. [in Russian].
26. Shabanov V.V., Markin V.N. Assessment of water quality and ecological state of water bodies // Water purification, Water treatment, Water supply, 2008. - No. 10. - P. 28 - 37. [in Russian].
27. Mustafayev, Z. (2022). Forecasting the quality of surface waters in river basins using physical and chemical indicators of natural systems. "Reports of the NAS RK", (3), 132–144. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-1483.164>. [in Russian].
28. Mustafayev Zh.S. Soil - ecological substantiation of agricultural land reclamation in Kazakhstan: Abstract for the degree of Doctor of Technical Sciences. - Moscow: MGMI, 1992. - 50 p. [in Russian].
29. Aquastat FAO. Official website of the Global Water Information System of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. [Electronic resource]. URL: <http://www.fao.org/nr/aquastat/> (date accessed: 09/22/2023)
30. Asanbaev A.T., Mamatkanov D.M., K.I. Shavva, Shapar A.K. Economic mechanism for managing transboundary water resources and the main provisions of the strategy for interstate water allocation. - Bishkek, 2000. - 48 p. [in Russian].
31. Ibatullin S.R., Mustafayev Zh.S., Koibagarova K.B. Balanced use of water resources of transboundary rivers. - Taraz: IC "Aqua", 2005. - 111 p. [in Russian].
32. Gauss K.F. Works on number theory. M.: USSR Academy of Sciences, 1959. - 979 p. [in Russian].
33. Ricklefs R. Fundamentals of General Ecology / Translated from English by N.O. Fomina. Edited by N.N. Kartashev. - Moscow: Mir, 1997. - 424 p. [in Russian].
34. Fashchevsky B. V. Ecological justification of the permissible degree of river flow regulation. - Minsk: BelNIINTI, 1989. - 51 p. [in Russian].

ӨЗЕН АҒЫНЫ МЕН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ АҒЫННЫҢ ЕҢ ЖОҒАРЫ РҰҚСАТ ЕТІЛГЕН АЛУ КӨЛЕМІН КЕШЕНДІ БАҒАЛАУ ӘДІСТЕМЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Жумахан С. Мустафаев^{1*} т.ғ.д, профессор, Канат Ж. Мұстафаев², э.ғ.к.

¹ «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; z-mustafa@rambler.ru

² «GENC KZ CONSTRUCTION» ЖШС, Алматы, Қазақстан; kmustafaev@gmail.com

*Автор корреспондент: Жумахан С. Мұстафаев, e-mail: z-mustafa@rambler.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

су ресурстары, өзен алабы, ағынның қайтымсыз тартылуы, экологиялық ағын, квадрат теңдеу, әдіснама.

Мақала жайында:

Жіберілді: 31.10.2025

Қайта қаралды: 11.02.2026

Қабылданды: 20.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Өзен ағынының шектілген-мүмкіншілік шегін және экологиялық ағынының шамасын бағалау мәселесін шешуге арналған қазіргі кездегі замуани тәсілдің айрықша ерекшеліктері, ол су ағынын пайдалану сипаты мен ауқымының табиғи ортаға әсерін, сондай-ақ олардың өзеннің су жинау алқаптарының аймақтарындағы экологияға, экономикаға және әлеуметтік жағдайына әсерін бағалау болып табылады. *Зерттеудің мақсаты* - геоэкологиялық шектеулердің талаптарын ескере отырып, өзен ағынының шектілген-мүмкіншілік шегін және экологиялық ағынының шамасын бағалаудың әдіснамалық тәсілін әзірлеу. *Зерттеу мәліметтері мен әдістері*. Зерттеу әдіснамасы өзен алқабының су жинау аймақтарының гидрологиялық, экологиялық және экономикалық белсенділігінің математикалық модельдерін әзірлеуге негізделген осы мәндердің көрсеткіштерін негіздеудің екі тәсілін қамтиды. Жұмыста Қазақстан Республикасы мен Қырғыз Республикасының мемлекеттік ұйымдарының статистикалық деректері пайдаланылды. *Нәтижесі*. Өзен алабының табиғи және техногендік жүргілерінің модельдерін құруға негізделген өзен ағынының шектілген-мүмкіншілік шегін және экологиялық ағынының шамасын реттеудің жалпы қағидасы, сынақтық көрсеткіштері және мөлшерлеудің әдістері ұсынылған. Нақты өзен алаптары үшін шектілген-мүмкіншілік шегін және экологиялық ағынының шамасын бағалаудың есептеудің шеңберінде тексерудің алгоритмі ұсынылған. *Қорытынды*. Математикалық модельдерді пайдалану гидрологиялық, экологиялық және экономикалық тұрғыдан тереңірек негіздеуге мүмкіндік береді, бұл өзеннің сужинау аймақтарындағы әлеуметтік-экологиялық жағдайды жақсартуға ықпал етеді.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ОБЪЕМА ПРЕДЕЛЬНО-ДОПУСТИМОГО ИЗЪЯТИЯ РЕЧНОГО И ПРОПУСКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА

Жумахан С. Мустафаев^{1*} д.т.н., профессор, Канат Ж. Мұстафаев², 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. Мұстафаев, z-mustafa@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водные ресурсы, речной бассейн, безвозвратное изъятие стока, экологический сток, квадратное уравнение, методология.

АБСТРАКТ

Отличительными чертами современного подхода к решению задачи оценки предельно допустимого изъятия речного стока и попуска экологического стока являются учет влияния характера и масштабов использования водных ресурсов на природную среду, а также оценка их воздействия на экологию, экономику и социум на территории водосборов речных бассейнов. *Цель исследования* заключается в разработке методического подхода к оценке предельно допустимого изъятия речного стока и попуска экологического стока с учетом

По статье:

Получено: 31.10.2025

Пересмотрено: 11.02.2026

Принято: 20.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026





требований геоэкологических ограничений. *Материалы и методы исследования.* Методология исследования включает два подхода к обоснованию объемов указанных величин, основанных на разработке математических моделей гидролого-экологической и экономической активности территорий водосборов речных бассейнов. В работе использовались статистические данные государственных организаций Республики Казахстан и Кыргызской Республики. *Результаты.* Предложены общие принципы, критерии, параметры и методы нормирования предельно допустимого изъятия речного стока и попуска экологического стока, базирующиеся на моделировании природных и антропогенных процессов в речных бассейнах. Приведен алгоритм апробации в рамках расчетов нормативов допустимого воздействия для конкретных речных бассейнов. *Выводы.* Использование математических моделей позволяет провести более углубленное гидролого-эколого-экономическое обоснование, способствующее улучшению социально-экологической обстановки на территории водосборов речных бассейнов.

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).



Научная статья

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВОДОЕМАХ АЛМАТИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, д.инж.н., Валентин В. Смургин¹, Кирилл Д. Гизатулин¹, Адилхан Сымагулов^{1,2}, Алексей Г. Терехов^{2,3}, к.т.н., Елена Л. Мухамедиева^{1,2}, Фарида Н. Абдолдина¹, к.т.н.

¹ НАО «Казахский Национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева» (Satbayev University), Алматы, Казахстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.), valentinsmurgin@gmail.com (В.В.С.), gkd.030201@gmail.com (К.Д.Г.), asmogulove00@gmail.com (А.С.), abdoldinafarida@gmail.com (Ф.Н.А.).

² Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан; muhamedijeva@gmail.com (Е.Л.М.)

³ РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан; aterekhov1@yandex.ru (А.Г.Т.)

Автор корреспонденции: Фарида Н. Абдолдина, abdoldinafarida@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Оптически активные компоненты, Озеро Сорбулак, Загрязненность воды, Дистанционный мониторинг, Беспилотный летательный аппарат (БПЛА)

АБСТРАКТ

В работе описывается набор данных, полученный в ходе полевых экспедиций к озеру Сорбулак и водохранилищу Капчагай. На указанных водоемах произведены облеты в прибрежной зоне с применением БПЛА, оснащенного мультиспектральной камерой. Рассчитаны и картированы спектральные индексы обеспечивающие выявление водной поверхности и наличие в водоемах оптически активных компонентов на основе спутниковых продуктов (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) и изображений, полученных с борта БПЛА (NDWI, NDCI, WRI, NDTI). Выполнено сравнение качества оценки загрязненности озера оптически активными компонентами с применением спутниковых снимков и снимков полученных с борта БПЛА. Показано, что загрязненность прибрежной зоны озера Сорбулак (мутность и содержание хлорофилла) в несколько раз выше, чем водохранилища Капчагай. БПЛА демонстрируют большую детализацию в малых масштабах, способны выполнять мониторинг с высоким темпоральным и пространственным разрешением. Однако малогабаритные мультиспектральные камеры устанавливаемые на борту БПЛА обладают ограничениями по числу спектральных каналов. БПЛА ограничены и по масштабу выполняемого мониторинга. С другой стороны, спутниковый мониторинг отличается большими масштабами, большим числом спектральных каналов даже в бесплатной версии спутниковых продуктов и, в тоже время, намного меньшим пространственным и временным разрешением. Очевидно, что сочетание возможностей присущих обеим технологиям может повысить качество и оперативность мониторинга крупных водных объектов в зонах существенного антропогенного влияния.

1. ВВЕДЕНИЕ

Научное сообщество проявляет значительный интерес к вопросам использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в области экологического мониторинга [1]. Значительное число статей посвящено мониторингу дорожного движения [2] и оценке качества воздуха по содержанию CO, O₃, NO, двуокиси азота NO₂, сжиженного природного газа, H₂, метана, PM2.5, летучих органических соединений (VOC), CO₂, SO₂, CO, температуры, влажности, NH₃, PM10 [3...6], мониторинга, вертикального [7] и пространственного распределения пылевых частиц

По статье:

Получено: 16.08.2025

Пересмотрено: 09.03.2026

Принято: 10.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Мухамедиев Р., Смурыгин В., Гизатулин К., Сымагулов А., Терехов А., Мухамедиева Е., Абдолдина Ф. Сравнительный анализ дистанционных методов контроля оптически активных компонентов в водоемах Алматинской области // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 24-42.

[8...9]. Рост публикационной активности наблюдается и в сфере контроля полигонов твердых бытовых отходов (ТБО) [10], шума [11] и загрязненности воды [12]. Рисунок 1 иллюстрирует изменения в количестве статей с определенным сочетанием ключевых терминов за десятилетний период.



Рисунок 1. Динамика публикационной активности по направлениям экологического мониторинга

Мониторинг загрязненности водных объектов включает контроль химических и термических загрязнений, мутности, загрязненности растительностью, нефтью, микропластиком, металлами и другими отходами связанным с промышленной или сельскохозяйственной деятельностью. Многие из указанных загрязнителей выявляются лабораторным анализом проб воды, однако часть загрязнителей могут быть определены путем анализа оптических каналов электромагнитного спектра, то есть являются оптически активными компонентами (ОАК). Подобные загрязнения могут быть идентифицированы и количественно оценены на космических или околоземных мультиспектральных снимках.

Особую проблему представляют собой водоемы, расположенные вблизи крупных городских агломераций. Антропогенная деятельность приводит к загрязнению водоемов бытовыми и промышленными отходами. Например, озеро Онтарио (Канада) одно из Великих озер, испытывает проблемы с загрязнением из-за промышленных и бытовых стоков. В последние годы предпринимаются усилия по очистке и восстановлению экосистемы [13]. Другим примером служит озеро Тайху (Китай). Это крупное пресноводное озеро, страдающее от эвтрофикации и загрязнения сточными водами. Власти Китая активно работают над улучшением качества воды и предотвращением дальнейшего загрязнения [14]. Озеро Виктория является крупнейшим озером Африки, которое сталкивается с проблемами загрязнения из-за сельскохозяйственных стоков и бытовых отходов. Международные организации и местные правительства работают над решением этих проблем [15]. Озеро Эри (США) страдает от загрязнения сточными водами и сельскохозяйственными стоками, что приводит к цветению водорослей и снижению качества воды [16]. Озеро Балатон (Венгрия) крупное, но мелководное. Испытывает проблемы с эвтрофикацией из-за сельскохозяйственных стоков и бытовых отходов. Озеро Чапала крупнейшее пресноводное озеро Мексики, страдающее от загрязнения сточными водами и сельскохозяйственными стоками [17]. К подобным водоемам, нуждающимся в мониторинге, можно отнести и озеро Сорбулак, специально созданное для сбора сточных вод Алматы, крупнейшего мегаполиса Казахстана.

Универсальным средством анализа подстилающей поверхности в дистанционном мониторинге являются спектральные индексы, которые позволяют оценить динамику изменений растительности, водоемов, пожаров и т.п. на поверхности Земли [18]. Например, Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) отражает содержание хлорофилла в воде, высокие значения указывают на цветение фитопланктона, значения > 0.3 – возможна эвтрофикация (это процесс чрезмерного обогащения водоёма питательными веществами, в первую очередь азотом (N) и фосфором (P), что приводит к бурному росту водорослей и фитопланктона). Высокие значения NDCI – тревожный сигнал, который указывает на цветение водорослей, что может быть связано с эвтрофикацией (избытком питательных веществ, таких как фосфор и азот). Может привести к снижению кислорода в воде и массовой гибели рыб. Низкие значения NDCI (синие зоны) – снижение биологической активности, что может быть связано с сезонными изменениями, очищением воды, уменьшением концентрации фитопланктона [19]. MNDWI используется для выявления воды, положительные значения означают наличие воды, отрицательные значения – суша, растительность. В экологической оценке водоемов используются несколько спектральных индексов для мониторинга состояния и качества воды [20...22] (Таблица 1):

Таблица 1
Спектральные индексы для мониторинга водоемов

Индекс	Аббревиатура	Формула	Назначение
Normalized Difference Water Index	NDWI	$NDWI = (G - NIR) / (G + NIR)$	Определение водоемов и мониторинг изменений уровня воды.
Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$MNDWI = (G - SWIR) / (G + SWIR)$	Улучшенная идентификация водоемов, особенно в урбанизированных районах.
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Оценка влажности почвы и растительности, а также мониторинг водного стресса.
Water Ratio Index	WRI	$WRI = (G + RED) / (NIR + SWIR)$	Определение водоемов и оценка их состояния.
Normalized Difference Chlorophyll Index	NDCI	$NDCI = (RedEdge - RED) / (RedEdge + RED)$	Определение содержания хлорофилла в воде
Normalized Difference Turbidity Index	NDTI	$NDTI = (RED - G) / (RED + G)$	Оценка мутности воды

Примечания:

G – зеленый (Green) канал (длина волны около 0.560 мкм), NIR – ближний инфракрасный канал, SWIR - канал коротковолнового инфракрасного диапазона (Band 11 для спутника Sentinel-2), RED – красный (red) канал, RedEdge - канал красного края.

В некоторых случаях, при отсутствии канала SWIR возможна замена формулы расчета Water Ratio Index следующим образом $WRI = (G + RED) / (NIR + NIR)$ [23]

БПЛА с установленной мультиспектральной камерой потенциально позволяют получить необходимые данные для расчета спектральных индексов при мониторинге водоемов. Особый интерес представляют NDTI и NDCI, которые дают возможность оценить мутность воды и концентрацию хлорофилла в водоемах как одного из видов оптически активных компонентов, который является индикатором уровня фитопланктона и продуктивности водных экосистем. Сравнение индексов, полученных на основе спутниковых продуктов и на основе низковысотных снимков с БПЛА позволяет оценить границы применимости обоих методов.

В настоящей работе описывается процесс сопоставительного анализа загрязненности озера Сорбулак оптически активными компонентами и оцениваются границы применимости методов, основанных на спутниковом дистанционном зондировании и зондировании с применением БПЛА.

Область исследований

Рост городской агломерации Алматы, которая занимает первое место по объему регионального валового продукта с долей 22.9% в ВВП страны, и рост самого мегаполиса, население которого на конец 2024 года составляло более 2.28 миллиона человек, приво-

дит к обострению экологических проблем [24]. К их числу кроме загрязненности воздушного бассейна относятся и проблемы утилизации отходов, в частности сточных вод. Для решения задачи обработки сточных вод используется озеро Сорбулак, расположенное в Алматинской области Казахстана. Озеро является искусственным водоемом, созданным в 1970-х годах для сбора сточных вод из Алматы (рисунок 2). Первоначально оно предназначалось для предотвращения загрязнения рек и подземных вод, однако со временем озеро стало источником экологических проблем. Среди экологических проблем, связанных с озером, во-первых, выделяют собственно загрязненность воды органическими и неорганическими соединениями, в частности, считается, что озеро Сорбулак содержит высокие концентрации тяжелых металлов и других загрязняющих веществ, что представляет угрозу для окружающей среды и здоровья населения [25...26]. Во-вторых, отмечается, что уровень воды в озере подчас достигает предельных значений и, соответственно, существует опасность прорыва дамбы, что может привести к затоплению прилегающих территорий и загрязнению рек.

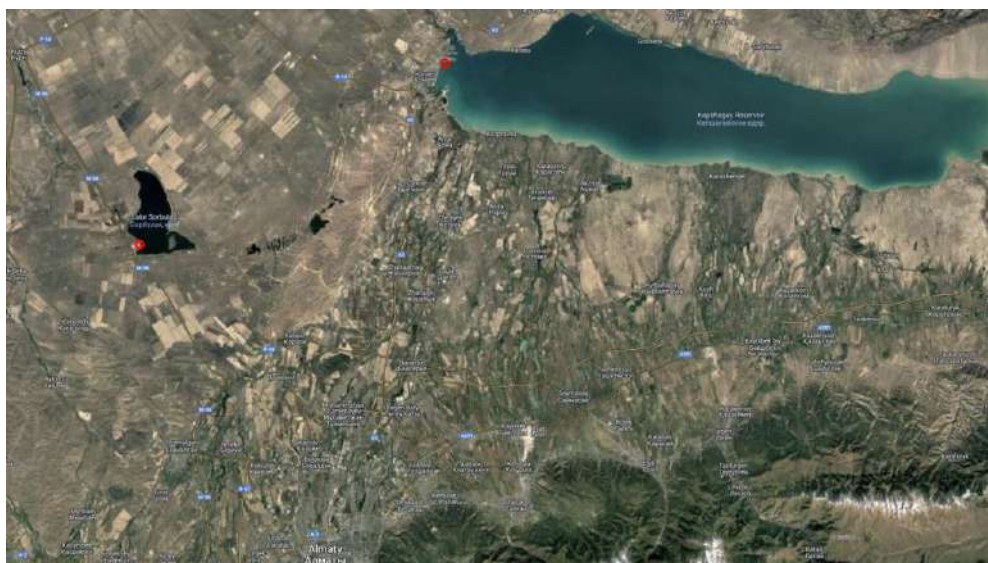


Рисунок 2. Озеро Сорбулак (слева сверху), водохранилище Капчагай (справа сверху) и город Алматы (внизу). Места проведения облетов помечены красными кружками

Для защиты подобных водоемов важно идентифицировать источники загрязнения, выполнять контроль за сбросом сточных вод и состоянием водоема. Это позволит оценить затраты на использование современных очистных сооружений, использование технологий аэрации, фильтрации и биологического разложения органических веществ. Для контроля состояния водоемов кроме наземных способов определения качества воды используются методы дистанционного зондирования, особенно в случае, когда загрязнение воды происходит оптически активными компонентами. Данный процесс с применением двух способов дистанционного мониторинга (спутниковый и БПЛА мониторинг) описан в настоящей работе. Для сравнительного анализа методов выявления ОАК и оценки загрязненности сточного водоема и проточного водохранилища выполнен мониторинг не только озера Сорбулак, но и водохранилища Капчагай. На рисунке 2 места проведения полевых экспедиций обозначены красными кружками.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс исследований включал следующие этапы (рисунок 3):

- 1) Получение спутниковых продуктов и выполнение облетов БПЛА.
- 2) Формирование карт водоемов из множества снимков полученных с борта БПЛА.
- 3) Расчет спектральных индексов.
- 4) Сегментация карт спектральных индексов.

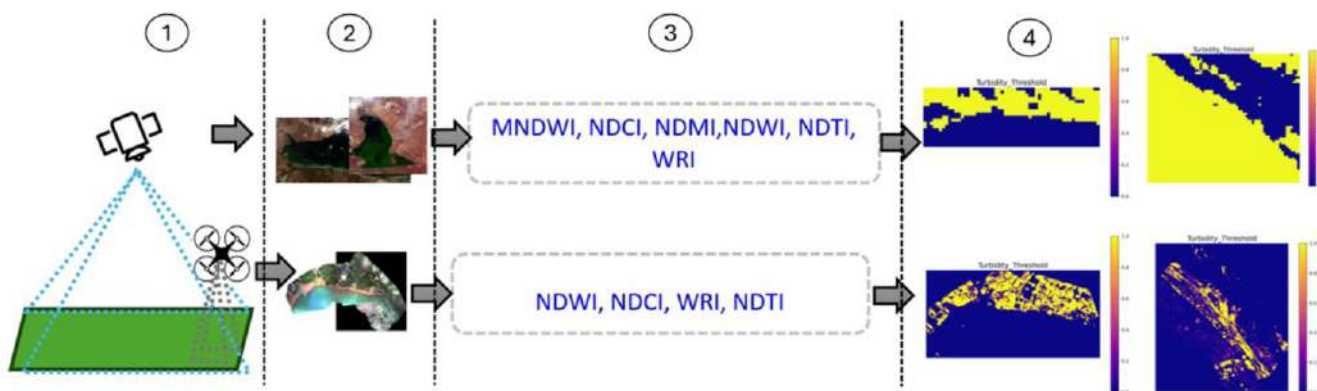


Рисунок 3. Основные этапы процесса исследований

Во-первых, получены спутниковые продукты высокого разрешения для озера Сорбулак и водохранилища Капчагай, за период максимально близкий к датам полевых работ, проведенных в июне 2024 года. Изображения водоемов со спутника в RGB показаны на рисунке 4.



Рисунок 4. Изображения водоемов со спутника. Сорбулак (слева) и Капчагай (справа)

Использованы космические снимки, полученные спутником Sentinel-2. Спутниковый продукт содержит 12 спектральных каналов от B1 до B12 и 4 канала спектральных индексов: NDVI, NDTI, NDCI, MNDWI.

Общепринятыми приложениями спектральных каналов B1...B12 являются следующие:

B1, B9, B10 – используются для атмосферных коррекций.

B4, B3, B2 – видимый спектр (RGB).

B5, B6, B7 – красный край.

B8, B8A – ближний инфракрасный диапазон (NIR), используется для NDVI.

B11, B12 – коротковолновой инфракрасный диапазон (SWIR), применяется в водных индексах (например, MNDWI).

Во-вторых, в течение четырех полевых экспедиций, к упомянутым водоемам выполнены облеты в прибрежной зоне и получены мультиспектральные снимки (рисунок 5...6).



Рисунок 5. Вид процесса облета на пульте дистанционного управления БПЛА



Рисунок 6. Процесс посадки БПЛА

БПЛА и комплекс наземных средств применённые в процессе сбора данных (рисунок 7) являются разработкой учебно-производственной лаборатории «Беспилотные летательные аппараты», созданной на базе КазНИТУ им. К.И. Сатпаева. На борту БПЛА установлена мультиспектральная камера MicaSense Altum. Полученные снимки собраны в формате geo tiff в 1017 мультиспектральных файлов, каждый из которых содержит 6 каналов (Blue, Green, Red, Nir, Red edge, LWIR). Разрешение каждого спектрального канала кроме LWIR стандартное - 2064x1544. Разрешение LWIR составляет 160x120. Пример одного из снимков приведен на рисунке 8.



Рисунок 7. БПЛА и наземное оборудование на берегу озера Сорбулак

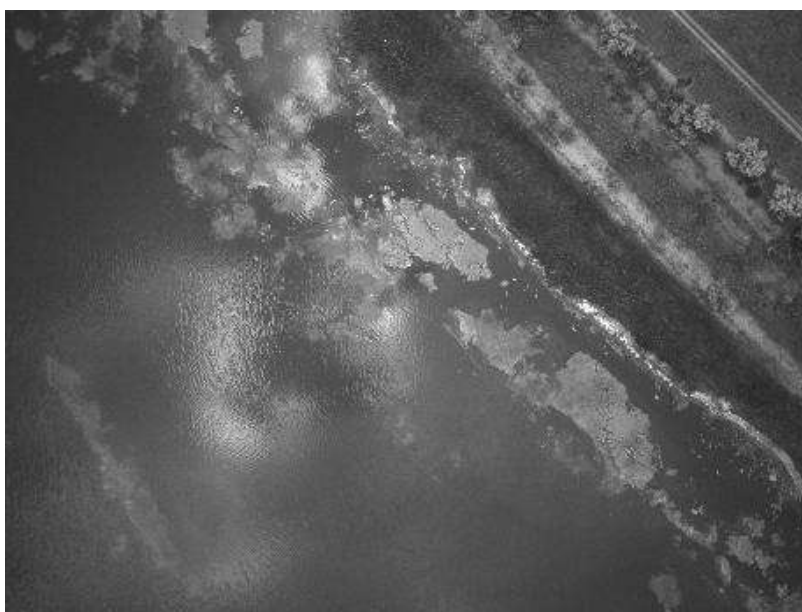


Рисунок 8. Один из каналов мультиспектрального снимка озера Сорбулак с борта БПЛА

Их полученных низковысотных снимков сформированы карты высокого разрешения (рисунок 9), где представлены сгенерированные из карты зоны облетов на озере Сорбулак и водохранилище Капчагай.

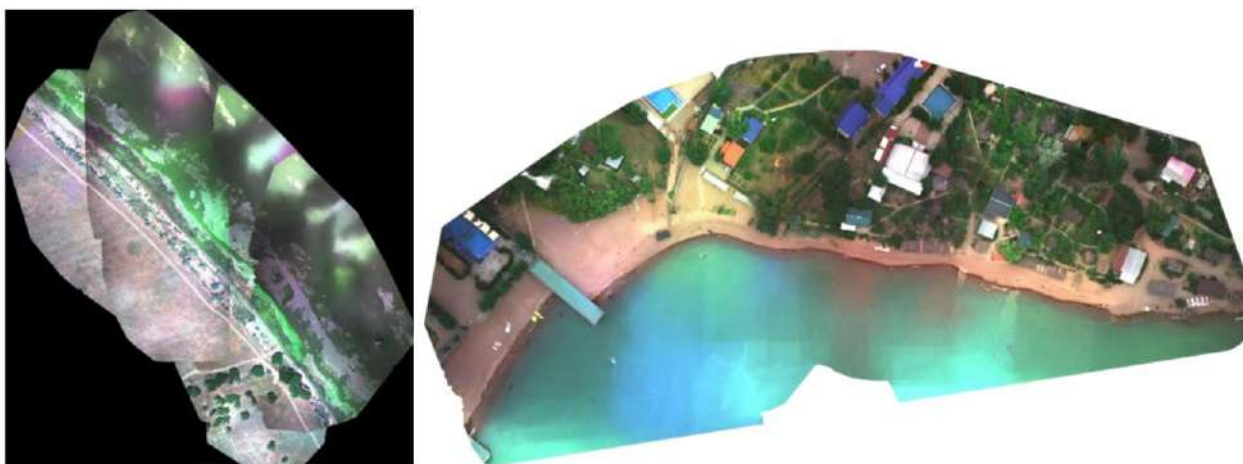


Рисунок 9. Карты высокого разрешения зон облетов на озере Сорбулак (слева) и водохранилище Капчагай (справа)

Полученные спутниковые и низковисотные данные позволяют рассчитать спектральные индексы, и сегментировать изображения несколькими методами для более ясного выявления зон загрязнения. Сегментация карт спектральных индексов выполнена с помощью трех методов, включая и алгоритм машинного обучения (K-means): Threshold Segmentation (Пороговая сегментация), Gaussian Segmentation (Гауссовская сегментация), K-means Clustering (Кластеризация K-средних). В таблице 2 приведен перечень показателей, которые используются для оценки качества воды в процессе обработки полученных спутниковых и низковисотных изображений.

Таблица 2

Расчетные показатели по спутниковым данным и данным полученным с борта БПЛА

Индекс №	Аббревиатура Показатель	Формула Диапазон значений	Назначение Что означает	Цветовая палитра (cmr)	Тип визуализации
1	NDCI	-0.3877 ... +0.5098	Содержит хлорофилл: низкие → чистая вода/растительность; высокие → цветение/эвтрофикация	viridis	Градиент
3	NDCI_Threshold	0 или 1	1 = NDCI > 0.2 (потенциальное цветение водорослей)	Greens	Дискретные классы
4	NDCI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры NDCI: 0 = низкий, 1 = средний, 2 = высокий	viridis	Дискретные классы
5	MNDWI	-0.6611 ... +0.9036	Индекс воды: <0 = суша/растительность; >0.2 = явная вода	Blues	Градиент
7	MNDWI_Threshold	0 или 1	1 = MNDWI > 0.2 (вода)	Blues	Дискретные классы
8	MNDWI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры MNDWI: 0 = суша, 1 = переход (берег), 2 = вода	Blues	Дискретные классы
9	NDTI (Turbidity)	-0.5863 ... +0.7022	Индекс мутности: отриц = прозрачная вода; полож = мутная вода	plasma	Градиент
11	NDTI_Threshold	0 или 1	1 = Turbidity > 0.2 (участки повышенной мутности)	plasma	Дискретные классы
12	NDTI_KMeans	0, 1, 2	Кластеры мутности: 0 = прозрачная, 1 = средняя, 2 = высокая	plasma	Дискретные классы

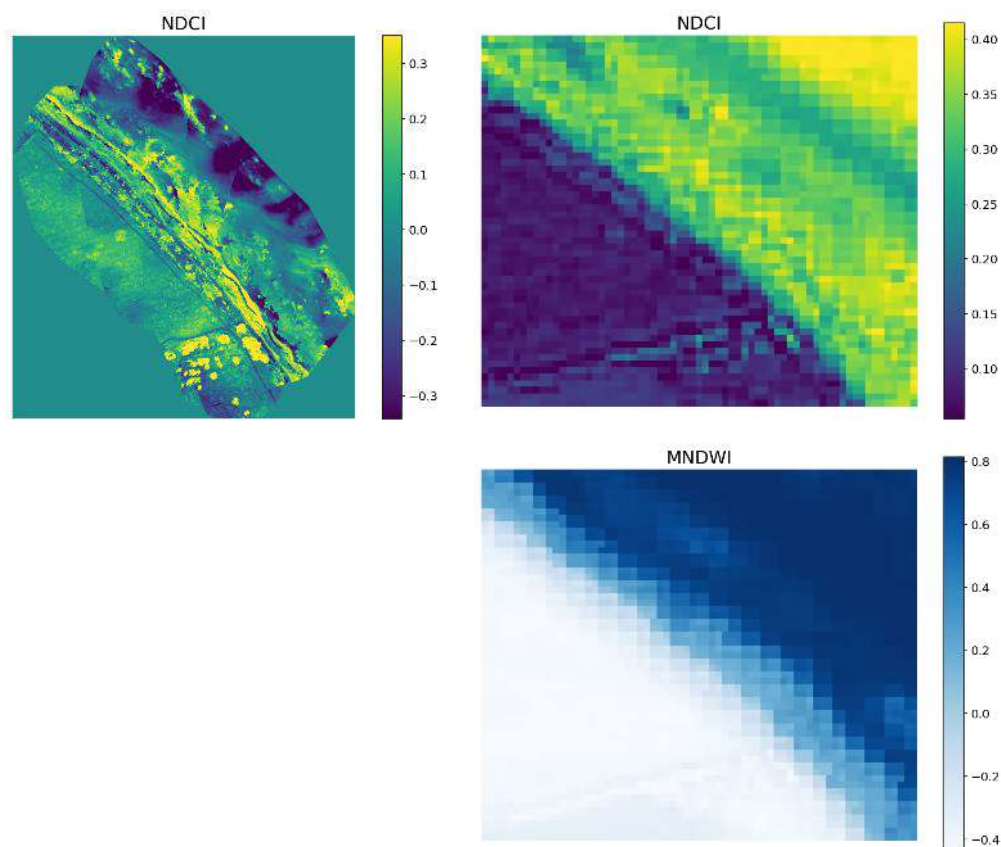
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления масштаба и разрешения снимков БПЛА и спутниковых снимков выполнено наложение карты снимков БПЛА на спутниковое изображение (рисунок 10).



Рисунок 10. Наложение карты снимков, полученных с помощью БПЛА на спутниковое изображение для озера Сорбулак (слева) и водохранилища Капчагай (справа)

На рисунке 11 показаны результаты расчета спектральных индексов с использованием спутникового продукта (справа) и снимков полученных с помощью БПЛА (слева) для озера Сорбулак. Пустые места в первой колонке демонстрируют что не часть спектральны индексов не может быть рассчитана с применением снимков с борта БПЛА. Можно видеть что спутниковые продукты хотя и дают более широкий перечень спектральных индексов однако обладают намного меньшим разрешением.



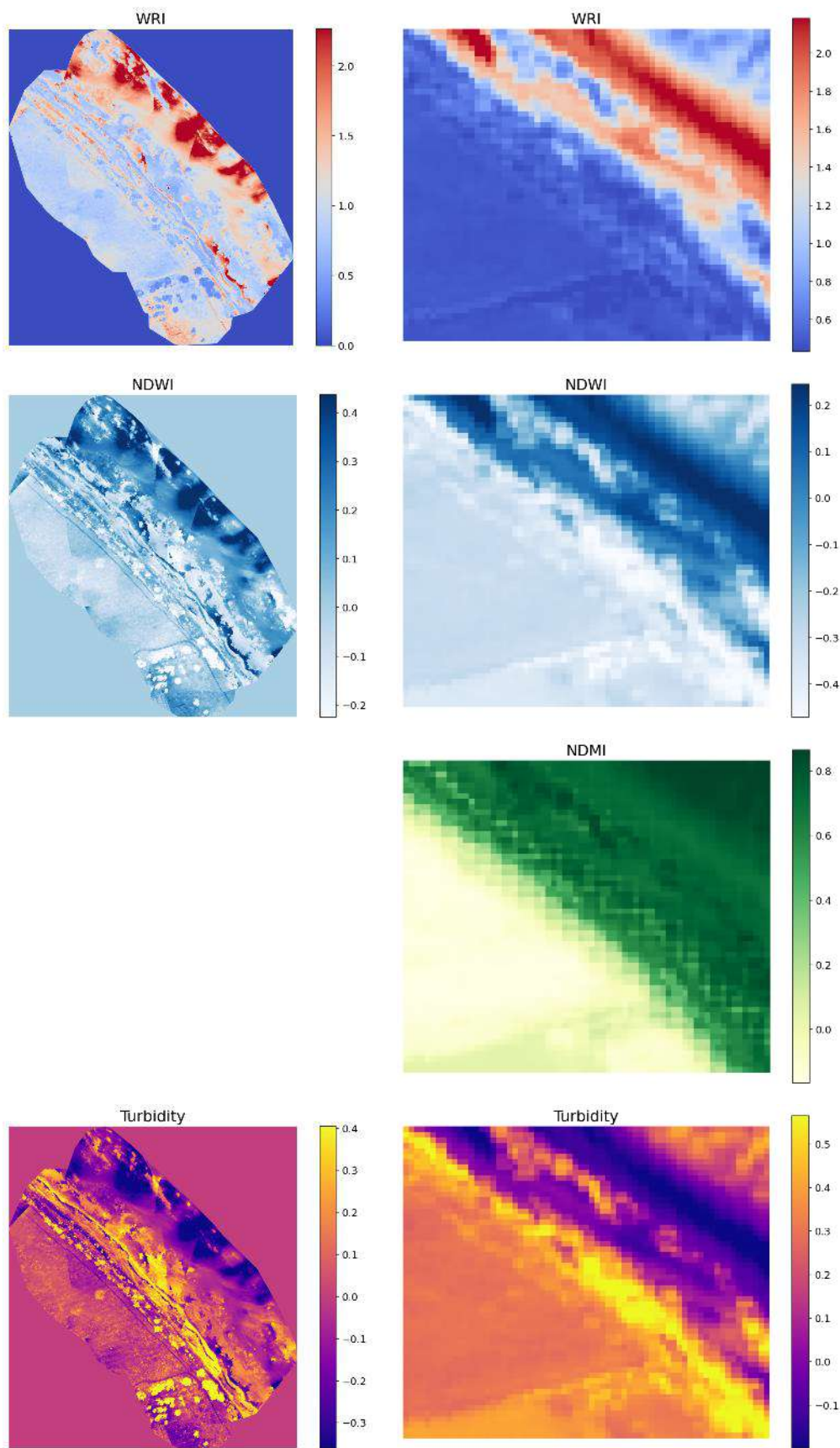
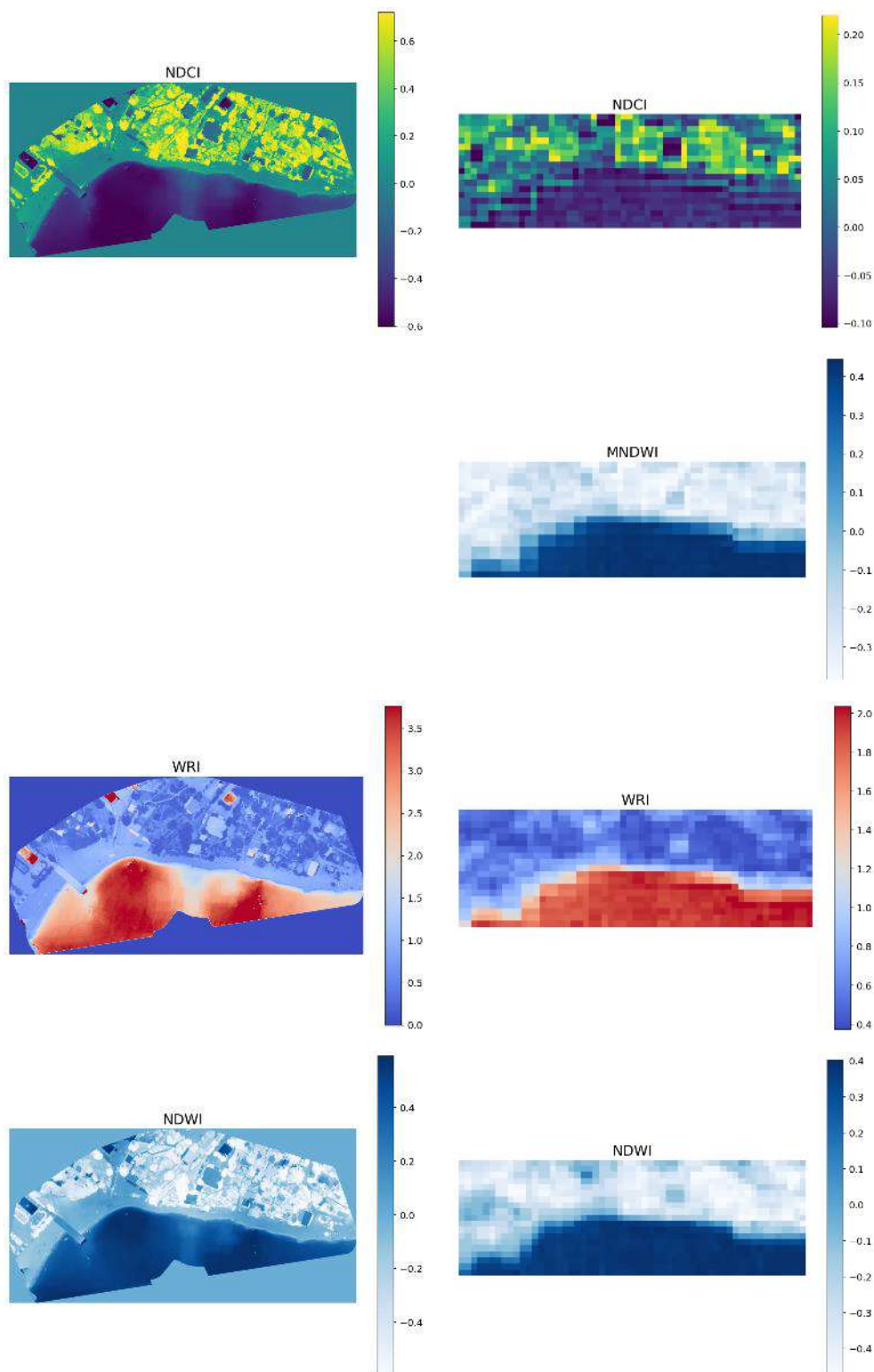


Рисунок 11. Сравнение карт спектральных индексов, полученных с БПЛА (слева) и спутника (справа)

На рисунке 12 показаны результаты расчета спектральных индексов с использованием спутникового продукта (справа) и снимков полученных с помощью БПЛА (слева) для водохранилища Капчагай.



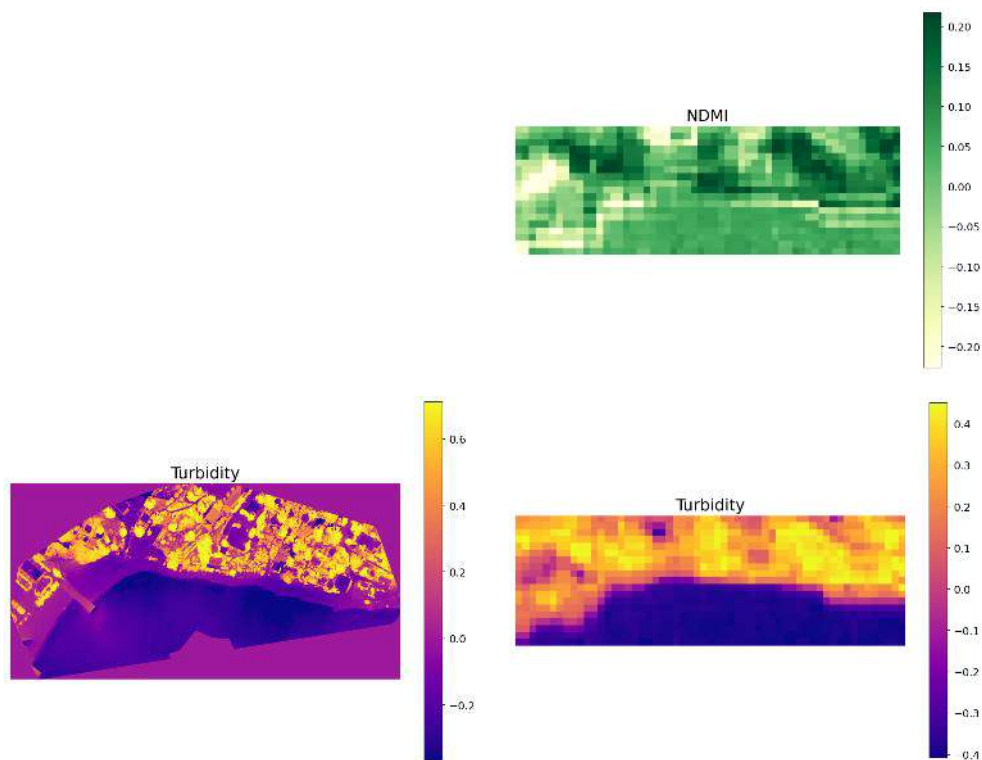


Рисунок 12. Сравнение карт спектральных индексов, полученных с БПЛА (слева) и спутника (справа)

Сегментированные изображения водоемов приведены на рисунках 13...18. Сегментация позволяет более ясно выделить зоны загрязненности особенно характерные для озера Сорбулак.

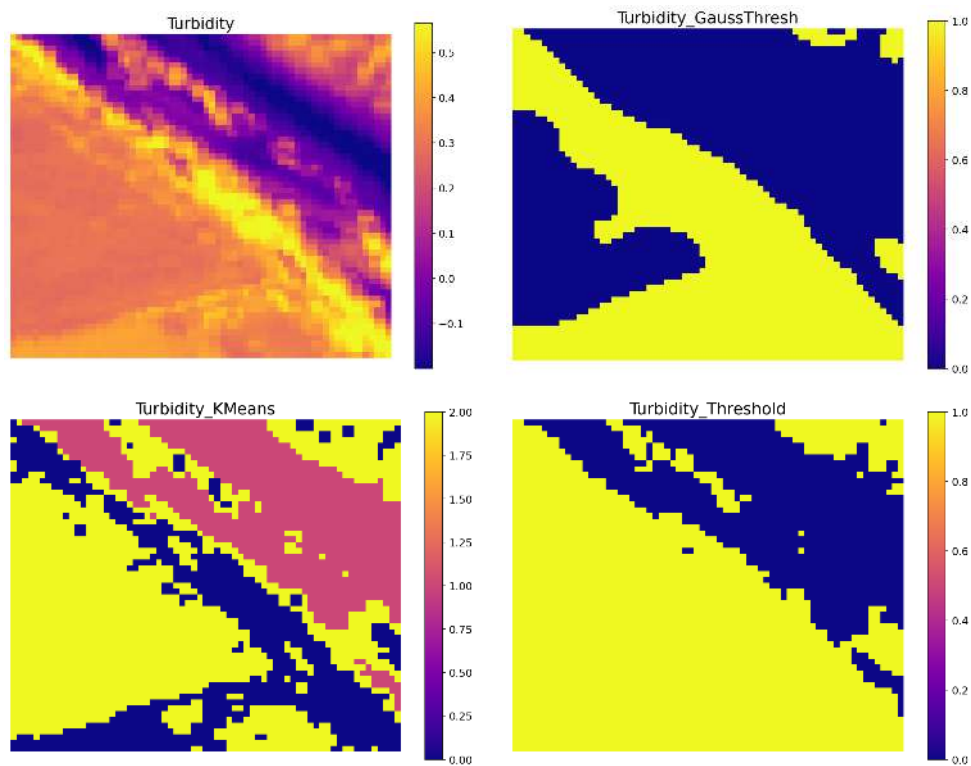


Рисунок 13. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны озера Сорбулак видимой со спутника

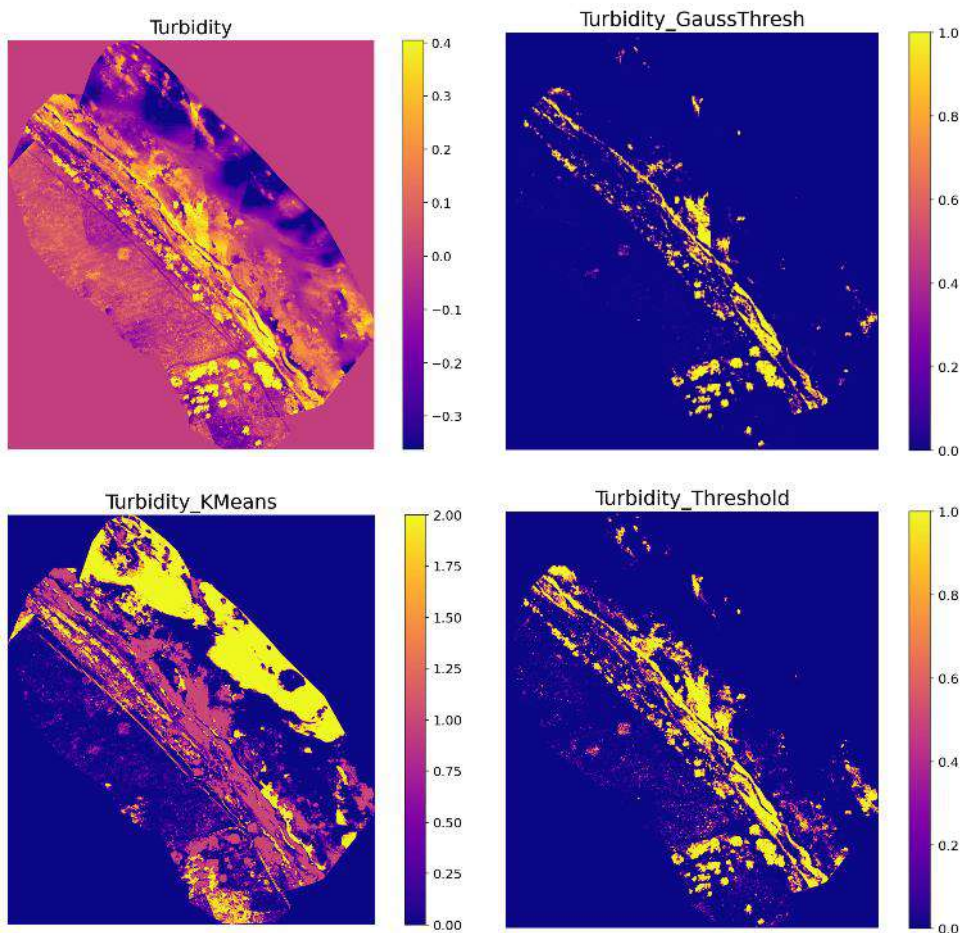
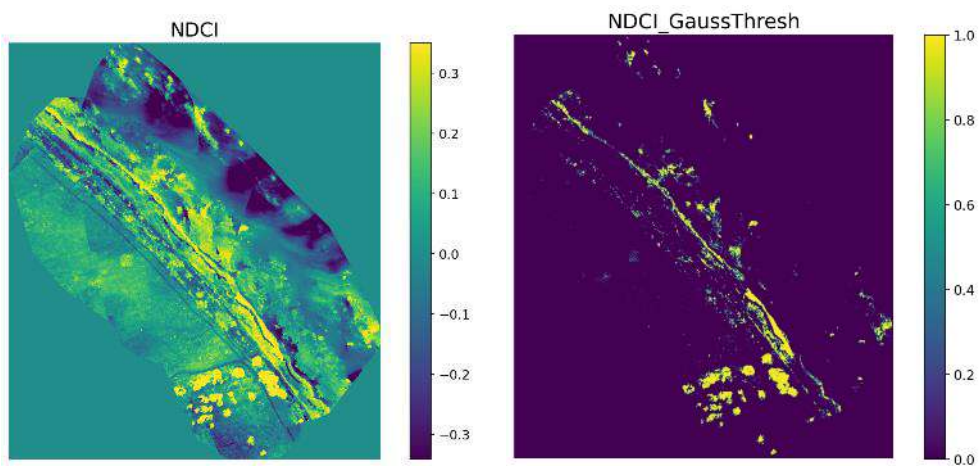


Рисунок 14. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны озера Сорбулак по снимкам с БПЛА



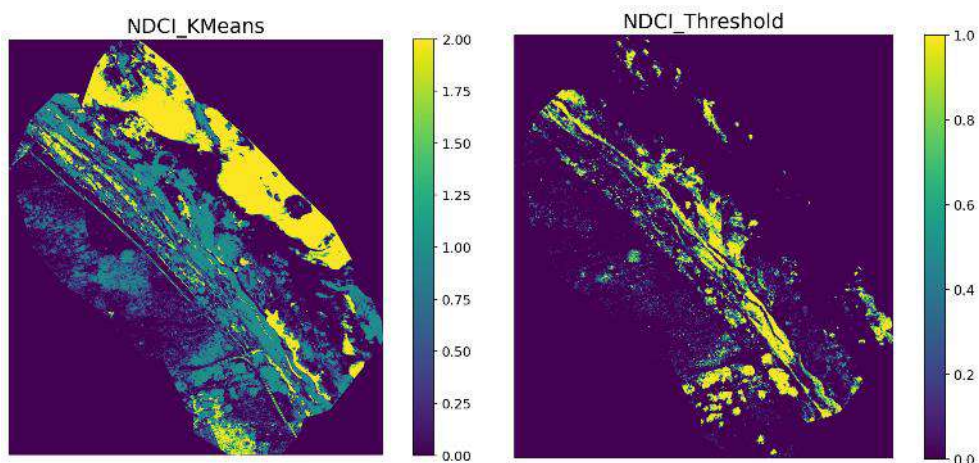


Рисунок 15. Сегментация карты NDCI прибрежной зоны озера Сорбулак по снимкам с БПЛА

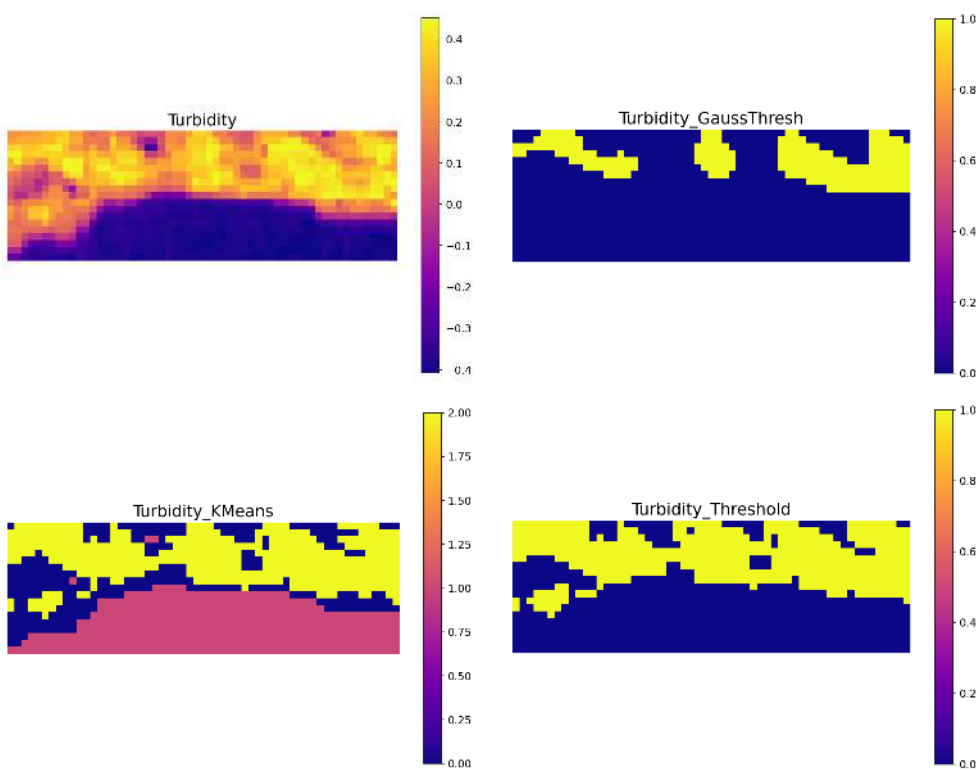
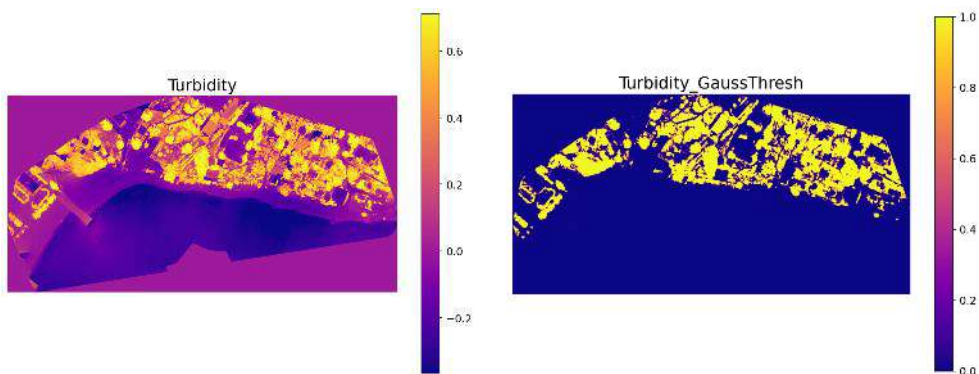


Рисунок 16. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай видимой со спутника



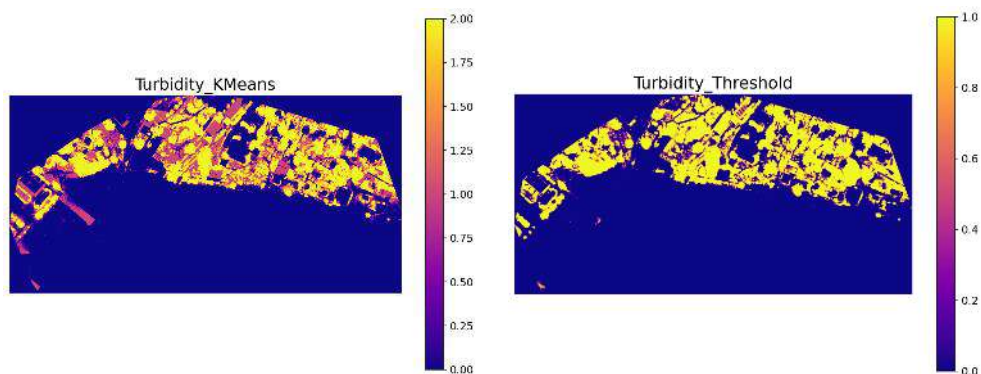


Рисунок 17. Сегментация карты NDTI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай по снимкам с БПЛА

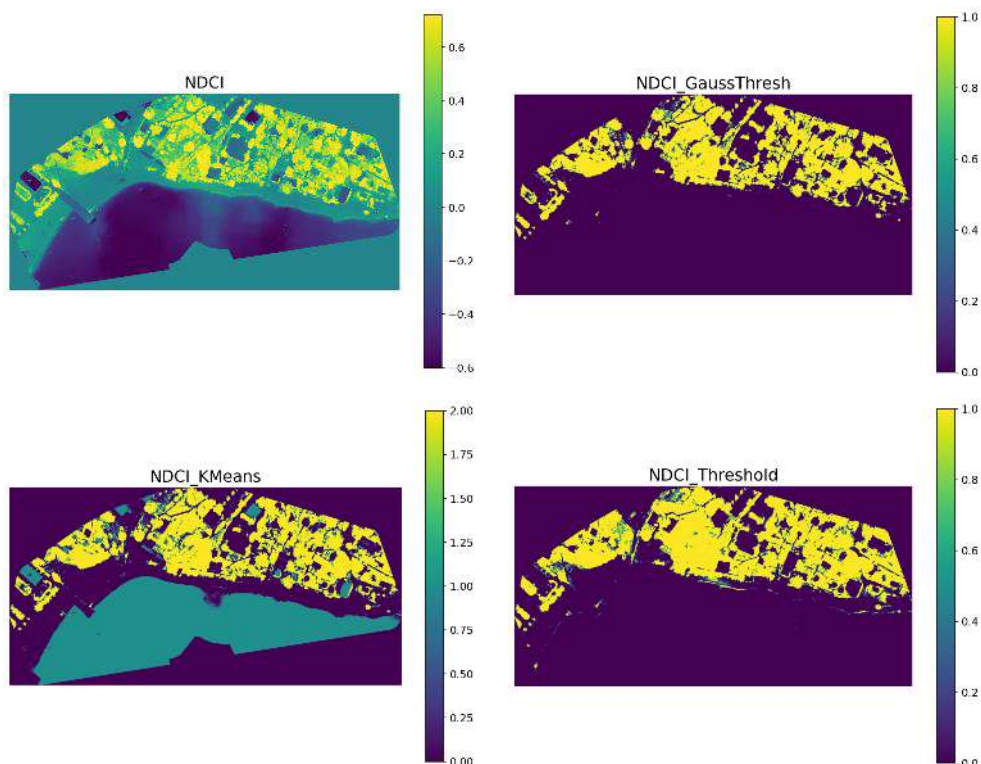


Рисунок 18. Сегментация карты NDCI прибрежной зоны на водохранилище Капчагай по снимкам с БПЛА

Сравнивая карты WRI и NDTI можно сделать предположение, что повышенные значения мутности характерны для мелких участков прибрежной зоны. То есть БПЛА «видит» дно водоема. То же самое характерно и при сравнении WRI и NDCI. Применение «линейных» методов сегментации таких как пороговая или гауссова сегментация позволяет более точно выделить зоны повышенной мутности или зоны повышенного содержания хлорофилла. Однако применение этих методов требует настройки пороговых значений. Применение k-means скорее полезно для выявления потенциальных зон мутности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формальное сравнение двух водоемов по значениями индексов показывает, что Капчагай значительно чище. Максимальное значение индекса мутности (NDTI) для Капчагая достигает значения 0.1, а индекса содержания хлорофилла (NDCI) -0.2.

Аналогичные значения для Сорбулака 0.4 и 0.35. Эти результаты вполне предсказуемы учитывая назначение водоемов, однако спектральные индексы позволили сделать численную оценку загрязненности.

Сравнивая карты на тестовых участках видно, что БПЛА дает, во-первых, более детальную картину содержания хлорофилла в воде и показывает его повышенное содержание в прибрежной зоне, в то время как спутниковое изображение менее дифференцировано. Во-вторых, БПЛА позволяет получить детализованное изображение мутности, что полезно для выявления причин и следствий загрязнения воды. Вместе с тем мультиспектральные камеры, устанавливаемые на БПЛА не имеют камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR), что не позволяет выполнять точные расчеты некоторых спектральных индексов (MNDWI, NDMI, WRI). Подводя итог можно констатировать, что рассматриваемые методы дистанционного зондирования могут дополнять друг друга для получения более полного набора спектральных индексов, либо карт высокого разрешения в особо интересных зонах. Появляются возможности определения координат источников загрязнения, возникает основа для понимания и типирования гидрологических режимов перемешивания водных слоев озера Сорбулак. Циркуляционные режимы перемешивания воды в озере, очевидно, тесно связаны с погодными условиями, особенно с ветровым полем, но именно они определяют пространственное распределение загрязнений. Это направление в исследованиях может стать целью будущих работ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Иллюстрации в высоком разрешении можно скачать по ссылке <https://www.dropbox.com/scl/fo/zkm5lriyg2fldcaph7mf9/AN6uWKjgh95zUJ-DeJPfjcc?rlkey=kbiefb081exylt10cwsqkyhx&dl=0>

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Р.И.М.; Управление данными – В.В.С.; Формальный анализ – Р.И.М.; Методология – А.Г.Т.; Программное обеспечение – В.В.С., К.Д.Г.; Отслеживание – В.В.С., А.С.; Визуализация – А.С., К.Д.Г.; Написание исходного проекта – РИМ, Е.Л.М. Ф.Н.А.; Написание и редактирование – Е.Л.М., Ф.Н.А.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант BR28713375 «Многоцелевая роботизированная беспилотная летательная платформа дистанционного мониторинга (AeroScope)»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Albrecht V., Mukhamediev R.I., Popova Y., Muhamedijeva E., Botaibekov A. Top2Vec Topic Modeling to Analyze the Dynamics of Publication Activity Related to Environmental Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles // Publications. – 2025. – Vol. 13(2). – P. 15. – DOI: <https://doi.org/10.3390/publications13020015>.
2. Li B., et al. Three-dimensional diffusion patterns of traffic-related air pollutants on the roadside based on unmanned aerial vehicles monitoring // Building and Environment. – 2022. – Vol. 219. – P. 109159. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003961>
3. Hemamalini R.R., et al. Air quality monitoring and forecasting using smart drones and recurrent neural network for sustainable development in Chennai city // Sustainable Cities and Society. – 2022. – Vol. 85. – P. 104077. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072200395X>
4. Arroyo P., et al. Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2022. – Vol. 364. – P. 131815. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579>
5. Cozma A., et al. Autonomous Multi-Rotor Aerial Platform for Air Pollution Monitoring // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 860. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/860>.
6. De Fazio R., et al. A sensor-based drone for pollutants detection in eco-friendly cities: Hardware design and data analysis application // Electronics. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 52.
7. Jiang Y., et al. Identification of the atmospheric boundary layer structure through vertical distribution of PM_{2.5} obtained by unmanned aerial vehicle measurements // Atmospheric Environment. – 2022. – Vol. 278. – P. 119084. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022001492>.
8. Liu X., et al. Quantification of multifactorial effects on particle distributions at urban neighborhood scale using machine learning and unmanned aerial vehicle measurement // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 378. – P. 134494.
9. Li C., et al. Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring // Sustainable Cities and Society. – 2022. – Vol. 86. – P. 104144.
10. Sharma R., Arya R. UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – Vol. 168. – P. 108066.

11. Minea M., Dumitrescu C.M. Urban Traffic Noise Analysis Using UAV-Based Array of Microphones // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 4. – P. 1912. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1912>.
12. Medvedev A., Telnova N., Alekseenko N., Koshkarev A., Kuznetchenko P., Asmaryan S., Narykov A. UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12, № 22. – P. 3821. – URL: <https://doi.org/10.3390/rs12223821>.
13. Tenkouano G.T., Cumming B.F., Jamieson H.E. Geochemical and ecological changes within Moira Lake (Ontario, Canada): A legacy of industrial contamination and remediation // *Environmental Pollution*. – 2019. – Vol. 247. – P. 980–988. – DOI: [10.1016/j.envpol.2019.01.019](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.019)
14. Chen J., Liu X., Chen J., Jin H., Wang T., Zhu W., Li L. Underestimated nutrient from aquaculture ponds to lake eutrophication: A case study on Taihu Lake Basin // *Journal of Hydrology*. – 2024. – Vol. 630. – P. 130749.
15. Muli J.R. Environmental problems of Lake Victoria (East Africa): what the international community can do // *Lakes & Reservoirs: Research & Management*. – 1996. – Vol. 2(1–2). – P. 47–53.
16. Watson S.B., Miller C., Arhonditsis G., Boyer G.L., Carmichael W., Charlton M.N., et al. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia // *Harmful Algae*. – 2016. – Vol. 56. – P. 44–66.
17. Ramírez-Sánchez H.U., Fajardo-Montiel A.L. Assessment of water quality, ecological and health risks of inland water bodies in Mexico: A case study of Lake Chapala // *Asian Journal of Environment & Ecology*. – 2024. – Vol. 23(6). – P. 91–108.
18. Montero D., et al. A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research // *Scientific Data*. – 2023. – Vol. 10, № 1. – P. 197.
19. Mishra S., Mishra D.R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 117. – P. 394–406.
20. Prasad A.D., et al. Remote sensing satellite data and spectral indices: an initial evaluation for the sustainable development of an urban area // *Sustainable Water Resources Management*. – 2022. – Vol. 8, № 1. – P. 19.
21. Yang Z., Reiter M., Munyei N. Estimation of chlorophyll-a concentrations in diverse water bodies using ratio-based NIR/Red indices // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2017. – Vol. 6. – P. 52–58.
22. Nagaraj R., Kumar L.S. Extraction of surface water bodies using optical remote sensing images: A review // *Earth Science Informatics*. – 2024. – Vol. 17, № 2. – P. 893–956.
23. Laonamsai J., Julphunthong P., Saprathet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P., Tomun N. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand // *Hydrology*. – 2023. – Vol. 10. – P. 70. – DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>.
24. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. (2024). Валовой региональный продукт Республики Казахстан за 2024 год: статистический бюллетень. <https://stat.gov.kz/ru/news/valovoy-regionalnyy-produkt-respubliki-kazakhstan-za-2024/> (дата обращения: 22.08.2025).
25. Есырєв О.В., Купчишин А.И., Костюк Т.П., Мухамеджанов Э.К., Ходарина Н.Н. Наличие тяжелых металлов в представителях флоры и фауны озера-накопителя Сорбулак // *Актуальные проблемы экологии и здоровья человека: материалы конф.* – 2015. – С. 74–77.
26. Озеро Сорбулак алматинская область // *Байкал24 – Наука*. – URL: <https://baikal24-nauka.ru/ozero-sorbulak-almatinskaya-oblast/> (дата обращения: 08.08.2025).

REFERENCES

1. Albrekht, V., Mukhamediev, R. I., Popova, Y., Muhamedijeva, E., & Botaibekov, A. (2025). Top2Vec topic modeling to analyze the dynamics of publication activity related to environmental monitoring using unmanned aerial vehicles. *Publications*, 13, 15. <https://doi.org/10.3390/publications13020015>
2. Li, B., et al. (2022). Three-dimensional diffusion patterns of traffic-related air pollutants on the roadside based on unmanned aerial vehicles monitoring. *Building and Environment*, 219, 109159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132322003961>
3. Hemamalini, R. R., et al. (2022). Air quality monitoring and forecasting using smart drones and recurrent neural network for sustainable development in Chennai city. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104077. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067072200395X>
4. Arroyo, P., et al. (2022). Electrochemical gas sensing module combined with unmanned aerial vehicles for air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364, 131815. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400522004579>
5. Cozma, A., et al. (2022). Autonomous multi-rotor aerial platform for air pollution monitoring. *Sensors*, 22(3), 860. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/860>
6. De Fazio, R., et al. (2021). A sensor-based drone for pollutants detection in eco-friendly cities: Hardware design and data analysis application. *Electronics*, 11(1), 52.
7. Jiang, Y., et al. (2022). Identification of the atmospheric boundary layer structure through vertical distribution of PM2.5 obtained by unmanned aerial vehicle measurements. *Atmospheric Environment*, 278, 119084. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231022001492>
8. Liu, X., et al. (2022). Quantification of multifactorial effects on particle distributions at urban neighborhood scale using machine learning and unmanned aerial vehicle measurement. *Journal of Cleaner Production*, 378, 134494.
9. Li, C., et al. (2022). Investigating the vertical distribution patterns of urban air pollution based on unmanned aerial vehicle gradient monitoring. *Sustainable Cities and Society*, 86, 104144.
10. Sharma, R., & Arya, R. (2022). UAV based long range environment monitoring system with Industry 5.0 perspectives for smart city infrastructure. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108066.
11. Minea, M., & Dumitrescu, C. M. (2023). Urban traffic noise analysis using UAV-based array of microphones. *Sensors*, 23(4), 1912. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/1912>
12. Medvedev, A., Telnova, N., Alekseenko, N., Koshkarev, A., Kuznetchenko, P., Asmaryan, S., & Narykov, A. (2020). UAV-derived data application for environmental monitoring of the coastal area of Lake Sevan, Armenia with a changing water level. *Remote Sensing*, 12(22), 3821.

13. Tenkouano, G. T., Cumming, B. F., & Jamieson, H. E. (2019). Geochemical and ecological changes within Moira Lake (Ontario, Canada): A legacy of industrial contamination and remediation. *Environmental Pollution*, 247, 980–988.
14. Chen, J., Liu, X., Chen, J., Jin, H., Wang, T., Zhu, W., & Li, L. (2024). Underestimated nutrient from aquaculture ponds to lake eutrophication: A case study on Taihu Lake Basin. *Journal of Hydrology*, 630, 130749.
15. Muli, J. R. (1996). Environmental problems of Lake Victoria (East Africa): What the international community can do. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 2(1–2), 47–53.
16. Watson, S. B., Miller, C., Arhonditsis, G., Boyer, G. L., Carmichael, W., Charlton, M. N., ... & Wilhelm, S. W. (2016). The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful Algae*, 56, 44–66.
17. Ramírez-Sánchez, H. U., & Fajardo-Montiel, A. L. (2024). Assessment of water quality, ecological and health risks of inland water bodies in Mexico: A case study of Lake Chapala. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 23(6), 91–108.
18. Montero, D., et al. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Scientific Data*, 10(1), 197.
19. Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012). Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406.
20. Prasad, A. D., et al. (2022). Remote sensing satellite data and spectral indices: An initial evaluation for the sustainable development of an urban area. *Sustainable Water Resources Management*, 8(1), 19.
21. Yang, Z., Reiter, M., & Munyei, N. (2017). Estimation of chlorophyll-a concentrations in diverse water bodies using ratio-based NIR/Red indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 6, 52–58.
22. Nagaraj, R., & Kumar, L. S. (2024). Extraction of surface water bodies using optical remote sensing images: A review. *Earth Science Informatics*, 17(2), 893–956.
23. Laonamsai, J., Julphunthong, P., Sapprathet, T., Kimmany, B., Ganchanasuragit, T., Chomcheawchan, P., & Tomun, N. (2023). Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology*, 10, 70. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>
24. Gross regional product of the Republic of Kazakhstan for 2024: Statistical bulletin]. *Stat.gov.kz*. Retrieved August 22, 2025, from <https://stat.gov.kz/ru/news/valovoy-regionalnyy-produkt-respubliki-kazakhstan-za-2024/> [in Russian]
25. Esyrev, O. V., Kupchishin, A. I., Kostyuk, T. P., Mukhamedzhanov, E. K., & Khodarina, N. N. (2015). Naličie tjaželyh metallov v predstavitel'jakh flory i fauny ozera-nakopitelja Sorbulak [The presence of heavy metals in representatives of flora and fauna of the Sorbulak reservoir]. In *Aktual'nye problemy ekologii i zdorov'ja cheloveka* (pp. 74–77) [in Russian].
26. Ozero Sorbulak Almatinskaja oblast' [Lake Sorbulak, Almaty region]. (n.d.). *Bajkal24 – Nauka*. Retrieved August 8, 2025, from <https://baikal24-nauka.ru/ozero-sorbulak-almatinskaya-oblast> [in Russian].

АЛМАТЫ ОБЛЫСЫ СУ ҚОЙМАЛАРЫНДАҒЫ ОПТИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ КОМПОНЕНТТЕРДІ ҚАШЫҚТЫҚТАН БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, инж. ғ. д, Валентин В. Смурьгин¹, Кирилл Д. Гизатулин¹, Адилхан Сымагулов^{1,2}, Алексей Г. Терехов^{2,3}, т. ғ. к., Елена Л. Мухамедиева^{1,2}, Фарида Н. Абдолдина¹, т. ғ. к.

¹ КЕАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Satbayev University), Алматы, Қазақстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.), valentinsmurygin@gmail.com (В.В.С.), gkd.030201@gmail.com (К.Д.Г.), asmogulove00@gmail.com (А.С.), abdoldinafarida@gmail.com (Ф.Н.А.).

² ҚР БҒМ ҒК Ақпараттық және есептеу технологиялары институты, Алматы, Қазақстан; muhamedijeva@gmail.com (Е.Л.М.)

³ «Қазгидромет» РМК, Алматы, Қазақстан; aterekhov1@yandex.ru (А.Г.Т.)

Автор корреспонденциясы: Фарида Н. Абдолдина, abdoldinafarida@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Оптикалық белсенді компоненттер, Сорбулақ көлі, Су ластануы, Қашықтықтан мониторинг, Ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА)

Мақала жайында:

Алынды: 16.08.2025

Қайта қаралды: 09.03.2026

Қабылданды: 10.03.2026





Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Бұл жұмыста Сорбулақ көлі мен Қапшағай су қоймасына жүргізілген далалық экспедициялар барысында жиналған деректер жиынтығы сипатталған. Аталған су айдындарының жағалау аймағында мультиспектралды камералармен жабдықталған ұшқышсыз ұшу аппараты (ҰҰА) көмегімен әуе түсірілімдері орындалды. Су бетінің және су айдындарындағы оптикалық белсенді компоненттердің болуын анықтауға арналған спектралдық индекстер есептеліп, картографияланды. Бұл мақсатта спутниктік өнімдер (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) және ҰҰА арқылы алынған бейнелер (NDWI, NDCI, WRI, NDTI) пайдаланылды. Су айдындарының оптикалық белсенді компоненттермен (судың лайлылығы және хлорофилл мөлшері) ластануын бағалау сапасы бойынша спутниктік суреттер мен ҰҰА суреттерін қолдану нәтижелері салыстырылды. Зерттеу нәтижелері Сорбулақ көлі жағалау аймағының ластану деңгейі Қапшағай су қоймасына қарағанда бірнеше есе жоғары екенін көрсетті. ҰҰА шағын ауқымда жоғары детальділікке ие, уақыттық және кеңістіктік рұқсаттылығы жоғары мониторинг жүргізуге мүмкіндік береді. Дегенмен, ҰҰА-ға орнатылатын шағын мультиспектралды камералардың спектрлік арна саны

шектеулі, сондай-ақ мониторинг ауқымы бойынша да шектеулер бар. Ал спутниктік мониторинг кең ауқымды қамтиды, тіпті спутниктік өнімдердің тегін нұсқасында да спектрлік арналар саны көп, бірақ кеңістіктік және уақыттық рұқсаттылығы айтарлықтай төмен. Осы екі технологияның артықшылықтарын үйлестіре пайдалану ірі су айдындарын қарқынды антропогендік әсер аймақтарында тиімді әрі жедел мониторинг жүргізудің сапасын арттыра алады

MONITORING COMPARATIVE ANALYSIS OF REMOTE METHODS FOR MONITORING OPTICALLY ACTIVE COMPONENTS IN WATER BODIES OF THE ALMATY REGION

Ravil I. Mukhamediev^{1,2} , Dr.Eng.Sc., Valentin V. Smurygin¹, Kirill D. Gizatulin¹, Adilkhan Symagulov^{1,2} , Alexey G. Terekhov^{2,3} , Ph.D. (Tech.), Elena L. Mukhamedieva^{1,2}, Farida N. Abdoldina¹ , Ph.D. (Tech.)

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; ravil.muhamedyev@gmail.com (R.I.M.), valentinsmurygin@gmail.com (V.V.S.), gkd.030201@gmail.com (K.D.G.), asmogulove00@gmail.com (A.S.), abdoldinafarida@gmail.com (F.N.A.)

² Institute of information and computational technologies, CS MSE RK, Almaty, Kazakhstan; muhamedijsjeva@gmail.com (E.L.M.)

³ RSE "Kazhydromet", Almaty, Kazakhstan; aterekhov1@yandex.ru (A.G.T.)

Corresponding author: Farida N. Abdoldina, abdoldinafarida@gmail.com

KEY WORDS

Optically active components, Sorbulak Lake, Water pollution, Remote monitoring, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

About article:

Received: 16.08.2025

Revised: 09.03.2026

Accepted: 10.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

This study presents a dataset obtained during field expeditions to Sorbulak Lake and Kapchagay Reservoir. UAV-based surveys were conducted in the coastal zones of these water bodies using a multispectral camera. Spectral indices were calculated and mapped to detect water surfaces and identify the presence of optically active components in the water bodies, based on satellite products (MNDWI, NDCI, NDMI, NDWI, NDTI, WRI) and UAV-acquired imagery (NDWI, NDCI, WRI, NDTI). A comparative assessment was carried out to evaluate water pollution by optically active components using both satellite imagery and UAV-derived images. The results show that the pollution level of Sorbulak Lake's coastal zone (turbidity and chlorophyll content) is several times higher than that of Kapchagay Reservoir. UAVs provide high-detail monitoring at small scales, with the ability to perform observations at high temporal and spatial resolutions. However, small-sized multispectral cameras installed on UAVs are limited in the number of spectral bands and in the scale of monitoring they can perform. Conversely, satellite monitoring covers larger areas and offers a greater number of spectral bands, even in free-access satellite products, but at much lower spatial and temporal resolutions. It is evident that integrating the capabilities of both technologies can enhance the quality and timeliness of monitoring large water bodies located in areas of significant anthropogenic impact.

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



Научная статья

ОЦЕНКА ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩА СВЕТЛОГОРСКОЕ

Александр А. Волчек^{ID} д.г.н., Сергей И. Парфомук^{ID} к.т.н., Светлана В. Сидак^{ID},
Николай Н. Шешко^{ID} к.т.н., Наталья Н. Шпендик к.г.н.

Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь, volchak@tut.by (ААВ), parfom@mail.ru (СИП),
harchik-sveta@mail.ru (СВС), optimum@tut.by (ННШ), shpendik@tut.by (ННШ)

*Автор корреспонденции: Александр А. Волчек, volchak@tut.by

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

водохранилище,
водохозяйственный
баланс,
водопользование, сток,
экологический сток,
допустимое изъятие,
климатические
изменения, прогноз

АБСТРАКТ

Выполнена комплексная оценка водных ресурсов рек Березины и Сведи в створах проектируемого водозабора для обоснования реконструкции Светлогорского наливного водохранилища. На основе многолетних гидрологических наблюдений и региональных расчетных методов определены основные статистические характеристики стока, его внутригодовое распределение и экологически допустимые объемы изъятия. С использованием метода переноса обеспеченностей получены уточненные значения экологического стока для рек Березина и Сведь. Разработан водохозяйственный баланс водохранилища для двух расчетных уровней обеспеченности (75 % и 90 %). Критерием допустимого изъятия принята разность между стоком расчетной обеспеченности и величиной экологического стока, определенного методом переноса обеспеченностей. Общий объем забора из р. Березина составил 37 720 тыс. м³, из р. Сведь – 3 673,7 тыс. м³, что соответствует снижению годового стока на 1,0 % и 8,3 % соответственно. Проанализированы многолетние изменения климата и стока в бассейне Березины за 1961...2018 гг., выявлены статистически значимые тренды: повышение зимнего стока (11...21 %), снижение стока весеннего половодья (30...40 %). На основе сценариев МГЭИК выполнен прогноз изменения стока до 2035 г., показавший возможное сокращение весеннего и летне-осеннего стока. Предложены направления совершенствования мониторинга и адаптивного управления водными ресурсами водохранилища.

По статье:

Получено: 17.12.2025

Пересмотрено: 20.03.2026

Принято: 30.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Волчек А., Парфомук С.,
Сидак С., Шешко Н.,
Шпендик Н. Оценка
гидрологического режима
водохранилища
Светлогорское //
Гидрометеорология и
экология, 121 (1), 2026, 43-
59.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное потепление климата сопровождается повышением частоты и продолжительности засушливых периодов [1...2], что усиливает потребность в дополнительном увлажнении сельскохозяйственных земель. Одним из эффективных решений в данных условиях является создание или реконструкция водохранилищ, позволяющих накапливать воду в многоводные периоды и использовать ее в межень [3] на увлажнение сельскохозяйственных культур. Однако равнинный рельеф Беларуси ограничивает возможности строительства крупных водоемов, поэтому особое значение приобретает оптимизация режима существующих водохранилищ [4...5].

Светлогорское наливное водохранилище площадью 14,4 км² и полным объемом 64,43 млн м³ расположено в 11 км от г. Светлогорск. Основным назначением являлось орошение сельскохозяйственных культур на площади 49,8 тыс. га, рыбоводства и рекреации, однако по причине не завершенности строительства и последующего разрушения насосной системы с 90-х годов прошлого века находится в неудовлетворительном состоянии: ложе заросло древесно-кустарниковой растительностью на 50...60%, пополнение осуществляется за счет атмосферных осадков и грунтовых вод, а проектные параметры не достигнуты. В связи с планируемой реконструкцией водохранилища возникла необ-

ходимость в уточнении его водохозяйственного баланса с учетом современных гидрологических условий и климатических тенденций. Состав сооружений водохранилища входят: ограждающая дамба, водоподводящие и ловчие каналы, насосные станции, водовыпуски из водохранилища, водоотводящий канал [6].

В мировой практике концепция экологического стока (environmental flow) прошла путь от оценки минимальных расходов до признания необходимости сохранения всего естественного гидрографа как механизма поддержания биоразнообразия и экосистемных услуг [7...8]. Современные публикации [9...11] подчеркивают, что успешная реализация экологических попусков требует формализованных критериев, учитывающих внутригодовую изменчивость, и адаптивного управления в условиях меняющегося климата. В Беларуси нормативный подход (75 % от минимального месячного стока 95 % обеспеченности) не отражает сезонную динамику и может недооценивать реальные потребности водных экосистем.

Цель настоящей работы – комплексная оценка гидрологического режима и разработка научно обоснованного водохозяйственного баланса Светлогорского водохранилища, позволяющего определить допустимые объемы изъятия воды из рек Березина и Сведь, обеспечивающие минимальное воздействие на их естественный режим, с учетом экологических ограничений и прогнозируемых климатических изменений.

Научная новизна заключается в применении метода переноса обеспеченностей для расчета экологического стока и обоснования формализованного критерия допустимого изъятия, что позволяет более объективно, по сравнению с нормативным подходом, учесть внутригодовую изменчивость стока и обеспечить сохранение гидробиологических условий. Кроме того, в работе впервые для данного объекта выполнена количественная оценка влияния климатических изменений на приходные и расходные компоненты баланса до 2035 г.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы ряды ежедневных и среднемесячных расходов воды р. Березина по гидрологическим постам Борисов, Бобруйск, Светлогорск за период 1961...2018 гг., а также данные метеорологических станций Бобруйск, Василевичи, Жлобин, Мозырь, Октябрь за тот же период. Для р. Сведь, где отсутствуют систематические наблюдения, гидрологические характеристики определены расчетным путем с использованием реки-аналога Ведрич (створ Бабичи) и карт изолиний [12...13].

Река Березина – единственный из крупных водотоков (длина 615 км), который от истока до устья протекает по территории Беларуси. Площадь водосбора – 24650 км². Водосбор грушевидной формы, асимметричный, более развито правобережье. Режим реки изучался на 16 гидрологических постах. На сегодняшний день функционируют четыре гидрологических поста – в районе Борисова, Березино, Бобруйска и Светлогорска. Анализ гидрологических параметров реки Березины проводился на основе данных, полученных с постов наблюдений на р. Березина – г. Бобруйск, р. Березина – г. Светлогорск.

Река Сведь является правым притоком Березины. Начинается в 1,5 км на юг от деревни Прилуки Калинковичского района, устье за 3 км на восток от д. Сведское Речицкого района. Полная длина водотока составляет 49 км. Площадь водосборного бассейна – 625 км², средний уклон реки 0,3 ‰, средний расход воды в устье 2,60 м³/с.

Применительно к бассейну реки Березина на основании выполненного анализа климатических данных было отобрано 5 ближайших метеорологических станций (Бобруйск, Василевичи, Жлобин, Мозырь, Октябрь). Критерием выбора станций стало соблюдение требования: каждая из них должна была функционировать с 1961 г. без перерывов до 2018 г., а также продолжением функционирования в настоящее время. Это обеспечивало обязательное условие – наличие непрерывных рядов климатических наблюдений.

Исходные климатические данные при этом получены из различных источников, включая открытые информационные ресурсы ВМО и других организаций и центров, занимающихся изучением климата, а также из климатических справочников.

Итоги исследования динамики климата в период с 1961 по 2018 годы позволили сформулировать ряд обобщенных выводов, представленных ниже [14]:

1. Средняя температура воздуха в бассейне реки Березины увеличилась на 1,1 °С. Сезонный анализ показал, что максимальное повышение пришлось на зиму (2,0 °С), а минимальное — на осень (0,3 °С) (рис. 1).

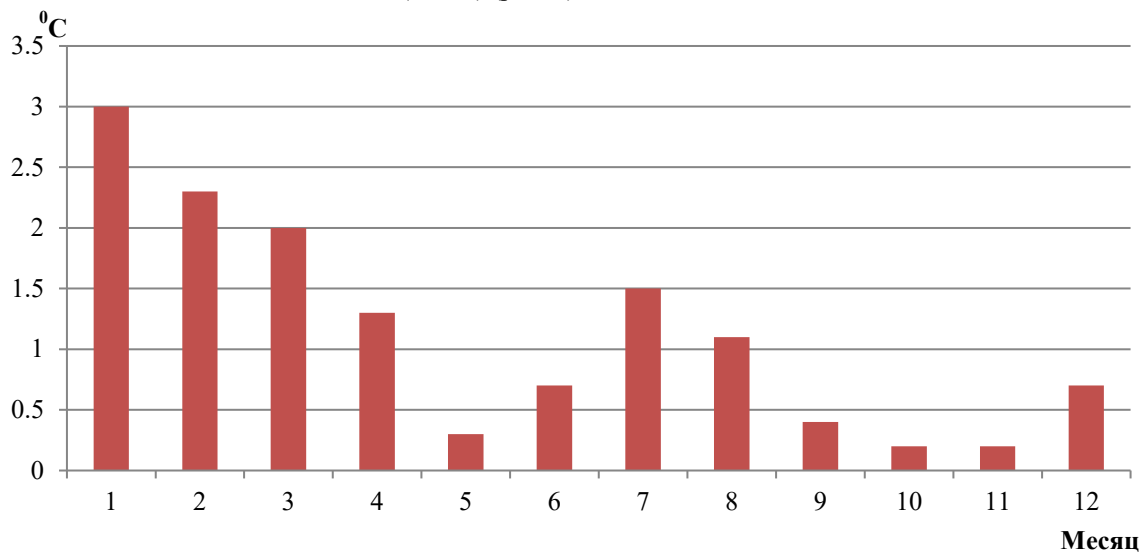


Рисунок 1. Изменение температуры воздуха (°С) по месяцам в бассейне реки Березины: динамика за период 1961...2018 гг.

2. По данным наблюдений, в бассейне реки Березина отмечается рост количества осадков: в среднем на 4,8 %, а в зимний период — на 8,6 % (рис. 2).

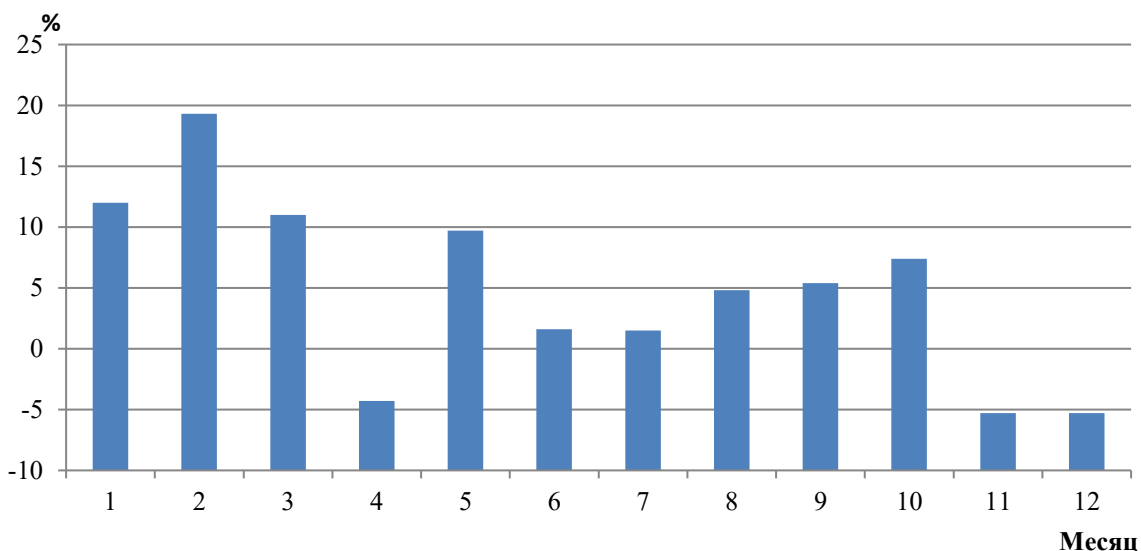


Рисунок 2. Помесячное распределение изменений количества осадков (%) в бассейне реки Березина за 1961...2018 гг.

Оценка однородности рядов выполнена с помощью критериев Смирнова–Граббса, Диксона, Фишера и Стьюдента. Для сглаживания эмпирических кривых обеспеченности использовано трехпараметрическое распределение Крицкого–Менкеля. Внутригодовое распределение стока для р. Березина установлено методом компоновки сезонов, для р. Сведь – по региональным схемам [15].

Существует несколько методов расчета водохозяйственного баланса, которые применяются в зависимости от целей исследования, доступных данных и особенностей водного объекта. Основные методы включают:

1. Метод водного баланса – основан на уравнении баланса, учитывающем приходные и расходные компоненты водохранилища: атмосферные осадки, приток воды, испарение, фильтрацию и водопотребление.

2. Гидрологический метод – использует данные о стоке рек, осадках и испарении для определения водных ресурсов и их распределения.

3. Метод математического моделирования – включает построение гидродинамических моделей, учитывающих физические процессы движения воды и взаимодействие с окружающей средой.

4. Метод статистического анализа – применяется для прогнозирования изменений водного баланса на основе многолетних наблюдений и статистических закономерностей.

5. Метод спутникового мониторинга – использует данные дистанционного зондирования для оценки уровня воды, испарения и других параметров.

6. Метод гидрохимического анализа – позволяет оценить качество воды и влияние антропогенных факторов на водохозяйственный баланс.

В настоящей работе расчет баланса выполнен согласно ТКП 17.06-03-2008 [16] по уравнению

$$B = W_{\text{ex}} + W_{\text{бок}} + W_{\text{пзв}} + W_{\text{ов}} + W_{\text{дом}} \pm \Delta V - W_{\text{исп}} - W_{\text{ф}} - W_{\text{y}} - W_{\text{пер}} - W_{\text{одн}} - W_{\text{кл}}, \quad (1)$$

где: B – значение баланса на расчетном участке; W_{ex} – объем стока, поступающий из верхнего течения рассматриваемого водного объекта, м³; $W_{\text{бок}}$ – объем воды, формирующийся в пределах расчетного участка и представляет как правило боковую приточность; $W_{\text{пзв}}$ – объем водозабора формирующийся за счет добычи из подземных источников; $W_{\text{ов}}$ – возвратные воды на водохозяйственном участке в виде сточных вод; $W_{\text{дом}}$ – объем воды за счет межбассейновые переброски; $\pm \Delta V$ – объем воды на наполнение и опорожнение прудов и водохранилищ на расчетном водохозяйственном участке; $W_{\text{исп}}$ – потери на дополнительное испарение в результате увеличения площади водной поверхности; $W_{\text{ф}}$ – потери на фильтрацию из водохранилищ, каналов, других поверхностных водных объектов; W_{y} – изменение речного стока, обусловленное водозабором из подземных водных объектов, при наличии гидравлической связи с расчетным водным объектом; $W_{\text{пер}}$ – переброска объема воды из расчетного водохозяйственного участка в смежные водосборы; $W_{\text{одн}}$ – суммарная потребность всех водопользователей в пределах расчетного водохозяйственного участка; $W_{\text{кл}}$ – требуемая величина стока в замыкающем створе расчетного водохозяйственного участка (в первую очередь санитарно-экологические и хозяйственные попуски).

При составлении водохозяйственного баланса предусматривается многовариантная его проработка [16]. Попуски необходимы для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарного состояния реки, обеспечения судоходства, а в некоторых случаях – обводнения пойм и нерестилищ.

Под санитарно-экологическими попусками в настоящее время понимают экологический сток. Он представляет собой минимальную величину речного стока постоянного или переменного в течение года.

При определении экологического стока необходимо учитывать ряд ключевых аспектов:

– *внутригодовая изменчивость стока.* Биологическое разнообразие водоема сохраняется благодаря естественным годовым колебаниям стока, которые задают необходимую цикличность в развитии разных биологических видов.

– *межгодовая изменчивость стока.* Гидрофобные растения склонны активно осваивать пойму в засушливые периоды, но периодические затопления служат природным механизмом их удаления из экосистемы пойменной зоны.

– *выполнение рекой природных функций.* Речная система играет ключевую роль в перемещении и перераспределении веществ и энергии как в пространственном, так и во временном измерении, что в итоге поддерживает целостность всей экосистемы.

– *объем воды для поддержания гидробионтов.* Нормальное развитие водных организмов возможно лишь при соблюдении определенных гидрологических условий: скорость течения должна быть в диапазоне 0,25...0,6 м/с (с минимальным порогом 0,25 м/с, запускающим активное развитие фитопланктона), а глубина водного потока — не менее 0,1...3 м.

На сегодняшний день существует множество подходов к оценке величины экологического стока, которые можно условно классифицировать на четыре основные группы. Подробный разбор указанных методик представлен в публикациях [12...17]. В рамках настоящего исследования для расчета экологического стока выбран метод переноса обеспеченностей [14...15], который позволяет учесть естественную многолетнюю изменчивость стока и установить верхнюю и нижнюю границы колебаний, характерные для конкретной реки. Как отмечается в критическом анализе [18], простые гидрологические методы (процент от среднегодового стока) часто игнорируют сезонную изменчивость, необходимую для сохранения экосистем. Метод переноса обеспеченностей лишен этого недостатка, так как опирается на структуру многолетних колебаний.

Для минимизации воздействия на естественный гидрологический режим объем изъятия $W_{изъят,i}$ в каждом месяце i не должен превышать разности между стоком расчетной обеспеченности $Q_{р,i}$ и экологическим стоком $Q_{эк,i}$:

$$W_{изъят,i} \leq (Q_{р,i} - Q_{эк,i}) \cdot t_i \quad (2)$$

где t_i – число секунд в месяце.

В качестве расчетной обеспеченности принята P=75 % (основной вариант) и P=90 % (поверочный). Экологический сток $Q_{эк,i}$ определен методом переноса обеспеченностей. Данный подход гарантирует сохранение в реке объема воды, необходимого для поддержания экосистемы в маловодный год даже в случае забора расчетного объема воды. Это соответствует современным рекомендациям, согласно которым целевые показатели должны быть законодательно закреплены и адаптированы к местным условиям [8... 10].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет гидрологических характеристик годового стока и его внутригодового распределения для реки Березина выполнен на основе фактических данных наблюдений. Отсутствующие значения в рядах наблюдений за 1978...2018 годы были восстановлены с помощью программного комплекса «Гидролог-2» [19]. Основные статистические параметры стока приведены в табл. 1. Для р. Березина в створе Светлогорск среднегогодовой расход составляет 132 м³/с, коэффициент вариации 0,22, коэффициент автокорреляции 0,23. Внутригодовое распределение стока: весна – 39%, зима – 22%, лето–осень – 39% (рис. 3). Для р. Сведь средний расход 1,78 м³/с, распределение по сезонам: весна – 48%, зима – 20%, лето–осень – 32% (рис. 4).

Таблица 1
Основные гидрологические характеристики стока исследуемых рек

Параметры	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина в створе Светлогорск													
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	121	127	171	265	171	116	101	92,6	89,9	104	116	112	132
C_v	0,37	0,34	0,30	0,45	0,30	0,32	0,39	0,42	0,29	0,30	0,32	0,29	0,22
C_s	0,82	0,77	-0,15	1,06	0,80	1,12	1,22	2,66	1,36	3,13	1,87	1,32	-1,13

$r(1)$	0,11	0,13	0,14	-0,03	0,04	0,08	0,17	0,17	0,12	0,06	0,07	-0,08	0,23
--------	------	------	------	-------	------	------	------	------	------	------	------	-------	------

р. Сведь

$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1,32	1,71	3,06	4,68	2,54	1,42	1,01	0,815	0,896	1,09	1,51	1,29	1,78
---------------------------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	------	------	------	------

Примечание: Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; C_v – коэффициент вариации; C_s – коэффициент асимметрии; $r(1)$ – коэффициент автокорреляции).

Расчет по нормативному методу дал для Березины $Q_{\text{эк,норм}} = 34,7 \text{ м}^3/\text{с}$, для Сведи – $0,332 \text{ м}^3/\text{с}$. Метод переноса обеспеченностей существенно повышает эти оценки: для Березины $Q_{\text{эк,пер}} = 67,7 \text{ м}^3/\text{с}$, для Сведи – $0,706 \text{ м}^3/\text{с}$. Разница обусловлена тем, что нормативный подход не учитывает внутригодовую динамику и многолетние колебания, тогда как метод переноса обеспеченностей опирается на естественную структуру стока реки. В дальнейших расчетах в качестве экологического ограничения использованы именно значения $Q_{\text{эк,пер}}$, поскольку они обеспечивают сохранение минимальных скоростей течения ($0,25 \dots 0,6 \text{ м/с}$) и глубин ($0,1 \dots 3 \text{ м}$), необходимых для гидробионтов [12]. Полученный результат согласуется с выводами [9] о недостаточности упрощенных гидрологических методов для адекватной оценки экологических потребностей рек.

На рис. 5 представлены водохозяйственные балансы участков водосборов, куда технически возможна подача воды из водохранилища «Светлогорское». Эти балансы рассчитаны для оценки ресурсов поверхностного стока в год с расчетной обеспеченностью 75 %. Расчеты выполнены по составляющим водного баланса – приходная часть и расходная часть. В табл. 2 представлена характеристика водохозяйственного участка р. Березина.

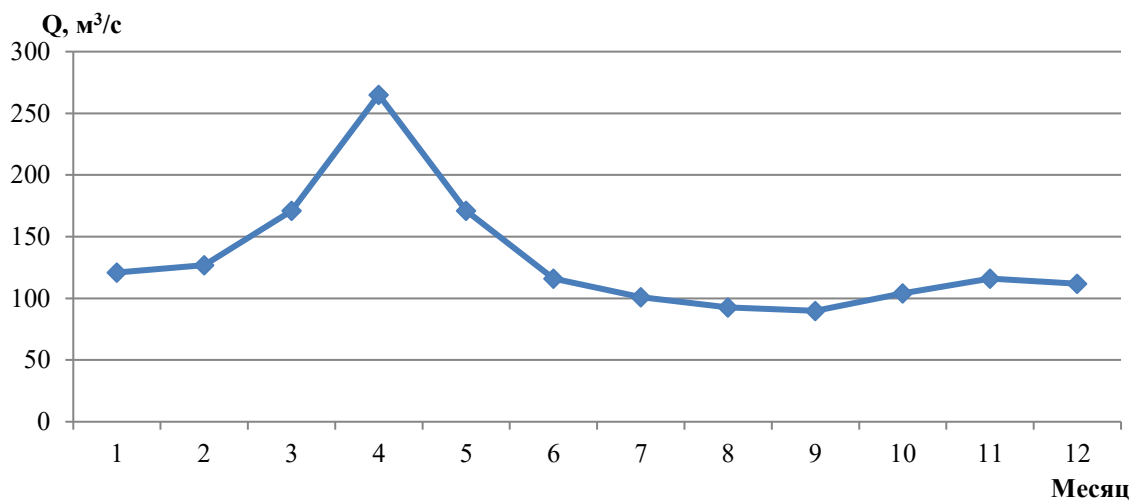


Рисунок 3. Внутригодовое распределение среднегогодового стока р. Березина – Светлогорск

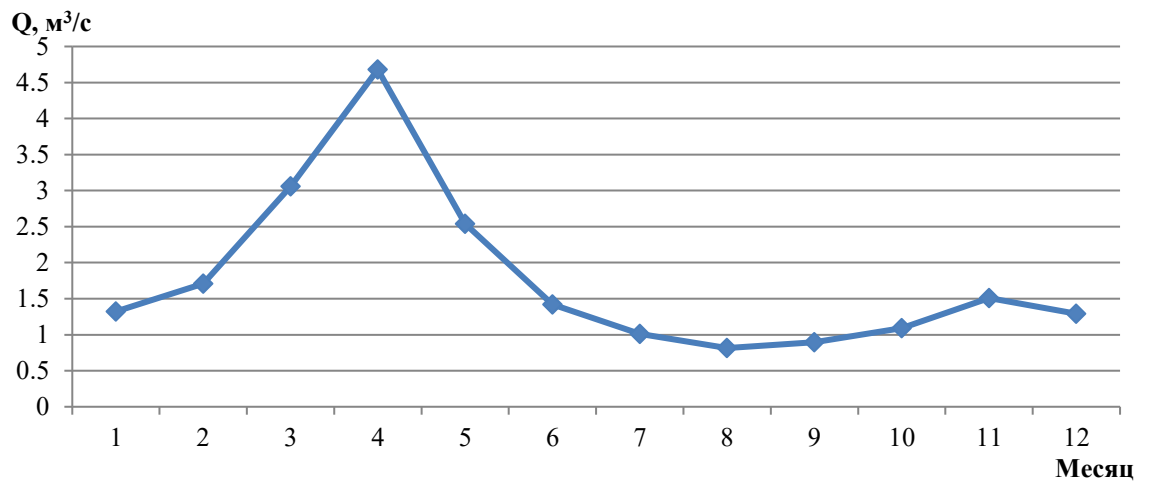


Рисунок 4. Внутригодовая динамика стока реки Сведь с месячной градацией



Рисунок 5. Расчетная линейная схема водохозяйственного участка

Анализ структуры поверхностного стока позволил установить основные направления линий стока и границы возможных участков увлажнения непосредственно из р. Сведь, что в свою очередь использовалось для оценки объемов водопотребления для целей орошения/увлажнения.

Таблица 2

Характеристика водохозяйственного участка р. Березина

Створ	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Расходы воды, м ³ /с				
			Норма стока	C _v	Расчетная обеспеченность, %		
					50	75	95
Борисов	383	5690	35,2	0,18	34,7	31,8	28,5
Бобруйск	167	20300	114	0,21	115	99,2	75,3
Светлогорск	68	23300	132	0,22	131	111	82,7

В таблице 3 представлены объёмы подачи воды на увлажнение из водохранилища «Светлогорское», рассчитанные для двух уровней обеспеченности: 75 % (основной расчёт) и 90 % (поверочный расход).

Таблица 3

Показатели подачи воды из водохранилища на увлажнение «Светлогорское» (75 % обеспеченность, основной, числитель) (90 % обеспеченность, поверочный, знаменатель)

№ п.п.	Потребление воды	Потребление воды, тыс. м ³				Итого:
		Май	Июнь	Июль	Август	
1	Потребление воды для регулирования почвенной влажности шлюзованием	<u>1 854,6</u>	<u>8 107,0</u>	<u>3 792,8</u>	<u>9 119,0</u>	<u>22 873,4</u>
		2 707,1	9 840,6	10 818,5	2 072,4	25 438,6
		<u>372,6</u>				<u>372,6</u>
2	Заполнение водоподводящих каналов	372,6				372,6
		<u>294,3</u>				<u>294,3</u>
	в т.ч. ВП-1	294,3				294,3
		<u>57,2</u>				<u>57,2</u>
	ВП-1-1	57,2				57,2
		<u>16,5</u>				<u>16,5</u>
	ВП-2	16,5				16,5
		<u>4,6</u>				<u>4,6</u>
	ВП-3	4,6				4,6
		<u>92,7</u>	<u>405,4</u>	<u>189,6</u>	<u>456,0</u>	<u>1 143,7</u>
3	Потери на испарение и фильтрацию по каналам	135,4	492,0	540,9	103,6	1 271,9
		<u>2 319,9</u>	<u>8 512,4</u>	<u>3 982,4</u>	<u>9 575,0</u>	<u>24 389,7</u>
Итого:		3 215,1	10 332,6	11 359,4	2 176,0	27 083,1

Результаты водохозяйственного баланса для основного расчетного случая (обеспеченность 75%) представлены в табл. 4, поверочный расчет (обеспеченность 90%) реализован аналогично.

Общий объем забора из р. Березина при 75% обеспеченности составил 37 720 тыс. м³, из р. Сведь – 3 673,7 тыс. м³. Доля изъятия от стока расчетной обеспеченности в створах водозабора приведена в табл. 5. Для Березины среднемесячное снижение стока не превышает 3,4%, годовое – 1,0%, что находится в пределах допустимых погрешностей. Для Сведи в феврале–апреле изъятие достигает 19,8% от стока 75% обеспеченности,

однако эта величина не превышает разности ($Q_{75} - Q_{эк.пер}$), которая в эти месяцы составила 20–25%. Таким образом, структура экологического стока не нарушается.

При поверочном расчете для 90% обеспеченности суммарный забор из Березины увеличился до 40 200 тыс. м³, доля изъятия возросла до 1,5% годового стока, при этом максимальное месячное изъятие (4,7% в июне) также остается в пределах, гарантирующих соблюдение экологического стока. Объем водохранилища при НПУ в этом случае составил 44 236,6 тыс. м³, что несколько ниже проектного, но достаточно для покрытия потребностей орошения.

Таблица 4

Водохозяйственный баланс 75 % обеспеченности (основной расчетный случай)

Характеристики	Объемы воды в тыс. м ³												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
р. Березина - Светлогорск													
Объем стока P=75%	268	280	377	586	377	257	223	204	198	229	256	247	3 508
	762,53	725,69	313,57	053,53	671,66	586,16	058,43	891,78	884,98	801,57	456,42	615,18	821,50
р. Сведь													
Объем стока P=75%	3	3	6	8	4	3	2	1	2	2	2	2	44
	211,25	581,59	018,69	935,89	055,59	074,08	292,65	936,00	621,62	690,51	974,45	986,60	378,91
Доступно для забора	636,44	709,84	1	1	803,78	609,26	454,38	383,70	519,58	533,24	589,51	591,92	8 795,52
			192,85	771,02									
Забор насосной №1			10	10	9	8							37
			000,00	000,00	000,00	720,00							720,00
Забор насосной №2	0,00	0,00	9	9	8	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35
			500,00	500,00	550,00	284,00							834,00
Забор насосной №4 (фильтрация)	0,00	0,00	177,39	269,50	351,49	365,42	314,89	228,31	173,74	165,42	158,32	0,00	2 204,46
Забор из р. Сведь	0,00	709,84	1	1									3 673,71
			192,85	771,02									
Итого приток	0,00	709,84	10	11	8	8	314,89	228,31	173,74	165,42	158,32	0,00	41
			870,24	540,51	901,49	649,42							712,17
Подача воды на увлажнение	0,00	0,00	0,00	0,00	2	8	3	9	0,00	0,00	0,00	0,00	24
					319,90	512,40	982,40	575,00					389,70
Наполнение (+) водохранилища	0,00	709,84	10	11	6	137,02	0,00	0,00	173,74	165,42	158,32	0,00	30336,6
			870,24	540,51	581,59								6
Сработка (-) водохранилища	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-3	-9	0,00	0,00	0,00	0,00	-
							667,51	346,69					13014,2
													0
Распределение испарения	0,00	0,00	5,18	11,37	14,72	17,06	18,27	9,98	6,11	3,03	0,00	14,29	100,00
Доп. испарение	0,0	0,0	14,3	31,4	40,6	47,1	50,4	27,5	16,9	8,3	0,0	39,4	275,92
Потери на испарение	0,0	0,0	179,6	412,2	552,4	643,7	676,0	354,7	211,5	104,3	0,0	488,9	3623,32
Отметка воды в водохр., м	132,98	132,94	133,33	134,07	134,60	134,69	134,39	133,75	133,29	133,22	133,15	133,06	
Фильтрация из водохранилища	826,8	809,2	991,5	1 361,2	1 630,3	1 672,4	1 519,5	1 200,9	974,4	938,1	906,7	866,0	13696,9
													4
Объем воды в водохранилище на нач.	22	21	21	30	40	45	42	37	26	25	24	23	
	180,0	353,2	253,8	953,0	720,1	119,0	940,0	076,9	174,6	162,5	285,5	537,1	
Объем воды в водохранилище на конец	21	21	30	40	45	42	37	26	25	24	23	22	
	353,2	253,8	953,0	720,1	119,0	940,0	076,9	174,6	162,5	285,5	537,1	182,2	
Средняя глубина, м	1,76	1,73	2,08	2,73	3,16	3,22	2,98	2,45	2,04	1,98	1,92	1,84	
Изменение стока в р. Березина, %	0,000	0,000	2,650	1,706	2,383	3,385	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,075
Изменение стока в створе Сведь, %	0,000	19,819	19,819	19,819	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,278

Современные климатические колебания и антропогенные воздействия, несомненно, оказывают заметное влияние на речной сток, которое с течением времени будет усиливаться. Поэтому необходимы экспертные оценки изменения стока в будущем, которые основываются на тенденциях прошлых лет.

В рамках данной работы проанализированы изменения расходов воды в р. Березина на двух гидрологических постах. Временной охват включал два периода: базовый (1961...1985 гг.) и современный (1986...2018 гг.). Расчеты проводились отдельно для среднемесячных и среднегодовых значений. Итоговые данные по динамике стока за весь период наблюдений (1961...2018 гг.) систематизированы в таблицах 5 и 6 [14].

Таблица 5

Изменения стока в бассейне р. Березина за период с 1961 по 2015 гг.

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км ²	Характеристика	Значения расходов воды за периоды (1986...2015), (1961...1985), м ³ /с, разница, %											
			январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
Борисов	5690	Q _{ср.}	28,3	27,6	40,8	84,2	51,0	31,4	24,8	23,0	22,5	26,1	31,0	30,0
		Q ₁₉₆₁₋₁₉₈₅	24,9	21,6	34,5	93,8	51,7	31,2	24,0	23,4	23,0	25,8	30,2	28,5
		Q ₁₉₈₆₋₂₀₁₅	31,1	32,7	46,1	76,3	50,5	31,6	25,5	22,6	22,1	26,4	31,5	31,0
		Δ%	24,7	51,6	33,7	-18,7	-2,3	1,3	6,1	-3,3	-3,8	2,5	4,3	8,9
Бобруйск	20300	Q _{ср.}	97,6	99,0	144	265	159	106	90,5	84,2	82,0	90,0	101	97,9
		Q ₁₉₆₁₋₁₉₈₅	89,7	80,8	134	306	167	103	90,0	83,7	82,4	86,4	101	98,4
		Q ₁₉₈₆₋₂₀₁₅	104	114	152	230	153	108	90,9	84,6	81,6	92,8	102	97,4
		Δ%	16,3	41,3	13,6	-24,9	-8,2	4,9	1,0	1,0	-1,1	7,5	0,2	-1,1

Таблица 6

Абсолютные значения характерных расходов воды (м³/с) р. Березина за период с 1961 по 2015 гг. (числитель), изменение стока, (%) (знаменатель)

Гидрологический пост	Площадь водосбора, км ²	Средний	максимальный весеннего половодья	минимальный летне-осенней межени	минимальный зимней межени
Борисов	5690	35,1 / 3,6	112 / -29,7	16,9 / -3,8	19,7 / 20,9
Бобруйск	20300	118 / -0,9	407 / -40,4	59,3 / 2,6	57,6 / 11,2

На основе анализа динамики стока за 1961...2018 гг. сформулированы следующие обобщенные выводы: изменения среднегодового стока носили умеренный характер: на севере зафиксировано повышение на 3,6%, на юге – снижение до 1%; весеннее половодье существенно сократилось: объем стока уменьшился на 30...40%, при этом пик половодья

стал наступать раньше; в зимний период наблюдался рост стока: на севере бассейна – на 21%, на юге – на 11%.

На протяжении всего исследуемого периода (1961...2018гг.) изменения летнего стока оставались незначительными. Однако в последние годы зафиксировано резкое снижение показателя – до значений, оказавшихся ниже минимального уровня за весь рассматриваемый промежуток времени.

Климатические изменения и антропогенное воздействие неизбежно отразились на процессе испарения с водной поверхности водоемов. Результаты наблюдений подтверждают существенные трансформации в пространственно-временной структуре этого явления.

Сравнительный анализ испарения на территории Беларуси выявил две ключевые тенденции:

- общее снижение величины испарения с водной поверхности;
- рост пространственной неоднородности процесса.

Для количественной оценки изменений применялся метод градиентов линейных трендов – их значения представлены в месячной динамике. Анализ месячных показателей испарения по метеостанциям Беларуси свидетельствует о наличии статистически значимых (на уровне 95 %) линейных трендов в многолетней динамике.

В бассейне реки Березины за период с мая по октябрь зафиксированы статистически значимые снижения испарения. При этом выявлены следующие особенности по сезонам:

- максимальные градиенты наблюдаются в летние месяцы (июнь–июль);
- в осенние месяцы градиенты меньше по величине, но практически все имеют отрицательное значение.

Полученные данные позволяют сделать два важных вывода:

- отмечается снижение скорости изменения климатических факторов.
- природная составляющая оказывает большее влияние на динамику испарения, чем антропогенная (табл. 7).

Таблица 7

Градиенты (α , мм/10 лет) изменения испарения с водной поверхности и коэффициенты корреляции линейных трендов (r) по метеостанциям Беларуси

Интервал осреднения	Параметр	
	Градиент (α , мм/10 лет)	Коэффициент корреляции линейных трендов (r)
май	-3,35 / -3,12*	-0,31 / -0,31
июнь	-6,56 / -5,08	-0,40 / -0,34
июль	-6,74 / -4,21	-0,38 / -0,26
август	-1,91 / -1,365	-0,13 / -0,10
сентябрь	-2,52 / -1,79	-0,29 / -0,22
октябрь	-0,37 / -0,08	-0,10 / -0,02

Примечание. * в числителе приведены сведения из работы [20]; коэффициенты корреляции, обладающие статистической значимостью, выделены.

На интенсивность испарения с водной поверхности в первую очередь влияют два показателя: температура воздуха и скорость ветра. Несмотря на то что повышение температуры ускоряет испарение, наблюдается тенденция к снижению скорости ветра, который в настоящее время играет доминирующую роль в динамике испарения. Кроме того, на процесс испарения с водной поверхности оказывают влияние локальные факторы. Данный фактор необходимо учитывать при составлении водохозяйственного баланса.

Сценарии изменения климата для бассейна Березины на период до 2035 года получены с использованием материалов, представленных в Атласе глобальных и региональных климатических прогнозов, являющегося приложением к Пятому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [14...21]. Для общего прогноза изменения климата и стока до 2035 года используется представленный в Пятом докладе МГЭИК для Европы мультимодельный ансамбль из четырех сценариев – RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5, RCP2.6 и картосхемы, разработанные МГЭИК с использованием глобальных климатических моделей и представленные в данном атласе.

Для бассейна р. Березины более подробный прогноз климата с учетом региональной его изменчивости, выявленной по метеорологическим станциям за период с 1961 по 2018 гг., разработан с использованием наиболее неблагоприятных (консервативных) сценариев наибольшего повышения температуры и снижения осадков, а также с учетом линейной интерполяции.

С учетом использования наиболее консервативных сценариев изменения климата повышение температуры в бассейне Березины в среднем за год может составить до 1,9°C при максимальном повышении зимой на 2,3°C, летом – на 1,9 °C, весной и осенью – примерно на 1,7 °C. При этом годовое количество осадков изменится незначительно (суммарно за год уменьшится на 2 %) с увеличением их зимой (в среднем на 7 %), максимальным уменьшением летом (в среднем на 10 %), в меньшей степени уменьшением весной (на 4 %) и незначительном уменьшении осенью (в среднем на 1,6 %).

По методу гидролого-климатических расчетов [22] получены прогнозные оценки изменения речного стока в бассейне Березины на период до 2035 года. При этом использованы результаты оценки фактического изменения климата и речного стока за период с 1961 по 2018 гг. и уточненный прогноз изменения климата на период до 2035 года в исследуемом бассейне с учетом мультимодельного ансамбля из четырех сценариев, рекомендуемого МГЭИК, а также региональной изменчивости климата [14... 23].

Обобщение результатов расчетов прогнозного изменения стока в бассейне Березины на период до 2035 года приведено в табл. 8 [14].

Таблица 8

Прогноз изменения поверхностного стока до 2035 года для рек бассейнов Березина, в % от современного состояния

Гидрологический пост	Зима	Весна	Лето	Осень	среднегодовой
Борисов	13,7	-0,8	-3,5	-1,1	2,1
Бобруйск	4,3	-18,4	-2,1	-10,8	-6,7

На основании проведенных расчетов выявлены следующие прогнозные тенденции изменения стока в бассейне реки Березины вплоть до 2035 года:

- в зимний период прогнозируется незначительное изменение объема стока на юге бассейна, тогда как на севере предполагается его рост;
- на южной части бассейна ожидается уменьшение среднегодового стока;
- весной, в основном, вероятно сокращение стока, летом – определенное снижение стока, осенью, прежде всего в начальной фазе сезона и до середины октября, предвидится уменьшение стока.

ОБСУЖДЕНИЕ

Примененный критерий допустимого изъятия, основанный на сравнении стока расчетной обеспеченности и экологического стока, рассчитанного методом переноса обеспеченностей, позволил количественно обосновать режим водозабора, минимизирующий воздействие на речные экосистемы. Существенное различие между нормативным и уточненным значениями экологического стока (в 2 раза для Березины) свидетельствует о

необходимости пересмотра региональных нормативов с учетом современных гидрологических и экологических требований, что согласуется с выводами международных обзоров [8, 10], подчеркивающих важность адаптации законодательства к местным условиям.

Полученные балансы подтверждают принципиальную возможность реконструкции водохранилища даже при более жестких экологических ограничениях. Однако прогнозируемое снижение весеннего стока до 2035 г. требует периодичности в корректировке параметров забора в будущем. Как отмечается в [9...22], климатические изменения вносят дополнительную неопределенность в оценку экологического стока, поэтому необходимы адаптивные стратегии управления, включающие регулярный мониторинг и корректировку режимов водозабора. Предложенные в работе направления мониторинга (автоматизация, спутниковый контроль, создание ГИС-модели) соответствуют современным тенденциям, изложенным в [8], где мониторинг и вовлечение заинтересованных сторон названы ключевыми факторами успеха.

Сравнение с мировыми примерами внедрения экологических стоков [7...11] показывает, что в Беларуси пока доминирует упрощенный подход. Настоящее исследование демонстрирует возможность использования более совершенных гидрологических методов даже при ограниченных исходных данных, что особенно актуально для малых рек (р. Сведь). Полученные результаты могут служить основой для разработки региональных нормативов экологического стока, учитывающих внутригодовую изменчивость, что соответствует рекомендациям [8] о необходимости перехода от фиксированных процентов к научно обоснованным режимам.

Для корректной эксплуатации водохранилища «Светлогорское» необходимо совершенствовать мониторинг поверхностных вод, для чего нужно осуществлять переход от эпизодического наблюдения к автоматизированной системе сбора данных.

Предлагается:

- установить гидрометеорологические станции и датчики уровня/температуры воды;
- вести учет реального времени по фильтрационным потерям и испарению;
- использовать спутниковый мониторинг для отслеживания площади зеркала водохранилища.
- организовать лабораторные исследования по динамике заиления и коэффициентам фильтрации;
- создать цифровую геоинформационную модель водохранилища (в среде QGIS, ArcGIS и т.п.);
- разработать сценарный анализ при экстремальных осадках и длительных засухах, модель изменения сезонной водоотдачи рек Березина и Сведь;
- выполнить анализ потребности водопотребителей по месяцам для сглаживания водозаборов;
- исследовать возможность накапливающей фильтрации для поддержания уровней;
- разработать адаптивные графики управления водоподачей и сбросами;
- провести анализ биоразнообразия в зоне влияния водохранилища (в т.ч. болотные и пойменные экосистемы);
- исследовать влияние изменения водного режима на агропромышленный комплекс региона.

В качестве инженерно-технического решения для повышения эффективности мониторинга за уровнем водопотребления и водопользования предлагается установка измерительного устройства в реперных точках расчетных створов исследуемых рек [24].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ многолетних колебаний стока воды р. Березина показал, что на весенний, зимний и летне-осенний периоды приходится 39, 22 и 39 % от годового стока соответственно. На р. Сведь – 48, 20 и 32 % от годового стока соответственно. Изменения среднегодовых расходов воды в р. Березина для периода с 1986 по 2018 гг. по отношению к периоду 1961...1986 гг. являются незначительными. Значительные изменения касаются весеннего половодья, снижения колеблется от 30 до 40 % с более ранним наступлением его пика. При этом, имело место увеличение стока в зимний период от 11 до 21 %, и незначительные изменения расходов воды в летне-осенний период.

Для р. Березина в створе Светлогорск уточненное значение экологического стока (95% обеспеченности методом переноса обеспеченностей) составляет 67,7 м³/с, для р. Сведь – 0,706 м³/с, что значительно превышает нормативные 34,7 и 0,332 м³/с соответственно. Использование этих величин в водохозяйственных расчетах позволяет более надежно защитить речные экосистемы.

Предложен формализованный критерий допустимого изъятия: объем забора в каждом месяце не должен превышать разности между стоком расчетной обеспеченности (75% или 90%) и экологическим стоком (95% по методу переноса обеспеченностей). При соблюдении этого условия доля изъятия для Березины не превышает 1,5% годового стока, для Сведи – 8,3%.

Разработанный водохозяйственный баланс подтверждает достаточность водных ресурсов для наполнения водохранилища до объема 44...45 млн м³ и обеспечения орошения 49,8 тыс. га в годы 75% и 90% обеспеченности. Потери воды на испарение и фильтрацию составляют около 17,3 млн м³/год, из них 2,2 млн м³ – фильтрация в оградительный канал.

Климатические изменения за 1961...2018 гг. привели к росту зимнего стока на 11...21% и снижению весеннего половодья на 30...40%. Прогноз до 2035 г. указывает на дальнейшее сокращение весеннего и осеннего стока, что требует корректировки графика наполнения водохранилища и внедрения адаптивных методов управления.

Для обеспечения устойчивой эксплуатации водохранилища рекомендовано развивать автоматизированную систему мониторинга уровня воды, фильтрационных потерь и испарения, создать геоинформационную модель объекта и проводить регулярную оценку биоразнообразия в зоне влияния. Полученные результаты могут быть использованы при пересмотре региональных нормативов экологического стока.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ААВ; управление данными - ННШ; формальный анализ - СИП; методология - ААВ; программное обеспечение - СИП; отслеживание - ННШ; Визуализация - СВС; написание исходного проекта - ННШ; написание и редактирование обзора - ННШ .

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант № X25КИ-036).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальное потепление // Всероссийский Экологический портал. – URL: <https://ecoportal.su/public/klimat/view/2110.html> (дата обращения: 10.06.2025).
2. Данилович И. С., Гледко Ю. А., Тарасевич И. В. Повторяемость засух на территории Беларуси в связи с атмосферной циркуляцией в Атлантико-Европейском секторе // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 9. – С. 61-71. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71.
3. Коледа, К.В. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур : рекомендации / К.В. Коледа и др.; под общ. ред. К.В. Коледы, А.А. Дудука. – Гродно : ГГАУ, 2010. – 340 с.
4. Эколого-социальные аспекты освоения водно-земельных ресурсов и технологий управления режимами гидромелиораций / П.В. Шведовский, В.Е. Валуев, А.А. Волчек, В.Г. Федоров. – Минск: Ураджай, 1998. – 363 с.
5. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Водный баланс речных водосборов Беларуси. – Минск: Тонпик, 2006 – 160 с.
6. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы, турысцкі патынцыял водных аб'ектаў / маст.: Ю.А. Тарэў, У.І. Цярэнцьеў. – Мінск : БелЭн, 2007. – 480 с.
7. Alexandra, J., Rickards, L., Pahl-Wostl, C. The logics and politics of environmental flows – A review // Water Alternatives. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – P. 346-373.

8. Arthington, A.H., Tickner, D., McClain, M.E. et al. Accelerating environmental flow implementation to bend the curve of global freshwater biodiversity loss // *Environmental Reviews*. – 2024. – Vol. 32, No. 3. – P. 387-413.
9. Bhuiyan, C. Environmental flows: issues and gaps—a critical analysis // *Sustainability Science*. – 2022. – Vol. 17, No. 3. – P. 1109-1128.
10. Gebreegzabher, G.A., Degefa, S., Furi, W., Legesse, G. Evolution and concept of environmental flows (e-flows): meta-analysis // *Water Supply*. – 2023. – Vol. 23, No. 6. – P. 2466-2490.
11. Tickner, D., Opperman, J.J., Abell, R. et al. Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: an emergency recovery plan // *BioScience*. – 2020. – Vol. 70, No. 4. – P. 330-342.
12. Волчек А.А., Дашкевич Д.Н., Кухаревич М.Ф., Парфомук С.И., Сидак С.В., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н. Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2025. № 1. С. 76 – 99.
13. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. Технический кодекс установившейся практики ТКП 45-3.04-168-2009(02250). – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 55 с.
14. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз с учетом изменения климата / А.А. Волчек, В.Н. Корнеев, С.И. Парфомук, И.А. Булак; под общ. ред. А.А. Волчек, В.Н. Корнеева. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
15. Волчек, А.А. Гидрологические расчеты : учебное пособие / А.А. Волчек. – Москва : КНОРУС, 2021. – 418 с.
16. «Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Порядок проведения расчета и оформления водохозяйственных балансов. ТКП 17.06-03-2008 (02120). – Минск, 2018. – 25 С.
17. Ясельда / И. В. Абрамова [и др.] ; под общ. ред. А.А. Волчека, И.И. Кирвеля, Н.В. Михальчука ; Национальная академия наук Беларуси, Полесский аграрно-экологический институт. – Минск : Беларуская навука, 2017. – (Реки Полесья). – 416 с.
18. Бурлибаев М.Ж., Волчек А.А., Шведовский П.В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах. – Алматы: Издательство «Каганат», 2003. – 532 с.
19. Волчек А.А., Парфомук С.И. Пакет прикладных программ для определения расчетных характеристик речного стока / *Вестник Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Серыя прыродазнаўчых навук*. – 2009. – №1. – С. 22 – 30.
20. Логинов В.Ф., Волчек А.А. Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии // *География и природные ресурсы*, №2, 2005. – С. 137 – 144.
21. Изменение климата, 2013 г. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). – Женева: МГЭИК, 2013. – 1552 с. // *Материалы МГЭИК. Электронный ресурс*. – Режим доступа: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. – Дата доступа: 04.06.2025.
22. Мезенцев В.С. Гидролого-климатическая гипотеза и примеры ее использования // *Водные ресурсы*. – 1995. – Том 22, №3. – С. 299–301.
23. Волчек А.А., Парфомук С.И. Оценка трансформации водного режима малых рек Белорусского Полесья под воздействием природных и антропогенных факторов (на примере р. Ясельда) // *Водное хозяйство России*. – 2007. – № 1. – С. 50 – 62.
24. Устройство для измерения уровня воды: пат. 13217 Респ. Беларусь, МПК U G 01F 23/00 / А.А. Волчек, М.А. Таратенкова, Д.А. Шпока, Е.И. Дмухайло; заявитель Брест. гос. техн. ун-т. – № u 20220312; заявл. 30.12.22; опубл. 30.06.23 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. – 2023. – № 3. – С. 97 – 98.

REFERENCES

1. Global'noe poteplenie // *Vserossiiskii Ekologicheskii portal*. – URL: <https://ecoportal.su/public/klimat/view/2110.html> (data obrashcheniya: 10.06.2025).
2. Danilovich I. S., Gledko Yu. A., Tarasevich I. V. Povtoryaemost' zasukh na territorii Belarusi v svyazi s atmosfernoі tsirkulyatsiei v Atlantiko-Evropеiskom sektore // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2023. – № 9. – S. 61-71. – DOI 10.52002/0130-2906-2023-9-61-71.
3. Koleda, K.V. Sovremennye tekhnologii vzdelyvaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur : rekomendatsii / K.V. Koleda i dr.; pod obshch. red. K.V. Koledy, A.A. Duduka. – Grodno : GGAU, 2010. – 340 s.
4. Ekologo-sotsial'nye aspekty osvoiniya vodno-zemel'nykh resursov i tekhnologii upravleniya rezhimami gidromelioratsii / P.V. Shvedovskii, V.E. Valuev, A.A. Volchek, V.G. Fedorov. – Minsk: Uradzhai, 1998. – 363 s.
5. Loginov V.F., Volchek A.A. Vodnyi balans rechnykh vodosborov Belarusi. – Minsk: Tonpik, 2006 – 160 s.
6. Blakitny skarb Belarusi: Reki, azery, vadaskhovishchy, turystski patyntsyyal vodnykh ab'ektaŭ / mast.: Yu.A. Tareeŭ, U.I. Tsyarents'eŭ. – Minsk : BelEn, 2007. – 480 s.
7. Alexandra, J., Rickards, L., Pahl-Wostl, C. The logics and politics of environmental flows – A review // *Water Alternatives*. – 2023. – Vol. 16, No. 2. – P. 346-373.
8. Arthington, A.H., Tickner, D., McClain, M.E. et al. Accelerating environmental flow implementation to bend the curve of global freshwater biodiversity loss // *Environmental Reviews*. – 2024. – Vol. 32, No. 3. – P. 387-413.
9. Bhuiyan, C. Environmental flows: issues and gaps—a critical analysis // *Sustainability Science*. – 2022. – Vol. 17, No. 3. – P. 1109-1128.
10. Gebreegzabher, G.A., Degefa, S., Furi, W., Legesse, G. Evolution and concept of environmental flows (e-flows): meta-analysis // *Water Supply*. – 2023. – Vol. 23, No. 6. – P. 2466-2490.
11. Tickner, D., Opperman, J.J., Abell, R. et al. Bending the curve of global freshwater biodiversity loss: an emergency recovery plan // *BioScience*. – 2020. – Vol. 70, No. 4. – P. 330-342.
12. Volchek A.A., Dashkevich D.N., Kukharevich M.F., Parfomuk S.I., Sidak S.V., Sheshko N.N., Shpendik N.N. Otsenka dopustimogo otbora rechnykh vod poimennymi rybkhozami Belorusskogo Poles'ya // *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2025. № 1. С. 76 – 99.
13. Raschetnye gidrologicheskie kharakteristiki. Poryadok opredeleniya. Tekhnicheskii kodeks ustanovivsheysya praktiki TKP 45-3.04-168-2009(02250). – Minsk: RUP «Stroitekhnorm», 2010. – 55 s.

14. Vodnye resursy Belarusi i ikh prognoz s uchetom izmeneniya klimata / A.A. Volchek, V.N. Korneev, S.I. Parfomuk, I.A. Bulak; pod obshch. red. A.A. Volchek, V.N. Korneeva. – Brest : Al'ternativa, 2017. – 228 s.
15. Volchek, A.A. Hidrologicheskie raschety : uchebnoe posobie / A.A. Volchek. – Moskva : KNORUS, 2021. – 418 s.
16. «Okhrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie. Gidrosfera. Poryadok provedeniya rascheta i oformleniya vodokhozyaistvennykh balansov. TKP 17.06-03-2008 (02120). – Minsk, 2018. – 25 S.
17. Yasel'da / I. V. Abramova [i dr.] ; pod obshch. red. A.A. Volcheka, I.I. Kirveliya, N.V. Mikhal'chuka ; Natsional'naya akademiya nauk Belarusi, Poleskii agrarno-ekologicheskii institut. – Minsk : Belaruskaya navuka, 2017. – (Reki Poles'ya). – 416 s.
18. Burlibaev M.Zh., Volchek A.A., Shvedovskii P.V. Problemy optimizatsii prirodopol'zovaniya i prirodoobustroistva v matematicheskikh modelyakh i metodakh. – Almaty: Izdatel'stvo «Kaganat», 2003. – 532 s.
19. Volchek A.A., Parfomuk S.I. Paket prikladnykh programm dlya opredeleniya raschetnykh kharakteristik rechnogo stoka / Vesnik Paleskaga dzhyarzhaynaga universiteta. Seryya pryrodaznaŭchykh navuk. – 2009. – №1. – S. 22 – 30.
20. Loginov V.F., Volchek A.A. Izmenenie ispareniya s vodnoi poverkhnosti na territorii Belorussii// Geografiya i prirodnye resursy, №2, 2005. – S. 137 – 144
21. Izmenenie klimata, 2013 g. Fizicheskaya nauchnaya osnova. Vklad Rabochei gruppy I v Pyaty doklad ob otsenke Mezhpravitel'stvennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata (MGEIK). – Zheneva: MGEIK, 2013. – 1552 s. // Materialy MGEIK. Elektronnyi resurs. – Rezhim dostupa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf. – Data dostupa: 04.06.2025.
22. Mezentshev V.S. Hidrologo-klimaticheskaya gipoteza i primery ee ispol'zovaniya // Vodnye resursy. – 1995. – Tom 22, №3. – S. 299–301.
23. Volchek A.A., Parfomuk S.I. Otsenka transformatsii vodnogo rezhima malykh rek Belarusskogo Poles'ya pod vozdeistviem prirodnykh i antropogennykh faktorov (na primere r. Yasel'da) // Vodnoe khozyaistvo Rossii. – 2007. – № 1. – S. 50 – 62.
24. Ustroistvo dlya izmereniya urovnya vody: pat. 13217 Resp. Belarus', MPK U G 01F 23/00 / A.A. Volchek, M.A. Taratenkova, D.A. Shpoka, E.I. Dmukhailo; zayavitel' Brest. gos. tekhn. un-t. – № u 20220312; zayavl. 30.12.22; opubl. 30.06.23 // Afitsyiny byul. / Nats. tsentr intelektual. ulasnasti. – 2023. – № 3. – S. 97 – 98.

СВЕТЛОГОРСК СУ ҚОЙМАСЫНЫҢ ГИДРОЛОГИЯЛЫҚ РЕ- ЖИМІН БАҒАЛАУ

Александр А. Волчек г.ғ.д., Сергей И. Парфомук т.ғ.к., Светлана В. Сидак, Николай Н. Шешко т.ғ.к., Наталья Н. Шпендик г.ғ.к.

Брест мемлекеттік техникалық университеті, Брест қ., Беларусь volchak@tut.by (ААВ), parfom@mail.ru (СИП), harchik-sveta@mail.ru (СВС), optimum@tut.by (ННШ), shpendik@tut.by (ННШ)

*Автор корреспондент: Александр А. Волчек, volchak@tut.by

ТҮЙІН СӨЗДЕР

су қоймасы, су шаруашылық балансы, су пайдалану, ағын, экологиялық ағын, рұқсат етілетін су алу, климаттық өзгерістер, болжам

Мақала жайында:

Алынды: 17.12.2025
Қайта қаралды: 20.03.2026
Қабылданды: 30.03.2026
Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Березина және Сведь өзендерінің су ресурстарына жобаланатын су алу тораптары тұстамаларында Светлогорск құймалы су қоймасын қайта жаңғыртуды негіздеу мақсатында кешенді бағалау жүргізілді. Көпжылдық гидрологиялық бақылаулар мен өңірлік есептеу әдістері негізінде ағынның негізгі статистикалық сипаттамалары, оның жыл ішіндегі таралуы және экологиялық тұрғыдан рұқсат етілетін су алу көлемдері анықталды. Қамтамасыз етілімдерді көшіру әдісін қолдану арқылы Березина және Сведь өзендері үшін экологиялық ағынның нақтыланған мәндері алынды. 75 % және 90 % есептік қамтамасыз етілім деңгейлері үшін су қоймасының су шаруашылық балансы әзірленді. Рұқсат етілетін су алу өлшемі ретінде есептік қамтамасыз етілімдегі ағын мен қамтамасыз етілімдерді көшіру әдісімен анықталған экологиялық ағын шамасының айырмасы қабылданды. Березина өзенінен жалпы су алу көлемі 37 720 мың м³, ал Сведь өзенінен – 3 673,7 мың м³ құрады, бұл сәйкесінше жылдық ағынның 1,0 % және 8,3 % төмендеуіне сәйкес келеді. 1961...2018 жылдар аралығында Березина алабында климат пен ағынның көпжылдық өзгерістері талданып, статистикалық тұрғыдан мәнді трендтер анықталды: қысқы ағынның артуы (11...21 %), көктемгі тасқын ағынының азаюы (30...40 %). Климаттың өзгеруі жөніндегі үкіметаралық сарапшылар тобы (КӨУСТ) (RCP) сценарийлері негізінде 2035 жылға дейінгі ағын өзгерісіне болжам жасалып, көктемгі және жаз-күзгі ағынның ықтимал қысқаруы көрсетілді. Су қоймасының су ресурстарын мониторингілеу мен бейімделген басқаруды жетілдіру бағыттары ұсынылды.

ASSESSMENT OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE SVETLOGORSKOYE RESERVOIR

Aleksandr A. Volchek Doctor of Geographical Sciences, Sergey I. Parfomuk Candidate of Technical Sciences, Svetlana V. Sidak, Nikolay N. Sheshko Candidate of Technical Sciences, Natalia N. Shpendik Candidate of Geographical Sciences

Brest State Technical University, Brest, Belarus volchak@tut.by (AAB), parfom@mail.ru (СИП), harchik-sveta@mail.ru (CBC), optimum@tut.by (HHIII), shpendik@tut.by (HHIII)

*Author correspondent: Aleksandr A. Volchek, volchak@tut.by

KEY WORDS

reservoir, water management balance, water use, runoff, environmental flow, permissible withdrawal, climate change, forecast

About article:

Received: 17.12.2025

Revised: 20.03.2026

Accepted: 30.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT



A comprehensive assessment of the water resources of the Berezina and Sved Rivers at the planned intake sites was conducted to justify the reconstruction of the Svetlogorskoye reservoir. Based on long-term hydrological observations and regional calculation methods, the main statistical characteristics of the flow, its intra-annual distribution, and environmentally permissible withdrawal volumes were determined. Using the probability transfer method, updated environmental flow values were obtained for the Berezina and Sved Rivers. A water management balance for the reservoir was developed for two estimated probability levels (75 % and 90 %). The criterion for permissible withdrawal was the difference between the estimated probability flow and the environmental flow determined by the probability transfer method. The total withdrawal volume from the Berezina River amounted to 37,720 thousand m³, and from the Sved River is 3,673,700 m³, which is corresponding to a decrease in annual flow of 1.0% and 8.3 %, respectively. Long-term climate and runoff changes in the Berezina River basin from 1961 to 2018 were analyzed, revealing statistically significant trends: an increase in winter runoff (11...21 %) and a decrease in spring flood runoff (30...40 %). Based on IPCC (RCP) scenarios, a runoff change forecast was generated to 2035, showing a possible reduction in spring and summer-autumn runoff. Suggestions for improving monitoring and adaptive management of the reservoir's water resources were provided.

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



Научная статья

ГЕОЛОГО-ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ СКВАЖИННОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

Дияр К. Бармаков^{1*} , Егор Г. Язиков² доктор геолого-минералогических наук 

¹Восточно-Казахстанский технический университет имени Д.Серикбаева, г.Усть-Каменогорск, Казахстан, diyar.barmakov@gmail.com (ДКБ)

²Томский политехнический университет, г.Томск, Россия, yazikoveg@tpu.ru (ЕГЯ)

*Автор корреспонденции: Дияр К. Бармаков diyar.barmakov@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

скважинное выщелачивание, золото, трещиноватость, проницаемость, литология, структурные элементы, геомеханика, гидрогеология, 3D моделирование

АБСТРАКТ

Целью исследования является комплексная оценка геолого-геомеханических и гидрогеологических условий, определяющих возможность применения технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на примере золоторудного месторождения Ашиктас. В рамках работы построены трёхмерные геологические и структурные модели с использованием данных бурения, описаний керна, показателей трещиноватости (RQD) и геостатистического анализа распределения золота, серебра и меди. Особое внимание уделено роли литологии, трещиноватости и тектонических нарушений в формировании зон высокой проницаемости и концентрации полезных компонентов. Установлено, что золото преимущественно приурочено к трещиноватым туфам и зонам разломов, обеспечивающим циркуляцию выщелачивающего раствора, тогда как интрузивные породы выполняют роль природных барьеров. Проведён анализ геомеханических и гидрогеологических факторов, влияющих на фильтрацию растворов и экологические риски. Практическая значимость работы заключается в обосновании применения ПСВ как экономически целесообразного и экологически безопасного метода извлечения золота на месторождениях с аналогичными геолого-структурными условиями.

По статье:

Получено: 23.10.2025

Пересмотрено: 10.02.2026

Принято: 26.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Бармаков Д., Язиков Е. Геолого-геомеханические предпосылки применения скважинного выщелачивания золота // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 60-70.

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения традиционных открытых и подземных методов добычи золота возрастают экономические и экологические вызовы, которые требуют внедрения более эффективных, экономичных и экологически безопасных технологий. Скважинное выщелачивание (ПСВ) приобретает всё большую популярность как перспективный метод извлечения золота из сложных и малопроницаемых рудных тел. Этот метод успешно применяется на ряде российских месторождений, таких как Гагарское, Маминское, Долгий Мыс, Верхотурское и Восточно-Семеновское, демонстрируя высокую эффективность при снижении затрат и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

Месторождение Ашиктас характеризуется уникальным комплексом геологических, литологических и структурных особенностей, создающих благоприятные предпосылки для применения ПСВ. В частности, наличие проницаемых зон, трещиноватых коллекторов и устойчивых геомеханических условий способствуют успешной реализации технологии подземного скважинного выщелачивания.

Цель данной статьи — провести комплексную оценку возможности применения ПСВ на месторождении Ашиктас на основе анализа геолого-структурных и геомеханических параметров, а также рассмотреть технологические и экологические

аспекты внедрения данного метода. Особое внимание уделяется выявлению ключевых факторов, влияющих на эффективность выщелачивания, и оценке потенциальных рисков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Месторождение Ашиктас расположено в пределах геологической зоны с комплексным строением, включающей эффузивно-вулканогенные комплексы, интрузивные тела и разнообразные тектонические структуры. Оно относится к жильному типу золотоносных месторождений, приуроченных к вулканогенно-осадочным породам мезозойского возраста [1].

Литостратиграфически район характеризуется чередованием вулканогенных туфов, эффузивных пород и интрузивных тел. Вулканогенные туфы представлены преимущественно кислым и промежуточным составом, обладающим развитой пористостью и зональной изменчивостью минерального состава. Эффузивные породы — базальты и андезиты — отличаются высокой трещиноватостью, что способствует формированию гидротермальных каналов.

Интрузивные тела, преимущественно гранитоиды, внедрены в эффузивно-вулканогенный комплекс и играют роль не только литологических барьеров, но и структурных ориентиров, контролирующих развитие рудных жил. Их плотность и малая проницаемость ограничивают распространение гидротермальных растворов.

Тектонически месторождение характеризуется сложной системой разломов и взбросов, среди которых Ашиктасский взброс является одной из ключевых структур. Эта зона нарушений создает сеть трещиноватых разломных зон, которые служат основными проводниками для миграции минерализующих флюидов. Наличие активной тектоники обуславливает развитие гидротермальных систем и концентрирует рудные тела в зонах пересечений и изгибов структур.

Минерализация представлена главным образом золотом, с сопряженным содержанием серебра и меди. Золото локализовано в кварцевых жилах, трещинах и петрогенных изменениях вулканогенных пород. Серебро и медь ассоциированы с сульфидными минералами, такими как пирит, халькопирит и сфалерит, локализованными преимущественно в зонах активной трещиноватости [2]-[5].

Гидротермальные процессы, обусловленные циркуляцией металлонесных растворов, приводят к интенсивной перестройке минералогического состава пород в пределах рудных зон. Происходит формирование зон альбитизации, серицитизации, кварцитизации и пиритизации, что служит индикатором локализации и интенсивности минерализации.

Таким образом, комплексная геологическая структура, литологическое разнообразие и выраженная тектоника создают благоприятные предпосылки для формирования обширных зон рудоносности и, одновременно, обуславливают сложность процессов миграции и осаждения металлов в пределах месторождения Ашиктас.

В целях оценки возможности эффективного использования технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на месторождении Ашиктас была проведена комплексная интеграция геологических, структурных и геомеханических данных. В исследовании учитывались литологические характеристики, индекс дробления породы (RQD), структурные модели, а также пространственное распределение золота, серебра и меди (Au, Ag, Cu).

Литологическая характеристика и роль пород в миграции флюидов. В пределах изучаемой территории выделяются две основные группы горных пород, которые по-разному влияют на процессы движения и накопления гидротермальных растворов, что обусловлено их структурно-литологическими особенностями.

Эффузивные породы представляют собой вулканические лавы с изменчивой степенью трещиноватости, напрямую зависящей от локальной геологии и близости к крупным

разломам. В участках с высокой трещиноватостью (низкие значения RQD свидетельствуют о высокой степени дробления) такие породы образуют разветвленные трещинные сети, служащие эффективными каналами для движения выщелачивающих растворов. Это обеспечивает их активное взаимодействие с минерализованными телами и способствует максимальному извлечению металлов. В более цельных (высокий RQD) зонах проницаемость эффузивов значительно снижается, ограничивая циркуляцию растворов. Данный факт подчеркивает необходимость детального учета локальной неоднородности проницаемости при моделировании процесса выщелачивания.

Туфы как аккумуляторы минерализующих растворов. В отличие от эффузивных пород, туфы — осадочные вулканогенные породы — характеризуются высокой пористостью и относительно низкой трещиноватостью. Их поровое пространство способствует накоплению и удержанию минерализующих растворов, замедляя их движение. Это создает благоприятные условия для отложения рудных минералов в порах и мелких пустотах, что позволяет туфам выполнять функцию природных коллекторов, аккумулирующих полезные компоненты. Эффективное моделирование миграции и накопления растворов возможно лишь при комплексном учете литологии и локальных геоструктурных особенностей, определяющих проницаемость и степень трещиноватости [9]-[13].

В данной работе моделирование трещиноватости базируется на использовании геотехнического показателя RQD (Rock Quality Designation), введенного исследователем Диром в рамках более широкой системы оценки качества горной массы — RMR (Rock Mass Rating). RQD отражает качество горной породы и определяется как отношение суммарной длины керновых образцов длиной более 10 см к общей длине отобранного керна из геологоразведочных скважин. Этот показатель широко применяется для оценки степени трещиноватости массива, поскольку наличие трещин и зон разрушения оказывает существенное влияние на геотехнические и гидрогеологические процессы. Высокие значения RQD указывают на относительно цельные и неповрежденные породы, тогда как низкие значения свидетельствуют о значительном разрушении и развитии трещиноватости [14]-[17].

Анализ качества горных пород по индексу RQD показал, что в районах, приуроченных к рудным телам и крупным разломным структурам, отмечается значительная трещиноватость пород. Низкие значения RQD указывают на развитую сеть трещин, что создаёт благоприятные условия для равномерного проникновения выщелачивающих растворов и их эффективного контакта с рудой.

Структурная модель месторождения выявила множество разломов, взбросов и зон сдвигов различного масштаба. Особое значение для формирования гидродинамических условий имеет Ашиктасский взброс — крупный сдвиговой разлом, усиливающий трещиноватость и выступающий в роли главного проводника миграции минерализующих растворов. Данная сеть структурных нарушений формирует сложную систему трещин, по которым обеспечивается циркуляция выщелачивающих жидкостей, создавая оптимальные условия для ин-ситу извлечения золота и сопутствующих металлов.

Проницаемость и степень трещиноватости являются ключевыми параметрами, влияющими на распределение рудных минералов. Интенсивная трещиноватость, особенно вблизи структурных разломов, формирует сети гидродинамических каналов, по которым гидротермальные растворы, обогащенные Au, Ag и Cu, перемещаются и концентрируются. В местах с низкой проницаемостью — преимущественно в туфах — замедленное движение растворов способствует локализации руды и более интенсивному осаждению минералов.

Взаимодействие литологических особенностей и тектонических структур формирует сложную пространственную схему распределения полезных компонентов.

В геологической структуре месторождения явно выраженных гидрогеологических барьеров — таких как плотные интрузивные тела с низкой проницаемостью — не выяв-

лено. Возможные барьеры в виде глинистых слоев наблюдаются лишь в верхних горизонтах и не охватывают основные рудные зоны. Это указывает на необходимость тщательного контроля технологических параметров скважинного выщелачивания с целью минимизации неконтролируемого распространения выщелачивающих растворов за пределы целевых рудных зон.

Пространственное распределение золота, серебра и меди. Моделирование в трех измерениях показало, что наиболее богатые концентрации золота, серебра и меди приурочены к зонам трещиноватых эффузивных пород и разломных систем. Такие зоны создают оптимальные гидродинамические условия для циркуляции растворов и их контакта с минералами, что обеспечивает эффективное выщелачивание.

Высокая трещиноватость эффузивов способствует проникновению реагентов, тогда как пористые туфы обеспечивают задержку и аккумуляцию растворов, создавая благоприятные условия для извлечения полезных компонентов.

Прочностные свойства пород в зоне выщелачивания являются критическими для поддержания стабильности скважин и предотвращения деформаций. Породы месторождения Ашиктас характеризуются средней прочностью и умеренной устойчивостью, что обеспечивает сохранность горных массивов в процессе длительной циркуляции растворов. Тем не менее, для минимизации рисков рекомендуется проводить постоянный геомеханический мониторинг с целью выявления зон потенциальной нестабильности.

Высокая трещиноватость пород способствует эффективному фильтрационному проникновению растворов. Однако чрезмерное дробление пород может привести к неконтролируемому распространению выщелачивающих жидкостей за пределы рудных тел, снижая эффективность процесса и повышая экологические риски. Поэтому контроль степени трещиноватости и параметров фильтрации является важным аспектом эксплуатации.

Гидрогеологические условия и их значение. Водоносные горизонты, расположенные вблизи или внутри выщелачиваемой зоны, оказывают существенное влияние на движение растворов. Вода может менять гидравлические градиенты, способствуя непредсказуемому вытеканию реагентов и потенциальному загрязнению окружающей среды. На месторождении Ашиктас отсутствуют выраженные гидрогеологические барьеры, способные ограничить распространение растворов, а глинистые слои, которые могли бы выполнять эту функцию, локализируются только в верхних горизонтах, не затрагивая основные рудные тела.

Для минимизации экологических рисков необходима разработка комплексной системы гидроизоляции, включая мониторинг уровней подземных вод и контроль фильтрации выщелачивающих растворов.

Опыт применения скважинного выщелачивания золота на аналогичных месторождениях России, таких как Гагарское, Маминское, Долгий Мыс, Верхотурское и Восточно-Семеновское, демонстрирует, что успешность данной технологии во многом зависит от комплекса геолого-структурных и гидродинамических факторов. Важнейшими из них являются наличие пород-проводников с высокой трещиноватостью и проницаемостью, обеспечивающих свободную циркуляцию выщелачивающих растворов, а также присутствие пород-коллекторов, обладающих значительной пористостью, способствующей аккумуляции и удержанию реагентов в пределах целевых зон. Немаловажную роль играют природные или искусственно создаваемые барьеры, которые препятствуют неконтролируемому распространению растворов за пределы рудных тел, тем самым повышая эффективность выщелачивания и снижая экологические риски. Кроме того, практика успешных проектов подчеркивает необходимость внедрения систем геомеханического и гидрогеологического мониторинга, а также мер гидроизоляции, которые обеспечивают стабильность горных массивов и контролируют фильтрационные потоки, что в итоге способствует безопасности и долговременной устойчивости технологии [6]-[8].

Выводы, сформулированные на основании интегрированного анализа геолого-структурных и гидрогеологических данных, свидетельствуют о том, что высокая трещиноватость и пористость пород-проводников создают благоприятные условия для эффективного проникновения и циркуляции выщелачивающих растворов, что является ключевым для максимального извлечения золота и сопутствующих металлов. Пористые туфы, в свою очередь, выступают в роли коллекторов, способствуя локализации минерализации и осаждению рудных компонентов в пределах пространств порового и микропорового типа. Отсутствие выраженных природных гидрогеологических барьеров в пределах рудного тела месторождения Ашиктас требует разработки дополнительных инженерных мер, направленных на контроль фильтрации и предотвращение нежелательного распространения реагентов. При этом геомеханические свойства вмещающих пород обеспечивают достаточную устойчивость массива, что при условии постоянного мониторинга позволяет минимизировать риски обрушений и деформаций в зоне выщелачивания. Таким образом, комплексный подход, основанный на учёте геологических, структурных, геомеханических и гидрогеологических факторов, подтверждает готовность месторождения Ашиктас к успешному применению технологии скважинного выщелачивания золота с высокой эффективностью и минимальными экологическими последствиями.

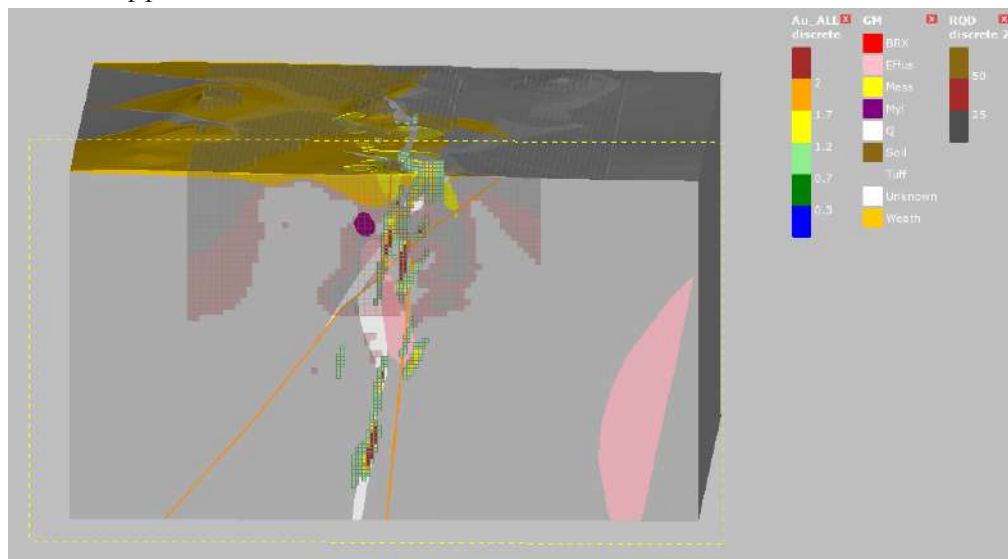


Рисунок 1. Литологическая модель, модель содержания меди (Cu), модель разломов, а также модель трещиноватости (RQD) в разрезе (ПО Leapfrog Geo)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования для оценки возможности применения технологии скважинного выщелачивания золота (ПСВ) на месторождении Ашиктас был проведён комплексный анализ геомеханических, гидрогеологических и литологических характеристик массива. Для более детального понимания пространственной организации и особенностей горных пород, а также их влияния на циркуляцию выщелачивающих растворов, были построены и интегрированы несколько трёхмерных моделей.

В первую очередь была создана литологическая модель, которая позволила выделить ключевые типы пород, влияющих на миграцию и аккумуляцию минерализующих флюидов. Эта модель стала основой для дальнейшего построения и интерпретации данных. Одновременно были сформированы модели распределения золота, серебра и меди, что обеспечило пространственное понимание концентрации и локализации полезных компонентов. Особое внимание уделялось оценке индекса трещиноватости (RQD), по которому была построена модель, отражающая степень разрушенности и проницаемости горных пород. Дополнительно была разработана структурная модель с выделением разломов и крупных тектонических элементов, таких

как Ашиктасский взброс, оказывающих существенное влияние на миграционные пути флюидов.

Объединение всех этих моделей позволило визуализировать потенциальные каналы миграции золотоносных растворов, определить зоны с высокой проницаемостью и трещиноватостью, а также выявить возможные гидродинамические барьеры и локализации минерализации. Это, в свою очередь, стало основой для предварительной оценки возможности и эффективности применения ПСВ на данном месторождении.

Результаты моделирования показали, что высокая трещиноватость и проницаемость в туфах и эффузивных породах обеспечивают благоприятные условия для циркуляции выщелачивающих растворов, что позитивно сказывается на извлечении золота и сопутствующих металлов. Однако выявленные структурные особенности и наличие водоносных горизонтов вблизи минерализованных зон требуют более детального изучения, так как возможны риски неконтролируемого распространения растворов и выноса реагентов за пределы целевых зон. В частности, не до конца изучена гидрогеологическая связь водоносных горизонтов с близлежащими поверхностными водными объектами, такими как реки и озера, что может существенно повлиять на экологическую обстановку региона при реализации технологии.

Кроме того, геомеханический анализ пород показал средний уровень прочности и умеренную устойчивость, что создаёт благоприятные условия для сохранения стабильности скважинных каналов в зоне выщелачивания. Вместе с тем, полученные данные указывают на необходимость организации регулярного мониторинга и проведения дополнительных исследований геомеханических характеристик в процессе эксплуатации, чтобы своевременно выявлять и предотвращать потенциальные зоны нестабильности.

Комплексное моделирование и интеграция геологических, структурных и гидрогеологических данных позволили сформировать целостное представление о геологическом строении и гидродинамических условиях месторождения Ашиктас. Эти результаты служат важной основой для принятия обоснованных решений по применению технологии скважинного выщелачивания золота, позволяя заранее определить потенциальные трудности и зоны риска, а также обозначить направления для дальнейших исследований и усовершенствований проекта. В частности, рекомендуется уделить особое внимание изучению гидрогеологической связи водоносных горизонтов с поверхностными водами и внедрению систем гидроизоляции и контроля фильтрационных потоков для минимизации экологических рисков и повышения эффективности технологии.

На рисунке 2 обозначены литологическая модель, блочная модель содержания золота Au, полупрозрачным отображена модель RQD со значениями «очень слабых» (от 0 до 25 красным цветом) и «слабых» пород (от 25 до 50 черным цветом), зеленой линией изображены границы планируемой открытой отработки месторождения. Ниже указанной границы имеются значительные запасы руды, которые требуют рассмотрения различных вариантов отработки с расчетом рентабельности.

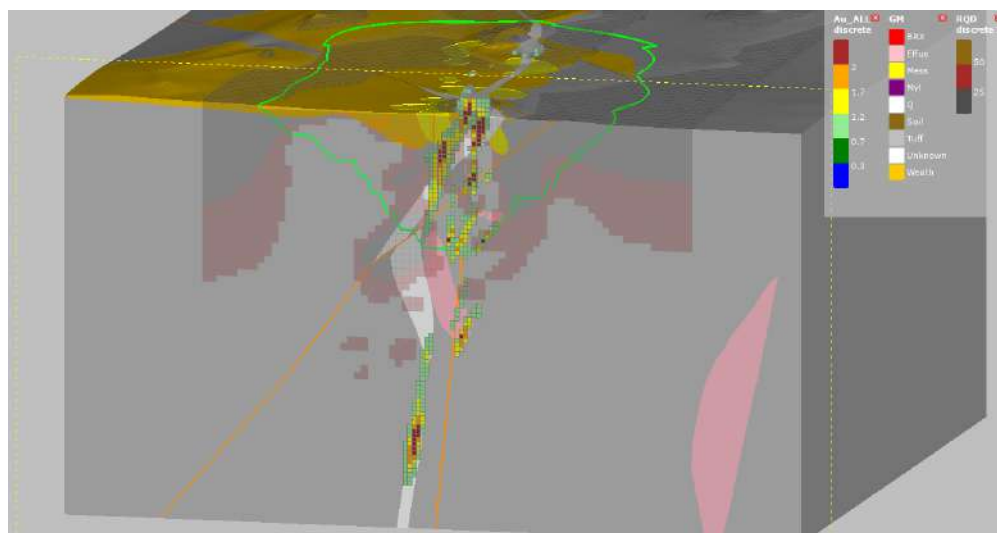


Рисунок 2. Литологическая модель, модель содержания меди (Cu), модель разломов, а также модель трещиноватости (RQD) в разрезе (ПО Leapfrog Geo)

Предпосылки для применения технологии скважинного выщелачивания (ПСВ) на месторождении Ашиктас во многом сходны с условиями, успешно реализованными на таких известных объектах, как Гагарское, Маминское и Верхотурское месторождения. Ключевыми факторами успеха на этих площадках стали комплекс литологических особенностей, высокий уровень трещиноватости пород, наличие структурных разломов, формирующих эффективные пути миграции растворов, а также благоприятные гидрогеологические условия, обеспечивающие контроль движения выщелачивающих растворов и минимизацию экологических рисков. Литологический состав и структурные элементы месторождения Ашиктас создают потенциал для формирования замкнутых зон выщелачивания, что крайне важно для ограничения неконтролируемой фильтрации и сохранения реагентов в целевых минерализованных зонах. Высокий индекс трещиноватости (RQD) в порах и вдоль разломных зон способствует равномерному проникновению выщелачивающего раствора, что положительно влияет на эффективность извлечения золота. Анализ геомеханических характеристик пород показывает достаточную устойчивость выработанных пространств, обеспечивающую безопасность проведения ПСВ.

Тем не менее, все сделанные выводы основаны на данных компьютерного моделирования, геологического и геомеханического анализа, а не на результатах реальных полевых испытаний. Это накладывает ограничения на точность прогноза, так как безполевых экспериментов невозможно полноценно оценить динамику движения растворов, скорость извлечения металлов и возможные экологические последствия. В частности, неопределённость в структуре водоносных горизонтов, а также возможная гидрогеологическая связь с близлежащими поверхностными водными объектами требует проведения дополнительного детального гидрогеологического картирования. Это позволит уточнить пути миграции подземных вод и разработать мероприятия по гидроизоляции для снижения экологических рисков.

Выбор выщелачивающих реагентов играет важную роль в обеспечении эффективности и безопасности технологии. На месторождении Ашиктас предпочтение отдается цианистым растворам — проверенному и широко используемому в России реагенту, который характеризуется высокой селективностью и скоростью извлечения золота. Вместе с тем, учитывая растущие требования к экологической безопасности, целесообразно рассмотреть менее токсичные альтернативы, такие как тиомочевина, персульфаты, хелатообразующие агенты и биохимические реагенты. Их применение позволит снизить экологическую нагрузку и минимизировать риски, связанные с обращением отходов и взаимодействием с подземными водами.

Основные технологические сложности связаны с потенциальным разубоживанием выщелачивающего раствора при контакте с горными породами, что ведет к снижению концентрации активного реагента и уменьшению эффективности извлечения металлов. Неконтролируемая фильтрация растворов через трещиноватые породы или гидрогеологические каналы может привести к значительным потерям реагентов и загрязнению окружающей среды. Для минимизации этих рисков необходимо разработать комплексную систему гидроизоляции, включающую создание барьерных зон, цементационных экранов и использование геотекстильных материалов. При этом особое значение приобретает организация постоянного мониторинга качества подземных вод и состояния выщелачивающей среды посредством гидрогеохимических исследований, регулярного отбора проб и анализа концентраций реагентов и металлов. Контроль параметров рН, окислительно-восстановительного потенциала и содержания токсичных соединений в подземных водах позволит своевременно выявлять аномалии и предотвращать неконтролируемое загрязнение.

Экологическая безопасность выступает приоритетом при внедрении ПСВ на месторождении Ашиктас. Для снижения рисков загрязнения подземных водных горизонтов необходимо предусмотреть гидроизоляционные мероприятия, такие как создание защитных экранов и использование запирающих пород. Строгое соблюдение законодательных требований и нормативов по обращению с опасными веществами, регулярное обучение персонала и проведение экологических аудитов станут важной частью комплексного управления экологическими рисками.

Опыт успешного применения ПСВ на Верхотурском и Восточно-Семеновском месторождениях демонстрирует, что при правильной организации технологических и экологических мероприятий возможно значительно снизить негативное воздействие, повысить безопасность и экономическую эффективность добычи. В связи с этим дальнейшие этапы исследований на Ашиктасе должны включать проведение пилотных скважинных выщелачиваний для верификации эффективности и выявления технических ограничений, детальное гидрогеологическое картирование, разработку и внедрение систем экологического мониторинга, а также исследования по подбору и оптимизации реагентов с учетом геохимических особенностей месторождения и минимизации экологического воздействия [6]-[8].

Таким образом, интеграция результатов моделирования с опытом аналогичных проектов и вниманием к экологическим аспектам позволяет рассматривать месторождение Ашиктас как перспективную площадку для успешного применения технологии скважинного выщелачивания золота, способствующего повышению экономической эффективности добычи при минимальных экологических рисках.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скважинное выщелачивание (ПСВ) рассматривается как перспективный и эффективный метод добычи золота на месторождении Ашиктас благодаря совокупности благоприятных геолого-структурных, геомеханических и гидрогеологических условий. Высокая трещиноватость и развитая пористость туфов, а также наличие протяженных разломных зон с повышенной проницаемостью создают оптимальные пути для циркуляции выщелачивающего раствора и обеспечивают эффективное извлечение золота ин-ситу. Наиболее перспективными для применения ПСВ выделены именно участки трещиноватых туфов и разломов, где наблюдается высокая концентрация золота и одновременно благоприятные условия для фильтрации, что способствует максимальному контакту реагентов с минералами и контролю над процессом выщелачивания.

Одним из ключевых условий успешной реализации технологии является тщательный учет гидрогеологических особенностей месторождения. Необходима разработка комплексных систем гидроизоляции и контроля движения подземных вод с целью

предотвращения неконтролируемого распространения растворов и минимизации экологических рисков, связанных с загрязнением водоносных горизонтов и близлежащих поверхностных водных объектов.

Для практического внедрения ПСВ на Ашиктасе рекомендуется проведение полевых пилотных испытаний, которые позволят подтвердить прогнозные оценки, оптимизировать технологические параметры и выявить возможные технические и экологические ограничения. В дальнейшем целесообразно осуществлять гидрогеохимический мониторинг, проводить комплексные исследования по подбору и оптимизации выщелачивающих реагентов с учетом специфики месторождения, а также разрабатывать и внедрять системы экологической безопасности.

В целом, применение скважинного выщелачивания на месторождении Ашиктас обладает высоким потенциалом для повышения экономической эффективности добычи золота при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду. Такой подход отвечает современным требованиям устойчивого развития горнодобывающей отрасли и способствует внедрению инновационных и экологически ответственных технологий в отечественную практику.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в данном исследовании, получены авторами в ходе полевых и камеральных исследований на месторождении Ашиктас, а также из открытых источников.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ЕГЯ, ДКБ; управление данными - ДКБ; формальный анализ - ДКБ; методология - ДКБ; программное обеспечение - ДКБ; отслеживание - ЕГЯ; Визуализация - ДКБ; написание исходного проекта - ДКБ; написание и редактирование обзора - ДКБ, ЕГЯ.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю благодарность редактору и анонимным рецензентам за их содержательные замечания и ценные предложения, которые существенно повысили качество данной рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено без привлечения внешних источников финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черненко З.И., Матайбаева И.Е. Промышленные типы месторождений полезных ископаемых: Учеб. пособие (курс лекций). – Алматы: Бастау, 2019
2. Авдонин В.В., Мосейкин В.В., Мельников М.Е. Геология и разведка месторождений полезных ископаемых. – Москва: Академия, 2011
3. Аношин Г.Н. Химический анализ в геологии и геохимии. – Новосибирск: GEO, 2016.
4. Стримжа Т.П. Прикладная геохимия. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2015.
5. Старостин В.И., Игнатов П.А. Геология полезных ископаемых: Учебник для высшей школы. Москва: Академия, 2017.
6. Фазлуллин М.И., Шаталов В.В., Авдонин Г.И., Смирнова Р.Н., Ступин В.И. Подземное выщелачивание урана, золота и других металлов. Москва: Руда и металлы, 2005.
7. Низамутдинова Н. Р., Кутлиахметов А. Н., Шайдулина Г. Ф., Сафарова В. И., Докукин Ю. В. Оценка воздействия технологии подземного выщелачивания золота на окружающую среду. Москва: Вода: химия и экология, 2014.
8. Заболоцкий А. И., Харькевич К. А., Видусов Т. Э. Опытные испытания способа ПВ для добычи золота из руд коры выветривания золоторудного месторождения Гагарского. Москва: ГИАБ, 1999.
9. Cooke D. R., Simmons S.F. Characteristics and Genesis of Epithermal Gold Deposits. Littleton, USA.: Society of Economic Geologists, 2000.
10. Mériaud, N., Masurel, Q., Thébaud, N., Tourigny, G. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d’Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Mineralium Deposita, 2022.
11. Doe A., Lee B. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d’Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Springer, 2022.
12. Zhang X., Wang Y. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling for the Xiadian Orogenic Gold Deposit, China. Basel, Switzerland: Minerals, 2019.

13. Liu M., Chen Q. 3D Mineral Prospectivity Modeling for the Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit: A Case Study of the Axi Gold Deposit. Basel, Switzerland: Minerals, 2021.
14. Reid D., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing.
15. GOST 25100-2020 Grunty. Klassifikatsiya. Moscow: Rosstandart, 2009.
16. Beniaowski Z.T. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley & Sons, 1989.
17. Korchak S.A. Otsenka sostoyaniya massiva gornykh porod dlya vydeleniya potentsial'no opasnykh uchastkov proektiruемого kar'era. Yekaterinburg: Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2022.

REFERENCES

1. Chernenko Z.I., Matajbaeva I.E. Promyshlennyye tipy mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh: Ucheb. posobie (kurs lektsij). – Almaty: Bastau, 2019
2. Avdonin V.V., Mosejkin V.V., Mel'nikov M.E. Geologiya i razvedka mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh. – Moskva: Akademiya, 2011
3. Anoshin G.N. Himicheskij analiz v geologii i geohimii. – Novosibirsk: GEO, 2016.
4. Strimzha T.P. Prikladnaya geohimiya. Krasnoyarsk: Sibirskij federal'nyj universitet, 2015.
5. Starostin V.I., Ignatov P.A. Geologiya poleznykh iskopaemykh: Uchebnik dlya vysshej shkoly. Moskva: Akademiya, 2017.
6. Fazlullin M.I., SHatalov V.V., Avdonin G.I., Smirnova R.N., Stupin V.I. Podzemnoe vyshchelachivanie urana, zolota i drugih metallov. Moskva: Ruda i metally, 2005.
7. Nizamutdinova N. R., Kutliahmetov A. N., SHajdulina G. F., Safarova V. I., Dokukin YU. V. Ocenka vozdejstviya tekhnologii podzemnogo vyshchelachivaniya zolota na okruzhayushchuyu sredu. Moskva: Voda: himiya i ekologiya, 2014.
8. Zabolockij A. I., Har'kevich K. A., Vidusov T. E. Opytnye ispytaniya sposoba PV dlya dobychi zolota iz rud kory vyvetrivaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Gagarskogo. Moskva: GIAB, 1999.
9. Cooke D. R., Simmons S.F. Characteristics and Genesis of Epithermal Gold Deposits. Littleton, USA: Society of Economic Geologists, 2000.
10. Mériaud, N., Masurel, Q., Thébaud, N., Tourigny, G. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d'Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Mineralium Deposita, 2022.
11. Doe A., Lee B. Fluid pressure–dominated orogenic gold mineralization under low differential stress: case of the Yaouré gold camp, Côte d'Ivoire, West Africa. Basel, Switzerland: Springer, 2022.
12. Zhang X., Wang Y. Three-Dimensional Mineral Prospectivity Modeling for the Xiadian Orogenic Gold Deposit, China. Basel, Switzerland: Minerals, 2019.
13. Liu M., Chen Q. 3D Mineral Prospectivity Modeling for the Low-Sulfidation Epithermal Gold Deposit: A Case Study of the Axi Gold Deposit. Basel, Switzerland: Minerals, 2021.
14. Reid D., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing.
15. GOST 25100-2020 Grunty. Klassifikatsiya. Moscow: Rosstandart, 2009.
16. Beniaowski Z.T. Engineering rock mass classification. New York: John Wiley & Sons, 1989.
17. Korchak S.A. Otsenka sostoyaniya massiva gornykh porod dlya vydeleniya potentsial'no opasnykh uchastkov proektiruемого kar'era. Yekaterinburg: Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta, 2022.

АЛТЫНДЫ СҚВАЖИНАЛЫҚ ШАЙМАЛАУ ӘДІСІН ҚОЛДАНУДЫҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ-ГЕОМЕХАНИКАЛЫҚ НЕГІЗДЕМЕЛЕРІ

Дияр К. Бармаков^{1*}, Егор Г. Язиков² Геология-минералогия ғылымдарының докторы

Автор(лар)дың негізгі жұмыс орны, мекен-жайы; e-mail (А.Ә.Т.)

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан, diyar.barmakov@gmail.com (ДКБ)

²Томск политехникалық университеті, Томск қ., Ресей, yazikov@tpu.ru (ЕГЯ)

*Автор корреспондент: Дияр К. Бармаков diyar.barmakov@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

ұңғымалық шаймалау, алтын, жарықшақтылық, өткізгіштік, литология, құрылымдық элементтер, геомеханика, гидрогеология, 3D модельдеу

Мақала жайында:

Алынды: 23.10.2025

Қайта қаралды: 10.02.2026

Қабылданды: 26.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Бұл зерттеудің мақсаты – Ашықтас алтын кен орнында ұңғымалық шаймалау (ин-ситу) технологиясын қолдану мүмкіндігін айқындайтын геологиялық, геомеханикалық және гидрогеологиялық жағдайларды кешенді бағалау. Бұрғылау деректері, өзек сипаттамалары, жыныс сапасының индексі (RQD) және алтын, күміс және мыс таралуының геостатистикалық талдауы негізінде үш өлшемді геологиялық және құрылымдық модельдер жасалды. Литология, жарықшақтылық және әсіресе Ашықтас жарылысы сияқты тектоникалық құрылымдардың өткізгіштігі жоғары аймақтар мен металдар шоғырлануын қалыптастырудағы рөліне ерекше назар аударылды. Алтынның негізінен жарықшақты туфтарда және сілтілік ерітінділердің айналымына қолайлы құрылымдық бұзылыстарда жинақталатыны анықталды, ал интрузивті жыныстар табиғи тосқауылдар қызметін атқарады. Ерітінді фильтрациясына және экологиялық қауіп-қатерлерге әсер ететін геомеханикалық және гидрогеологиялық факторлар да талданды. Зерттеудің практикалық маңыздылығы – ұқсас геологиялық және құрылымдық жағдайлардағы кен орындарында алтын өндірудің тиімді әрі экологиялық қауіпсіз әдісі ретінде ұңғымалық шаймалауды қолдану мүмкіндігін негіздеуінде.

GEOLOGICAL AND GEOMECHANICAL CONDITIONS FOR IMPLEMENTING IN-SITU LEACHING TECHNOLOGY FOR GOLD EXTRACTION

Diyar K. Barmakov^{1*}, Egor G. Yazikov² doctor of geological and mineralogical sciences

¹D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, diyar.barmakov@gmail.com (ДКБ)

²Tomsk Politechnic University, Tomsk, Russia, yazikoveg@tpu.ru (ЕГЯ)

*Author correspondent: Diyar K. Barmakov diyar.barmakov@gmail.com

KEY WORDS

in-situ leaching, gold, fracturing, permeability, lithology, structural features, geomechanics, hydrogeology, 3D modeling

About article:

Received: 23.10.2025

Revised: 10.02.2026

Accepted: 26.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

The aim of this study is to conduct a comprehensive assessment of geological, geomechanical, and hydrogeological conditions determining the feasibility of applying in-situ gold leaching (ISL) technology at the Ashiktas gold deposit. Three-dimensional geological and structural models were developed based on drilling data, core logging, rock quality designation (RQD) indices, and geostatistical analysis of gold, silver and copper distribution. Special attention was given to the role of lithology, fracturing, and tectonic structures, particularly the Ashiktas fault, in forming zones of high permeability and metal concentration. It was established that gold is mainly associated with fractured tuffs and fault zones that facilitate the circulation of leaching solutions, while intrusive rocks act as natural barriers. Geomechanical and hydrogeological factors affecting solution filtration and environmental risks were also analyzed. The practical significance of this work lies in justifying the use of in-situ leaching as an economically viable and environmentally safe method for gold extraction at deposits with similar geological and structural conditions.

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



Ғылыми мақала

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАН ӨңІРІНДЕГІ ТАБИҒИ-КЛИМАТТЫҚ ЖАҒДАЙЛАРДЫҢ ХАЛЫҚТЫҢ ҚОНЫСТАНУЫНА ЫҚПАЛЫ

Шынар К. Шыңғысбаева¹, Алим Т. Мылкайдаров² г.ғ.к., аға оқытушы, Гулнар О. Орынбасарова² PhD, аға оқытушы, Акерке М. Нурпейсова³, Светлана Ж. Ерекеева⁴ PhD, аға оқытушы, Лаура М. Рыскулбекова⁵ PhD, қауымдастырылған профессор, Айгерим Б. Сансызбаева^{1*} PhD, доцент м.а.

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан; shyngysbaeva75@mail.ru (ШШК), sansyzybayeva.ab@mail.ru (САБ)

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; mylkaydarov@mail.ru (МАТ), gulnar.86_27@mail.ru (ОГО)

³“Шәкәрім университет” КеАҚ, Семей, Қазақстан; erkenurpejsova@gmail.com (НАМ)

⁴Өзбекәлі Жәнібеков атындағы Оңтүстік Қазақстан педагогикалық университеті, Шымкент, Қазақстан; svetlana.yerekeyeva@gmail.com (ЕСЖ)

⁵Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; ryskulbekova.laura@kaznaru.edu.kz (РЛМ)

* Автор корреспондент: Айгерим Б. Сансызбаева, sansyzybayeva.ab@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

ресурс,
климат,
фактор,
ауа ылғалдылығы,
температура,
көші-қон

АБСТРАКТ

Мақала халықтың демографиялық жағдайын жақсартуға бағытталған тиімді мемлекеттік әлеуметтік саясаттың маңызды алғышарттарының бірі ретінде қоныстану жүйесіне әсер ететін табиғи-климаттық факторларды қарастырады. Зерттеу Шығыс Қазақстан өңірі (сондай-ақ Абай облысы) аумағындағы табиғи және климаттық жағдайлардың халықтың қоныстануына ықпалын бағалауға бағытталған.

Өңірлердегі қоныстандыру жүйелерін талдау барысында қоныстану түрлерінің көптілігі климаттық тұрғыдан қолайлы аумақтарда айқынырақ байқалатыны анықталды. Табиғи факторлардың ықпал ету дәрежесін бағалау үшін суық және ыстық режимі, ылғалдылық және қолайсыз табиғи құбылыстар сияқты климаттық көрсеткіштер негізге алынды. Мақалада соңғы деректер базасы негізінде өңірдегі климат өзгерісінің ықпалына шолу жасалып, климаттық жайлылықты сипаттайтын көрсеткіштер ұсынылды. Шығыс Қазақстан облысының аудандары бойынша жылдың суық кезеңіндегі климаттық қолайлылық дәрежесі ең суық ай ретінде қаңтардың метеорологиялық деректері арқылы бағаланды.

Сонымен қатар Meteoblue (1979-2024жж.) деректері негізінде Абай облысы мен ШҚО аумағында ауа температурасы мен жауын-шашын мөлшерінің көпжылдық өзгеріс динамикасы көрсетілді. Алынған көрсеткіштерді интеграциялау арқылы климаттық жағдайлардың қоныстандыру жүйесінің дамуына ықпалын анықтау мақсатында нәтижелер 4 балдық бағалау шкаласына келтірілді. Осы негізде климаттық қолайлылық дәрежесі бойынша аумақты аудандастыру жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде орташа жылдық ауа температурасының картасы және халықты қоныстандыруға арналған климаттық жағдайлардың қолайлылық дәрежесінің ГАЗ технологиялары көмегімен жасалған тақырыптық карталары құрастырылды.

1. КІРІСПЕ

Жаһандық климаттың өзгеруі өткен ғасырлардан бастау алып, түрлі теориялар, гипотезалар, зерттеу әдістері ұсынылды, әлі де ұсынылып жатыр [1]. Ең маңызды физикалық-географиялық факторлардың бірі - табиғи-климаттық жағдайлар. Себебі олар адам ағзасы үшін жайлылық сезімін айқындап, адам өмірінің энергетикалық негізі болып табылатын дене температурасының тұрақтылығымен байланысты көрініс береді [2]. Алайда қоныстану кеңістігі тек климатпен ғана анықталмайды: тарихи-экономикалық даму, көлік қолжетімділігі, өндірістік мамандану, инфрақұрылым мен әлеуметтік қызметтердің шоғырлануы да қоныстанудың қалыптасуына әсер етеді. Осы зерттеуде климаттық жағдайлар халықтың қоныстануын жалғыз негізгі детерминант ретінде емес,

керісінше елді мекендер желісінің қалыптасуын шектейтін және түрлендіретін фондық табиғи алғышарт ретінде қарастырылады.

Шығыс Қазақстанның климаттық ресурстары, аумақтың ауқымы, жер бедері мен беткі қабатының физикалық-географиялық әртүрлілігі және атмосфера циркуляциясының ерекшеліктері нәтижесінде климаттың айқын аумақтық кереғарлығын қалыптастырады. Мұндай аумақтық кереғарлық, әдетте, қоныстанудың біркелкі таралмауына алып келетін табиғи шектеулерді күшейтеді: климаттық тұрғыдан қолайлы аумақтарда елді мекендердің жиілігі мен қоныстану түрлерінің әртараптануы жоғарырақ болуы ықтимал, ал қолайсыз аумақтарда елді мекендер желісі сирей түседі. Сондықтан климаттық нәтижелерді талдап түсіндіру кезінде оларды қоныстанудың нақты көрсеткіштерімен, ең алдымен елді мекендер саны және олардың аумақ бойынша таралуымен байланыстыра талдау қажет.

Климатты Шығыс Қазақстан халқының тіршілік әрекетін қалыптастыратын жалпы энергетикалық негіз ретінде қарастырамыз. Осы тұрғыдан алғанда, климат аумақты саралауда жетекші факторларының бірі болып табылады және тіршілік әрекеті үдерістеріне ықпалы бойынша маңызды орын алады. Қолайлы гидроклиматтық жағдайлар қоршаған ортаның оңтайлы сапасын қамтамасыз етіп, елді мекендердің тұрақты өмір сүруіне кедергі келтірмейді, ал қолайсыз жағдайлар (суық пен ыстық стресс, ылғал тапшылығы, катал жел режимі, қуаңшылық) қоныстанудың кеңістіктік мүмкіндіктерін тарылтып, елді мекендердің сиректеу орналасуына ықпал етуі мүмкін. Демек, өмірдегі қоныстандыру жүйелерінің құрылымын түсіндіруде климаттық қолайлылық дәрежесін елді мекендер санының аумақтық айырмашылықтарымен салыстыра қарастыру логикалық тұрғыдан негізді.

Сондықтан, Шығыс Қазақстан өңірлеріндегі қоныстандыру жүйелерін талдау барысында қоныстану түрлерінің неғұрлым жоғары әртүрлілігі климаттық тұрғыдан қолайлы аумақтарда шоғырланатыны анықталды.

Метеорологиялық жағдайлардың өзгерісі адам ағзасының бейімделу механизмдеріне қалай әсер ететінін зерттеу өмір сүру ортасы нашарлаған жағдайда халық денсаулығын қорғау және өмір қауіпсіздігін қамтамасыз ету жөніндегі жаһандық міндеттерді ғылыми тұрғыда негіздеуге мүмкіндік береді [3]. Биоклиматтық ресурстар адамға бағдарланған ұғым ретінде климаттың адамның жылулық күйімен, денсаулық жағдайымен, рекреациялық мүмкіндіктерімен және санитарлық-гигиеналық ерекшеліктерімен өзара байланысын сипаттайды. Осыған байланысты климаттық жағдайларды бағалау үшін кешенді метеорологиялық көрсеткіштер қолданылады: температура - ауа ылғалдылығы, температура - жел жылдамдығы, температура - атмосфералық қысым, ауа ылғалдылығы - атмосфералық қысым. Аталған индикаторлар климаттық жайлылық аймағын сипаттап қана қоймай, елді мекендер желісінің қалыптасуына ықпал ететін табиғи «шектерді» белгілеуге мүмкіндік береді.

Шығыс Қазақстан өңірінің климаты шұғыл континенттік сипатқа ие және жер бедерінің морфологиясына байланысты едәуір сараланады: абсолюттік биіктік, беткей экспозициясы, жоталардың бағыты, тауаралық аңғарлардың болуы және өзге де жергілікті факторлар климаттық жағдайлардың аймақтық айырмашылықтарын қалыптастырады. Континенттілік жылдың ішінде де, тәулік ішінде де ауа температурасының едәуір ауытқуларымен, температуралық контрастылықпен және күрделі рельеф жағдайында маусымаралық өтпелердің ерекшеліктерімен көрініс табады.

Мұндай табиғи әркелкілік қоныстану құрылымымен де ұштасуы ықтимал: салыстырмалы жұмсақ микроклиматты тауаралық аңғарлар мен су көздеріне жақын аумақтарда елді мекендердің шоғырлануы жоғарырақ болуы мүмкін, ал катал климатты және қуаң аудандарда елді мекендердің сиректеуі байқалуы ықтимал [4].

Сонымен қатар Шығыс Қазақстан климатының экстремалдылығы да байқалады. Бұл, ең алдымен өңірдің аридті аймақтармен шектесетін географиялық орналасуымен және табиғи ылғалдану режимінің тұрақсыздығымен түсіндіріледі. Әсіресе Абай

Мақала жайында:

Жіберілді: 21.11.2025
Қайта қаралды: 10.03.2026
Қабылданды: 13.03.2026
Жарияланды: 01.04.2026

Дәйексөз үшін:

Шыңғысбаева Ш.,
Мылқайдаров А.,
Орынбасарова Г.,
Нурпейсова А., Ерекеева
С., Рысқұлбекова Л.,
Сансызбаева А. Шығыс
Қазақстан өңіріндегі
табиғи-климаттық
жағдайлардың халықтың
қоныстануына ықпалы //
Гидрометеорология и
экология, 121 (1), 2026,
71-85.

облысының құрғақ дала және шөлейт белдеулерінде қуаңшылықтың жиілеуі мен су тапшылығы айқын көрініс табады. Мұндай климаттық қысым шаруашылық игерілу мүмкіндігін төмендетіп, жанама түрде елді мекендердің сақталуына және дамуына, қоныстану торының тұрақтылығына және көші-қон шешімдеріне әсер етуі мүмкін. Климаттың жылынуы жағдайында құрғақшылықтың күшеюі топырақтың ылғал режимін нашарлатып, ауыл шаруашылығы өнімділігін төмендетеді; бұл әлеуметтік-экономикалық тәуекелдерді арттырып, демографиялық үдерістермен қатар елді мекендер жүйесінің кеңістіктік трансформациясына да ықпал ететін факторлардың біріне айналады. Осы тұрғыда халықаралық бағалауларда экстремалды ауа райы құбылыстарының жиілеуі мәжбүрлі қоныс аудару тәуекелдерінің артуымен байланыстырылатыны атап көрсетіледі [5]

Зерттеудің мақсаты - Шығыс Қазақстан (және Абай облысы) аумағында климаттық қолайлылық пен жайсыздық көрсеткіштерін кеңістіктік тұрғыда бағалап, оларды елді мекендер санының аумақ бойынша таралуымен салыстыру арқылы табиғи-климаттық жағдайлардың қоныстану жүйесіне фондық (шектеуші немесе түрлендіруші) ықпалын талдау.

Зерттеудің міндеттері:

климаттық және биоклиматтық көрсеткіштер негізінде аумақтың қолайлылық дәрежесін бағалау;

алынған қолайлылық деңгейлері бойынша аумақты саралау (аудандастыру);

қолайлылық деңгейлері әртүрлі аймақтардағы елді мекендер санын салыстырып, кеңістіктік сәйкестік пен айырмашылықтарды анықтау;

анықталған байланыстарды қоныстануды жоспарлау және тәуекелдерді басқару тұрғысынан түсіндіру.

Зерттеу нысаны: Шығыс Қазақстан және Абай облыстарының аумағы.

Зерттеу пәні: климаттық қолайлылық көрсеткіштері мен елді мекендер жүйесінің кеңістіктік параметрлері (ең алдымен елді мекендер саны).

Ғылыми жаңалығы: климаттық қолайлылықты бағалау нәтижелерін қоныстанудың нақты индикаторымен - елді мекендер санының аумақтық таралуымен жүйелі салыстыру арқылы өңірдегі қоныстану жүйесінің табиғи шектерін айқындау.

Практикалық маңызы: өңірлік жоспарлау, инфрақұрылымдық дамуды негіздеу, климаттық тәуекелдерге бейімделу шараларын және қоныстану саясатын (ауылдық аумақтардың орнықтылығы, қызмет көрсету желісі) дәлелдеуде қолданылуы мүмкін.

Осы зерттеуде климаттық қолайлылық пен жайсыздық көрсеткіштері кеңістіктік тұрғыда бағаланып, олардың аудандар бойынша елді мекендер санының таралуымен салыстырылуы арқылы климаттың қоныстану жүйесіне фондық (түрлендіруші) ықпалы талданады.

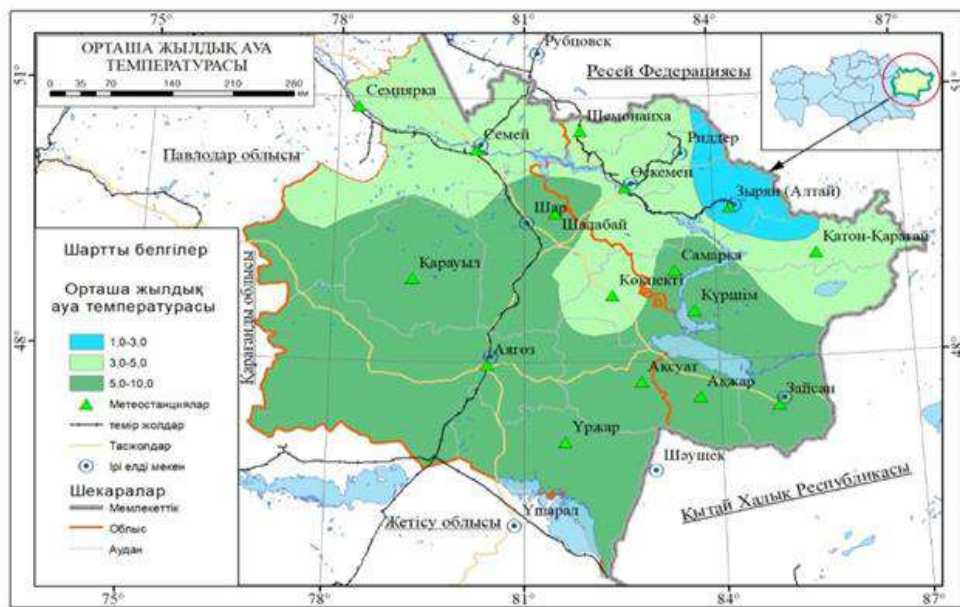
2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Осылайша, климаттық жағдайларды экономикаға дейінгі (предэкономикалық) факторлар қатарына жатқызуға болады. Олар экономикалық факторлардан айырмашылығы күн сайын үздіксіз әсер ететін, салыстырмалы түрде тұрақты және елеулі ықпалға ие табиғи алғышарттар болып табылады. Климаттық жағдайлар адамның өмір сүру ортасын және тіршілік ету мүмкіндіктерін айқындап қана қоймай, халықтың өмір сүруінің өзге қырларына да әсер етеді, нәтижесінде қоныстану үдерістерін өзгертіп ұзақ мерзімде демографиялық динамикаға ықпал етуі мүмкін.

Зерттеудің ақпараттық базасына өңірдің метеорологиялық көрсеткіштері және қоныстануды сипаттайтын деректер енгізілді. Қоныстанудың негізгі индикаторы ретінде аудандар бойынша елді мекендер саны алынды. Климаттық деректер ауа температурасының орташа жылдық және орташа айлық мәндерін қамтиды, олар өңірдің жылулық режимін сипаттап, климаттық қолайлылықты бағалау үшін бастапқы негіз ретінде пайдаланылды [6].

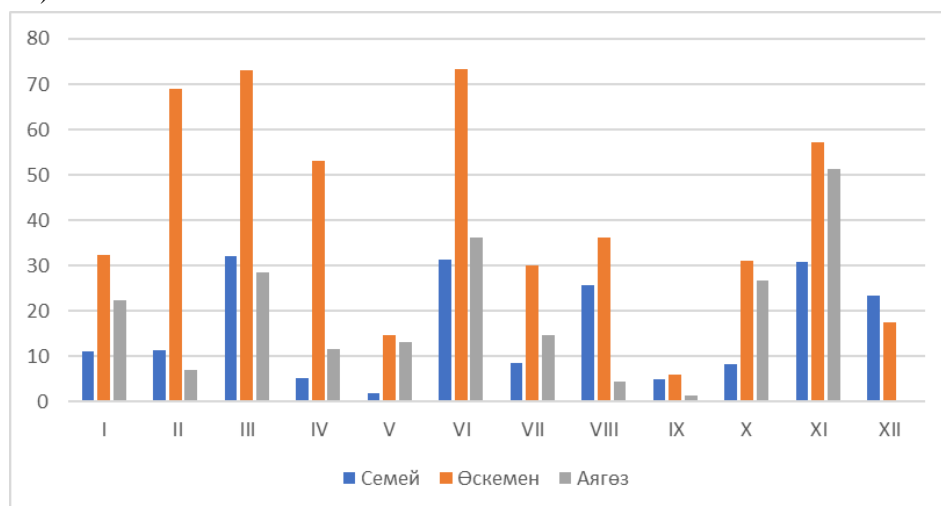
Әдістемелік тұрғыдан климаттық жағдайлардың аумақтық айырмашылықтары бағаланып, кейін олар елді мекендер санының таралуымен салыстырылды. Кеңістіктік талдау және картографиялық бейнелеу ГАЗ технологиялары арқылы орындалды

Шығыс Қазақстан аумағында ауа температурасы бойынша орташа жылдық көрсеткіш 5°C құрайды. Орташа айлық ауа температурасы ең жоғары шілдеде, ал қаңтарда ең төмен мәнге жетеді. Шілде айындағы орташа ауа температурасы 16,4–22,3°C, қаңтарда – минус 10,4 – минус 18,3°C. Қыста өңірдегі ең суық – Алтай ауданындағы Алтай МС (сурет 1) [7].



Сурет 1. Орташа жылдық ауа температурасы

Жылдық деректер бойынша Шығыс Қазақстанда жылына орта есеппен 320 мм жауын-шашын түседі. Жауын-шашынның ең көп мөлшері жылы мезгілде түседі, атап айтқанда маусым айында Өскемен МС айына 73 мм-ден астам жауады. Жауын-шашынның минимумы қыркүйек айында болады, Аягөзде 1,4 мм-ден аз жауды (сурет 2).



Сурет 2. Жауын-шашынның айлық мөлшерінің жыл ішіндегі өзгерісі

Облыс аумағындағы желдің орташа айлық жылдамдығы жазда және қыста әлсірейді, ал өтпелі кезендерде күшейеді.

Ең күшті жел Өскеменде - жылына орта есеппен 2,3 м/с байқалады. Семей МС және Аягөз МС ауданында желдің ең жоғары жылдамдығы жылына 2,1 м/с (ақпан, сәуір, желтоқсан) және 3,8 м/с (ақпан), ең азы 2,4 м/с (шілде, тамыз) және 2,1 м/с (наурыз) тіркелді [5].

Климаттық жағдайлардың жайлылық сипаттамалары:

«Өте қолайсыз» – табиғи ортаның қатты тітіркендіргіштікпен сипатталатын климаттық жағдайы. Бұл жағдайда жайлы өмір сүруді қамтамасыз ететін қосымша қорғау шаралары қажет болады.

«Қолайсыз» – бұл табиғи ортаның айтарлықтай тітіркендіргіштікпен сипатталатын климаттық жағдайы. Бұл жағдайда адам ағзасының бейімделу механизмі жайлы психофизиологиялық жағдайды қамтамасыз етпейді.

«Субқолайлы» – табиғи ортаның әлсіз тітіркендіргіш жағдайы. Яғни адам ағзасының бейімделу механизмі жайлы өмір сүруін қамтамасыз ететін негізгі жайлы психофизиологиялық жағдайға жақын болатын жағдай.

«Қолайлы» – бұл адамның тұрақты және уақытша өмір сүру ортасында жайлы өмір сүруін қамтамасыз ететін негізгі жайлы психофизиологиялық жағдайы.

Шығыс Қазақстан аумағының қазіргі климаттық жағдайларын халықтың өмір сүруі үшін қолайлылық пен қауіпсіздік тұрғысынан бағалау биоклиматтық индекстердің көмегімен жүргізіледі [8].

Биоклиматтық индекстердің теңдеулері негізінде келесі параметрлер орындалады:

1. Қозғалмайтын ауаның тиімді температурасы (ТТ).
2. Эквивалентті-тиімді температура (ЭТТ) - желдің әсерін ескеретін, жылу сезімталдығының көрсеткіші.
3. Радиациялық-эквивалентті-тиімді температура (РЭТТ).

Шығыс Қазақстанның аудандарында жылдың суық кезеңінің климаттық жағдайларының қолайлылық дәрежесі жылдың ең суық айы ретінде қаңтардың метеорологиялық деректері бойынша бағаланды. Ол үшін ТТ, РЭТТ және S (2-кесте) қолданылды. Шығыс Қазақстан аудандары қаңтар айында ТТ мәндері бойынша өте суық және суық, ЭТТ мәндері бойынша – дискомфортты, S мәндері бойынша – орташа қатал және аз қатал деп бағаланады.

Тиімді температура (ТТ) – адамға температура және ауа ылғалдылығының әсерін сипаттайтын биоклиматтық индекс. Тиімді температура моделі дененің және терінің физиологиялық факторын, киімнің физикалық ерекшеліктерін, ауа қабатының және қоршаған ортаның метеорологиялық факторларын біріктіреді [7]. Тиімді температураның теріс мәндері үсу, мұздау ықтималдықтарын, ал оң мәндері жылулық соққының болу ықтималдықтарын көрсетеді. ТТ анықтау үшін келесі формула қолданылады [9]:

$$ЭТ = t - 0.4(t - 10)(1 - f/100) \quad (1)$$

Мұндағы:

f - салыстырмалы ылғалдылық, %;

t – ауа температурасы, °C;

Биометеорологияда тиімді температура – адам ағзасының суықты немесе жылуды сезіну деңгейінің сипаттамасы болып табылады. Есептеу нәтижелері 1 кестеде келтірілген.

Кесте 1

Суық және жылы мерзімдер үшін ТТ мәндері (°C)

Станция	Суық мерзім						Жылы мерзім					
	1	2	3	10	11	12	4	5	6	7	8	9
Семей	-4,7	-5,3	-2,7	1,6	-1,9	-5,3	4,2	7,8	7,9	7,6	5,8	5,8
Өскемен	-18,6	-18,8	-8,8	1,8	-3	-7,4	3,9	7,1	6,5	7,3	5,2	6
Аягөз	-19,2	-20,7	-8,6	1,3	-10,6	-26,1	4,3	7	9	9,2	8,1	6,8

Үржар	-18,2	-19,5	-4,6	2,2	-8,1	-25	-1,03	6,5	8,7	9,6	9	7,6
Ақсуат	-24	-25	-8	1,3	-10,7	-30	5,2	8,8	9,45	9,2	8,1	7,6
Көкпекті	-23	-27	-11	0,8	-12	-30	-7,8	7,1	7,7	7,9	7,4	6,8
Қарауыл	-18	-18,3	-8,8	1,2	-5,4	-6,5	3,9	8,3	10,4	8,6	6,6	6,8
Зайсан	-5,8	-3,3	-2,1	3	-2,5	-5,3	6,11	9,9	11,9	11,7	6,7	9,5
Қатон-Қарағай	-6	-8	-3,2	0,2	-4,3	-7,8	-3,6	5,8	5,3	5,1	5,3	5,4
Алтай	-6,4	-7,7	-2,9	-0,3	-2,8	-7	0,8	5,1	3,5	3,6	3,7	3,5

Жылы мерзімде қарастырылған аймақта ТТ бойынша өте қолайсыз жағдай байқалмаған, ал суық мерзім үшін өте қолайсыз жағдайлар қаңтар айында Аягөз, Көкпекті, Қарауыл, Ақсуат, Өскемен станцияларында, ақпанда Көкпекті станциясында тіркелген.

Қолайсыз жағдай барлық станциялар бойынша жылы мерзімде тіркелмеген. Сонымен қатар барлық станцияларда шілде айында салқын субқолайлы жағдайлар байқалған. Суық мезгілде адам ағзасының суықты сезіну деңгейі бойынша жайсыз жағдайлары қаңтар, ақпан айларында Ақсуат, Көкпекті станцияларында тіркелген. Желтоқсан айында Ақсуат, Аягөз, Үржар, Көкпекті станцияларында қолайсыз климаттық жағдай анықталған.

Субқолайлы жағдайы Аягөз, Үржар, Қарауыл, Зайсан станцияларында, ал суық қолайсыз жағдай Қатон-Қарағай, Алтай, Семей станцияларында қыркүйекте байқалған. Барлық станциялар үшін мамыр айы салқын субқолайлы деп табылған. Қараша айында Зайсан, Қатон-Қарағай, Алтай станциясынан басқа барлық станцияларда суық болған.

Шығыс Қазақстан территориясы бойынша қазан айында барлық станцияларда суық қолайсыз жағдай тіркелген.

2. Эквивалентті-тиімді температура (ЭТТ) – жылу сезімталдықтың кешенді көрсеткіші болып табылады. Аталған көрсеткішке 3 метеошама әсер етеді: ауа температурасы, жел жылдамдығы, ауаның салыстырмалы ылғалдылығы [6-9]. Желсіз жағдайда ауа ылғалдылығы 100% болғанда адамның жылулық сезімталдығы тек ауа температурасына тәуелді болады. Температура өзгермегенде ауа ылғалдылығы төмендеп жел жылдамдығы артса, адамға температура төмендегендей сезіледі. Ал ауа ылғалдылығы артып жел жылдамдығы төмендесе, керісінше температура өскендей сезіледі. Аталған жағдайларға байланысты, адам құрғақ климат жағдайында жоғары температураны жеңіл қабылдайды. ЭТТ келесі формуламен есептеледі [8-10]:

$$ЭТТ = 37 - \frac{37-t}{0.68-0.0014f+\frac{1}{1.76+1.4v^{0.75}}} - 0.29t(1 - \frac{f}{100}) \quad (2)$$

мұндағы

t – ауа температурасы, °C;

f – салыстырмалы ылғалдылық, %;

v – жел жылдамдығы

Эквивалентті-тиімді температура (ЭТТ) – биоклиматтық көрсеткіш ретінде жылдың жылы да, суық та кезеңдері үшін қолданылады.

Жылы мерзім үшін ЭТТ күрделі физикалық жұмыс жасамаған, қалыпты киінген адамның жылуға сезімталдығы бойынша өте дискомфортты жағдай барлық станцияларда сәуірде тіркелген. Суық мерзім үшін ЭТТ бойынша өте жайсыз климат жағдайы қаңтар, ақпан айларында Көкпекті мен Үржардан басқа станцияларда, ал желтоқсан айында Ақжар, Семейка, Қатон-Қарағай станцияларында бақыланған.

Суық субкомфорт жағдай Қатон-Қарағай станциясында мамырда, Самарка, Семейка, Шемонайха станцияларында қыркүйек айлары байқалған. Ал суық мерзімде қазан айы барлық станциялар үшін комфортты болады.

3. Радиациялық эквивалентті-эффektivті температура (РЭЭТ) – ауа температурасы, ауа ылғалдылығы, жел жылдамдығы, күн радиациясымен энергетикалық жарықтануы факторларының кешенді әсерінен адамның жылулық сезімталдығын сипаттайтын көрсеткіш. РЭЭТ келесі формуламен анықталады:

$$РЭЭТ = 0,83 \text{ ЭЭТ} + 12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

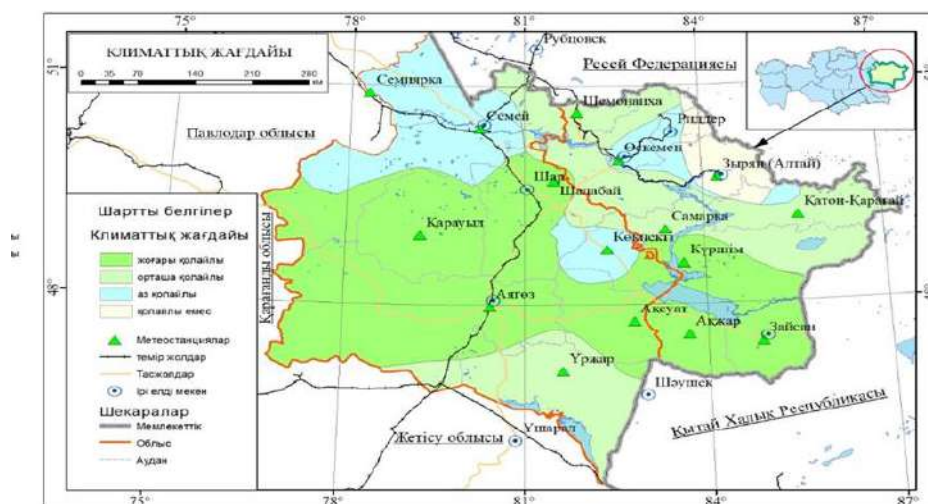
Есептеу нәтижелері 2-ші кестеде келтірілген.

Кесте 2					
<i>Орташа көпжылдық деректер бойынша есептелген биоклиматтық индекстердің мәндері</i>					
МС	Шілде				
	ТТ, °С		РЭТТ, °С		ЭТТ, °С
Семей	17,4	Орташа жылы	25	жылы комфорт	10,3
Өскемен	19,0	жылы	24,3	жылы комфорт	15,7
Аягөз	18,1	Орташа жылы	24,6	жылы комфорт	14,9
Көкпекті	16,8	Орташа жылы	25,6	жылы комфорт	15,3
Ақжар	16,2	Орташа жылы	24,3	жылы комфорт	16,5
Ақсуат	17,8	Орташа жылы	26,1	жылы комфорт	14,9
Үржар	18,5	жылы	28,2	жылы субкомфорт	17,1
Алтай	19,3	жылы	24,6	жылы комфорт	19,6
Қатон-Қарағай	18,4	жылы	19,3	Суық субкомфорт	15,3
Зайсан	19,5	жылы	25,2	Жылы комфорт	8,8
Қарауыл	18,9	жылы	26,5	Жылы комфорт	16
Күршім	19,3	жылы	25,6	Жылы комфорт	16,3
Самарка	7,9	Салқын субкомфорт	24,2	Жылы комфорт	16,4
Семиарка	8,9	Салқын субкомфорт	25,1	Жылы комфорт	14,7
Шалабай	8,5	Салқын субкомфорт	25,2	Жылы комфорт	15,9
Шемонайха	6,5	Салқын субкомфорт	24,4	Жылы комфорт	16
МС	Қаңтар				
	ТТ, °С		РЭТТ, °С		ЭТТ, °С
Семей	-12,0	Өте суық	2	Орташа қатал	-19,9
Өскемен	-11,1	суық	2,3	Орташа қатал	-21,1
Аягөз	-13,1	Өте суық	2,1	Орташа қатал	-20,7
Көкпекті	-12,8	Өте суық	1,8	Аз қатал	-16,9
Ақжар	-13,2	Өте суық	2,2	Орташа қатал	-22,3
Ақсуат	-12,9	Өте суық	1,9	Аз қатал	-18,6
Үржар	-13,2	Өте суық	1,4	Аз қатал	-8,2
Алтай	-13,1	Өте суық	1,8	Аз қатал	-17
Қатон-Қарағай	-11,1	суық	2,6	Орташа қатал	-23
Зайсан	-12,2	Өте суық	1,9	Аз қатал	-19
Қарауыл	-12,2	Өте суық	1,7	Аз қатал	-15,1
Күршім	-11,4	суық	2	Орташа қатал	-19,9
Самарка	-4,4	суық	2,1	Орташа қатал	-21
Семиарка	-5,9	суық	2,5	Орташа қатал	-26,3
Шалабай	-5,8	суық	2,3	Орташа қатал	-21,9
Шемонайха	-4,1	суық	2,1	Орташа қатал	-19,9

Осылайша, биоклиматтық индекстердің мәндері бойынша адамның өмір сүруі үшін Шығыс Қазақстанның аудандары жазда орташа жылы, ал қыста – өте суық деп сипатталатынын айтуға болады.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Алынған көрсеткіштердің параметрлері интеграцияланып, халықты қоныстандыру жүйесінің дамуына ықпал етуі мүмкін климаттық жағдайлардың қолайлылық нәтижесін алу үшін төрт балдық бағалау жүйесіне ауыстырылды. Бұл тәсіл зерттелетін аймақтың адам өмірі үшін климаттық қолайлылық деңгейін немесе салыстырмалы экстремалдық дәрежесін сипаттамалық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді. Осыған байланысты алынған нәтижелер негізінде климаттық жағдайлар қолайлылық дәрежесі бойынша аудандастыру жүргізілді (сурет 3).

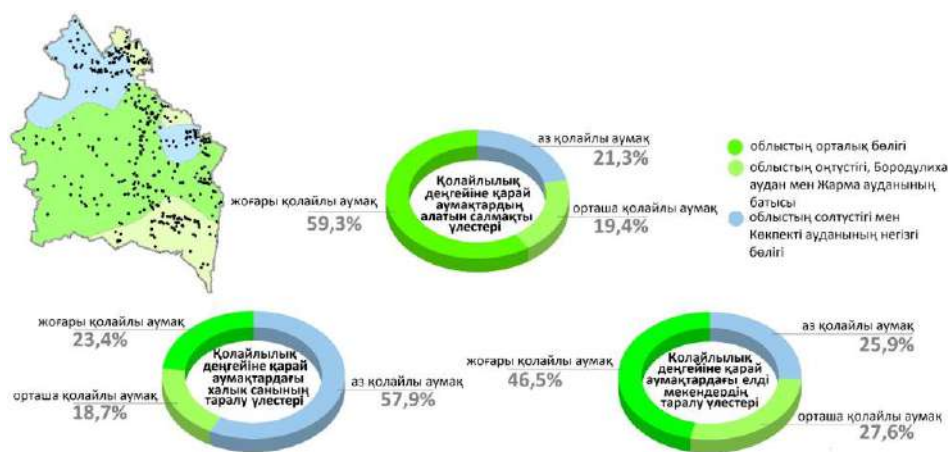


Сурет 3. Шығыс Қазақстанда халықтың қоныстануына климаттық жағдайлардың қолайлылық дәрежесі

Талдау нәтижелері бойынша Шығыс Қазақстан аумағында қолайлылығы жоғары климаттық жағдайлар шамамен жартысына жуық бөлігін қамтиды. Жылдың жылы кезеңіндегі бұл аумақта ауа температурасы орта есеппен $5,1^{\circ}\text{C}$ құрайды. Жылдың жылы кезеңіндегі орташа температура $15,1^{\circ}\text{C}$, қаңтарда -14°C , шілдеде $20,2^{\circ}\text{C}$. Жауын-шашын мөлшері орташа есеппен 235 мм-ден 413 мм-ге дейін, ал жел жылдамдығы $3,4$ м/с шамасында байқалады. Қолайлылығы төмен аумақтар үшін биоклиматтық сипаттамалар бойынша қозғалмайтын ауаның тиімді температурасы көрсеткіштеріне сәйкес қыс өте суық, ал жаз жылы болуы мүмкін. Радиациялық эквивалентті тиімді температура көрсеткіші бойынша аудан қолайлы деп сипатталады. Қатаңдық индексі бойынша аудан қатал немесе өте қатал деңгейге жатады. Қолайлылық дәрежесі төмен аумақтарға Бесқарағай ауданы, Семей және Өскемен қалалары кіреді. Қолайсыз климаттық жағдайлары бар аумақтарды Риддер қаласы, Алтай ауданы құрайды. Бұл аумақта ауаның орташа жылдық температурасы 1°C шамасында.

Жылдың жылы кезеңіндегі орташа температура 14°C , қаңтарда $-13,9^{\circ}\text{C}$, шілдеде $18,7^{\circ}\text{C}$. Жауын-шашын мөлшері орташа есеппен 620 мм-ге жуық, ал жел жылдамдығы $3,4$ м/с шамасында. Биоклиматтық сипаттамаларға сәйкес қозғалмайтын ауаның тиімді температурасы бойынша қыс өте суық, ал жаз орташа жылы. Радиациялық эквивалентті тиімді температура бойынша аудан субкомфортты сипатта болуы мүмкін. Қатаңдық индексі бойынша аудан қатал деңгейге жатады (сурет 3).

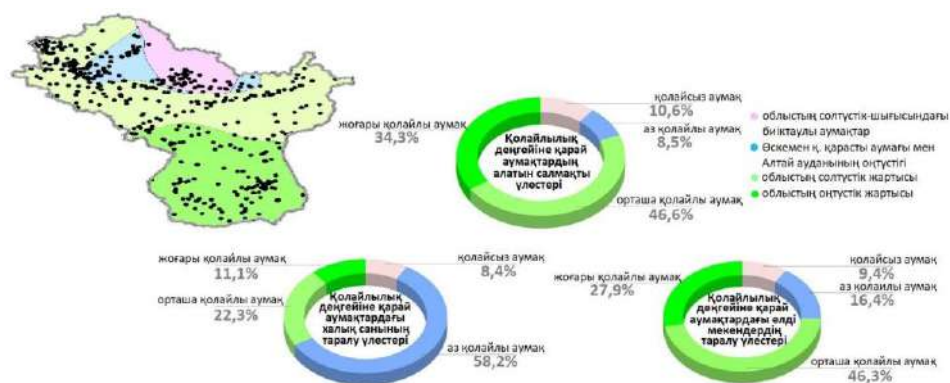
Шығыс Қазақстан өңіріндегі климаттық қолайлылық дәрежесінің қоныстану кеңістігімен байланысын сипаттамалық түрде бағалау үшін тұрғындардың орналасу көрсеткіштерімен салыстыру жүргізілді. Салыстыру көрсеткіштері ретінде қолайлылығы әртүрлі аумақтардағы халық және елді мекендер саны алынды. Салыстыру нәтижелері инфографикалық диаграммаларда көрсетілді: Абай облысы бойынша сурет - 4, ал Шығыс Қазақстан облысы бойынша сурет - 5 берілді.



Сурет 4. Абай облысында климаттық қолайлылық деңгейі бойынша аумақ үлесі мен халық таралуының салыстырмалы арақатынасы

Абай облысында қолайлылығы жоғары аумақ үлесі басым болғанымен, халықтың едәуір бөлігі қолайлылығы төмен аумақтарда шоғырланғаны байқалады. Сонымен қатар елді мекендердің едәуір бөлігі қолайлылығы жоғары аумақтарда орналасқан. Қолайлылығы төмен аумақ аумақтық үлесі салыстырмалы түрде шағын болғанымен, онда халық үлесінің жоғары болуы мүмкін, ал елді мекендердің үлесі төмендеу көрінеді.

Бұл жағдай климаттық қолайлылық пен қоныстану параметрлері арасындағы байланыс біркәнді емес екенін және өңірде қоныстануға ықпал ететін өзге факторлардың рөлі күшейетінін көрсетуі мүмкін. Мұндай факторларға Ертіс өзені аңғары, минералдық ресурстардың шоғырлануы, көлік дәліздері және қалалық орталықтардың тартылыс күші жатады. Осыған байланысты климаттың ықпалы бұл өңірде жанама әрі шектеулі сипатта көрінуі ықтимал.



Сурет 5. Шығыс Қазақстан облысы аумағында климаттық қолайлылық деңгейі бойынша аумақ үлесі мен халық таралуының салыстырмалы арақатынасы

Шығыс Қазақстан облысы бойынша диаграммаларды салыстыру кезінде бірнеше үрдіс байқалады. Біріншіден, биік таулы аумақтар қолайсыз аймақ ретінде айқынырақ көрінеді. Бұл аумақ облыстың жалпы жер көлемінің шамамен оннан бір бөлігін құрап, онда халық пен елді мекендердің таралуы сирек болуы мүмкін. Екіншіден, қолайлылығы төмен аумақта халық үлесінің жоғары болуы және елді мекен үлесінің төмен болуы байқалады. Бұл қоныстану құрылымына климатпен қатар өндірістік және ресурстық факторлардың, сондай-ақ инфрақұрылымдық жағдайлардың ықпалы бар екенін

меңзейді. Үшіншіден, орташа қолайлы аумақ облыс аумағының едәуір бөлігін қамти отырып, елді мекендер санының айтарлықтай үлесімен сәйкес келуі мүмкін. Жалпы алғанда, бұл салыстырулар климаттық шектеулер әсіресе экстремалдылығы жоғары биік таулы аумақтарда айқынырақ байқалатынын, ал климаттық жағдайлар салыстырмалы түрде төзімді аумақтарда қоныстануға әсер ететін басқа факторлардың ықпалы күшейетінін көрсетуі мүмкін. Мұндай факторларға Ертіс өзені, минералдық ресурстар, өндірістік тораптар және көлік қатынасы жатады. Сондықтан климат кей жағдайларда қоныстануды шектеуші фактор ретінде көрінсе, кей жағдайларда екінші дәрежелі немесе жанама фактор ретінде сипатталуы ықтимал.

Аудандар бойынша климаттық көрсеткіштердің қалыпты мәндерінің аумақтық таралуын талдау мынаны көрсетті:

1) табиғи климаттық факторлар аумақтың табиғи фонын қалыптастырады; олар ұзақ мерзімді тұрақты әсерімен және басу өзгеретіндігімен сипатталады;

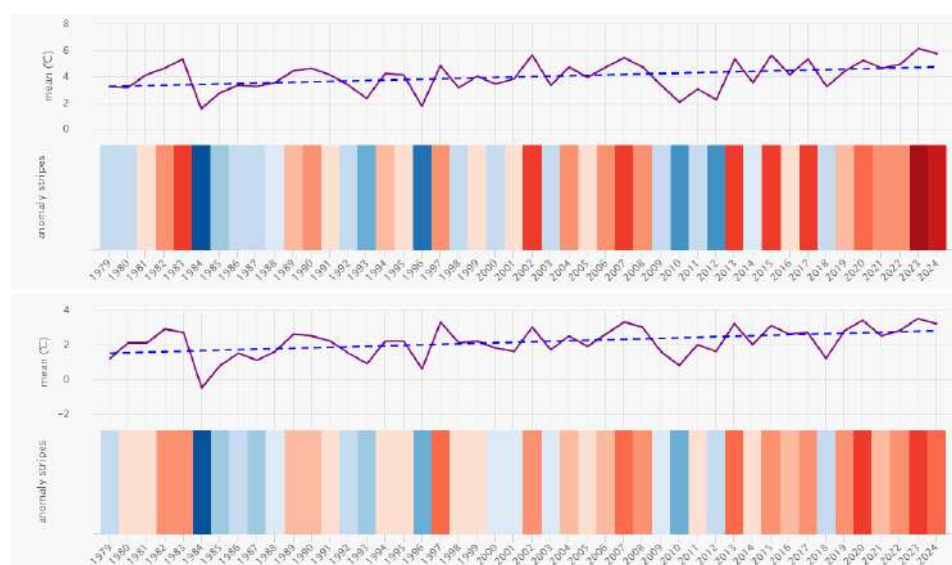
2) қолайсыздық аймақшаларының шекаралары климаттық жағдайлардың белгілі бір үйлесімімен айқындалады; ал осы үйлесім әр аймақшада өмір сүру жағдайларының күрделілік деңгейін сипаттайды;

3) өмір сүру жағдайларының нашарлауы орташа жайлы аймақтан өте қатты жайсыздық аймағына дейін өзгеруі мүмкін, жайсыздықтың интегралды көрсеткішінің орташа мәні 1,47 мен 6,9 аралығында ауытқиды;

4) климаттық жайсыздықтың интегралды көрсеткіші айқын аумақтық контрастка ие, орташа жайсыздық аймақшада минимум 0,71, ал өте қатты жайсыздық аймақшада максимум 7,3, яғни айырмашылық шамамен 10 есе.

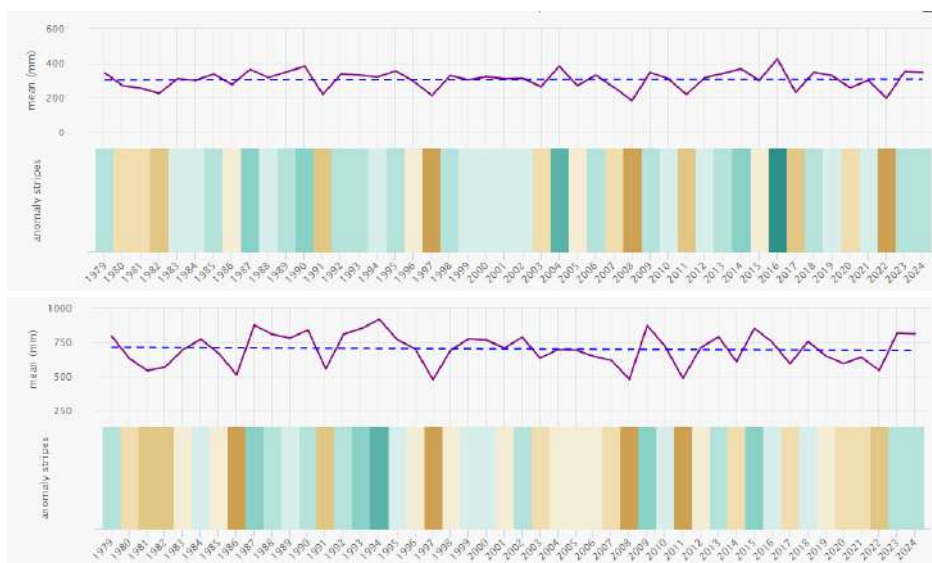
Осылайша, өңір аумағының шамамен 40%-ы қолайсыз аймақтарға жатады. Бұл халықтың өмір сүруіне салыстырмалы түрде қолайлы аумақтардың шектеулі екенін және климаттық шектеулердің кеңістіктік жоспарлауда ескерілетін маңызды фондық фактор екенін көрсетеді.

Сонымен қатар климаттың өзгеруі нәтижесінде байқалатын жылыну және құрғақтану үдерістері Шығыс Қазақстан аумағында да көрініс табуы мүмкін. Мысалы, ауа райы мен климатты бақылауға арналған швейцарлық ресми Meteoblue сайтының [11] деректері бойынша өңірде белгілі бір трендтер байқалады (суреттер 6-7). Сайтта пайдаланылатын дереккөзі кеңістіктік ажыратымдылығы 30 км болатын Еуропалық орта мерзімді ауа райын болжау орталығының ERA5 реанализ желілері болып табылады.



Сурет 6. Meteoblue деректері бойынша Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысындағы ауа температурасының өзгеру динамикасы (1979-2024 жж.) [12]

Графиктерде жалпы орташа ауа температурасының соңғы 45 жыл ішінде біртіндеп өскені аңғарылады. Абай облысында орташа температура шамамен $1,5^{\circ}\text{C}$ -қа (1979 жылы – $3,20^{\circ}\text{C}$ болса, 2024 – $4,70^{\circ}\text{C}$), ШҚО-да – $1,6^{\circ}\text{C}$ -қа (1979 жылы – $1,20^{\circ}\text{C}$ болса, 2024 – $2,80^{\circ}\text{C}$) жоғарылаған.



Сурет 7. Meteoblue деректері бойынша Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысындағы жауын-шашын мөлшерінің өзгеру динамикасы (1979-2024 жж.) [13-14]

Жауын-шашын динамикасында екі облыс бойынша да айқын бағытталған өзгеріс байқалмайды. Абай облысында шамалы өсім, ал Шығыс Қазақстан облысында аздап төмендеу байқалады. Сонымен қатар Қазақстан Республикасы Еңбек және халықты әлеуметтік қорғау министрлігінің Көші-қон комитеті соңғы жылдардағы климаттық өзгерістердің халықтың көшіп-қону үдерістеріне ықпалын талдауға назар аударған. Климаттық миграция әсіресе ауыл шаруашылығы мен инфрақұрылымға тәуелді аумақтарда қуаңшылықтың, су тапшылығының және экстремалды ауа райы құбылыстарының жиілеуімен байланысты күшейе түсуі мүмкін. Қазіргі таңда климаттың өзгеруі тек жеке аудандарда ғана емес, бүкіл Жер шарында бақыланып жатқаны көптеген еңбектерде көрсетіледі [15]. Бұл құбылыс дамушы елдерде де, дамыған елдерде де әртүрлі әлеуметтік, экономикалық және институционалдық салдарлар арқылы көрініс табады. Сондықтан мәселені экология және ресурстарды басқару саласындағы халықаралық ынтымақтастық, тұрақты даму қағидаттары және тәуекелдерді азайтатын инновациялық шешімдер аясында кешенді қарастыру қажет.

Әдістемелік шектеулер. Осы бөлімде ұсынылған салыстырулар сипаттамалық және көрнекі салыстыру деңгейінде жүргізілді. Климаттық қолайлылық деңгейлері мен халық пен елді мекендер үлестері арасындағы сәйкестік инфографика арқылы интерпретацияланды. Алайда климаттық көрсеткіштер мен қоныстану параметрлері арасындағы тәуелділіктерге сандық баға берілмеді және статистикалық тексеру жүргізілген жоқ. Сондықтан алынған қорытындылар климаттың қоныстануға әсерін жанама және ықтимал байланыстар ретінде сипаттайды. Алдағы зерттеулерде көп факторлы статистикалық талдау жүргізу ұсынылады, мұнда климаттық көрсеткіштермен қатар өзенге жақындық, минералдық ресурстардың орналасуы, көлік қолжетімділігі, инфрақұрылым және қалалық орталықтарға қашықтық сияқты факторлар есепке алынуы тиіс.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Қорытындылай келе, Қазақстан аумағында климаттық факторлар халықтың көшіп-қону үдерістеріне ықпал етуі мүмкін маңызды фондық алғышарттардың қатарына жатады. Олардың ішінде ауа температурасының өсуі, жауын-шашын режимінің құбылмалылығы, маусымдық ауытқулардың күшеюі және экстремалды құбылыстардың жиілеуі (су тасқыны, дауыл, нөсер, құрғақшылық, боран және басқа да құбылыстар) ерекше орын алады. Бақылау деректері 1960-жылдардан бері ел аумағында жылыну үрдісінің күшейгенін, ал 2019-2023 жылдар аралығы ең жылы кезеңдердің қатарына енгенін көрсетеді, соның ішінде 2023 жыл рекордтық жылы жыл ретінде сипатталады. Жауын-шашынның көпжылдық режимінде де тұрақсыздық байқалып, ылғалды және қуаң жылдардың алмасуы күшейе түсу үрдісін аңғартады.

Зерттеу нәтижелері Шығыс Қазақстан облысы мен Абай облысында климаттық қолайлылықтың аумақ бойынша біркелкі таралмайтынын және жер бедері мен биіктік белдеулілікке байланысты климаттың айқын сараланатынын көрсетті. Климаттық қолайлылық деңгейлері бойынша жүргізілген аудандастыруда экстремалды және қолайсыз жағдайлар, әсіресе биік таулы белдеулерде айқынырақ байқалады, ал салыстырмалы қолайлы аумақтарда қоныстану торының әртараптануы күштірек көрінуі мүмкін. Дегенмен, халықтың таралуы мен елді мекендер жүйесінің қалыптасуы климатпен ғана түсіндірілмейді. Абай облысы мен Шығыс Қазақстан облысы бойынша инфографикалық салыстырулар климаттық қолайлылық пен халық пен елді мекендер үлестері арасындағы сәйкестік әрқашан бірмәнді емес екенін көрсетті. Бұл өңірлерде қоныстануды айқындауда Ертіс өзені аңғары, минералдық ресурстардың шоғырлануы, өндірістік тораптар, көлік қатынасы және қалалық орталықтардың тартылыс күші сияқты факторлар маңызды рөл атқарады. Сондықтан климаттың ықпалы кей аумақтарда қоныстануды шектейтін фактор ретінде айқынырақ көрінгенімен, жалпы алғанда ол жиі жағдайда екінші дәрежелі немесе жанама сипатта байқалуы ықтимал.

Метеобақылаулар мен қайта талдау деректері негізіндегі динамикалық бағалаулар Шығыс Қазақстан облысы мен Абай облысында соңғы онжылдықтарда жылыну үрдісінің тұрақты байқалатынын көрсетеді, ал жауын-шашын мөлшерінде айқын бағытталған өзгерістер әлсіз көрінеді. Бұл жағдай, бір жағынан, су ресурстарының маусымдық теңгеріміне, екінші жағынан, қуаңшылық тәуекелдерінің күшеюіне қатысты мәселелерді өзекті етеді. Сонымен қатар климаттың өзгеруі ауыл шаруашылығы, жайылымдық ресурстар, инфрақұрылымның орнықтылығы және халық денсаулығы тәуекелдері арқылы әлеуметтік-экономикалық салдарға алып келіп, көші-қон шешімдеріне жанама түрде ықпал етуі мүмкін. Қазақстан тәжірибесінде климаттық тәуекелдер мен орын ауыстыру арасындағы байланыс көбіне апаттық жағдайлар арқылы айқынырақ байқалады: 2020 жылы экологиялық дағдарыс себептерімен байланысты қоныс аударудың шамамен 32 мың оқиғасы тіркелгені көрсетіледі. Өңіраралық көші-қон логикасында да табиғи-ресурстық және экономикалық айырмашылықтардың салмағы бар солтүстік өңірлерге қоныс аудару үрдісі күшейіп, ал оңтүстік аумақтарда ауыл шаруашылығы үшін жағдайлардың нашарлауы қосымша қысым факторына айналуы мүмкін.

Осыған байланысты Шығыс Қазақстан облысы мен Абай облысы үшін де, жалпы ел үшін де климат өзгерістері жағдайында тәуекелдерді азайтуға бағытталған кешенді бейімделу шараларын күшейту өзекті. Біріншіден, ерте ескерту жүйелерін жетілдіру және төтенше жағдайларға дайындықты арттыру қажет. Екіншіден, су ресурстарын басқару, су тапшылығы тәуекелдерін төмендету және су үнемдеу инфрақұрылымын дамыту маңызды. Үшіншіден, ауыл шаруашылығын климатқа бейімдеу, оның ішінде құрғақшылыққа төзімді технологиялар мен жайылымдарды тұрақты басқару тетіктерін енгізу қажет. Төртіншіден, аумақтық жоспарлау мен қоныстану саясаты климаттық тәуекелдердің кеңістіктік айырмашылықтарын ескеріп, осал топтарды әлеуметтік қорғау шараларымен толықтырылуы тиіс. Жалпы алғанда, климаттық тәуекелдерді басқару мен

бейімделу саясаты өңірлік тұрақтылықты сақтауға және халықтың мәжбүрлі орын ауыстыру ықтималдығын төмендетуге мүмкіндік беретін стратегиялық бағыт ретінде бағалануы керек.

Зерттеудің шектеулері және болашақ зерттеу бағыты бойынша бұл зерттеуде климаттық қолайлылық деңгейлері мен қоныстану параметрлері арасындағы байланыс негізінен сипаттамалық және көрнекі салыстыру тәсілдері арқылы бағаланды, ал статистикалық тексеру мен сандық модельдеу жүргізілген жоқ. Болашақта климаттық индекстер мен елді мекендер саны, халық тығыздығы және көші-қон көрсеткіштері арасындағы тәуелділікті корреляциялық және көпфакторлы регрессиялық талдау арқылы сандық негіздеу ұсынылады, мұнда өзенге жақындық, минералдық ресурстар, жол және инфрақұрылым қолжетімділігі, сондай-ақ қалалық орталықтарға қашықтық сияқты факторларды қатар енгізу қажет. Сонымен бірге жоғары кеңістіктік ажыратымдылықтағы деректер мен ұзақ мерзімді уақыт қатарларын пайдалану өңірлік деңгейдегі климаттық тәуекелдер мен қоныстану трансформациясын дәлірек бағалауға мүмкіндік береді.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛЖЕТІМДІЛІГІ

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

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау - САБ; деректерді басқару - РЛМ; Ресми талдау - МАТ; Әдістеме - ЕСЖ; Бағдарламалық қамтамасыз ету - НАМ; Қадағалау - ШШК; Визуализация - ОГО; Бастапқы жобаны жазу - САБ; Шолу жазу және редакциялау – САБ.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Munajtpasova A., Zheksenbaeva A., Orakova G., Musralinova G., Nyshanbay A. *sovremennye izmeneniya klimata na vostoке Kazakhstana // Hidrometeorologiya i ekologiya. № 3. S. 31-39.2024. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-114-3-31-39> [in Kazakh].*
2. Mitchell D., Maloney S.K., Snelling E.P., Hetem R.S., Fuller A. Revisiting Concepts of Thermal Physiology: Understanding Feedback and Feedforward Control, and Local Temperature Regulation. *Acta Physiologica (Oxf). 2025, 241(7). <https://doi.org/10.1111/apha.70063>*
3. World Meteorological Organization (WMO). *Climate and Human Health. - Geneva: WMO, 1996.*
4. Өскемен қаласы ауа температурасы мен жауын-шашынның климаттық сипаттамалары (1991-2020 нормалары; 1951/1958-2021 бақылау қатарлары) [Электрон. ресурстар] «Қазгидромет» РМК (қаралған күні: 26.02.2026).
5. World Economic Forum. *The Global Risks Report 2017. 12th edition. - Geneva: World Economic Forum, 2017. 132-133*
6. Абдулин А.А., Шлигин А.Е. *Металлогения и минеральные ресурсы Казахстана. – Алма-Ата: Наука, 1983.- С. 312-315*
7. *Географическая энциклопедия. Восточный Казахстан.- Усть-Каменогорск: Шығыс Полиграф, 2014. – С. 74-78*
8. Егорина А.В., Попова К.И., Чурсин А.С. и др. *Климат Юго-Западного Алтая.- Семей, 2015. - С. 315-321*
9. *Геология СССР: Геология СССР/ВСЕГЕИ Т. 41: Вост. Казахстан Ч. 1: Геол. описание. – 1967. – С. 123-125*
10. Егорина А.В., Зинченко Е.С., Зинченко Ю.К. *Физическая география Восточного Казахстана. Усть-Каменогорск: 2017. – С. 25-27*
11. Компания *meteoblue* [Электрон. ресурс] URL: <https://content.meteoblue.com> (дата обращения: 10.10.2025).
12. Фролькис В.А., Добровлянский Д.Б. (2020). Прогноз температуры воздуха с помощью методов машинного обучения. - *Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей StudNet, №9, 861-867. <https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1118>*
13. Компания *meteoblue* [Электрон. ресурс] URL: https://www.meteoblue.com/ru/climate-change/Восточно-Казахстанская-область_Казахстан_1517381 (дата обращения: 10.09.2025).
14. Международное информационное агентство «Казинформ» - Как климат влияет на миграционные процессы Казахстана [Электрон. ресурс] URL: <http://www.inform.kz/ru/kak-klimat-vliyaet-na-migratsionnye-protsessi-kazakhstan-b230a4> (дата обращения: 28.09.2025).
15. *Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2019 году. – Женева, 2020. – ВМО – № 1248. – 44 с.*

REFERENCES

1. Munajtpasova A., Zheksenbayeva A., Orakova G., Musralinova G., Nyshanbay A. *modern climate changes in the east of Kazakhstan // Hydrometeorology and ecology. No. 3. p. 31-39.2024.*
2. Mitchell D., Maloney S.K., Snelling E.P., Hetem R.S., Fuller A. Revisiting Concepts of Thermal Physiology: Understanding Feedback and Feedforward Control, and Local Temperature Regulation. *Acta Physiologica (Oxf). 2025, 241(7). <https://doi.org/10.1111/apha.70063>*
3. World Meteorological Organization (WMO). *Climate and Human Health. - Geneva: WMO, 1996.*
4. Өскемен қаласы ауа температурасы мен жауын-шашынның климаттық сипаттамалары (1991–2020 нормалары; 1951/1958–2021 бақылау қатарлары) [Elektronic resources] «Qazgidromet» RMK gidrologialyq mälmetter bazasy (qaralğan күні: 26.02.2026). [in Kazakh].

5. World Economic Forum. The Global Risks Report 2017. 12th edition. - Geneva: World Economic Forum, 2017. 132-133
6. A. Abdullin.A. And Shligyn.E. Metallogeny and mineral resources of Kazakhstan, Alma-Ata, Moscow: Nauka, 1983, pp. 312-315
7. Geographical encyclopedia. East Kazakhstan. Ust-Kamenogorsk: East Polygraph, 2014. pp. 74-78
8. Egorina A.V., Popova K.I., Chursin A.S. et. all. The climate of Southwestern Altai.- Semey, 2015. - pp. 315-321
9. Geology of the USSR: Geology of the USSR/T. VSEGEI. 41: East of Kazakhstan. 1: Geol. Description – 1967. - pp. 123-125
10. A.V.Egorina, E.S.Zinchenko, Y.K. Zinchenko. Physical geography of East Kazakhstan. Ust-Kamenogorsk: 2017. – pp. 25-27
11. Meteoblue Company [Electron. resource] URL: <https://content.meteoblue.com> (accessed: 10.10.2025).
12. Frolkis V.A., Dobrovlyansky D.B. (2020). Forecast temperature of the air with the methods of machine learning. Scientific and educational journal for students and teachers StudNet, No. 9, 861-867. <https://doi.org/10.24411/2658-4964-2020-1118>
13. Meteoblue Company [Electronic resource] URL: https://www.meteoblue.com/ru/climate-change / East Kazakhstan region_Kazakhstan_1517381 (accessed: 09.10.2025).
14. Kazinform International News Agency - How the climate affects migration processes in Kazakhstan [Electronic resource] URL: <http://www.inform.kz/ru / kak-klimat-vliyaet-na-migratsionnie-protsessi-kazahkstana-b230a4> (accessed: 28.09. 2025).
15. The WMO Statement on the state of the global climate in 2019. – Geneva, 2020. – WMO – No. 1248. – 44 p.

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОГО РЕГИОНА НА РАССЕЛЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ

Шынар К. Шынгысбаева¹, Алим Т. Мылқайдаров² к.ғ.н., старший преподаватель, Гулнар О. Орынбасарова² PhD, старший преподаватель, Акерке М. Нурпейсова³, Светлана Ж. Ерекеева⁴ PhD, старший преподаватель, Лаура М. Рыскулбекова⁵, PhD, ассоциированный профессор, Айгерим Б. Сансызбаева^{1*} PhD, и.о. доцента

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; shyngysbaeva75@mail.ru (ШШК), sansyzybayeva.ab@mail.ru (САБ)

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан; mylkaydarov@mail.ru (МАТ), gulnar.86_27@mail.ru (ОГО)

³“Шәкәрім университет” НАО, Семей, Казахстан; erkenurpejsova@gmail.com (НАМ)

⁴НАО Южно-Казахстанский педагогический университет имени Эзбекәлі Жәнібеков, Шымкент, Казахстан; svetlana.yerekeyeva@gmail.com (ЕЖ)

⁵Казахский национальный аграрный университет, Алматы, Казахстан; ryskulbekova.laura@kaznu.edu.kz

* Автор корреспонденции: Айгерим Б. Сансызбаева, sansyzybayeva.ab@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ресурс,
климат,
фактор,
влажность воздуха
температура,
миграция

По статье:

Получено: 21.11.2025

Пересмотрено: 10.03.2026

Принято: 13.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

АБСТРАКТ

В статье рассматриваются природно-климатические факторы, влияющие на систему расселения, как одна из важнейших предпосылок эффективной государственной социальной политики, направленной на улучшение демографического состояния населения. Исследование направлено на оценку влияния природных и климатических условий на расселение населения на территории Восточно-Казахстанского региона (а также Абайской области). В ходе анализа систем расселения в регионах установлено, что множественность видов расселения более выражена на климатически благоприятных территориях. Для оценки степени влияния природных факторов за основу были взяты такие климатические показатели, как холодный и жаркий режим, влажность и неблагоприятные природные явления. В статье сделан обзор влияния изменения климата в регионе на основе последней базы данных и представлены показатели, характеризующие климатический комфорт. Степень климатического благоприятствования в холодный период года по районам Восточно-Казахстанской области оценивалась по метеорологическим данным января как самого холодного месяца. А также Meteoblue (1979-2024гг.) показана динамика многолетних изменений температуры воздуха и количества осадков на территории Абайской области и ВКО. В целях определения влияния климатических условий на развитие системы расселения путем интеграции полученных показателей результаты приведены в 4-балльную оценочную шкалу. На этой основе проведено районирование территории по степени климатического комфорта. В результате исследования была составлена карта среднегодовой температуры воздуха и тематические карты степени благоприятности климатических условий для расселения населения, составленные с помощью ГИС-технологий.

THE INFLUENCE OF THE NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS OF THE EAST KAZAKHSTAN REGION ON THE SETTLEMENT OF THE POPULATION

Shynar K. Shyngysbayeva¹, Alim T. Mylkaidarov² Candidate of Geographical Sciences, Senior lecturer, Gulnar O. Orynbasarova² PhD, Senior lecturer, Akerke M. Nurpeysova³, Svetlana Zh. Erekeyeva⁴ PhD, Senior lecturer, Laura M. Ryskulbekova⁵ PhD, Associate Professor, Aigerim B. Sansyzybayeva^{1*} PhD Acting Associate Professor

¹L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; shyngysbaeva75@mail.ru , sansyzybayeva.ab@mail.ru

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; mylkaydarov@mail.ru, gulnar.86_27@mail.ru ,

³“Shakarim University” NJC, Semey, Kazakhstan; erkenurpejsova@gmail.com ,

⁴Ozbekali Zhanibekov, South Kazakhstan Pedagogical University, Shymkent, Kazakhstan; svetlana.yerekeyeva@gmail.com,

⁵Kazakh National Agrarian University, Almaty, Kazakhstan; ryskulbekova.laura@kaznaru.edu.kz,

* Correspondent author: Aigerim B. Sansyzybayeva, sansyzybayeva.ab@mail.ru

KEY WORDS

resource,
climate,
factor,
air humidity,
temperature,
migration

About article:

Received: 21.11.2025

Revised: 10.03.2026

Accepted: 13.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

The article examines the role of natural and climatic factors in shaping population settlement patterns, considering them as an important prerequisite for effective state social policy aimed at improving demographic conditions. The study focuses on assessing how environmental and climatic characteristics influence settlement development within the territories of the East Kazakhstan Region and the Abay Region. The analysis of regional settlement systems indicates that a greater diversity of settlement types tends to emerge in areas with more favorable climatic conditions. To evaluate the influence of environmental factors, several key climatic indicators were considered, including thermal regimes (cold and heat conditions), humidity levels, and the occurrence of adverse natural phenomena.

The paper also reviews recent trends in regional climate change using the latest available data sources and presents indicators describing climatic comfort. Climatic conditions during the cold season were assessed using meteorological data for January, the coldest month of the year, for the districts of the East Kazakhstan Region.

In addition, long-term changes in air temperature and precipitation across the Abay Region and the East Kazakhstan Region were analyzed using Meteoblue data for the period 1979–2024. To determine the overall influence of climatic conditions on settlement development, the obtained indicators were integrated and converted into a four-point evaluation scale.

Based on this assessment, the territory was classified according to the degree of climatic comfort. As a result of the study, a map of average annual air temperature and thematic maps illustrating the suitability of climatic conditions for population settlement were produced using GIS technologies.

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



Ғылыми мақала

ТҰЗДЫ КӨЛДЕР МАҢЫНДАҒЫ ТОПЫРАҚТАРДЫҢ ТҰЗДАНУ ДЕНГЕЙІНІҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ СИПАТТАМАСЫ (ҚАЗАҚСТАН МЫСАЛЫНДА)

Асанәлі. Қабдулмәжитұлы^{1*}, Асель.К Мурзалимова², Жанар. Рахымжан¹, Румия.М Тазитдинова^{1,2}, Айна.А Рысмағамбетова³

1 Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; akabdulmazhituly@bk.ru (АК), r.zhanar80@mail.ru (ЖР), tazitdinova_rm@enu.kz (PMT)

2 «Шәкәрім атындағы Университет» КЕАК, Семей, Қазақстан; murzalimova78@mail.ru (АКМ)

3 Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан; Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz (ААР)

* Автор корреспондент: Асанәлі Қабдулмәжитұлы, akabdulmazhituly@bk.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

тұзданған топырақтар, электр өткізгіштік, аниондық құрам, $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ қатынасы, сульфатты-хлоридті тұздану, солончактар, Керуенкөл, Сор, Шошқалы

АБСТРАКТ

Бұл зерттеу Қазақстанның Абай, Шығыс Қазақстан облыстарында орналасқан Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтардың тұздану деңгейін және олардың физика-химиялық қасиеттерін салыстырмалы түрде бағалауға арналған. Зерттеу барысында топырақтың реакциясы (рН), электр өткізгіштігі (ЕС), негізгі суға еритін катиондар мен аниондардың (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) концентрациялары анықталды, сондай-ақ аниондық құрам негізінде топырақтың тұздану типі жіктелді. Зерттеу нәтижелері бойынша барлық үш учаскеде топырақтар сілтілі реакциямен сипатталды (рН = 8,0–8,8). Электр өткізгіштік мәндері 7,5–13,2 дС/м аралығында өзгеріп, топырақтардың орташа және күшті тұзданған санаттарға жататынын көрсетті. Натрий, хлорид және сульфат иондарының жоғары концентрациялары анықталды: Na^+ – 1750–3600 мг/кг, Cl^- – 1300–2700 мг/кг, SO_4^{2-} – 600–1200 мг/кг. Топырақтың аниондық құрамын Н.И. Базилевич пен Е.И. Панковая ұсынған жіктеу әдісі бойынша талдау $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ қатынасының 2,17–2,47 аралығында екенін көрсетті, бұл барлық зерттелген учаскелердің сульфатты-хлоридті тұздану типіне жататынын дәлелдейді. Шошқалы учаскесіндегі көрсеткіштің салыстырмалы түрде төмен болуы оның хлоридті типке жақын өтпелі сипатқа ие екенін көрсетеді. Алынған нәтижелер зерттелген аумақтардың табиғи солончактық ландшафттарға тән жоғары тұздану деңгейімен, сілтілі реакциямен және улы тұздардың басым болуымен ерекшеленетінін көрсетеді. Бұл деректер Қазақстанның тұзданған жерлерін бағалау, топырақ деградациясын болжау және жер ресурстарын тиімді басқару үшін маңызды ғылыми негіз болып табылады.

1. КІРІСПЕ

Қазақстанның құрғақ және жартылай құрғақ аймақтарында топырақтың тұздануы мен химиялық ластануы экологиялық тұрақтылыққа және әлеуметтік-экономикалық дамуға тікелей әсер ететін өзекті мәселелердің бірі болып табылады [20], [25], [28]. Әсіресе Шығыс Қазақстан және Абай облыстарында тұзды және сілтілі топырақтардың кең таралуы климаттың құрғақтануы, буланудың жоғары қарқындылығы және минералданған жерасты суларының топырақ бетіне жақындығымен түсіндіріледі [21], [23]. Осыған ұқсас жағдайлар Шошқалы, Сор және Керуенкөл көлдері маңында да байқалады, бұл аймақтарды Қазақстанның табиғи тұзданған ландшафттарының қатарына енгізуге мүмкіндік береді [29]. Топырақтағы натрий (Na^+), хлорид (Cl^-) және сульфат (SO_4^{2-}) иондарының жоғары концентрациясы топырақ құрылымының бұзылуына, қарашірік мөлшерінің төмендеуіне, биологиялық белсенділіктің әлсіреуіне және өсімдік қауымдастықтарының деградациясына әкеледі [22], [24]. Бұл процестер нәтижесінде

Мақала жайында:

Жіберілді: 22.01.2026
 Қайта қаралды: 05.03.2026
 Қабылданды: 18.03.2026
 Жарияланды: 01.04.2026

Дәйексөз үшін:

Қабдулмәжитұлы А.,
 Мурзалимова А.,
 Рахымжан Ж.,
 Тазитдинова Р.,
 Рысмагамбетова А. Тұзды
 көлдер маңындағы
 топырақтардың тұздану
 деңгейінің салыстырмалы
 сипаттамасы (Қазақстан
 мысалында) //
 Гидрометеорология и
 экология, 121 (1), 2026, 86-
 99.

топырақтың су ұстау қабілеті төмендеп, экожүйелердің өнімділігі айтарлықтай қысқарады. Топырақ тұздануы тек табиғи факторлардың ғана емес, сондай-ақ антропогендік жүктеменің де нәтижесі болып табылады. Суармалы егіншілік кең тараған аймақтарда тиімсіз суару, дренаж жүйелерінің болмауы және минералданған суды пайдалану екінші реттік тұзданудың күшеюіне ықпал етеді [6], [25]. Мұндай құбылыс Павлодар, Қызылорда, Атырау және Шығыс Қазақстан облыстарында жиі кездеседі [29]. Дәстүрлі мелиорациялық әдістер (топырақ шаю, гипстеу, әктеу, дренаж жүйелері) экономикалық жағынан тиімсіз әрі ұзақ мерзімде тұрақты нәтиже бермейді [26]. Сондықтан соңғы жылдары биологиялық қалпына келтіру технологиялары, соның ішінде фиторемедиация әдістеріне қызығушылық артты [1], [5], [11].

Фиторемедиация – табиғи биологиялық процестерге негізделген, экологиялық таза технология. Тұзды ортаға бейімделген галофитті өсімдіктер Na^+ , Cl^- және SO_4^{2-} иондарын өз бойына жинау арқылы топырақтың тұздылығын төмендетуге қабілетті. Солардың ішінде *Salicornia europaea* ең перспективалы түр ретінде кеңінен зерттелуде [4], [11], [12], [28]. 2020 жылдан кейінгі халықаралық зерттеулер галофиттердің фиторемедиациялық мүмкіндіктерін жаңа деңгейде дәлелдеді. Khalilzadeh et al. *Salicornia europaea* өсімдігінің ауыр металдар мен тұздарды сіңіру тиімділігін жоғары бағалады [11]. Ahmadi et al. Орта Азияға жақын аймақтарда галофиттердің тұзданған топырақты қалпына келтіру мүмкіндігін көрсетті [12]. Beisenova et al. (Қазақстан) Pavlodar өңірінде *Salicornia europaea* жергілікті жағдайларға жақсы бейімделетінін көрсетті [9]. Baibekova & Sarsekova Қазақстанның тұзданған экожүйелеріндегі деградациялық процестерді сипаттады [10]. Hossain et al. галофиттердің тұзды топырақтарды биоремедиациялау қабілетін жоғары деп бағалады [14]. Сонымен бірге, *Salicornia europaea* өсімдігінің Қазақстан жағдайына физиологиялық бейімделуі және нақты топырақ құрамына әсері әлі толық зерттелмеген. Осыған байланысты зерттеудің мақсаты Шошқалы, Сор және Керуенкөл көлдері маңындағы тұзданған топырақтардың иондық құрамын анықтау және *Salicornia europaea* өсімдігін қолдану арқылы фиторемедиациялық тиімділігін бағалау [1], [11], [12].

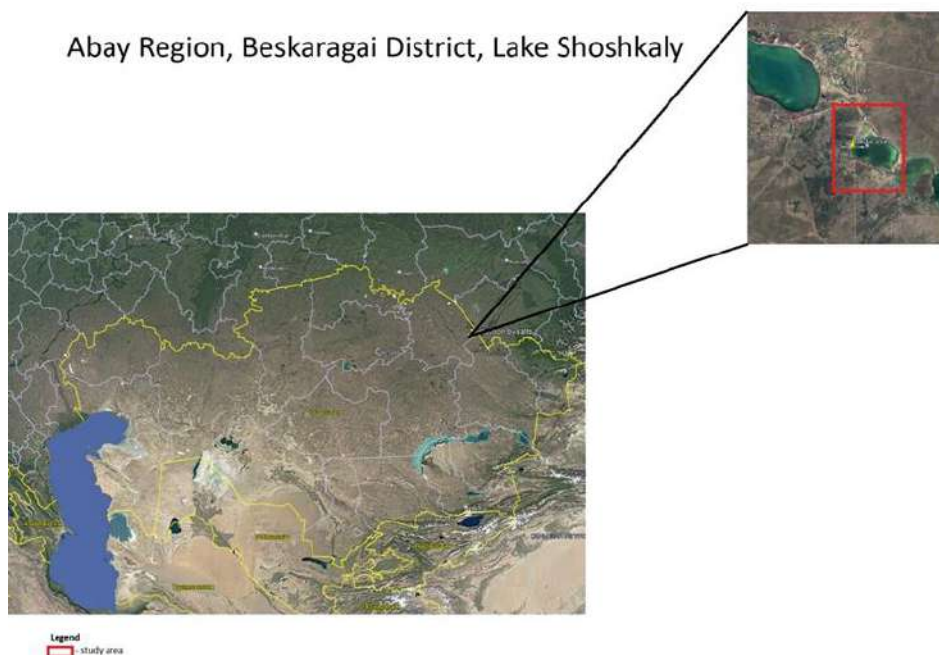
2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Қазақстан Республикасында тұзданған және сортаң топырақтардың таралу деңгейі жоғары болғанымен, көптеген өңірлерде, әсіресе Солтүстік-Шығыс аймақтарында бұл мәселе әлі де толық зерттелмеген [10], [14], [15]. Оңтүстік және Батыс өңірлермен салыстырғанда Абай, Шығыс Қазақстан және Павлодар облыстарындағы табиғи тұздану ошақтары жеткілікті зерттелмеген, сондықтан топырақтың нақты тұздану деңгейін, анион-катиондық құрамын және химиялық ерекшеліктерін анықтау өзекті болып табылады [9], [11], [28].

Осы зерттеуде негізгі мақсат ретінде Керуенкөл (Абай облысы), Сор (ШҚО) және Шошқалы (Павлодар облысы) көлдері маңындағы топырақтардың тұздану деңгейін анықтау және олардың химиялық құрамын талдау алынды. Бұл аймақтар Қазақстанның табиғи тұзданған ландшафттарының қатарына кіреді және өңірлік экожүйенің деградация қаупін күшейтеді [23], [27]. Далалық зерттеу жұмыстары 2024 жылғы маусым–шілде айларында жүргізілді. Әр зерттеу нысанында (Керуенкөл, Сор және Шошқалы) «конверт» әдісі бойынша 5 нүктеден 0–20 см тереңдікте топырақ сынамалары алынды. Осылайша, әр өңірде 5 сынамадан, жалпы 15 нүктелік сынама жиналды. Барлық сынамалар жеке-жеке зертханалық талдауға жіберілді.

Сурет 1-де Шошқалы көлі маңындағы топырақ сынамалары жиналған нақты учаскелердің кеңістіктік орналасуы көрсетілген. Карта зерттеу аумағының шекарасын, үлгі алу нүктелерін және олардың өзара қашықтықтарын визуалды түрде бейнелейді. Бұл ақпарат топырақтың кеңістіктік әркелкілігін бағалау және алынған деректердің репрезентативтілігін қамтамасыз ету үшін маңызды.

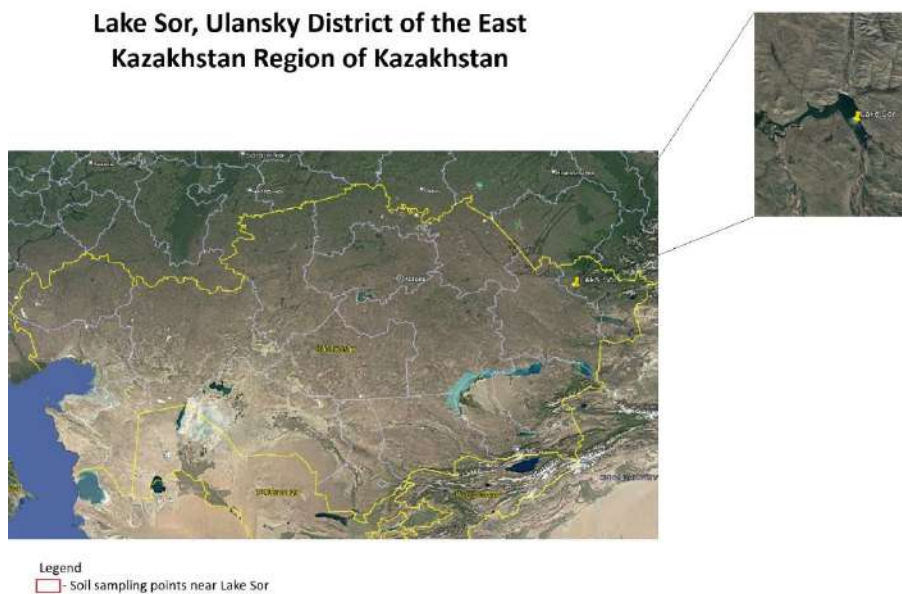
Abay Region, Beskaragai District, Lake Shoshkaly



Сурет 1. Абай облысы, Бесқарағай ауданы, Шошқалы көлі маңындағы топырақ сынамалары алынған зерттеу аумағы

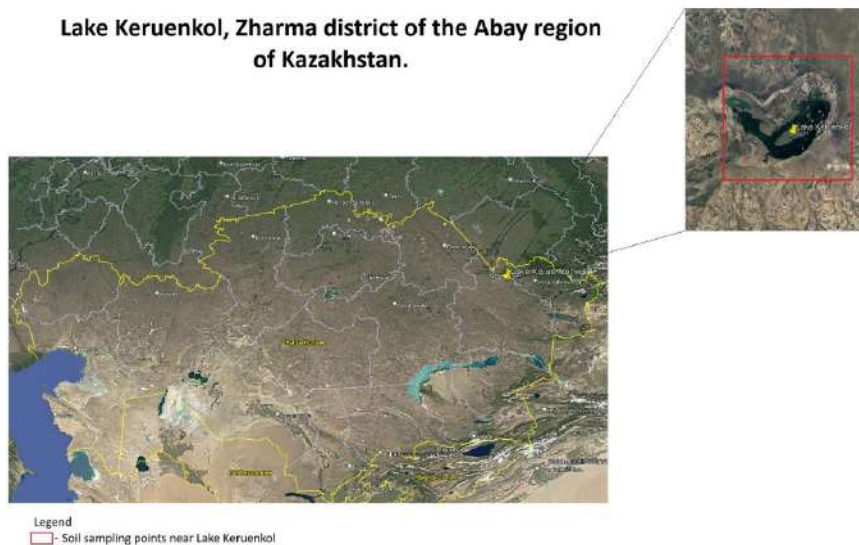
Сурет 2-де Сор көлі маңындағы зерттеу аумағы көрсетілген. Картада топырақ үлгілері жиналған нүктелердің орналасуы және олардың кеңістіктік таралуы бейнеленген. Бұл схема зерттелген аумақтың географиялық ерекшеліктерін және сынама алу процесінің құрылымын түсіндіруге көмектеседі.

Lake Sor, Ulansky District of the East Kazakhstan Region of Kazakhstan



Сурет 2. Шығыс Қазақстан облысы, Ұлан ауданы, Сор көлі маңындағы топырақ сынамалары алынған зерттеу аумағы

Сурет 3-де Керуенкөл көлі маңындағы зерттеу аумағы көрсетілген. Карта топырақ сынамалары жиналған нүктелердің орналасуын және олардың кеңістіктік ұйымдасуын бейнелейді, бұл талдау нәтижелерін аумақтық тұрғыда түсіндіруге мүмкіндік береді.



Сурет 3. Абай облысы облысы, Жарма ауданы, Керуенкөл көлі маңындағы топырақ сынамалары алынған зерттеу аумағы



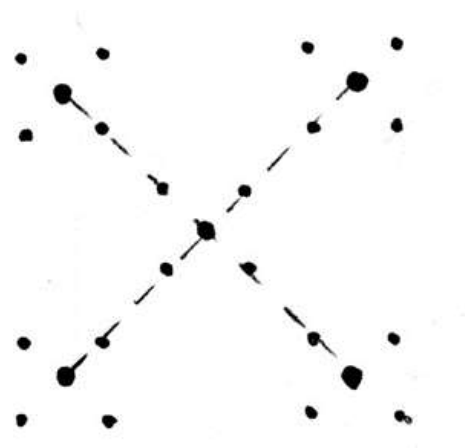
Сурет 4. Керуенкөл маңындағы топырақ үлгісі (0–20 см). Үлгі 2024 жылғы маусым айында алынды



Сурет 5. Сор көлі маңындағы топырақ үлгісі (0–20 см).



Сурет 6. Шошқалы көлі маңындағы топырақ үлгісі (0–20 см)



Сурет 7. «Конверт» әдісінің сынамалық схемасы

Бұл әдіс табиғи аумақтардағы топырақтың кеңістіктік әркелкілігін азайтып, репрезентативті (орташа) үлгі алуға мүмкіндік береді [9]. Әр учаскеден бес нүкте (төрт бұрыш және орталық) бойынша топырақ алынды, іріктеу тереңдігі 0–20 см деңгейінде белгіленді, бұл топырақтың үстіңгі генетикалық горизонттына қатысты халықаралық топырақтану нормаларына сәйкес келеді [9]. Жиналған топырақ үлгілері ауада кептіріліп, кейін 2 мм електен өткізілді, бұл стандартты зертханалық талдау талаптарына сай орындалды. Әрі қарай зерттеу рН және электр өткізгіштік (ЕС) мәндерін анықтау, негізгі иондар (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) құрамын талдау, құрғақ қалдыққа байланысты тұздану деңгейін бағалау [8], сондай-ақ Базилевич–Панкованың аниондық классификациясы бойынша топырақтың тұздану типін анықтау бағыттарында жүргізілді [11]. Барлық үлгілер зертханаға жеткізіліп, қағаз конверттерде сақталды. Зерттеу жұмысының жалпы құрылымы топырақтың физика-химиялық қасиеттерін (рН, ЕС) анықтау және алынған нәтижелерді салыстырмалы түрде бағалауға негізделді.

2.1. Лабораториялық талдау әдістері

Топырақ үлгілерін іріктеу «конверт» әдісімен жүргізілді. Әр учаскеде төрт шеткі және бір орталық нүктеден 0–20 см тереңдікте топырақ алынды. Әдіс топырақтың кеңістіктік әркелкілігін ескеруге мүмкіндік береді. рН мәні электродтық әдіспен, 1:2,5 топырақ:су қатынасындағы суспензияда өлшенді. Бұл ISO 10390:2005 халықаралық стандартына сәйкес жүргізілді [3]. Топырақтың сілтілі реакциясы тұзданған ландшафттарға тән қасиет болып табылады және иондық құрамның қалыптасуына тікелей әсер етеді.

Әр зерттеу нысаны бойынша 5 нүктеден алынған топырақ үлгілері біріктіріліп, бір орташа сынама ретінде дайындалды. Талдаулар бір реттік жүргізілгендіктен стандартты ауытқу есептелген жоқ, нәтижелер нақты өлшенген мәндер ретінде ұсынылды.

Электр өткізгіштік (ЕС) анықтау

Электр өткізгіштік 1:5 топырақ:су суспензиясында Hanna HI 8733 маркалы кондуктометр көмегімен анықталды. ЕС көрсеткіші топырақ ерітіндісіндегі еріген тұздардың жиынтық концентрациясын сипаттайтын интегралдық параметр. Ол топырақтың тұздану дәрежесін бағалауда негізгі индикатор ретінде пайдаланылады. Өлшеу 1:5 топырақ:су суспензиясында кондуктометр арқылы жүргізілді. Бұл әдіс классикалық USDA Salinity Laboratory Manual (1954) талаптарына сәйкес келеді [4], [5].

Хлорид (Cl^-) анықтау

Топырақтағы хлоридтер мөлшері Моор титрлеу әдісімен (AgNO_3 ерітіндісі) анықталды. Бұл ISO 9297:1989 стандартымен регламенттелген жоғары дәлдікті титриметриялық әдіс болып табылады [10].

Сульфат (SO_4^{2-}) анықтау

Сульфат иондары BaSO_4 тұнбасын түздіру арқылы анықталып, кейін фотометриялық әдіспен өлшенді. Бұл ISO 11048:1995 стандартына сәйкес сульфаттарды анықтаудың сенімді әдісі [14].

Натрий (Na^+) және калий (K^+) анықтау

Жалынды фотометрия әдісі қолданылды. Бұл әдіс жеңіл металл катиондарын анықтауға арналған және топырақ химиясында кеңінен танылған дәлдік деңгейімен ерекшеленеді [7], [8].

Аниондық классификация

Топырақтың тұздану типі Н.И. Базилевич және Е.И. Панковая (1986) жіктеу әдісі бойынша анықталды. Бұл классификация топырақтың негізгі аниондары — CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} — арасындағы өзара қатынастарға негізделеді [11].

Аталған әдіс табиғи және техногендік тұзданған топырақтардың химиялық генезисін бағалауда халықаралық деңгейде қолданылатын негізгі тәсіл болып табылады. Н.И. Базилевич және Е.И. Панковая (1986) — халықаралық танылған классификация [11]

Топырақ тұздылығы дәстүрлі түрде топырақ ерітіндісіндегі құрғақ қалдықпен бағаланады [8]. Тікелей өлшеу жүргізілмегендіктен, ЕС және ерігіш анион–катиондар негіз ретінде пайдаланылды.

Гигроскопиялық ылғалдың маңызы классикалық педология еңбектерінде көрсетілген [9].

Топырақтағы тұздардың химиялық типтері аниондар негізінде анықталды — (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) [11].

Топырақ тұздылығын бағалау, дәстүрлі түрде, топырақ ерітіндісіндегі құрғақ қалдық мөлшеріне негізделеді [8]. Құрғақ қалдық — топырақ ерітіндісін толық буландырғаннан кейін қалған жалпы еріген тұздар массасы. Осы көрсеткішке қарай топырақтың тұздану деңгейі немесе жекелеген горизонттарының тұздану дәрежесі анықталады (1-кесте).

Кесте 1

Топырақтың құрғақ қалдығына негізделе отырып тұздылық деңгейін бағалау

Топырақтың тұздылық деңгейі бойынша жіктелінуі	Құрғақ қалдық %
Тұзсыз	0,25-0,30
Әлсіз тұзды	0,30-0,50
Орташа тұзды	0,50-1,0
Қатты тұзды	1,0-2,0
Тұзды батпақтар	2,0-4,0

Біздің зерттеуімізде құрғақ қалдық тікелей өлшенбегенімен, тұздылық деңгейін сипаттайтын электр өткізгіштік (ЕС) және суға еритін иондардың (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) концентрациялары анықталды. ЕС мәндері құрғақ қалдықпен тығыз байланыста болғандықтан, топырақтың тұздану дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді.

Гигроскопиялық ылғал ұғымы топырақты талдау кезінде маңызды түсініктердің бірі болып табылады. Лабораториялық талдау, әдетте, ауалы-құрғақ күйде жүргізіледі, ал нәтижелері абсолютті құрғақ массаға қайта есептеледі. Сол себепті топырақ құрамындағы гигроскопиялық ылғал үлесін білу қажет. Гигроскопиялық ылғал – бұл топырақтың ауадан сіңірген және 100–105 °C температурада кептіргенде бөлінетін су мөлшері. Оның шамасы топырақтың су сыйымдылығын, пайдалы және тиімсіз ылғал қорының қатынасын бағалауда қолданылады.

Топырақ тұздылығы құрамындағы тұздар түріне байланысты әртүрлі типтерге бөлінеді [9]. Негізгі аниондарға (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) қарап тұзды топырақтар төмендегідей сипатталады:

Кесте 2

Тұзды топырақтардағы аниондардың түрлері бойынша сипаттама (Н.И. Базилевич, Е.И. Панковская бойынша)

Карбонатты	тұздардың арасында карбонаттар басым болады (карбонаттар CO_3^{2-} және бикарбонаттар HCO_3^-)
Хлоридті	тұздардың арасында хлоридтер күрт жоғарылайды (Cl^-)
Сульфатты	тұздардың арасында сульфаттар күрт жоғарылайды (SO_4^{2-})
Сульфатты-карбонатты	тұздардың арасында сульфаттар мен карбонаттар кездеседі, алайда карбонаттардың мөлшері сульфатқа қарағанда жоғары болады
Сульфатты-хлоридті	тұздардың арасында сульфаттар мен хлоридтер кездеседі, алайда хлоридтердің мөлшері сульфатқа қарағанда жоғары болады

Карбонатты – тұздардың арасында карбонаттар (CO_3^{2-}) мен бикарбонаттар (HCO_3^-) басым;

Хлоридті – тұздардың арасында хлоридтер (Cl^-) күрт жоғарылайды;

Сульфатты – тұздардың арасында сульфаттар (SO_4^{2-}) басым;

Сульфатты-карбонатты – сульфаттар мен карбонаттар бірге кездеседі, карбонаттардың мөлшері сульфаттан жоғары;

Сульфатты-хлоридті – тұздардың арасында сульфаттар мен хлоридтер басым, бірақ хлоридтердің үлесі жоғарырақ. Зертханалық талдаулар Шәкәрім университетінің зертханасы базасында жүргізілді.

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Тәжірибелік зерттеулер нәтижесінде Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтардың физика-химиялық қасиеттері, тұздану дәрежесі және суға еритін негізгі иондардың концентрациялары анықталды. Бұл нәтижелер аймақтарда тұздардың жинақталу қарқыны жоғары екенін, ал топырақ режимі табиғи солончактар үшін тән сипаттарға толық сәйкес келетінін көрсетті. Алынған деректер 3-кестеде берілген және оларды салыстырмалы талдау аймақтардың тұздану генезисін тереңірек түсінуге мүмкіндік береді [1], [3], [4], [15], [20].

Кесте 3

Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтардың физика-химиялық қасиеттері және иондық құрамы

Көл	pH	ЕС (дС/м)	Na ⁺ (мг/кг)	K ⁺ (мг/кг)	Cl ⁻ (мг/кг)	SO ₄ ²⁻ (мг/кг)	Тұздылық дәрежесі
Керуенкөл	8,2	9,8	2300	220	1850	750	Орташа тұзданған
Сор	8,8	13,2	3600	270	2700	1200	Күшті тұзданған
Шошқалы	8,0	7,5	1750	190	1300	600	Әлсіз-орташа тұзданған

Жоғарыда көрсетілген нәтижелерге сүйенсек, үш учаскенің де топырағы сілтілі реакцияға ие (pH 8,0–8,8). Электр өткізгіштік мәндері ЕС = 7,5–13,2 дС/м аралығында өзгеріп, топырақтың орташа және күшті тұзданғанын көрсетеді.

Топырақтың улы тұздар мөлшеріне байланысты жіктелуі Н.И. Базилевич және Е.И. Панковская әдісімен жүргізілді [11]. Бұл әдісте негізгі критерий ретінде Cl^- және SO_4^{2-} иондарының арақатынасы ($\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$) алынады. Жіктелудің қысқаша сызбасы төмендегідей:

Кесте 4

Н.И. Базилевич, Е.И. Панковая бойынша топырақтың улы тұздар мөлшеріне байланысты жіктелуі (қысқаша)

Тұздылық типі	Cl ⁻ :SO ₄ ²⁻ қатынасы
Хлоридті	≥ 2,5
Сульфатты- хлоридті	1,0 – 2,5
Сульфатты	≤ 1,0
Сульфатты немесе хлоридті-гидрокарбонатты сілтілі топырақ	HCO ₃ ⁻ :Cl ⁻ > 1 немесе HCO ₃ ⁻ :SO ₄ ²⁻ > 1

Зерттелген топырақтар бойынша Cl⁻ және SO₄²⁻ концентрациялары негізінде Cl⁻:SO₄²⁻ қатынастары есептелді (5-кесте). 5-кестедегі мәліметтерге сәйкес, үш көл маңындағы топырақтардың барлығында да Cl⁻:SO₄²⁻ қатынасы 2,17 – 2,47 аралығында. Бұл Н.И. Базилевич және Е.И. Панковая ұсынған критерийлерге сай сульфатты-хлоридті тұздану типіне жатады (Cl⁻:SO₄²⁻ = 2,5–Шошқалы учаскесінде қатынас шамасы сәл төмен болғанымен, ол да сульфатты-хлоридті тип шегінде орналасқан.

Кесте 5

Керуенкөл, Сор және Шошқалы топырақтарындағы Cl⁻:SO₄²⁻ қатынасы (Н.И. Базилевич, Е.И. Панковая әдісі бойынша)

Көл	Cl ⁻ (мг/кг)	SO ₄ ²⁻ (мг/кг)	Cl ⁻ :SO ₄ ²⁻	Тұздану типі (бойынша жіктеу)
Керуенкөл	1850	750	2.47	Сульфатты-хлоридті
Сор	2700	1200	2.25	Сульфатты-хлоридті
Шошқалы	1300	600	2.17	Сульфатты-хлоридті (хлоридтіге жақын)

Осылайша, Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтарда улы тұздардың (хлоридтер мен сульфаттардың) мөлшері жоғары, тұздану дәрежесі орташа мен күшті деңгейде, ал тұздану типі негізінен сульфатты-хлоридті екені анықталды. Бұл нәтижелер зерттелген аймақтардың табиғи-антропогендік тұздану процестеріне ұшырағанын және фиторемедиация сияқты биологиялық әдістерді қолдану қажеттілігін көрсетеді. Неге тұздану типін анықтауда тек екі ион (Cl⁻ және SO₄²⁻) қолданылады.

Топырақтың тұздану типін анықтау кезінде барлық аниондар (CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻) талданғанымен, ғылыми классификация тұздың басым түрін белгілеу үшін тек екі негізгі анионды — Cl⁻ және SO₄²⁻ пайдаланады. Бұл халықаралық әдістеменің бірнеше дәлелі бар.

Топырақтың тұздану типін анықтауда қолданылатын Базилевич Панковая классификациясы Cl⁻ және SO₄²⁻ иондарының арақатынасына негізделеді және шөлейт пен құрғақ аймақтарға тән топырақтарды жіктеуде ең дәл тәсілдердің бірі болып саналады [11]. Бұл әдіс бойынша қатынас 2.5 және одан жоғары болса топырақ хлоридті, 1.0 мен 2.5 аралығында болса сульфатты хлоридті, ал 1.0 деңгейінен төмен болса сульфатты типке жатады [11]. Мұндай жіктелудің ғылыми негізі Cl⁻ және SO₄²⁻ табиғи тұзданған топырақтардағы негізгі аниондар болып табылуымен түсіндіріледі, себебі Қазақстан аумағындағы сортаң және тұзданған топырақтарда еріген тұздардың 70–90 пайызы осы екі анионнан тұрады [18]. FAO 2020 және USDA 2014 деректері бойынша карбонаттар мен бикарбонаттар өте төмен мөлшерде кездеседі, ал Cl⁻ және SO₄²⁻ тұзданудың негізгі маркерлері ретінде ең жоғары сенімділікке ие [19], [20]. Карбонаттардың тұрақсыздығы олардың тұздану типін анықтауда жарамсыз екенін көрсетеді, себебі рН ауысқанда, кальциймен әрекеттескенде немесе ылғал төмендеген жағдайда олар көмірқышқыл

газына айналып немесе тұнбаға түсу арқылы топырақ ерітіндісінен тез жоғалады [21]. Ал Cl^- және SO_4^{2-} иондары химиялық тұрақтылығымен, топырақта жиналу қабілетімен және булану артқан сайын концентрациясының өсуімен ерекшеленеді, бұл олардың тұздардың геохимиялық эволюциясын дәл көрсетуін қамтамасыз етеді [22]. Сондықтан бұл аниондар топырақтың тұздану процесінің ең сенімді индикаторлары болып саналады. Cl^- булану қарқындылығын, жеңіл еритін тұздардың басымдығын және $NaCl$ құрамының жоғары болуын бейнелесе, SO_4^{2-} гипс және сульфатты минералдардың болуын, екінші реттік немесе техногендік тұздануды және ауыр еритін тұздардың жинақталуын көрсетеді [22], [23]. Катиондар Na^+ Ca^{2+} Mg^{2+} тұз мөлшерін көрсетуімен шектеледі және тұздың типін айқындауға жарамсыз, себебі хлоридті және сульфатты тұздану жағдайларының екеуінде де натрийдің деңгейі жоғары болуы мүмкін [23]. Осы барлық факторларды ескере отырып Cl^- және SO_4^{2-} қатынасына негізделген тұздану типін анықтау әдісі халықаралық деңгейде мойындалған және тұзды топырақтардың генетикалық ерекшеліктерін сипаттауда ең сенімді тәсіл ретінде қолданылады. Cl^- және SO_4^{2-} иондарының қатынасы — тұзды топырақтардың генетикалық типін анықтаудың халықаралық деңгейде мойындалған көрсеткіші. Бұл екі анион топырақтың химиялық эволюциясын ең дәл сипаттайды, ал басқа аниондар (CO_3^{2-} , HCO_3^-) тұрақсыз, катиондар (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) тұз типін көрсете алмайды.

$$Cl:SO_4^{2-} = \frac{Cl^-(\text{мг/кг})}{SO_4^{2-}(\text{мг/кг})} \quad (1)$$

Кесте 6

Аниондық құрамды талдау Cl^- және SO_4^{2-} концентрациялары бойынша $Cl^-:SO_4^{2-}$ қатынасы есептелді: (Н.И. Базилевич, Е.И. Панковская әдісі бойынша)

Көл	Cl^- (мг/кг)	SO_4^{2-} (мг/кг)	Есеп
Керуенкөл	1850	750	1850/750=2,47
Сор	2700	1200	2700/1200=2,25
Шошқалы	1300	600	1300/600=2,17

Базилевич–Панкованың жіктеуіне сәйкес топырақтың тұздану типі Cl^- және SO_4^{2-} иондарының өзара қатынасы арқылы анықталады. Егер $Cl^-:SO_4^{2-}$ қатынасы 2,5-тен жоғары болса, топырақ хлоридті типке жатады; көрсеткіш 1,0–2,5 аралығында болған жағдайда топырақ сульфатты-хлоридті типке жатады; ал қатынас 1,0-ден төмен болса, топырақ сульфатты тұздану типіне тән деп бағаланады.

Зерттелген үш учаскеде Cl^- және SO_4^{2-} концентрацияларына негізделген $Cl^-:SO_4^{2-}$ қатынастары 2.17–2.47 аралығында болды, бұл олардың барлығының сульфатты хлоридті типке толық сәйкес келетінін көрсетеді [11]. Шошқалы учаскесіндегі 2.17 мәні хлоридті типке жақын өтпелі сипатқа ие екенін байқатса, Керуенкөл учаскесіндегі 2.47 көрсеткіші сульфатты хлоридті аймақтың жоғарғы шекарасына жақындай түседі [11]. Топырақтың тұздану типін анықтау кезінде барлық негізгі аниондар қарастырылғанымен (CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), халықаралық тәжірибеде тұздың басым химиялық құрамын анықтауда ең сенімді екі маркер ретінде тек Cl^- және SO_4^{2-} пайдаланылады [18]. Бұл тәсілдің негізі Базилевич Панковская ұсынған классификацияға сүйенеді, онда тұздану типі Cl^- пен SO_4^{2-} қатынасына қарай анықталады: қатынас 2.5 және одан жоғары болса топырақ хлоридті, 1.0–2.5 аралығында болса сульфатты хлоридті, ал 1.0 төмен болса сульфатты типке жатады [11]. Мұндай жіктеудің тиімділігі оның шөлейт және құрғақ аймақтарда қалыптасқан тұздану процестерін дәлірек сипаттауымен байланысты, бұл аймақтарда булану қарқындылығы жоғары және тұздардың көтерілу механизмдері басым келеді [19].

Cl^- және SO_4^{2-} табиғи тұзданған топырақтардың негізгі аниондық компоненттері болып табылады, себебі Қазақстандағы сортаң топырақтарда еріген тұздардың 70–90 пайызы дәл осы екі ионнан тұрады деп көрсетіледі [20]. FAO 2020 және USDA 2014 материалдары бойынша көмірқышқыл және бикарбонат иондары төмен концентрацияда

кездеседі және тұздануды сипаттайтын негізгі индикатор бола алмайды, ал Cl^- мен SO_4^{2-} керісінше тұзданудың химиялық сипатын дәл көрсететін маркерлер ретінде қарастырылады [19], [20].

Карбонаттар және бикарбонаттар рН өзгерісі, ылғалдың азаюы немесе кальциймен реакцияға түсу нәтижесінде тұрақсыз болып, топырақ ерітіндісінен көмірқышқыл газы түрінде тез жойылады немесе тұнбаға түседі, сондықтан олар тұздану типін анықтауға жарамсыз [21]. Ал Cl^- және SO_4^{2-} топырақта химиялық тұрғыда тұрақты, жоғары ерігіш және булану күшейген сайын олардың концентрациясы арта түседі, бұл оларды топырақтағы тұздың геохимиялық эволюциясын көрсететін ең сенімді индикаторға айналдырады [22].

Cl^- ионы топырақтағы тұзданудың хлорлы сипатын, NaCl тұздарының басымдығын және булану қарқындылығын көрсетсе, SO_4^{2-} ионы гипс пен сульфатты минералдардың болуын, кей жағдайларда екінші реттік немесе техногендік тұздану процесстерін сипаттайды [22], [23]. Сондықтан Cl^- пен SO_4^{2-} қатынасы топырақтың тұздану генезисін анықтауда ең дәл және халықаралық деңгейде мойындалған тәсіл болып саналады. Катиондар Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} тұздың мөлшерін көрсеткенімен, оның химиялық типін айқындауға жарамсыз, себебі хлоридті және сульфатты тұздану жағдайларының екеуінде де натрийдің деңгейі ұқсас болуы мүмкін [23].

Бұл ерекшелік Cl^- және SO_4^{2-} аниондарының тұздану типін анықтаудағы маңызын одан әрі күшейтеді және осы жұмыс нәтижелерімен толық сәйкес келеді.

3.3. Талқылау және экологиялық түсіндірме

Зерттеу өңірлерінде анықталған рН, ЕС, Na^+ , Cl^- және SO_4^{2-} концентрациялары табиғи тұзданған топырақтарға тән интервалдармен толық сәйкес келеді. Бұл нәтижелер әлемнің әртүрлі аймақтарындағы тұзды топырақтарды сипаттаған жетекші ғылыми еңбектермен салыстырылып, алынған деректердің халықаралық нормаларға сай екенін көрсетті. Табиғи солончактардағы рН әдетте 8.0–9.5, ал электр өткізгіштік (ЕС) 6–20 дС/м диапазондарында болатыны белгілі [16].

Біздің зерттеу учаскелеріндегі рН (8.0–8.8) және ЕС (7.5–13.2 дС/м) көрсеткіштері дәл осы интервалдарға сәйкес келеді, бұл топырақтардың жоғары минералданғанын дәлелдейді. FAO Soils Bulletin мәліметтері бойынша тұзды топырақтарда Cl^- концентрациясы 1500–3000 мг/кг, SO_4^{2-} мөлшері 600–1500 мг/кг, ал Na^+ деңгейі 1800–3500 мг/кг аралығында өзгереді [17]. Керуенкөл, Сор және Шошқалы топырақтарында анықталған Cl^- (1300–2700 мг/кг), SO_4^{2-} (600–1200 мг/кг) және Na^+ (1750–3600 мг/кг) концентрациялары осы ғылыми диапазондарға толық сай келеді.

Тұзданған топырақтардың аниондық құрамын сипаттауда Cl^- және SO_4^{2-} иондарының арақатынасы маңызды индикатор ретінде қарастырылады [18]. Авторлар $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ қатынасы топырақтың геохимиялық дамуын, тұздану көздерін және миграциялық үдерістерін анықтауда негізгі маркер екенін көрсетеді. Біздің зерттеу нәтижелерінде бұл қатынас 2.17–2.47 диапазонында болды, бұл Базилевич–Панкованың классификациясы бойынша сульфатты-хлоридті тұздану типіне дәл сәйкес келеді [11], [19]. Шошқалы (2.17) мәндері хлоридті типке жақындаған өтпелі сипат көрсетті.

Gorji et al. (2017) зерттеулерінде электр өткізгіштік, Na^+ және Cl^- концентрациялары топырақ деградациясының сенімді индикаторлары болып саналатыны анықталған [20]. Біздің деректер осы тұжырымды қуаттап, үш зерттеу учаскесінде де тұздану дәрежесінің жоғары екенін көрсетті. Бұл аймақтарда буланудың жоғары болуы, жер бедерінің тұйық морфологиясы және жер асты суларының минералдануы тұздардың жиналуын күшейтеді, бұл құбылыс басқа құрғақ аймақтарда да байқалатыны белгілі [21], [22].

Халықаралық зерттеулермен салыстыру нәтижелері алынған көрсеткіштердің (рН, ЕС, Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , тұздану типтері) әлемдік ғылыми нормаларға толық сәйкес келетінін дәлелдеді. Бұл деректер өңірдің табиғи солончактық ландшафттарының геохимиялық

ерекшеліктерін сипаттайды және топырақ деградациясының қарқындылығын бағалауға мүмкіндік береді [23], [24], [25].

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл зерттеу Қазақстанның құрғақ және жартылай құрғақ аймақтарында кең таралған тұзданған топырақтардың физика-химиялық қасиеттерін анықтауға бағытталып, Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтардың жоғары минералданған, сілтілі реакциялы және ерігіш тұздарға қанық екенін көрсетті. Мұндай жағдайлар аймақтың климаттық және гидрогеологиялық ерекшеліктеріне тән құбылыс болып табылады [1], [2], [6]. Топырақтағы рН көрсеткішінің 8,0–8,8 аралығында болуы және электр өткізгіштік мәндерінің 7,5–13,2 дС/м деңгейінде анықталуы олардың орташа және күшті тұзданған топырақтарға жататынын дәлелдейді [4], [12], [16]. Натрий (Na^+), хлорид (Cl^-) және сульфат (SO_4^{2-}) иондарының концентрациялары табиғи солончақтардағы қалыпты интервалдармен толық сәйкес келеді. Rengasamy (2006) зерттеуінде тұзданған топырақтарда рН әдетте 8,0–9,5 аралығында, ал ЕС 6–20 дС/м шамасында болатыны көрсетілген [17]. Abrol et al. (1988) еңбектерінде Cl^- мөлшерінің 1500–3000 мг/кг, SO_4^{2-} деңгейінің 600–1500 мг/кг, Na^+ концентрациясының 1800–3500 мг/кг интервалында болатыны келтірілген [18]. Szabolcs (1989) жұмыстары да табиғи солончақтардағы тұз құрамының осы интервалдарға сәйкес келетінін атап өтеді [19]. Біздің далалық көрсеткіштер бұл мәндермен үйлесіп, аймақ топырақтарының шынайы тұздану дәрежесін растайды.

Топырақтың тұздану типін анықтауда шешуші рөл атқаратын $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ қатынасы барлық үш учаскеде 2,17–2,47 шамасында болды. Бұл Базилевич–Панкованың тұздану типологиясы бойынша сульфатты-хлоридті типке толық сәйкес келеді [11]. Шошқалы көрсеткіші (2,17) хлоридті типке жақын өтпелі сипаттың бар екенін білдіреді, ал Керуенкөл көрсеткіші (2,47) жоғарғы шекараға жақын орналасқан, бұл аймақтағы булану мен тұз миграциясының жоғары екенін меңзейді [3], [5]. ЕС, Na^+ , Cl^- және SO_4^{2-} мәндерінің жоғары болуы топырақ профиліндегі тұздардың жоғары концентрациямен жиналуын және олардың булану арқылы терең қабаттардан бетке көтерілуін көрсетеді [20], [21]. Бұл құбылыс аридті аймақтарда кең таралған және топырақ құрылымына тікелей әсер етеді: Na^+ иондары дисперсияны күшейтіп, агрегаттардың беріктігін төмендетеді; Cl^- және SO_4^{2-} тұздары өсімдік тамырлары үшін қолайсыз орта қалыптастырады [7], [8]. Жалпы алынған нәтижелер топырақтың жоғары тұзданғанын, құрылымдық тұрақтылықтың әлсірегенін, су өткізгіштіктің төмендегенін және ауыл шаруашылығына жарамдылықтың айтарлықтай шектелгенін көрсетеді [6], [15], [22]. Бұл факторлар жер ресурстарын басқаруда ерекше ескерілуі талап етеді.

Практикалық тұрғыдан алғанда, топырақтың иондық құрамын терең зерттеу тұзданған аумақтарды картаға түсіру, жердің деградация дәрежесін бағалау және мелиорациялық стратегияларды негіздеу үшін аса маңызды [23], [24]. Зерттеу нәтижелері егістік және жайылымдық жерлердің өнімділігінің төмендеу себептерін түсіндіруге, сондай-ақ антропогендік немесе табиғи факторлар әсерінен тұз жиналған аумақтарды қалпына келтірудің тиімді жолдарын жоспарлауға мүмкіндік береді. Зерттеудің белгілі шектеулері бар: талдаулар маусымдық динамиканы қамтымайды, тұздардың жылдық миграциясы, гидрогеологиялық процестердің маусымдық әсерлері және топырақ морфологиясы жеке қарастырылмады. Болашақта Cl^- және SO_4^{2-} динамикасын жыл бойы бақылау, тұз миграциясының кеңістіктік үлгілерін зерттеу, топырақтың физикалық қасиеттерін егжей-тегжейлі талдау маңызды болмақ [25], [26].

Қорытындылай келе, Керуенкөл, Сор және Шошқалы көлдері маңындағы топырақтар табиғи солончақтарға тән жоғары тұзданумен, сілтілі реакциямен және анион-катиондық құраммен ерекшеленеді. Тұздану типі – сульфатты-хлоридті, тұздану дәрежесі – орташа және күшті. Бұл мәліметтер аймақтың экологиялық жағдайын бағалау, топырақ

деградациясының бағытын болжау және жер ресурстарын басқару стратегияларын ғылыми негіздеу үшін маңызды база болып табылады.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректер қашықтықтан зондау (RS) технологияларын пайдалана отырып, авторлар жүргізген тәуелсіз талдаудың нәтижесі болып табылады.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – АҚ, ЖР; басқару деректері – АҚ, РМТ; формалды талдау – АҚ; әдіснама – АҚ, ЖР; визуализация – АҚ, РМТ; бастапқы жобаны жазу – АҚ; шолу жазу және өңдеу – АҚ.

ҚАРЖЫЛАНДЫРУ

Зерттеу мақсатты қаржыландырусыз жүргізілді және PhD бағдарламасында оқу процесінде докторанттың жеке ғылыми жобасы аясында жүзеге асырылды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Rengasamy P. World salinization with emphasis on Australia // *Journal of Experimental Botany*. – 2006. – Vol. 57(5). – P. 1017–1023.
2. FAO. Global Map of Salt-Affected Soils. FAO Soils Bulletin. – Rome, 2020.
3. ISO 10390:2005. Soil quality — Determination of pH. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
4. Richards L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Handbook No. 60. – Washington, 1954.
5. Szabolcs I. Salt-Affected Soils. – Boca Raton: CRC Press, 1989. – 274 p.
6. Abrol I.P., Yadav J.S.P., Massoud F.I. Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin №39. – Rome, 1988.
7. Hillel D. Salinity Management for Sustainable Irrigation. – World Bank, 2000. – 92 p.
8. Jackson M.L. Soil Chemical Analysis. – Prentice Hall, 1973. – 498 p.
9. ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. – Москва: Стандартинформ, 1989.
10. ISO 9297:1989. Water quality — Determination of chloride — Silver nitrate titration method. – Geneva, 1989.
11. Базилевич Н.И., Панковская Е.И. Солончаковые почвы и их классификация. – Москва: Наука, 1986. – 240 с.
12. Арыстанбеков Т.А. Вторичное засоление почв Казахстана. – Алматы: КазНАУ, 2019. – 164 с.
13. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // *Annual Review of Plant Biology*. – 2008. – Vol. 59. – P. 651–681.
14. ISO 11048:1995. Soil quality — Determination of sulfate. – Geneva, 1995.
15. Suleimenov M., Bulgakov N. Soil degradation trends in Northern Kazakhstan // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2020. – Vol. 192. – P. 655.
16. Gorji T., Sertsu S., Shukla S. Soil salinity and degradation indicators in arid lands // *Catena*. – 2017. – Vol. 150. – P. 181–193.
17. FAO. Guidelines for Soil Profile Description. – 3rd ed. – Rome, 1985.
18. Gupta R.K., Abrol I.P. Salt-affected soils: their reclamation and management. – ICAR Publication, 2000.
19. Gupta S., Sharma P. Soil salinity processes and environmental impacts // *Environmental Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 72. – P. 2569–2582.
20. Qadir M., et al. Salt-affected soils and their management // *CAB Reviews*. – 2014. – Vol. 9. – P. 1–14.
21. Tanji K.K. Agricultural Salinity Assessment and Management. – ASCE Manuals, 1990. – 619 p.
22. Bray R.H., Kurtz L.T. Mineral ion behavior in saline soils // *Soil Science*. – 1945. – Vol. 59. – P. 39–45.
23. Chowdhury A., Takemura Y. Geochemical behavior of salts in evaporative soils // *Geoderma*. – 2018. – Vol. 314. – P. 10–20.
24. Thomas G.W. Soil pH and Soluble Salts // *In Methods of Soil Analysis, Part 3*. – ASA, 1996. – P. 475–490.
25. Bloom P.R., Skyberg J. Climate-induced soil salinization patterns // *Soil Systems*. – 2019. – Vol. 3(2). – Article 29.
26. Wang L., Yang P. Hydrogeochemical evolution in salt-affected arid soils // *Journal of Arid Environments*. – 2021. – Vol. 190. – 104123.

REFERENCES

1. Rengasamy P. World salinization with emphasis on Australia // *Journal of Experimental Botany*. – 2006. – Vol. 57(5). – P. 1017–1023.
2. FAO. Global Map of Salt-Affected Soils. FAO Soils Bulletin. – Rome, 2020.
3. ISO 10390:2005. Soil quality — Determination of pH. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
4. Richards L.A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Handbook No. 60. – Washington, 1954.
5. Szabolcs I. Salt-Affected Soils. – Boca Raton: CRC Press, 1989. – 274 p.
6. Abrol I.P., Yadav J.S.P., Massoud F.I. Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin №39. – Rome, 1988.
7. Hillel D. Salinity Management for Sustainable Irrigation. – World Bank, 2000. – 92 p.
8. Jackson M.L. Soil Chemical Analysis. – Prentice Hall, 1973. – 498 p.
9. ГОСТ 28168–89. Почвы. Отбор проб. – Москва: Стандартинформ, 1989.
10. ISO 9297:1989. Water quality — Determination of chloride — Silver nitrate titration method. – Geneva, 1989.
11. Bazilevich N.I., Pankovaya E.I. Solonchakovye pochvy i ikh klassifikatsiya. – Moskva: Nauka, 1986. – 240 с.

12. Arystanbekov T.A. Vtorichnoe zasolenie pochv Kazakhstana. – Almaty: KazNAU, 2019. – 164 s
13. Munns R., Tester M. Mechanisms of salinity tolerance // Annual Review of Plant Biology. – 2008. – Vol. 59. – P. 651–681.
14. ISO 11048:1995. Soil quality — Determination of sulfate. – Geneva, 1995
15. Suleimenov M., Bulgakov N. Soil degradation trends in Northern Kazakhstan // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192. – P. 655.
16. Gorji T., Sertsu S., Shukla S. Soil salinity and degradation indicators in arid lands // Catena. – 2017. – Vol. 150. – P. 181–193.
17. FAO. Guidelines for Soil Profile Description. – 3rd ed. – Rome, 1985.
18. Gupta R.K., Abrol I.P. Salt-affected soils: their reclamation and management. – ICAR Publication, 2000.
19. Gupta S., Sharma P. Soil salinity processes and environmental impacts // Environmental Earth Sciences. – 2014. – Vol. 72. – P. 2569–2582.
20. Qadir M., et al. Salt-affected soils and their management // CAB Reviews. – 2014. – Vol. 9. – P. 1–14.
21. Tanji K.K. Agricultural Salinity Assessment and Management. – ASCE Manuals, 1990. – 619 p
22. Bray R.H., Kurtz L.T. Mineral ion behavior in saline soils // Soil Science. – 1945. – Vol. 59. – P. 39–45.
23. Chowdhury A., Takemura Y. Geochemical behavior of salts in evaporative soils // Geoderma. – 2018. – Vol. 314. – P. 10–20.
24. Thomas G.W. Soil pH and Soluble Salts // In Methods of Soil Analysis, Part 3. – ASA, 1996. – P. 475–490.
25. Bloom P.R., Skyberg J. Climate-induced soil salinization patterns // Soil Systems. – 2019. – Vol. 3(2). – Article 29.
26. Wang L., Yang P. Hydrogeochemical evolution in salt-affected arid soils // Journal of Arid Environments. – 2021. – Vol. 190. – 104123.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УРОВНЕЙ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ ВБЛИЗИ СОЛЕННЫХ ОЗЕР (НА ПРИМЕРЕ КАЗАХСТАНА)

Асанали Кабдулмажитұлы^{1*}, Асель.К Мурзалимова², Жанар. Рахымжан¹, Румия.М Тазитдинова^{1,2}, Айна.А Рысмагамбетова³

1 Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан; akabdulmazhituly@bk.ru, r.zhanar80@mail.ru, tazitdinova_rm@enu.kz

2 НАО «Университет имени Шакарима», Семей, Казахстан; murzalimova78@mail.ru

3 Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан; Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz

* Автор корреспонденции: Асанали Кабдулмажитұлы, akabdulmazhituly@bk.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

засоленные почвы, электропроводность, анионный состав, $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ соотношение, сульфатно-хлоридное засоление, солончаки, Керуенколь, Сор, Шошкалы

По статье:

Получено: 22.01.2026

Пересмотрено: 05.03.2026

Принято: 18.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Данное исследование посвящено сравнительной оценке уровня засоления и физико-химических свойств почв в районе озер Керуенколь, Сор и Шошкалы, расположенных в Абайской и Восточно-Казахстанской областях Казахстана. В ходе исследования были определены реакции почвы (рН), электропроводность (ЕС), концентрации основных водорастворимых катионов и анионов (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}), а также классифицирован тип засоления почвы на основе анионного состава. По результатам исследования на всех трех участках почвы характеризовались щелочной реакцией (рН = 8,0–8,8). Значения электропроводности варьировались в пределах 7,5–13,2 дС/м, что указывало на то, что почвы относились к категориям средней и сильной засоленности. Выявлены высокие концентрации ионов натрия, хлорида и сульфата: Na^+ – 1750–3600 мг/кг, Cl^- – 1300–2700 мг/кг, SO_4^{2-} – 600–1200 мг/кг. Анализ анионного состава почвы по методу классификации, предложенному Н.И. Базилевичем и Е. И. Панковой, показал, что соотношение $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ находится в диапазоне 2,17–2,47, что доказывает, что все изученные участки относятся к сульфатно-хлоридному типу засоления. Относительно низкий показатель на участке Шошкалы указывает на переходный характер, близкий к хлоридному типу. Полученные результаты демонстрируют, что исследуемые территории отличаются высоким уровнем засоления, щелочной реакцией и преобладанием токсичных солей, что характерно для природных солончаковых ландшафтов. Эти данные являются важной научной основой для оценки засоленных земель Казахстана, прогнозирования деградации почв и эффективного управления земельными ресурсами.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOIL SALINITY LEVELS NEAR SALT LAKES (ON THE EXAMPLE OF KAZAKHSTAN)

Asanali Kabdulmazhituly^{1*}, Asel.K Murzalimova², Zhanar. Rakhimzhan¹, Rumiya.M Tazitdinova^{1,2}, Aina.A Rysmagambetova³

1 L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; akabdulmazhituly@bk.ru (AK), r.zhanar80@mail.ru (RZh), tazitdinova_rm@enu.kz (RT)

2 “Shakarim University” NJC, Semey, Kazakhstan; murzalimova78@mail.ru (AM)

3 Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; Ayna.Rysmagambetova@kaznu.edu.kz (AR)

* The author is a correspondent: Asanali Kabdulmazhituly, akabdulmazhituly@bk.ru

KEY WORDS

saline soils, electrical conductivity, anionic composition, $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ ratio, sulfate-chloride salinity, salt marshes, Keruencol, Sor, Shoshkaly

About article:

Received: 22.01.2026

Revised: 05.03.2026

Accepted: 18.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT







This study is devoted to a comparative assessment of the salinity levels and physicochemical properties of soils adjacent to Lakes Keruencol, Sor, and Shoshkaly, located in the Abai and East Kazakhstan regions. During the study, soil reactions (pH), electrical conductivity (EC), concentrations of the main water-soluble cations and anions (Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-}) were determined, and the type of soil salinity was classified based on the anionic composition. According to the results of the study, the soils on all three sites were characterized by an alkaline reaction (pH = 8.0–8.8). The values of electrical conductivity ranged from 7.5–13.2 dS/m, which indicated that the soils belonged to the categories of moderate and severe salinity. High concentrations of sodium, chloride, and sulfate ions were detected: Na^+ – 1750–3600 mg/kg, Cl^- – 1300–2700 mg/kg, SO_4^{2-} – 600–1200 mg/kg. An analysis of the anionic composition of the soil using the classification method proposed by N.I. Bazilevich and E. I. Pankova showed that the ratio of $\text{Cl}^-:\text{SO}_4^{2-}$ is in the range of 2,17–2,47, which proves that all the studied areas belong to the sulfate-chloride type of salinity. The relatively lower index at the Shoshkaly site indicates a transitional character close to the chloride type. The results obtained demonstrate that the investigated areas are distinguished by high salinity levels, alkaline reactions, and a predominance of toxic salts, typical of natural solonchak landscapes. These data serve as an important scientific basis for assessing saline lands in Kazakhstan, predicting soil degradation, and effectively managing land resources.

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



Научная статья

НАБОР АННОТИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОЕВОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ МОДЕЛЕЙ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ РАСТЕНИЙ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2} д.инж.н. , Валентин В. Смурьгин¹ , Людмила А. Городецкая¹ , Диас Құсайын¹ , Адилхан Сымагулов¹ , Надия Р. Юничева^{2,3*} к.т.н. .

¹ КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (РИМ), valentinsmurygin@gmail.com (BBC), ludmila260601@gmail.com (ЛАГ), a.symagulov@satbayev.university (АС), diac.kusain@gmail.com (ДК);

² Институт информационных и вычислительных технологий КН МНВО РК, Алматы, Казахстан; naduni@mail.ru (НPIO), ravil.muhamedyev@gmail.com (РИМ);

³ Алматинский Университет энергетики и связи им. Г. Даукеева, Алматы, Казахстан; naduni@mail.ru (НPIO);

*Автор корреспонденции: Надия Р. Юничева, naduni@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

точное земледелие, соя, детектирование, данные с БПЛА, нейронные сети, YOLOv8.

АБСТРАКТ

В статье представлен аннотированный датасет Soybean_2021_Almalaybak, предназначенный для задач автоматического анализа сельскохозяйственных территорий на основе аэрофотоснимков, полученных с использованием беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Датасет включает изображения соевых полей, охватывающие различные фазы роста растений и содержащие ручную разметку 12 классов объектов, включая культурный и сорные виды. Работа акцентирует внимание на значении полевых данных, отражающих реалистичное состояние агроландшафтов, для обучения устойчивых моделей компьютерного зрения.

В качестве базовой модели была использована YOLOv8x — современная архитектура для одновременной локализации и классификации объектов. Модель обучалась на размеченной выборке из 300 изображений без применения аугментации, что позволило получить эталонную оценку точности. Экспериментальные результаты продемонстрировали высокую эффективность модели: F1-score по классу Glycine max (соя) составил 0.933, а метрика mAP@0.5 — 0.72. Несмотря на ограниченный объём данных и частичную аннотацию, модель показала устойчивость к вариативности полевых условий и несбалансированности классов.

По статье:

Получено: 13.01.2026

Пересмотрено: 15.02.2026

Принято: 31.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Мухамедиев Р., Смурьгин В., Городецкая Л., Құсайын Д., Сымагулов А., Юничева Н. Набор аннотированных изображений соевого поля для настройки моделей детектирования растений // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 100-109.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство находится в условиях постоянного роста требований к эффективности производства, обусловленных увеличением численности населения, ограниченностью природных ресурсов и необходимостью повышения продуктивности агросистем. Одним из перспективных направлений повышения эффективности агропроизводства является внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и методов точного земледелия [1]. Как подчёркивается в работе Cosmin Pora [2], ИИ способен трансформировать аграрный сектор за счёт интеграции экспертных систем, сенсорных технологий и автономных роботов. Однако автор отмечает неравномерное распространение подобных решений, связанное с инфраструктурными, экономическими и технологическими барьерами. Несмотря на это, наблюдается устойчивая тенденция к расширению применения интеллектуальных систем в задачах мониторинга состояния посевов, автоматизации полевых работ и поддержки принятия решений.

Одной из ключевых задач в рамках точного земледелия является своевременное распознавание культурных и сорных растений. Автоматизация этих процессов с применением алгоритмов компьютерного зрения и машинного обучения позволяет

оптимизировать агротехнические мероприятия, снижая потребность в гербицидах, повышая урожайность и снижая производственные издержки [3]. Однако разработка надёжных систем для классификации и детектирования растений требует наличия репрезентативных и качественно аннотированных наборов данных, отражающих реальное разнообразие полевых условий, растений и стадий их развития.

Существующие датасеты, созданные для решения подобных задач, демонстрируют значительное разнообразие в условиях съёмки, типах культур и способах аннотирования [4, 5, 6]. Так, Crop/Weed Field Image Dataset [7] включает изображения морковных полей, полученные при помощи робота *Wopigob* на органической ферме, с аннотациями по типу растительности (культура или сорняк) и масками вегетации. Данный датасет применялся для задач фенотипирования, включая сегментацию и классификацию растений, и подчёркивает значение открытого доступа к полевым данным. Аналогичный по тематике Carrot-Weed dataset [8] также содержит изображения растений моркови и сорняков в естественных условиях освещённости, что делает его полезным для устойчивого обучения моделей.

Для задач классификации проростков растений в контролируемых условиях в исследовании [9] предложили датасет изображений 12 видов культурных и сорных растений на ранних стадиях развития. Целью работы было формирование стандартизированной базы для обучения алгоритмов точечного удаления сорняков. Несмотря на значимость этой работы, её ограничения связаны с лабораторными условиями съёмки и ограниченным набором видов, что подчёркивает необходимость создания новых датасетов, приближенных к реальным полевым условиям.

Отдельное внимание уделяется датасетам, охватывающим разнообразие видов и стадий роста растений. В работе [10] был представлен подход к автоматизированной оценке фенофаз 18 видов сорных растений на основе изображений, полученных в полевых условиях. С применением архитектуры Inception-v3 и более 11 000 аннотированных изображений достигнута точность 96 % при классификации по числу листьев с допустимым отклонением. Это подтверждает потенциал сверточных нейронных сетей в условиях высокого визуального шума сельскохозяйственного производства и демонстрирует необходимость создания разнообразных и реалистичных наборов данных.

В области изучения соевых культур и сопутствующих сорных растений особое внимание привлекает работа [11], в которой представлена система автоматического детектирования сорняков на изображениях, полученных с БПЛА. Используется более 15 000 изображений, включающих сою, почву, злаковые и двудольные сорняки, авторы обучили модель на основе архитектуры CaffeNet. Сегментация изображений осуществлялась с помощью алгоритма SLIC, а итоговая точность классификации превысила 98 %, что демонстрирует эффективность ConvNet-моделей в аграрных задачах. Несмотря на высокую ценность этого датасета, он ограничен фиксированным разрешением и типом сенсора, а также не предполагает аннотирования на уровне отдельных экземпляров растений.

В свою очередь, работа WeedMap [12] демонстрирует подход к семантической сегментации посевов с использованием мультиспектральных изображений. Съёмка осуществлялась с БПЛА, а обработка данных велась на основе метода скользящего окна и свёрточных нейронных сетей. Важным аспектом этой работы стало выравнивание спектральных каналов и радиометрическая калибровка, позволившие улучшить точность сегментации. Представленный датасет включает вручную аннотированные мультиспектральные изображения сахарной свёклы и сорняков и иллюстрирует преимущества многоаспектных изображений при решении аграрных задач.

Таким образом, несмотря на наличие различных наборов данных, ориентированных на задачи распознавания культурных и сорных растений, в открытом доступе по-прежнему ощущается дефицит изображений, полученных в реальных

условиях соевых полей, с аннотациями, пригодными для обучения современных моделей детекции объектов. В настоящей работе представлен новый аннотированный датасет, собранный в Алматинской области Казахстана с использованием дрона DJI Mavic Mini 2. Набор включает RGB-изображения высокого разрешения с разметкой культурных растений и сорняков и предназначен для обучения и валидации моделей детекции, таких как YOLOv8. Целью создания данного датасета является содействие разработке устойчивых систем автоматического мониторинга сельхозугодий и восполнение нехватки открытых полевых данных для задач точного земледелия в условиях соевых культур.

2. ОПИСАНИЕ ДАТАСЕТА

Набор данных Soybean_2021_Almalymbak представляет собой коллекцию аннотированных RGB-изображений высокого разрешения, предназначенных для обучения и тестирования алгоритмов компьютерного зрения в задачах автоматического выявления и локализации сои (*Glycine max*) и сорных растений на сельскохозяйственных угодьях. Изображения были получены с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в рамках полевых исследований, проводившихся в селе Алмалыбак Алматинской области (Казахстан), на экспериментальных участках, находящихся в ведении Казахского научно-исследовательского института земледелия и растениеводства (село Алмалыбак, Алматинская область, Казахстан; координаты: 43°13' N, 76°42' E).

Съёмка проводилась с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Mavic Mini 2 (камера FC7203). Почвы исследуемой территории — светло-каштановые, преимущественно орошаемые, с низким содержанием гумуса (1.9–2.0%) и умеренными запасами основных макроэлементов (фосфор, калий, азот). Эти участки используются в аграрных экспериментах по селекции и оптимизации методов возделывания сельскохозяйственных культур, что делает актуальными задачи автоматической идентификации культурных и сорных растений.


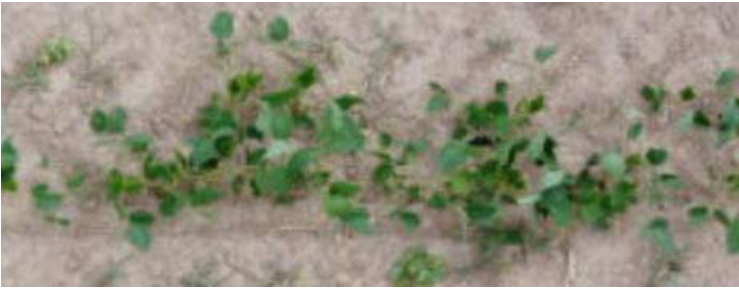

Датасет включает 968 изображений в формате JPEG, разрешением 4000×2250 пикселей (~9 Мп). Съёмки проводились в три этапа:

- 19 мая 2021 г. (~13:00) — 376 изображений (папка soybean-1), относительная высота полета — от 2.1 до 3.3 м;
- 9 июня 2021 г. (~12:00) — 200 изображений (папка soybean-2), высота полета — от 4 до 12.5 м;
- 23 июня 2021 г. (~12:00) — 392 изображения (папка soybean-3), высота полета — от 4.7 до 7.2 м.

Таблица 1 демонстрирует визуальные примеры трёх этапов роста сои, зафиксированных в ходе съёмки с беспилотного летательного аппарата. Каждый снимок представляет собой участок грядки с растущей соей, соответствующий определённой фазе развития растения. Учитывая значительное изменение плотности растительности и цветовых характеристик, изображения из разных этапов позволили учесть сезонную вариативность и повысить устойчивость обучаемых моделей к изменению условий съёмки.

Таблица 1

Примеры посевов сои, снятые в три периода роста: от ранних всходов до формирования плотного покрова

1 этап	
2 этап	
3 этап	

Съёмка выполнялась при минимальной динамике полёта с преимущественно вертикальной ориентацией камеры (угол наклона от -80° до -90°), что обеспечивает ортогональную проекцию и высокую чёткость объектов. При этом скорость движения беспилотника выдержана в пределах 1 метра в секунду.

Разметка выполнена вручную с использованием платформы CVAT в формате, совместимом с YOLOv8 (bounding box). В датасете представлены 12 классов объектов, включая культурные растения, грядки и наиболее распространённые виды сорной растительности в регионе (Таблица 2).

Таблица 2

Классы аннотированных объектов (пример: 19 мая 2021 г.)

№	Класс	Латинское название	Количество объектов (на первом этапе съёмки)
0	Грядка	Bed	2458
1	Соя	<i>Glycine max</i>	42 282
2	Ширица обыкновенная	<i>Amaranthus retroflexus</i>	6155
3	Вьюнок полевой	<i>Convolvulus arvensis</i>	385
4	Щетинник сизый	<i>Setaria glauca</i>	1897
5	Дурнишник обыкновенный	<i>Xanthium strumarium</i>	513
6	Осот розовый	<i>Cirsium arvense</i>	532
7	Просо куриное	<i>Echinochloa crusgalli</i>	0
8	Гибискус тройчатый	<i>Hibiscus trionum</i>	15

9	Канатник Теофраста	<i>Abutilon theophrasti</i>	27
10	Марь белая	<i>Chenopodium album</i>	0
11	Метлица полевая	<i>Apera spica-venti</i>	0

Рисунок 1 демонстрирует пример размеченного изображения с цветовой кодировкой классов: растения сои обозначены зелёным, грядки — красным, *Amaranthus retroflexus* — жёлтым, *Convolvulus arvensis* — голубым и т.д. Видна высокая плотность культурных растений в пределах грядок и более разреженное распределение сорной растительности. Пример иллюстрирует характерную пространственную структуру поля, разнообразие классов, а также уровень визуальной сложности, с которым сталкиваются алгоритмы при обучении и валидации.

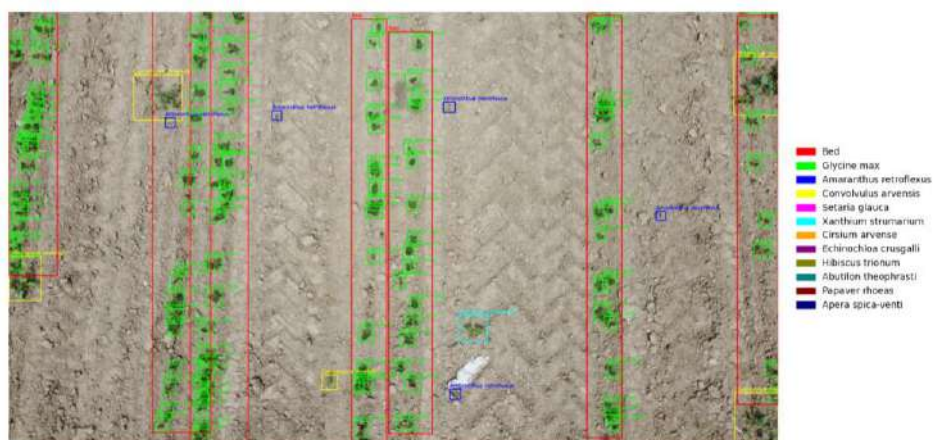


Рисунок 1. Пример аннотированного изображения из набора данных Soybean_2021_Almalymbak

Таблица 3 представляет собой визуальную справку по основным видам сорной растительности, аннотированной в датасете Soybean_2021_Almalymbak. В таблице 3 приведены фотографии сорных растений, сделанные в полевых условиях на территории Южного Казахстана, а также указаны их русские и латинские названия. Эти виды являются наиболее распространёнными на сельскохозяйственных угодьях региона и представляют интерес для задач автоматической идентификации в агротехническом мониторинге. Эти изображения могут быть использованы в качестве наглядного пособия при аннотировании новых изображений, а также для проверки корректности работы алгоритмов компьютерного зрения.

Таблица 3

Примеры сорной растительности, произрастающей в Казахстане.

Ширица обыкновенная (<i>Amaranthus retroflexus</i>)	Вьюнок полевой (<i>Convolvulus arvensis</i>)	Щетинник сизый (<i>Setaria glauca</i>)	Дурнишник обыкновенный (<i>Xanthium strumarium</i>)	Осот розовый (<i>Cirsium arvense</i>)
---	--	--	---	---



Просо куриное
(*Echinochloa crusgalli*)-

Гибискус тройчатый
(*Hibiscus trionum*)

Канатник Теофраста
(*Abitilon theophrasti*)

Марь белая
(*Chenopodium album*)

Метлица обыкновенная, полевая
(*Apera spica-venti*)



Датасет не подвергался аугментации или другим видам предобработки.

3. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Архитектура модели

Для решения задачи одновременной классификации и детекции сельскохозяйственных объектов на аэрофотоснимках соевых полей была использована модель YOLOv8 [13], относящаяся к семейству алгоритмов You Only Look Once (YOLO) [14], зарекомендовавшему себя как один из наиболее эффективных подходов к детекции объектов.

Модификация YOLOv8x была выбрана в силу своей высокой производительности и способности обрабатывать изображения с ограниченным количеством размеченных данных — что особенно актуально в аграрной сфере, где получение качественной аннотации зачастую сопряжено с трудностями. Дополнительным преимуществом модели является высокая скорость обработки, позволяющая применять её в задачах реального времени, таких как мониторинг посевов с использованием БПЛА.

3.2 Подготовка данных и обучение модели

Собранный датасет был разделён на обучающую и тестовую выборки в соотношении 80/20, что составило 300 изображений для обучения и 76 изображений для валидации. На этапе предварительного обучения аугментация данных не применялась. Это решение было принято с целью получения эталонной оценки базовой точности модели в условиях естественной вариативности полевых изображений, включая различия в освещённости, фоновом окружении, стадиях вегетации и погодных условиях.

Модель YOLOv8x была инициализирована предварительно обученными весами, полученными на обобщённом датасете COCO (Common Objects in Context) [15], и далее дообучалась на целевом наборе изображений, содержащем классы интереса. Такая стратегия переноса обучения (transfer learning) позволяет значительно ускорить сходимость модели и повысить качество предсказаний при наличии ограниченного количества размеченных данных.

Обучение проводилось в течение 300 эпох при размере батча 8 и размере входного изображения 640×640 пикселей. Указанные параметры позволили достичь сбалансированного соотношения между качеством распознавания и вычислительной эффективностью в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

В дальнейшем возможно применение различных техник расширения обучающей выборки, включая геометрическую и фотометрическую аугментацию, а также использование методов семантической сегментации для улучшения качества аннотаций.

3.3 Метрики оценки

Для комплексной оценки качества работы модели использовался набор как классификационных, так и детекционных метрик:

- Классификационные метрики: Precision, Recall, F1-score (как микро-, так и макроусреднённый), а также F1-score по отдельному классу (соя);

- Метрики локализации объектов: Intersection over Union (IoU), Average Precision (AP) для отдельных классов и Mean Average Precision (mAP) при различных порогах перекрытия (mAP@0.5 и mAP@0.5–0.95).

Результаты модели на валидационном наборе данных:

- mAP@0.5: 0.72
- mAP@0.5–0.95: 0.30
- Recall: 0.599
- Precision: 0.677
- F1-score (micro): 0.636
- F1-score (macro): 0.341
- F1-score по классу Glycine max (соя): 0.933

Использование указанных метрик позволяет оценить не только точность предсказаний модели в терминах классификации, но и её способность корректно локализовать объекты различных классов в природной среде.

3.4 Общая эффективность модели

Несмотря на наличие определённой несбалансированности классов, а также присутствие до 10% неразмеченных объектов на отдельных изображениях, модель продемонстрировала высокую устойчивость к подобным искажениям данных и хорошую способность к обобщению. Особенно высокие результаты были достигнуты при детекции сои, что подтверждается значением F1-score, превышающим 0.9.

Таким образом, модель YOLOv8x показала практическую применимость для задач автоматического мониторинга состояния посевов, даже в условиях ограниченного объёма данных и без применения дополнительных методов улучшения качества входных изображений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен аннотированный датасет Soybean_2021_Almalıybak, собранный в условиях реального сельскохозяйственного производства с использованием дрона DJI Mavic Mini 2. Набор данных охватывает 12 классов объектов и отличается высокой вариативностью изображений, что делает его ценным ресурсом для задач детекции и классификации культурных и сорных растений в аграрной сфере. В отличие от многих существующих датасетов, полученных в контролируемых условиях, предложенный набор данных ориентирован на реалистичные сценарии точного земледелия и может способствовать развитию устойчивых моделей компьютерного зрения.

Эксперименты с моделью YOLOv8x продемонстрировали высокую базовую точность даже при отсутствии аугментации и ограниченном объёме данных. F1-score по классу Glycine max составил 0.933, а mAP@0.5 — 0.72, что подтверждает применимость модели в условиях вариативной съёмки и неполной аннотации.

Полученные результаты создают основу для дальнейших исследований, направленных на повышение точности модели с помощью аугментации, семантической сегментации и активного обучения. Используемый подход открывает путь к более широкому применению методов глубокого обучения в аграрной практике и развитию интеллектуальных систем мониторинга сельскохозяйственных угодий.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

В данном исследовании использованы собственные экспериментальные данные, соответствующие тематике работы, а также опубликованные материалы зарубежных авторов в области автоматического анализа сельскохозяйственных территорий и методов компьютерного зрения. Для задач детектирования и классификации растений применялся аннотированный набор аэрофотоснимков Soybean_2021_Almalymbak, полученный с использованием беспилотного летательного аппарата в условиях реального сельскохозяйственного производства и отражающий различные фазы роста соевых культур. Датасет с ручной разметкой доступен по ссылке https://drive.google.com/drive/folders/1ObZjrP5eW3zO0bZLeFrNd347nKULgowU?usp=drive_link и может быть использован для обучения и тестирования моделей машинного обучения. Статья написана на материале собственных исследований авторов и данных научных публикаций. Результаты обучения и оценки модели детектирования растений основаны на размеченных изображениях соевых полей и рассчитанных метриках качества (F1-score, mAP@0.5), полученных при использовании нейросетевой архитектуры YOLOv8x.

ВКЛАД АВТОРОВ

Разработка концепции - РИМ, разработка методологии - ЛАГ, ресурсы, подготовка и редактирование текста, визуализация - НРЮ, создание программного обеспечения - ВВС, ДК, АС, проведение исследования - ЛАГ, ВВС.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект программно-целевого финансирования № BR24992908 «Система поддержки агротехнических мероприятий в растениеводстве на базе комплекса средств мониторинга и методов искусственного интеллекта (Agroscore)»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abbas, A., Zhang, Z., Zheng, H., Alami, M. M., Alrefaei, A. F., Abbas, Q., Naqvi, S. A. H., Rao, M. J., Mosa, W. F. A., Abbas, Q., Hussain, A., Hassan, M. Z., & Zhou, L. (2023). Drones in Plant Disease Assessment, Efficient Monitoring, and Detection: A Way Forward to Smart Agriculture. *Agronomy*, 13(6), 1524. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061524>
2. Popa, C. (2011). Adoption of artificial intelligence in agriculture. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 68(1), 1–7. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:6454>
3. Lottes, P., Hörferlin, M., Sander, S., Stachniss, C. (2017). Effective vision-based classification for separating sugar beets and weeds for precision farming. *Journal of Field Robotics*, 34(6), 1160–1178. <https://doi.org/10.1002/rob.21675>
4. Sa, I., Chen, Z., Popović, M., Khanna, R., Liebisch, F., Nieto, J., & Siegwart, R. (2017). WeedNet: Dense semantic weed classification using multispectral images and MAV for smart farming. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1), 588–595. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2774979>
5. Olsen, A., Konovalov, D. A., Philippa, B., Ridd, P., Wood, J. C., Johns, J., White, R. D. (2019). DeepWeeds: A multiclass weed species image dataset for deep learning. *Scientific Reports*, 9, 2058. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38343-3>
6. Leminen Madsen, S., Mathiassen, S. K., Dyrmann, M., Laursen, M. S., Paz, L. C., Jørgensen, R. N. (2020). Open plant phenotype database of common weeds in Denmark. *Remote Sensing*, 12(8), 1246. <https://doi.org/10.3390/rs12081246>
7. Haug, S., & Ostermann, J. (2015). A crop/weed field image dataset for the evaluation of computer vision based precision agriculture tasks. In *Computer Vision – ECCV 2014 Workshops* (pp. 105–116). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-5_8
8. Lameski, P., Zdravevski, E., Trajkovic, V., & Kulakov, A. (2017). Weed detection dataset with RGB images taken under variable light conditions. In A. Goleva, D. Trajanov, & A. Stojanovski (Eds.), *ICT Innovations 2017: Data-Driven Innovation* (pp. 112–119). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67597-8_11
9. Giselsson, T. M., Jørgensen, R. N., Jensen, P. K., Dyrmann, M., & Midtby, H. S. (2017). A public image database for benchmark of plant seedling classification algorithms. *arXiv preprint arXiv:1711.05458* <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05458>
10. Teimouri, N., Dyrmann, M., Nielsen, P. R., Mathiassen, S. K., Somerville, G. J., & Jørgensen, R. N. (2018). Weed growth stage estimator using deep convolutional neural networks. *Sensors*, 18(5), 1580. <https://doi.org/10.3390/s18051580>
11. dos Santos Ferreira, A., Freitas, D. M., da Silva, G. G., Pistori, H., Folhes, M. T. (2017). Weed detection in soybean crops using ConvNets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.027>
12. Sa, I., Popović, M., Khanna, R., Chen, Z., Lottes, P., Liebisch, F., Siegwart, R. (2018). WeedMap: A large-scale semantic weed mapping framework using aerial multispectral imaging and deep neural network for precision farming. *Remote Sensing*, 10(9), 1423.
13. [ML Paper] Explanation of all of YOLO series Part 11 - https://zenn.dev/yuto_mo/articles/14a87a0db17dfa (date of access: 15.10.2025)
14. Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016*; pp. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
15. Набор данных COCO - <https://docs.ultralytics.com/ru/datasets/detect/coco/> (date of access: 06.10.2025)

REFERENCES

1. Abbas, A., Zhang, Z., Zheng, H., Alami, M. M., Alrefaei, A. F., Abbas, Q., Naqvi, S. A. H., Rao, M. J., Mosa, W. F. A., Abbas, Q., Hussain, A., Hassan, M. Z., & Zhou, L. (2023). Drones in Plant Disease Assessment, Efficient Monitoring, and Detection: A Way Forward to Smart Agriculture. *Agronomy*, 13(6), 1524. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061524>
2. Popa, C. (2011). Adoption of artificial intelligence in agriculture. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 68(1), 1–7. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-agr:6454>
3. Lottes, P., Hörferlin, M., Sander, S., Stachniss, C. (2017). Effective vision-based classification for separating sugar beets and weeds for precision farming. *Journal of Field Robotics*, 34(6), 1160–1178. <https://doi.org/10.1002/rob.21675>.
4. Sa, I., Chen, Z., Popović, M., Khanna, R., Liebisch, F., Nieto, J., & Siegwart, R. (2017). WeedNet: Dense semantic weed classification using multispectral images and MAV for smart farming. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1), 588–595. <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2774979>
5. Olsen, A., Konovalov, D. A., Philippa, B., Ridd, P., Wood, J. C., Johns, J., White, R. D. (2019). DeepWeeds: A multiclass weed species image dataset for deep learning. *Scientific Reports*, 9, 2058. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38343-3>
6. Leminen Madsen, S., Mathiassen, S. K., Dyrmann, M., Laursen, M. S., Paz, L. C., Jørgensen, R. N. (2020). Open plant phenotype database of common weeds in Denmark. *Remote Sensing*, 12(8), 1246. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38343-3>
7. Haug, S., & Ostermann, J. (2015). A crop/weed field image dataset for the evaluation of computer vision based precision agriculture tasks. In *Computer Vision – ECCV 2014 Workshops* (pp. 105–116). Springer International Publishing.
8. Lameski, P., Zdravevski, E., Trajkovic, V., & Kulakov, A. (2017). Weed detection dataset with RGB images taken under variable light conditions. In A. Goleva, D. Trajanov, & A. Stojanovski (Eds.), *ICT Innovations 2017: Data-Driven Innovation* (pp. 112–119). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-5_8
9. Giselsson, T. M., Jørgensen, R. N., Jensen, P. K., Dyrmann, M., & Midtby, H. S. (2017). A public image database for benchmark of plant seedling classification algorithms. *arXiv preprint arXiv:1711.05458*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67597-8_11
10. Teimouri, N., Dyrmann, M., Nielsen, P. R., Mathiassen, S. K., Somerville, G. J., & Jørgensen, R. N. (2018). Weed growth stage estimator using deep convolutional neural networks. *Sensors*, 18(5), 1580. <https://doi.org/10.3390/s18051580>
11. dos Santos Ferreira, A., Freitas, D. M., da Silva, G. G., Pistori, H., Folhes, M. T. (2017). Weed detection in soybean crops using ConvNets. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.027>
12. Sa, I., Popović, M., Khanna, R., Chen, Z., Lottes, P., Liebisch, F., Siegwart, R. (2018). WeedMap: A large-scale semantic weed mapping framework using aerial multispectral imaging and deep neural network for precision farming. *Remote Sensing*, 10(9), 1423.
13. [ML Paper] Explanation of all of YOLO series Part 11 - https://zenn.dev/yuto_mo/articles/14a87a0db17dfa (date of access: 15.10.2025)
14. Redmon, J.; Divvala, S.; Girshick, R.; Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016*; pp. 779–788. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91>
15. COCO dataset - <https://docs.ultralytics.com/ru/datasets/detect/coco/> (date of access: 06.10.2025)

ӨСІМДІКТЕРДІ АНЫҚТАУ ҮЛГІЛЕРІН РЕТТЕУГЕ АРНАЛҒАН АННОТАЦИЯЛАНҒАН СОЯ АЛҚАБЫ КЕСКІНДЕРІНІҢ ЖИНАҒЫ

Равиль И. Мухамедиев^{1,2}, т.ғ.д. (инж.), Валентин В. Смурыгин¹, Людмила А. Городецкая¹, Диас Құсайын¹, Адилхан Сымагулов¹, Надия Р. Юничева^{2,3*}, т.ғ.к.

¹ К.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан; ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.), valentinsmurygin@gmail.com (В.В.С.), ludmila260601@gmail.com (Л.А.Г.), a.symagulov@satbayev.university (А.С.), diac.kusain@gmail.com (Д.Қ.);

² ҚР БҒМ Информатика және есептеу техникасы институты, Алматы, Қазақстан; naduni@mail.ru (Н.Р.Ю.), ravil.muhamedyev@gmail.com (Р.И.М.);

³ Г. Дәукенов атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан; naduni@mail.ru (Н.Р.Ю.)

*Автор-хатшы: Надия Р. Юничева, naduni@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Дәл егіншілік, соя, анықтау, Ұшқышсыз ұшу аппараттарының деректері, нейрондық желілер, YOLOv8.

АБСТРАКТ

Бұл мақалада пилотсыз ұшу аппаратын (ПҰА) пайдаланып алынған әуеден түсірілген суреттерге негізделген ауылшаруашылық алқаптарын автоматтандырылған талдауға арналған аннотацияланған Soybean_2021_Almalubak деректер жиынтығы ұсынылған. Деректер жиынтығына әртүрлі өсу кезеңдерін қамтитын және дақылдар мен арамшөп түрлерін қоса алғанда, қолмен белгіленген 12 нысан класын қамтитын соя егістіктерінің суреттері кіреді. Мақалада сенімді компьютерлік көру модельдерін оқыту үшін

Мақала жайында:

Жіберілді: 13.01.2026

Қайта қаралды: 15.02.2026

Қабылданды: 31.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

нақты ауылшаруашылық ландшафттарын көрсететін далалық деректердің маңыздылығы атап өтілген.

Базалық модель ретінде бір мезгілде объектілерді локализациялау және жіктеуге арналған заманауи архитектура YOLOv8x пайдаланылды. Модель 300 суреттен тұратын белгіленген жиынтықта үлкейтусіз оқытылды, бұл эталондық дәлдікті бағалауға мүмкіндік берді. Тәжірибелік нәтижелер модельдің жоғары өнімділігін көрсетті: Glycine max (соя) класы үшін F1-балы 0,933, ал mAP@0,5 метрикасы 0,72 болды. Деректер көлемінің шектеулі болуына және ішінара аннотацияға қарамастан, модель егістіктердің өзгергіштігі мен сынып теңгерімсіздігіне беріктігін көрсетті.

ANNOTATED IMAGE SET OF SOYBEAN FIELDS FOR TRAINING PLANT DETECTION MODELS

Ravil I. Mukhamediev^{1,2}, doc. eng. sci., Valentin V. Smurygin¹, Lyudmila A. Gorodetskaya¹, Dias Qusain¹, Adilkhan Symagulov¹, Nadiya R. Yunicheva^{2,3*} candidate of technical sciences

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; ravil.muhamedyev@gmail.com (R.M.), valentinsmurygin@gmail.com (V.S.), lyudmila260601@gmail.com (L.A.G.), a.symagulov@satbayev.university (A.S.), diac.kusain@gmail.com (D.Q.);

² Institute of Information and Computational Technologies, MES RK, Almaty, Kazakhstan; naduni@mail.ru (N.R.Y.), ravil.muhamedyev@gmail.com (R.I.M.);

³ Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan; naduni@mail.ru (N.R.Y.)

*Corresponding author: Nadiya R. Yunicheva, naduni@mail.ru

KEY WORDS

precision agriculture, soybeans, detection, UAV data, neural networks, YOLOv8.

About article:

Received: 13.01.2026

Revised: 15.02.2026

Accepted: 31.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

This article presents annotated Soybean_2021_Almalymbak dataset designed for automatic analysis of agricultural areas based on aerial photographs obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs). The dataset includes images of soybean fields covering various stages of plant growth and containing manual labelling of 12 object classes, including cultivated and weed species. The work emphasises the importance of field data reflecting the realistic state of agricultural landscapes for training robust computer vision models.




YOLOv8x, a modern architecture for simultaneous object localisation and classification, was used as the base model. The model was trained on a labelled sample of 300 images without augmentation, which allowed for a benchmark accuracy assessment. The experimental results demonstrated the high efficiency of the model: the F1-score for the Glycine max (soybean) class was 0.933, and the metric mAP@0.5 was 0.72. Despite the limited amount of data and partial annotation, the model showed resistance to variability in field conditions and class imbalance.

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



Scientific article

BIOGEOCHEMICAL FEATURES OF SOILS AND VEGETATION IN THE AREA OF THE ATOMIC LAKE OF THE FORMER SEMIPALATINSK NUCLEAR TEST SITE

Meruyert T. Zhailybayeva¹ , Rumiya M. Tazitdinova¹  PhD, Zhanar Rakhymzhan¹  PhD, Gulmira T. Kyzdarbekova²  PhD, Associate Professor

¹L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: meruyert.zhailybayeva55@gmail.com (MTZH), irm85@mail.ru (RMT), r.zhanar80@mail.ru (RZH)

²Sh. Ualikhanov Kokshetau University, Kokshetau, Kazakhstan, email: gulmira.kyzdarbekova.80@mail.ru (GTK)

Author correspondent: M.T. Zhailybayeva, e-mail: meruyert.zhailybayeva55@gmail.com

KEY WORDS

Semipalatinsk Nuclear Test Site, Atomic Lake, elemental composition, radiation contamination, soil analysis, vegetation, biological absorption coefficients, biogeochemical characteristics.

ABSTRACT

This article presents the results of a comprehensive study on the elemental composition of soils and vegetation in the area of the Atomic Lake, located within the Semipalatinsk Nuclear Test Site. The main objective of the research was to assess the concentrations and distribution patterns of chemical elements in soils and local plant species, with a particular focus on understanding the biogeochemical characteristics shaped by prolonged anthropogenic impact and radiation exposure. Fieldwork was conducted to collect representative samples of soil and vegetation, which were subsequently analyzed in the laboratory using modern analytical techniques. The obtained data underwent thorough statistical processing to identify distribution patterns of elements and to examine the relationships between elemental concentrations in soils and their uptake by plants. A comparative analysis was carried out between the concentrations of trace elements in the studied plants and those in a reference plant species. Additionally, the concentrations of trace elements in the soils were compared with the Clarke values of the upper continental crust. Special attention was given to the calculation of biological absorption coefficients, which provided valuable insights into the ability of different plant species to selectively accumulate elements. These coefficients enabled the evaluation of adaptive mechanisms developed by vegetation in response to chronic radiation stress. The findings highlight the significance of biogeochemical research for assessing environmental risks associated with nuclear contamination.

About article:

Received: 11.08.2025

Revised: 22.01.2026

Accepted: 04.03.2026

Published: 01.04.2026

For citation:

Zhailybayeva M., Tazitdinova R., Rakhymzhan Zh., Kyzdarbekova G. Biogeochemical features of soils and vegetation in the area of the atomic lake of the former semipalatinsk nuclear test site // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 110-123.

1. INTRODUCTION

Wide-scale nuclear tests conducted at the Semipalatinsk test site had a major impact on the ecological and radiological conditions of the region. One such locations is the Atomic Lake created as a result of the underground nuclear explosion in 1965. This artificial reservoir is of particular interest for research due to its impact on ecosystems [1, 2].

In the studies of scientists M.R.Aktayev, S.N.Lukashenko, A.O. Aidarkhanov et al., the Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, all the main aspects of radiation contamination of the Atomic Lake and its impact on the environment were studied thoroughly. These studies identified that the major portion of radionuclides at the Atomic Lake was accumulated in the soil pile resulted from the soil displacement after the nuclear explosion. The specific activity of man-made radionuclides in the pile soil is 4000 Bq/kg of²⁴¹Am, 15000 Bq/kg of¹³⁷Cs, 17000 Bq/kg of²³⁹ + ²⁴⁰Pu, 10000 Bq/kg of⁹⁰Sr, 65000 Bq/kg of³H, 20000 Bq/kg of¹⁵²Eu and 13000 Bq/kg of¹⁵⁴Eu [3, 4, 5].

Studies conducted by M.R. Aktayev et al. showed that radionuclide contamination of the coastal waters of the Atomic Lake had the following values: ³H varied from 100 to 1500 Bq/kg, ⁹⁰Sr - from 1 to 3 Bq/kg, and ¹³⁷Cs and ²³⁹+²⁴⁰Pu were below 0.03 and 0.002 Bq/kg. They

made a conclusion that this contamination is associated with the leaching of radionuclides from the soil and groundwater from the wells of the Balapan site [6]. The authors also studied the elemental composition of water both in the Atomic Lake itself and in the Chagan River. The evidence suggests that the waters in the Atomic Lake influence zone exceeds average contents in comparison with natural waters for such elements as strontium, lithium, iron and uranium [7, 8, 9].

The problem of the effects of nuclear tests on ecosystems remains relevant to this day. In addition to radiological contamination, which has been the focus of previous research, considerable attention should be paid to non-radiative effect, including changes in the chemical composition of the environment, anthropogenic transformation of soils and alteration of trophic chains. Nuclear explosions and further processes caused a change in the natural soil profile, increased erosion processes and a decrease in organic matter. These changes lead to deterioration of soil fertility and limitation of the ability of ecosystems to self-regeneration [10].

In addition, technogenic factors contribute to changes in the migration of chemical elements in soil and plant systems, which affect their distribution and bioaccumulation in vegetation [11]. The study of the elemental composition of plants on the territory of the Atomic Lake located on the territory of the former Semipalatinsk Nuclear Test Site enables a deeper understanding of the dynamics of accumulation and distribution of elements in ecosystems that have undergone technogenic changes. The analysis of these processes is important for assessing the long-term condition of soils and green cover, as well as for developing actions for the rehabilitation of exposed areas.

The scientific novelty of the study is a deep analysis of the elemental composition of soil and plants near the Atomic Lake, with a focus on changes caused not only by radionuclide contamination, but also by adverse environmental conditions. Unlike previous studies, which focused mainly on the migration of radionuclides, this study reveals outstanding differences in the macro- and microelement composition of soil cover and vegetation in the areas affected by nuclear exposure and in the control zone.

The practical relevance of the research is the need to take these factors into account when predicting recovery processes in the Atomic Lake ecosystem. The results obtained make it possible to clarify the dynamics of soil transformation caused by man-made impacts and their impact on biodiversity. In this way, the study contributes to understanding the long-term effects of nuclear testing, going beyond the typical analysis of radiation pollution and offering a new perspective on ecosystem degradation under extreme conditions.

The goal of the research: to research the elemental composition of soils and plants in the zone of influence of the Atomic Lake.

2. MATERIALS AND METHODS

The study area is located within the Balapan site of the former Semipalatinsk Nuclear Test Site and is characterized by an arid continental climate, sparse vegetation covers and technogenically transformed soils [12]. The soils are predominantly light-textured, weakly developed, with low organic matter content and show signs of mechanical disturbance caused by underground nuclear explosions and subsequent erosion processes [13]. In this research, the elemental composition of soils and plants was studied at 2 sampling areas near the Atomic Lake. At present, the Atomic Lake is a closed artificial water body surrounded by embankments of varying height and width. These embankments consist of blocks and fragments of rocks of different origins, as well as loose unconsolidated material containing both fine detrital particles and soil components. The zonal soil type in the area is represented by light chestnut soils [14,15]. The study area experiences a strongly continental climate, characterized by significant seasonal and diurnal temperature variations. Summers are typically hot and moderately dry, whereas winters are cold and snowy. January minimum temperatures range from -27°C to -33°C , while July maximum temperatures reach $+32^{\circ}\text{C}$ to $+37^{\circ}\text{C}$ [16].

The sample area No. 1 – “Outer Lake” is located on the territory of the outer lake, where no radioactive contamination was observed. The sample area No. 2 – “Atomic Lake” is located on one of the shores of the Atomic Lake. A schematic map of the sampling site is shown in Figure 1, which was built using the QGIS program. The survey of the selected areas and sampling was conducted in September 2023.

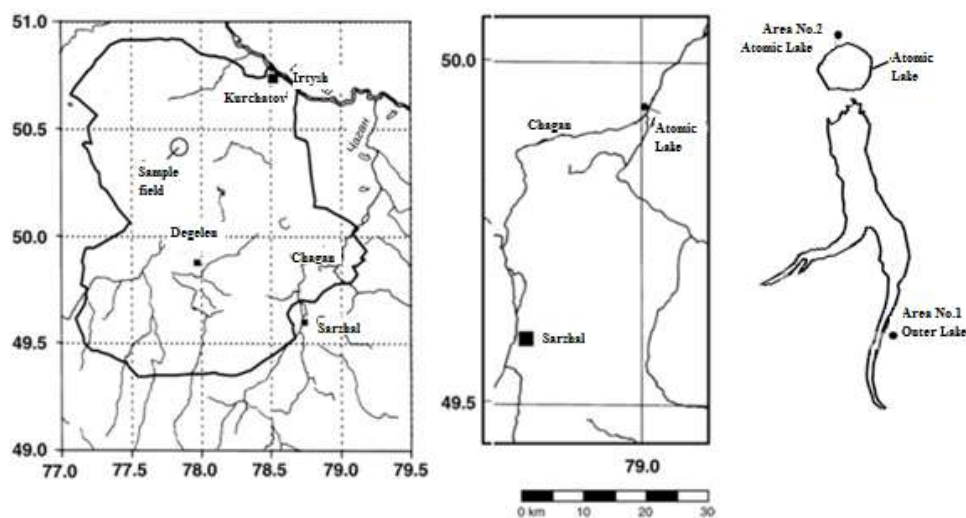


Figure 1. Schematic map of sample areas

Soil was sampled using the envelope method at a depth of 0-50 cm in accordance with GOST 17.4.4.02-84 [17]. The taken samples weighing at least 1 kg were dried in a drying oven at a temperature of 105 °C for 3-6 hours, following which they were packed and sent to the laboratory.

The plants were sampled according to GOST 588-2019 using a square sampling, each square sized 1 by 1 meter [18]. In each square, all plant species that could be found within the research area were sampled.

The following species were sampled at area No.1: california sagebrush *Artemisia californica* L.; wormwood *Artemisia absinthium* L.; stinking fleabane *Dittrichia graveolens* L.; weak sedge *Carex supina* L.; common reed *Phragmites australis* L.; tamarisk french *Tamarix gallica*; hollow-stemmed asphodel *Asphodelus fistulosus*; gmelin's sea lavender *Limonium gmelinii* L.; at the area No.2 sampled the following species: common mugwort *Artemisia vulgaris* L.; sandhill sage *Artemisia pycnocephala* L.; wormwood *Artemisia absinthium* L.; weak sedge *Carex supina* L.; branched gypsophila *Gypsophila paniculata* L.

The nomenclature of Latin plant species is given according to the reference book by S.K. Cherepanov “Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)” [19]. For each plant species, three individual specimens were collected and combined into one composite sample. In total, 13 composite plant samples and 10 soil samples from the root layer were analyzed. Each composite sample of plants and samples of soils were analyzed once without analytical duplication. Each species was assembled separately and packaged in labeled bags. Whole plants (aboveground parts and roots) were used for chemical analysis.

The preparation and analysis of samples to determine the concentration of 41 chemical elements of soil and plants was performed according to the NSAM method No. 499, using complete acid decomposition [20]. Elemental analysis was performed using an inductively coupled plasma optical emission spectrometer ICP-OES Agilent 5800 (Agilent Technologies, USA). The measurements were carried out under standard operating conditions recommended by the manufacturer. Analytical wavelengths were selected to minimize spectral interferences. The accuracy of measurements was controlled using certified reference materials, and the relative analytical error did not exceed 5–10% for most elements.

The bioavailability in soils was assessed by the value of the biological absorption factor [21]:

$$\text{Biological absorption factor} = C_{\text{plant}}/C_{\text{soil}} \quad (1)$$

where C_{plant} is the concentration of an element in a plant sample, mg/kg; C_{soil} is the concentration of an element in a soil sample, mg/kg.

The tables used the following abbreviations for statistical parameters: X is the arithmetic mean, Δ is confidence range ($p=0,95$), RE is relative error of the confidence range as a percentage ($p=0,95$), Max is maximum value, Cv is variation factor (VF).

Statistical processing of the research results was performed using standard methods [22,23] utilizing the Orange Data Miner and Microsoft Excel software packages. The value of Clark trace elements in the soils of the upper continental crust is shown from [24].

3. RESULTS AND DISCUSSION

In the research the analysis of soil and plant samples was performed to determine the concentration of 41 chemical elements.

The grouping and classification of the identified elements is presented in table 1, which was performed using the World Health Organization document on pollution and toxicity of the elements. [25].

Table 1
Classification of analyzed elements in samples

Group	Element
Metals	Ag, Al, Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hf, In, La, Li, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Sc, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Yb, Zn, Zr
Heavy metals	Ag, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr
Macronutrients	Fe, P
Trace elements	Li, B, Al, P, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Ni, Zn, Ga, As, Sr, Y, Zr, Mo, Ba, La, Ce, Pb
Semi-metals	As, Sb
Non-metals	Se

A data bulk on the content of trace elements in the studied samples was obtained. Statistical indicators were calculated to assess changes in data for different samples, to assess the accuracy of measurements, and to determine how much the content of elements from sample area No. 1 and sample area No. 2 differs from the natural background. Statistical indicators of the content of trace elements in soil are presented in Table 2. This table shows the average concentrations of trace elements in the soil (X), measurement errors (Δ), minimum and maximum concentrations, as well as variation factors, which show how variable the data are relative to their average value (Cv%).

Table 2

Statistical indicators of the gross content of trace elements in the soil of the studied areas, n=10, mg/kg

Element	Outer Lake X±Δ(RE%) min-max(Cv%)	Atomic Lake X±Δ(RE%) min-max(Cv%)	Clarke of the upper continental crust [24]
Li	<u>30,3±4,1(14)</u> 26,4-32,9(11)	<u>25,9±1,3(5)</u> 24,3-27,0(4)	30
B	<u>1,6±0,3(16)</u> 1,3-1,8(13)	<u>0,8±0,6(72)</u> 0,5-1,6(58)	34
Al	<u>90860±11442(13)</u> 79748-103406(10)	<u>101905±4073(4)</u> 98731-106609(3)	76000
P	<u>1090±254(23)</u> 833-1264(19)	<u>938±54(6)</u> 882-997(5)	610
Ti	<u>5346±273(5)</u> 5071-5584(4)	<u>6425±421(7)</u> 6121-6933(5)	3410
Cr	<u>46,2±7,0(15)</u> 40,4-54(12)	<u>78,6±5,5(7)</u> 73,0-84(6)	150
Mn	<u>1575±90(6)</u> 1507-1694(5)	<u>1230±63(5)</u> 1143-1261(4)	670
Fe	<u>78247±9781(13)</u> 69851-86799(10)	<u>91553±2905(3)</u> 89208-94188(3)	40600
Co	<u>27,8±8,9(32)</u> 19,8-35(26)	<u>37,7±1,56(4)</u> 36,5-39(3)	17
Cu	<u>75,3±11,5(15)</u> 61,1-84(12)	<u>94,3±11,9(13)</u> 86,6-109(10)	39
Ni	<u>29,1±5,9(20)</u> 23,8-33(16)	<u>38,9±1,3(3)</u> 37,4-40(3)	62
Zn	<u>129±11,0(14)</u> 105-143(12)	<u>142±7(5)</u> 136-151(4)	78
Ga	<u>15,3±2,7(17)</u> 13,2-18(14)	<u>18,6±1,0(5)</u> 17,8-20(4)	19
As	<u>12,0±10,0(83)</u> 3,7-24(67)	<u>26,6±6,8(26)</u> 19,0-31,1(21)	6,5
Sr	<u>302±31,3(10)</u> 281-344(8)	<u>357±15(4)</u> 340-372(3)	270
Y	<u>14,8±2,27(15)</u> 12,6-17(12)	<u>16,3±0,8(5)</u> 15,3-17(4)	26
Zr	<u>84±19,8(24)</u> 63,8-102(19)	<u>85,4±12,8(15)</u> 75,5-98(12)	160
Mo	<u>0,8±0,4(56)</u> 0,4-1,3(45)	<u>3,9±7,1(184)</u> 1,1-14(148)	1,5
Ba	<u>528±66(13)</u> 468-594(10)	<u>650±307(47)</u> 518-1091(38)	510

Table 2Statistical indicators of the gross content of trace elements in the soil of the studied areas, $n=10$, mg/kg

Element	Outer Lake $X \pm \Delta(\text{RE}\%)$ min-max(Cv%)	Atomic Lake $X \pm \Delta(\text{RE}\%)$ min-max(Cv%)	Clarke of the upper continental crust [24]
La	<u>21,8±1,2(5)</u> 21-23(4)	<u>22,9±0,9(4)</u> 22-24(3)	32
Ce	<u>40,0±8,3(21)</u> 30,6-48(17)	<u>49±26(52)</u> 34-85(42)	63
Pb	<u>6,2±3,1(49)</u> 2,1-8,3(40)	<u>7,4±2,7(36)</u> 5,6-11(29)	17

The concentrations of most elements in the Atomic Lake are higher than in the Outer Lake, which proves a significant anthropogenic impact. This especially manifests for elements such as Cr, Fe, Cu, Pb and As, where the values in the Atomic Lake significantly exceed the background content. For example, the average Cr content in the Atomic Lake samples is 78.6 mg/kg, while for the Outer Lake it is 46.2 mg/kg. This element, being toxic in high concentrations, is an important indicator of pollution.

When comparing the concentration of trace elements obtained during the research from the Atomic Lake sample area and the concentration of elements in the upper continental crust, differences were found. Increased concentrations were observed in Al and Sr by 1.3 times, P by 1.5 times, Ti, Mn and Zn by 1.8 times, Fe and Co by 2.2 times, Cu and Mo by 2.5 times, As by 4 times.

Elements such as Li, P, and Ti have values close to Clarke of the upper continental crust, which may indicate minimal anthropogenic impact on the concentration of these elements in the reservoirs under research.

Thus, increased concentrations of elements in the soil of the Atomic Lake may be the result of long-term anthropogenic effects, in particular, nuclear tests, toxic chemical emissions and radiation pollution, which is reflected in significant deviations from the natural background of these elements.

The data also show that the variation factor for trace elements vary significantly between the soils of the Outer Lake and the Atomic Lake, which indicates differences in geochemical conditions. Outstanding differences are observed for a number of elements, such as B and Mo: in the Atomic Lake, their variation factors reach 58% and 148%, respectively, which indicates the presence of certain differences in the mineral composition of soil. The most stable elements with low variation factor in both reservoirs include Al and Fe, which may reflect their resistance to redistribution under these conditions.

The quantitative content of chemical elements in biological objects and abiotic substances of the environment in the area of the Atomic Lake influence is a key indicator for biogeochemical research.

In this study, the concentrations of Cu, Zn, Mn, and Co in the Atomic Lake soils were 94, 142, 1230, and 38 mg/kg, respectively. In comparison, similar research by A.A. Kirgizbayeva et al. [26] on metal content in soils within the Atomic Lake area of the former Semipalatinsk Test Site reported values of 34, 61, 2200, and 13 mg/kg, respectively. Thus, measured concentrations of Cu and Co were nearly three times higher than those reported by Kirgizbayeva et al. in 2014, while Zn was more than twice as high. In contrast, Mn concentrations were approximately 1000 mg/kg lower than the previously reported values. The elevated levels of Cu, Co, and Zn, alongside the decreased Mn content, indicate a shift in metal accumulation and

mobility in the soils of Atomic Lake compared to previous studies, reflecting changes in biogeochemical conditions over time.

Taking into account the different physiological significance of trace elements and the peculiarities of their selective absorption from soils exposed to specific geochemical conditions, the content of these elements in plants varied widely. Table 3 shows the content of trace elements in the composition of vegetation distributed by species diversity in the studied areas and the indicators for the reference plant.

Table 3

The content of the elemental composition of vegetation in the studied areas, mg/kg of air-dry

Element	The Outer Lake								The Atomic Lake					X±Δ(RE%) min- max(Cv%)	Reference plant [27]
	<i>Artemisia californica</i>	<i>Carex supina</i>	<i>Tamarix gallica</i>	<i>Limonium gmelini</i>	<i>Artemisia absinthium</i>	<i>Phragmites australis</i>	<i>Dittrichia graveolens</i>	<i>Asphodelus fistulosus</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>	<i>Artemisia pycnocephala</i>	<i>Carex supina</i>	<i>Artemisia absinthium</i>	<i>Gipsophila paniculata</i>		
Li	0,05	0,4	0,2	0,9	0,4	0,3	1,1	0,3	1,1	1,68	1,0	0,9	1,4	<u>0,73±0,52(71)</u> 0,05-1,68(71)	0,2
B	6,2	53,4	1,0	1,0	14,7	1,0	27,6	1,0	3,3	94,8	38,3	1,0	173,0	<u>51±57(112)</u> 3-173(112)	40
Al	380	274	406	487	548	296	629	463	196	897	580	637	929	<u>517±222(43)</u> 196-929(43)	80
P	831	978	422	1536	962	2296	1440	853	1788	1788	2319	552	1739	<u>1346±627(47)</u> 422-2319(47)	2000
Ti	21	104	40	211	56	80	49	92	147	634	284	228	374	<u>178±173(97)</u> 21-634(97)	5
Cr	4,8	26,8	14,9	8,1	7,2	18,6	7,3	7,9	5,5	83,3	23,7	19,5	63,5	<u>22±24(109)</u> 4,8-83 (108)	1,5
Mn	245	104	53	169	148	156	149	96	138	180	142	144	153	<u>144±45(31)</u> 53-245(31)	200
Fe	819	919	591	1861	930	5676	1123	3526	1362	4812	2585	2134	3087	<u>2264±1614(71)</u> 591-5676(71)	150
Co	0,1	0,6	0,2	0,6	1,1	1,2	1,1	1,1	0,8	3,4	1,7	1,6	2,7	<u>1,2±0,9(75)</u> 0,1-3,4(76)	0,2
Ni	2,8	15,1	9,5	6,7	2,1	20,3	1,9	8,4	2,4	52,6	12,8	10,6	38,3	<u>14,1±15,2(108)</u> 1,9-52,6(108)	1,5
Cu	4,3	3,7	6,0	6,1	5,4	10,8	5,6	15,8	5,3	10,5	6,6	8,8	4,3	<u>7,2±3,4(48)</u> 3,7-15,8(48)	10
Zn	26	41	18	387	32	1375	84	486	44	104	77	64	75	<u>216±377(174)</u> 18-1375(174)	50
Ga	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,5	0,2	0,4	0,3	1,0	0,5	0,4	0,6	<u>0,38±0,25(65)</u> 0,12-1(65)	0,1

Table 3

The content of the elemental composition of vegetation in the studied areas, mg/kg of air-dry

Element	The Outer Lake								The Atomic Lake					X±Δ(RE%) min- max(Cv%)	Reference plant [27]
	<i>Artemisia californica</i>	<i>Carex supina</i>	<i>Tamarix gallica</i>	<i>Limonium gmelinii</i>	<i>Artemisia absinthium</i>	<i>Phragmites australis</i>	<i>Dittrichia graveolens</i>	<i>Asphodelus fistulosus</i>	<i>Artemisia vulgaris</i>	<i>Artemisia pycnocephala</i>	<i>Carex supina</i>	<i>Artemisia absinthium</i>	<i>Gypsophila paniculata</i>		
As	0,24	0,12	0,10	0,10	0,48	1,99	0,73	1,13	1,15	0,98	1,21	0,10	0,95	0,9±0,54(61) 0,1-1,99(61)	0,1
Sr	50	27	97	96	88	120	128	74	195	82	48	112	303	109±72(66) 27-303(66)	50
Y	0,19	0,12	0,24	0,21	0,38	0,18	0,29	0,25	0,15	0,63	0,34	0,46	0,48	0,30±0,15(50) 0,12-0,63(50)	0,2
Zr	2,1	1,9	2,8	3,5	3,7	1,8	2,1	2,5	1,9	7,4	3,9	3,5	9,6	3,59±2,36(66) 1,76-9,62(66)	0,1
Mo	0,05	0,05	0,59	0,05	0,42	0,31	0,13	0,14	0,17	0,27	0,47	0,33	0,44	0,26±0,18(68) 0,05-0,59(68)	0,5
Ba	19	17	14	19	18	23	32	23	17	37	32	28	46	25±10(38) 14-46(38)	40
La	0,29	0,26	0,36	0,52	0,48	0,51	0,72	0,38	0,44	1,15	0,70	0,78	0,90	0,6±0,3(45) 0,3-1,1(45)	0,2
Ce	0,7	0,4	1,1	1,4	1,4	1,8	2,0	1,3	2,9	1,1	0,8	1,5	3,1	1,5±0,8(53) 0,4-3,1(53)	0,5
Pb	0,5	1,6	0,7	6,5	1,2	3,0	2,4	2,5	1,0	9,3	3,8	1,5	3,1	2,9±2,5(88) 0,5-9,3(88)	1

Based on the analysis, outstanding differences in the accumulation of trace elements between plants growing in the Outer Lake and the Atomic Lake were revealed.

On the Outer Lake, the maximum concentrations of elements are recorded in the following species:

- In *Phragmites australis* the P content reaches 2296 mg/kg, Zn — 1375 mg/kg.
- In *Dittrichia graveolens* there is a high content of Zn (486 mg/kg) and Cu (15.8 mg/kg).
- In *Tamarix gallica* elevated levels of Fe (591 mg/kg) and Cr (14.9 mg/kg) were recorded.

On the Atomic Lake, the maximum values of trace elements are determined in:

- *Artemisia pycnocephala* — the B content is 94.8 mg/kg, Fe — 4812 mg/kg, Cr — 83.3 mg/kg.
- *Artemisia absinthium* — the Fe content reaches 2134 mg/kg, Cr — 19.5 mg/kg.

Carex supina from the Atomic Lake is characterized by an increased Al content (580 mg/kg), which is 2.1 times higher than that of *Carex supina* from the Outer Lake (274 mg/kg). Cr concentrations in *Artemisia pycnocephala* are 83.3 mg/kg, which is significantly higher than

in *Carex supina* from the Outer Lake, where this indicator is 26.8 mg/kg. This indicates a high level of chromium contamination of soil and plants in the territory of the Atomic Lake, which is confirmed by soil sample analysis, which was described in this research earlier.

In *Carex supina*, which grows in the Atomic Lake, the Fe concentration was 2585 mg/kg, which is 2.8 times higher than in *Carex supina* in the Outer Lake, where the iron concentration was 919 mg/kg. These data indicate a high level of iron concentration in vegetation in the Atomic Lake area.

Dittrichia graveolens on the Outer Lake showed a Cu concentration of 5.6 mg/kg, while on the Atomic Lake in *Artemisia absinthium*, the Cu concentration was 8.8 mg/kg, 1.5 times higher. This indicates a higher degree of copper contamination in the Atomic Lake territory.

In *Tamarix gallica*, the concentration of Cr on the Outer Lake was 14.9 mg/kg, while on the Atomic Lake in *Artemisia pycnocephala*, the concentration of Cr reached 83.3 mg/kg, which is 5.5 times higher.

Thus, in plants growing on the Atomic Lake, on average, higher concentrations of trace elements (especially B, Fe, Cr, Ni, Sr) are recorded compared to the Outer Lake, which indicates an outstanding difference in the accumulation of elements depending on environmental conditions. This indicates the effect of radiation and chemical pollution on the ability of plants to selectively accumulate certain chemical elements from the environment, especially from the soil. The concentrations of P, Ti, Sr, Y, and Ba in the Atomic Lake are generally comparable to those in the Outer Lake or even lower. This indicates a less manifested accumulation of these elements in plants, possibly due to their lower mobility in the soil.

A comparison between the concentrations of trace elements in samples from the Outer Lake and the Atomic Lake and its concentrations in the reference plant showed that Al concentrations in the Outer Lake range from 274 to 629 mg/kg, while in the Atomic Lake concentrations of Al range from 196 to 929 mg/kg, while in the reference plant the concentration of Al is 80, which is much lower than the plants from the Atomic Lake and the Outer Lake areas. For Ti, an almost 127-fold excess was found in the *Artemisia pycnocephala* plant of the Atomic Lake compared to the value in the reference plant, which is equal to 5 mg/kg. In general, the most significant differences are observed for a number of trace elements such as: Fe, Cr, Co, Ni, Zn, As, and Zr. Table 4 shows the values of biological absorption factor in plants in the Atomic Lake and the Outer Lake.

Table 4

Average content of elements in soil and plants, biological absorption factor for the areas under research, mg/kg

Element	X in soil		X in plants		biological absorption factor	
	the Outer Lake	the Atomic Lake	the Outer Lake	the Atomic Lake	the Outer Lake	the Atomic Lake
Li	30,3	25,9	0,4	1,2	0,01	0,05
B	1,6	0,8	25,5	77,3	15,7	92,4
Al	90860	101905	435	648	0,005	0,01
P	1090	938	1165	1637	1,1	1,7
Ti	5346	6425	82	333	0,02	0,1
Cr	46,2	78,6	11,9	39,1	0,3	0,5
Mn	1575	1230	140	151	0,1	0,1
Fe	7827	91553	1931	2796	0,02	0,03
Co	7,8	37,7	0,7	2,0	0,03	0,1
Ni	29,1	38,9	8,3	23,4	0,3	0,6
Cu	75,3	94,3	7,2	7,1	0,1	0,1
Zn	129	142	306	73	2,4	0,5
Ga	15,3	18,6	0,3	0,6	0,02	0,03

Table 4

Average content of elements in soil and plants, biological absorption factor for the areas under research, mg/kg

Element	X in soil		X in plants		biological absorption factor	
	the Outer Lake	the Atomic Lake	the Outer Lake	the Atomic Lake	the Outer Lake	the Atomic Lake
As	12,0	26,6	0,8	1,1	0,1	0,04
Sr	302	357	85	148	0,3	0,4
Y	14,8	16,3	0,2	0,4	0,02	0,03
Zr	84,2	85,4	2,5	5,3	0,03	0,1
Mo	0,77	3,85	0,2	0,3	0,3	0,1
Ba	528	650	20,6	32,0	0,04	0,05
La	21,8	22,9	0,4	0,8	0,02	0,03
Ce	40,0	48,7	1,27	1,90	0,03	0,04
Pb	6,2	7,4	2,31	3,74	0,4	0,5

The results of the research showed that the biological absorption factor of elements in plants at the Atomic Lake area differs from the biological absorption factor value at the Outer Lake area. Thus, for many elements, the biological absorption factor value at the Atomic Lake area turned out to be higher than that of the Outer Lake. This may indicate that the degree of soil change in the Atomic Lake area has affected the composition of the soil and plants.

In similar studies investigating the content of trace elements in plants growing on the territory of the former Semipalatinsk nuclear test site, Pleshkova S. M. et al. [28] reported elevated concentrations of Cr (up to 23 times), Sc (approximately 5–7 times), Cu (3 times), Al (2 times), and V (2 times) compared to background levels. Plants collected from the Degelen mountain massif were particularly enriched in Sc, Cr, and Mo. The concentrations of Cr exceeded global average values by 23 times, Mo by 8 times, and Sc by 5–7 times. In plants sampled from the Experimental Field, increased contents of Cr (23 times), Sc (5–7 times), Pb (1.3–4 times), and Mo (2 times) were observed.

Among the elements for which an increased biological absorption factor was found at the Atomic Lake area, one can note B, Ni. The biological absorption factor of these elements increased by more than 5 times for B, more than 2 times for Ni. This may be due to the more accessible form of these biogenic elements for plants.

4. CONCLUSION

The study established that the concentrations of most trace elements in the soils of the Atomic Lake area are significantly higher than those in the soils of the Outer Lake, indicating pronounced anthropogenic impact. For example, the average concentration of Cr in Atomic Lake soils is 78.6 mg/kg, whereas in Outer Lake soils it is 46.2 mg/kg. Compared to the upper continental crust reference values (Clarke), levels of Al and Sr in Atomic Lake soils are elevated by 1.3 times, P by 1.5 times, Ti, Mn, and Zn by 1.8 times, Fe and Co by 2.2 times, Cu and Mo by 2.5 times, and As by 4 times. Meanwhile, elements such as Li, P, and Ti exhibit concentrations close to Clarke values, suggesting minimal technogenic influence on their content. The coefficients of variation for trace elements in Atomic Lake soils are substantially higher, reflecting heterogeneous geochemical conditions, whereas Al and Fe remain stable across both water bodies. These findings confirm long-term anthropogenic effects associated with nuclear testing and chemical pollution.

In plants growing in the Atomic Lake area, significantly higher accumulation of trace elements was observed compared to plants from Outer Lake. For instance, Cr concentration in *Artemisia hololeuca* reaches 83.3 mg/kg, which is three times higher than that in plants from Outer Lake. Fe concentration in Atomic Lake plants reaches 2585 mg/kg, 2.8 times greater than in Outer Lake plants. Al content in *Carex supina* from Atomic Lake is 580 mg/kg, 2.1 times

higher than Outer Lake. Concentrations of P, Ti, Sr, Y, and Ba in Atomic Lake plants are at levels comparable to or lower than those in Outer Lake. However, Fe, Cr, Co, Ni, Zn, and As levels markedly exceed those of the reference plant species. These data confirm a significant influence of radiochemical contamination on the accumulation of trace elements by plants in the Atomic Lake zone.

The biological accumulation coefficients of trace elements in plants from the Atomic Lake are considerably higher than those from the Outer Lake, indicating an increased capacity of plants to accumulate elements under anthropogenic pressure. Elevated biological accumulation coefficients of elements such as B, Co, Ni, and Cr suggest pronounced stress in vegetation related to altered mechanisms of trace element uptake and redistribution. This reflects the impact of radiological and chemical pollution, potentially leading to bioaccumulation of toxic substances and increased ecological risks to the ecosystem.

Further research should be aimed at expanding the spatial coverage of the sample and including seasonal variability. A promising direction is to conduct genetic and physiological-biochemical studies of plants to assess the mechanisms of adaptation to chronic radiation and chemical stress. In addition, a detailed study of the migration of elements in the soil–vegetation–water system, including the bottom sediments of an Atomic Lake, would provide a more complete picture of the long-term transformation of the ecosystem.

DATA AVAILABILITY

The data used in this study were obtained by the authors through original field sampling and laboratory analyses conducted in 2023 using accredited analytical procedures.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Conceptualization – M.T. Zhailybayeva; Resources – R.M. Tazitdinova; Formal analysis – M.T. Zhailybayeva, Zh. Rakhymzhan; Methodology – M.T. Zhailybayeva, G.T. Kyzdarbekova; Software – M.T. Zhailybayeva; Supervision – R.M. Tazitdinova, Zh. Rakhymzhan; Visualization – M.T. Zhailybayeva; Writing—original draft preparation – M.T. Zhailybayeva; Writing—review and editing – all authors.

REFERENCES

- Article from a periodical:
- 1 Timofeev-Resovskij, N. V. *Izbrannyetrudy / N. V. Timofeev-Resovskij; pod red. O. G. Gazenko iV. I. Ivanova.* – M.: Medicina, 1996. – 480 s. – ISBN 5-225-00773-2. [in Russian]
 - 2 Aidarkhanov, A. O., Lukashenko, S. N., Lyakhova, O. N., Subbotin, S. B., Yakovenko, Yu. Yu., Genova, S. V., Aidarkhanova, A. K. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan river zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site / *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2013. – Vol. 124. – P. 163-170. [in English]
 - 3 Aidarkhanova, A. K., Lukashenko, S. N., Larionova, N. V., Polevik, V. V. Radionuclide transport in the “sediments – water – plants” system of the water bodies at the Semipalatinsk test site / *J. Environ. Radioact.* – 2018. – Vol. 184-185. – P. 122-126. [in English]
 - 4 Aidarkhanov, A. O., Lukashenko, S. N., Genova, S. V., et al. Radioaktivnoe zagryaznenie vod reki Shagan (po rezul'tatam 2011-go goda) // *Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Vyp. 4. T. 1. SborniktrudovNatsional'nogoYader'nogotsentraRespubliki Kazakhstan za 2011–2012 gg.* / Pod ruk. S. N. Lukashenko. Pavlodar: Dom pečati, 2013. S. 249–256. [in Russian]
 - 5 Aktaev, M. R., Lukashenko, S. N., Aidarkhanov, A. O. Monitoringradioaktivnogozagryazneniyavodr. Shagan // *Semipalatinskijispytatel'nyjpoligon. Radiatsionnoenasledieiperspektivyrazvitiya: Tez. dokl. VMezhdunar. nauch.-prakt. konf. Pavlodar: Dom pečati, 2012. S. 63–64.* [in Russian]
 - 6 Aktaev, M. R., Lukashenko, S. N., Aidarkhanov, A. O., Lyakhova, O. N., Toktaganov, T. Sh., Tokarev, I. V. Raspre-delenemikro- imakrokompontoviiiskusstvennykhradionuklidovvvodoyeme “Atomnoeozero” / *Radiatsionnaya-biologiya. Radioekologiya, 2019. Tom 59, № 3. S. 311–320.* [in Russian]
 - 7 Tashekova, A. Zh., Lukashenko, S. N., Koigeldinova, M. T., Mukhamediyarov, N. Zh. Kharakteristika element-nogosostavavody r. Shagan / *VestnikKrasGAU.* – 2016. – № 12. – S. 141-146. [in Russian]
 - 8 Gorlachev, I., Kharkin, P., Dyussembayeva, M., Lukashenko, S., Gluchshenko, G., Matiyenko, L., Zheltov, D., Kitamura, A., Khlebnikov, N. Comparative analysis of water contamination of the Shagan river at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides / *J. Environ. Radioact.* – 2020. – Vol. 213. – P. 106110.[in English]
 - 9 Yessilkanov, G. M., Lukashenko, S. N., Rikhvanov, L. P., Koygeldinova, M. T., Mukhamediyarov, N. Z., Shakenov, E. Z., Temirzhanova, A. E., Yakovenko, Yu. Yu. Peculiarities of water elemental composition at water use objects located at the territory of the former Semipalatinsk test site / *Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo. Assets Eng.* – 2017. – Vol. 328, № 11. – P. 39–49.[in English]

- 10 Rikhvanov, L. P., Arbuzov, S. I., Baranovskaya, N. V., et al. Radioaktivnye elementy v okruzhayushchej srede // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2007. – T. 311, № 1. – S. 128-136. [in Russian]
- 11 Yelkenova, Botakoz, et al. Accumulation of Heavy Metals in the Needles of Scots Pine of the Semipalatinsk Pre-Irtysh Region and Burabay National Park. Journal Of Environmental Management And Tourism, 2023. – Vol. 14, № 5. – P. 2242-2252. [in English]
- 12 Aidarkhanov A.O. Mechanisms for surface contamination of soils and bottom sediments in the Shagan River zone within former Semipalatinsk Nuclear Test Site / A.O. Aidarkhanov, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. - 2013. - Vol. 124. - P. 163-170. [in English]
- 13 Aidarkhanova A. Character of radionuclide contamination of natural lakes at the territory of Semipalatinsk test site / A. Aidarkhanova, A. Mamyrbayeva // 3rd European radiological protection research week, October 1-5, 2018. - Rovinj-Rovigno, Croatia, 2018. - P. 214. [in English]
- 14 Aidarkhanova A.K. Investigation of character of distribution of radioactive contamination in water objects of Semipalatinsk test site and adjacent territories / A.K. Aidarkhanova, S.N. Lukshenko // Meeting in St. Petersburg: Fourth International Conference, Dedicated to N.W. Timofeev-Ressovskiy and His Scientific School "Modern Problems of Genetics, Radiobiology, Radioecology and Evolution"; June 2-6, 2015. - St. Petersburg, 2015. - P. 147. [in English]
- 15 Kunduzbayeva, A. E., Kabdyrakova, A. M., Larionova, N. V., & others. (2017). Forms of occurrence of artificial radionuclides in the soils of the "Atomic" Lake of the Semipalatinsk Test Site. Actual Problems of Radioecology of Kazakhstan, 6 (1), 288. [in Russian]
- 16 Meteorological database of the National Hydrometeorological Service of Kazakhstan RSE "Kazhydromet" https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/index.php
- 17 GOST 17.4.4.02-84. Metodyotborai podgotovki probdlyakhimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza. – Vveden 1986-01-01. [in Russian]
- 18 GOST R 58588—2019 Sampling and preparation of plant samples for isotopic analysis / 2019, 12 pages.[in English]
- 19 Cherepanov, S. K. Sosudistyerasteniya Rossiisopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR). – SPb.: Mir isem'ya, 1995. – 992 s. [in Russian]
- 20 NSAM 499-AES/MS. Opređenje elementnog sostava gornyx porod, pochv, gruntov i donnykh otlozhenij atomno-emissionnym s induktivnosvyazannoj plazmoj i mass-spektral'nykh s induktivnosvyazannoj plazmoj metodami – red. 2015 g., vzyamen red. 2011 g. [in Russian]
- 21 Dobrovolskij, V. V. Osnovy biogeokhimii. – M.: Izdat. dom "Akademiya", 2003. – 400 s. [in Russian]
- 22 Zaytsev, G. N. Matematika v eksperimental'noj botanike. – M.: Nauka, 1990. – 296 s. [in Russian]
- 23 Toropov, A. S., Yessilkanov, G. M. Advanced Instruments for Identifying Geochemical Dependences of Radionuclide Migration in Natural Waters // Geochemistry International. – 2022. – Vol. 60. – No. 3. – P. 266-278. [in English]
- 24 Trebovaniya k proizvodstvu rezul'tatam mnogotsелеvogeochemicheskogo kartirovaniya. – M.: IMGRE, 2002. – 92 s. [in Russian]
- 25 Environmental health criteria: Heavy metals (2nd edition). – Zheneva, 2021. – S. 1-300. c. [in English]
- 26 Kirgizbayeva, A., Sharipov, K., Zhakypbekova, S. S., Batyrbayeva, A., & Toktabayeva, A. (2014). Technogenic contamination of lands of the Semipalatinsk nuclear test site by heavy metals. Chemical Bulletin of Kazakh National University, 69–73. [in Russian]
- 27 Markert, B., Jayasekera, R. Elemental composition of different plant species / Journal of Plant Nutrition. – 1987. – Vol. 10, № 7. – P. 783–794. [in English]
- 28 Kirgizbayeva, A. A., Pleshkova, S. M., Sharipov, K. O., & Lebekova, Zh. T. (2013). Content of trace elements in plants growing in the territory of the former Semipalatinsk Nuclear Proving Ground (Kazakhstan). Microelements in Medicine, 14(1), 41–43. [in Russian]

БҰРЫНҒЫ СЕМЕЙ ЯДРОЛЫҚ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНЫҢ АТОМ КӨЛІ АУДАНЫНДАҒЫ ТОПЫРАҚ ПЕН ӨСІДІКТЕРДІҢ БИОГЕОХИМИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

М.Т. Жайлыбаева¹, Р.М. Тазитдинова¹ PhD, Ж. Рахымжан¹ PhD, қауымдастырылған профессор м.а., Г.Т. Кыздарбекова² PhD, қауымдастырылған профессор

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан; meruyert.zhailybayeva55@gmail.com (МТЖ), irm85@mail.ru (PMT), r.zhanar80@mail.ru (ПЖ)

²Ш. Уалиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., Қазақстан; gulmira.kyzdarbekova.80@mail.ru (ГТК)

*Автор корреспонденциясы: М.Т. Жайлыбаева, e-mail: meruyert.zhailybayeva55@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Семей ядролық сынақ полигоны, Атом келі, элементтік құрамы, радиациялық ластануы, топырақ талдауы, өсімдік жамылғысы, биологиялық сіңіру коэффициенттері, Биогеохимиялық ерекшеліктері.

Мақала жайында:

Алынды: 11.08.2025

Қайта қаралды: 22.01.2026

Қабылданды: 04.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Бұл мақалада Семей ядролық сынақ полигоны аумағында орналасқан Атом көлінің маңындағы топырақ пен өсімдіктердің элементтік құрамын кешенді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Зерттеудің негізгі мақсаты — ұзақ мерзімді антропогендік әсер мен радиациялық сәулеленудің салдарынан қалыптасқан биогеохимиялық ерекшеліктерді түсінуге баса назар аударып, топырақтар мен жергілікті өсімдіктердегі химиялық элементтердің концентрацияларын және таралу заңдылықтарын бағалау болды. Өкілдік топырақ және өсімдік үлгілерін жинау үшін далалық зерттеулер жүргізіліп, кейін заманауи аналитикалық әдістер арқылы зертханалық талдаулар жасалды. Алынған деректер элементтердің таралу заңдылықтарын анықтау және топырақтағы элементтер концентрациясы мен олардың өсімдіктер арқылы сіңірілуі арасындағы өзара байланысты зерттеу үшін мұқият статистикалық өңдеуден өтті. Өсімдіктердегі микроэлементтер концентрациясының эталонды өсімдікпен салыстырмалы талдауы жүргізілді. Топырақтағы микроэлементтер мөлшері жер қыртысының жоғарғы қабатының Кларк көрсеткіштерімен салыстырылды. Биологиялық сіңіру коэффициенттерін есептеуге ерекше назар аударылды, бұл әртүрлі өсімдік түрлерінің элементтерді селективті жинақтау қабілетін анықтауға мүмкіндік берді. Бұл коэффициенттер өсімдіктердің созылмалы радиациялық стресс жағдайына бейімделу механизмдерін бағалауға септігін тигізді. Алынған нәтижелер ядролық ластануға байланысты экологиялық қауіп-қатерлерді бағалау үшін биогеохимиялық зерттеулердің маңыздылығын көрсетеді.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЧВ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ В РАЙОНЕ АТОМНОГО ОЗЕРА БЫВШЕГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ПОЛИГОНА

М.Т. Жайлыбаева¹, Р.М. Тазитдинова¹ PhD, Ж. Рахымжан¹ PhD, и.о. доцента, Г.Т. Кыздарбекова² PhD, доцент

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, г. Астана, Казахстан; meruyert.zhailybayeva55@gmail.com (МТЖ), irm85@mail.ru (PMT), r.zhanar80@mail.ru (ПЖ)

²Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, Казахстан; gulmira.kyzdarbekova.80@mail.ru (ГТК)

*Автор для корреспонденции: М.Т. Жайлыбаева, e-mail: meruyert.zhailybayeva55@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Семипалатинский ядерный испытательный полигон, Атомное озеро, элементный состав, радиационное загрязнение, анализ почвы, растительность, коэффициенты биологического

АБСТРАКТ

В данной статье представлены результаты комплексного исследования элементного состава почв и растительности в районе Атомного озера, расположенного на территории Семипалатинского испытательного ядерного полигона. Основной целью исследования была оценка концентраций и закономерностей рас-

поглощения, биогеохимические особенности.

По статье:

Получено: 11.08.2025

Пересмотрено: 22.01.2026

Принято: 04.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026






предела химических элементов в почвах и местных видах растений с акцентом на понимание биогеохимических характеристик, сформированных в результате длительного антропогенного воздействия и радиационного облучения. Для сбора репрезентативных образцов почвы и растений были проведены полевые исследования, которые затем были проанализированы в лаборатории с использованием современных аналитических методов. Полученные данные подверглись тщательной статистической обработке для выявления закономерностей распределения элементов и изучения взаимосвязи между концентрациями элементов в почвах и их усвоением растениями. Был проведен сравнительный анализ результатов полученных концентраций микроэлементов в растениях с концентрацией микроэлементов в эталонном растении. Результаты измерений содержания микроэлементов в исследуемых почвах сравнили с показателями кларка верхней части континентальной коры. Особое внимание было уделено расчету коэффициентов биологического поглощения, которые позволили получить ценную информацию о способности различных видов растений к избирательному накоплению. Эти коэффициенты позволили оценить адаптационные механизмы, выработанные растительностью в ответ на хронический радиационный стресс. Полученные результаты подчеркивают важность биогеохимических исследований для оценки экологических рисков, связанных с ядерным загрязнением.

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).



Ғылыми мақала

ҚОРШАҒАН ОРТАҒА ӘСЕРДІ АЗАЙТУ МАҚСАТЫНДА АЛМАТЫ ЖЭС ЖАҢҒЫРТУ НҰСҚАЛАРЫН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ БАҒАЛАУ

Айнур С. Бегимбетова* Ph.D, қауымдастырылған профессор , Светлана Е. Мананбаева ,
Жанна К. Мусаева к.б.н. , Куралай А. Сағытаева , Акбота К. Лепесбай 

Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан; a.begimbetova@aes.kz (АСБ), s.mananbaeva@aes.kz (СЕМ), zh.musaeva@aes.kz (ЖКМ), k.sagytayeva@aes.kz (КАС), a.lesbek@aes.kz (АКЛ)

*Автор корреспонденциясы: Айнур С. Бегимбетова, a.begimbetova@aes.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

шығарындылар, атмосфераның ластануы, жылу электр орталығы, табиғи газ, көмір, азот оксиді, күл, көміртек, парниктік газдар, газ турбиналық қондырғылар

АҢДАТПА

Бүгінгі таңда жылу электр станцияларының қызметі теріс әсермен қарастырылуда, сондықтан оның жұмысын табиғи газға ауыстырудың шұғыл қажеттілігі туындады. Мақалада бұл процесс – жылу электр орталығының (ЖЭО-ның) табиғи газға ауысуының - көмір күлінің, күкірт диоксиді мен мазут күлінің зиянды шығарындыларын азайту арқылы ауа сапасын жақсартудың тиімді әдісі ретінде қарастырылады. Сонымен қатар, азот пен көміртегі тотығы мен парниктік газдар шығарындыларын азайту мәселелері қарастырылуда. Сайып келгенде, бұл ластаушы заттардың жылдық шығарындыларының шамамен 80% - ға төмендеуіне әкеледі. Бұл зерттеудегі модельдеу процесі қаланың энергиямен жабдықтау сенімділігін сақтай отырып, экологиялық залалды барынша азайтатын оңтайлы технологиялық шешімді анықтауға бағытталған көп сатылы процедура болып табылады. Атмосфералық ауаның ластану деңгейіне қолданыстағы ЖЭО шығарындыларының үлесін бағалау атмосферадағы ластаушы заттар шығарындыларын бөлу процесін модельдеу арқылы орындалды. Модельдеу ЖЭО-ның максималды жүктемесі мен қолайсыз метеожағдайларда (атмосфералық ауада қоспалардың жиналуына ықпал ететін жағдайлар) шашырауды есептеу әдістемесі негізінде "Интеграл" фирмасы (С-Петербург қ.) әзірлеген "Эколог" атмосфералық ауаның ластануын есептеудің әмбебап бағдарламасын (3.0 нұсқасы) пайдалана отырып орындалды. Сондықтан біз Алматы жылу электр орталығын жақсартудың қоршаған ортаға тигізетін кері әсерін барынша азайтумен қатар энергетикалық және жылу қуатын арттыруға, сенімділікті, тиімділікті және пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз ететін әдісті таңдауды мақсат етіп қойдық. Зерттеу жылу станцияларының дамуының екі сценарийін қарастырады: көмір және газ. Жаңғыртудың ұсынылатын нұсқасы жаңа энергия көзін – газ турбиналы ЖЭО салу болып табылады. Әр түрлі типтегі заманауи газ турбиналарына негізделген нұсқаларды зерттеу электр және жылу жүктемелерін жабу талаптарына сәйкес келетін оңтайлы шешімді анықтайды.

1. КІРІСПЕ

Салыстырмалы түрде суық қысы бар континенттік климат аймағында орналасқан (жылыту үшін сыртқы ауаның есептік температурасы $-20,1$ °C) Алматы қаласының тұтынушыларын экологиялық қауіпсіз, сенімді және тұрақты жылумен қамтамасыз ету міндеті айқын әлеуметтік аспектіге ие.

Кез келген мемлекеттің басты басымдылықтарының бірі – тұрғын үйлерде жайлы өмір сүру жағдайларын жасау. Қыста ең маңызды әлеуметтік міндеттердің бірі-жылуды қамтамасыз ету болып табылады. Сондықтан ЖЭО-дағы жылу және электр энергиясын орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесі қазіргі заманғы талаптарға, оның ішінде экологиялық тазалық пен техникалық жетілдіруге, жеткілікті жылу өнімділігі мен желінің өткізу қабілеттілігіне сәйкес келуі тиіс [1-3].

Алматы қаласы үшін экологиялық таза және озық технологиялар негізінде жылумен жабдықтаудың орталықтандырылған жүйесін дамыту маңызды әлеуметтік мәнге ие:

- тұтынушылар жылу мен электр энергиясын аралас өндірудің тиімді жүйесін пайдалана отырып, ЖЭО өндіретін жылумен қамтамасыз етілетін болады;

- орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйесін дамыту атмосфералық ауаны ластанудан қорғау үшін шешуші мәнге ие, биік құрылыс және орталықтандырылмаған жылумен жабдықтау жүйелері бар аудандарда бірнеше тәуелсіз жылу көздерін пайдалану қажеттілігін болдырмауға мүмкіндік береді;

- жаңа энергетикалық объектілерді салу және пайдалану белгілі бір дәрежеде жұмыспен қамту мәселесін шешеді, өйткені ол құрылыс-монтаж және инженерлік-техникалық кадрларға қажеттілік туғызады [2, 5-7].

Осыған байланысты аталған зерттеу деректері өзекті болып табылады, өйткені қазіргі таңда Алматы қаласындағы жылу электр орталықтарын жаңғыртудың негізгі стратегиялық бағыттары ретінде кәсіпорынның қоршаған ортаға тигізетін әсерін барынша азайта отырып, жылу және электр энергиясының қажетті деңгейін сақтау, энергия көзінің орнатылған қуатын арттыру, сондай-ақ зиянды шығарындыларды қысқартуға бағытталған экологиялық қауіпсіз технологияларды қолдану қарастырылуда [4-9].

Зерттеудің негізгі мақсаты – атмосфераға таралатын зиянды заттар шығарындыларын төмендету үшін жылу электр станциясын жаңғыртудың ең тиімді нұсқасын таңдау болып табылады. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

- жылу электр орталығын жаңғыртудың барлық ықтимал нұсқаларын қарастыру;

- «ЭКОЛОГ» (атмосфералық ауаның ластануын есептеуге арналған әмбебап бағдарламалық кешен) бағдарламасын пайдалана отырып, әрбір жаңғырту нұсқасы бойынша жылдық шығарындылар көлемін есептеу;

- жылу электр орталығын жаңғыртудың ең тиімді нұсқасын анықтау;

- кәсіпорыннан таралатын ластаушы заттардың атмосферада таралу карталарын құрастыру [3, 6-11].

Бүгінгі таңда Алматы қаласындағы жылу электр орталығында жүйенің шектеулі жүктемесі, күл алаңының құрылысын қажет етуі, күл-қалдықтарды пайдалануға потенциалды тұтынушылардың болмауы сияқты маңызды мәселелер жиналып, қоршаған ортаға зиянды шығарындылардың әсерін туғызатын ең өзекті мәселені қалыптастырып отыр.

Жаңғыртудың мәні қазіргі көмір-тозанды жабдықтарын экологиялық таза заманауи бу-газ қондырғыларымен алмастыруда, сондай-ақ электр және жылу энергиясын бірге өндіру мүмкіндігі бар, маневрлік жұмыс режимі бар, жоғары қуатты жаңа жылу-энергетикалық жүйелерді салуда, негізгі жабдықты консервациялау және инфрақұрылым мен қосымша жүйелерді пайдалану болып табылады.

Әлемдік тәжірибеде жылу және электр энергиясын өндіру мақсатында газ жағуға арналған ең қолжетімді технология ретінде заманауи бу-газ технологиялары танылады, олар қымбат «таза» отынды ең тиімді пайдалану мүмкіндігін береді [12-17].

Көмір отынын газбен алмастыру арқылы кәсіпорынның атмосфералық ауаға тигізетін теріс әсерін азайту, сонымен қатар қолданыстағы инфрақұрылымды барынша сақтау және энергетикалық қуатты қамтамасыз ету мәселесі жылу электр орталығын жаңғырту барысында мамандар алдында тұрған негізгі міндеттердің бірі болып табылады [7, 18].

Мақала жайында:

Жіберілді: 23.10.2025

Қайта қаралды: 28.02.2026

Қабылданды: 27.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

Дәйексөз үшін:

Бегимбетова А.,

Мананбаева С., Иусасва

Ж., Сағытаева А.,

Лепесбай А. Қоршаған

ортаға әсерді азайту

мақсатында Алматы ЖЭС

жаңғырту нұсқаларын

экологиялық бағалау //

Гидрометеорология и

экология, 121 (1), 2026,

124-132.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

ЖЭО жылу магистралін қайта құру жылу мен электр энергиясын өндірудің артуына әкеледі деп күтілуде. Жылу магистралі екі құбырлы режимге ауыстырылады, бұл қолданыстағы жылу желілері арқылы жылу шығынын арттырады. ЖЭО Алматыдағы ең ірі энергия көзі болып табылады [4]. Нысанның күрделілігіне және қолданыстағы инфрақұрылымды кеңінен пайдалануға байланысты ЖЭО жаңғыртудың ықтимал нұсқаларын бағалау және салыстыру бірнеше кезеңдерде қарастырылды. Модернизация нұсқалары дамудың екі сценарийі негізделген: көмір және газ.

Ол үшін төрт нұсқа қарастырылды:

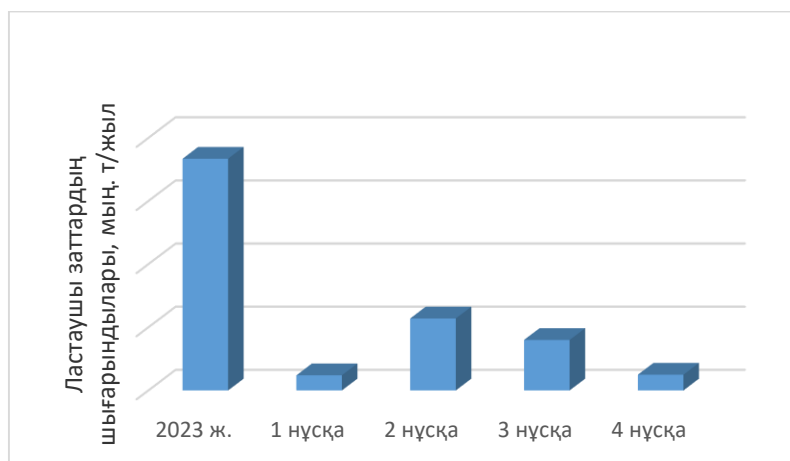
- 1-нұсқа-қазандықты газға ауыстыру арқылы жаңарту;
- 2-нұсқа - газ тазарту жабдығын орнатумен қолданыстағы қазандықтарды қайта құру;
- 3-нұсқа-когенерациялық газ турбиналық қондырғыны (КГТҚ) салумен ЖЭО-ты кеңейту;
- 4-нұсқа-жаңа газ қондырғысын салу.

Атмосфералық ластануды модельдеу әдістемесі әр түрлі модернизация сценарийлері үшін атмосферадағы ЖЭО-тың шығарындыларын тарату процестерін бағалауға негізделген. Шығарындыларды бақылау құралдық әдістер арқылы жүзеге асырылды. ЖЭО-дан шығатын ластаушы заттардың атмосфералық ауаның ластану деңгейіне қосатын үлесі Қазақстан Республикасы Қоршаған ортаны қорғау министрлігінің №100 бұйрығымен бекітілген әдістемеге сәйкес «ЭКОЛОГ» бағдарламасын қолдану арқылы ластаушы заттардың атмосферада таралу процесін модельдеу жолымен бағаланды [1, 5-6].

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

Модельдеу 2023-2024 жылдар аралығында қоспалар концентрациясына әсерін бағалау үшін екі түрлі метеожағдайлар жиынтығын ескере отырып жүргізілді.

ЖЭО-тың модернизациясының оңтайлы нұсқаларын анықтау кезінде шығарындыларды, ең алдымен күкірт диоксиді мен тоқтатылған бөлшектерді, сондай-ақ азот диоксидін азайту шешімдерін іздеуге баса назар аударылды [4]. Бұл жағдайда 1 және 4 нұсқалары (1-сурет) айқын артықшылықтар көрсетті.



Сурет 1. Қолданыстағы жағдаймен жылу электр орталықтарын жаңғырту кезінде зиянды заттар шығарындыларының салыстырмалы сипаттамасы

1-суретте жылу электр орталығынан (ЖЭО) шығатын ластаушы заттардың жиынтық шығарындылары қолданыстағы деңгей (2023 ж.) және жаңғырту нұсқалары бойынша салыстырмалы түрде көрсетілген. Деректерді талдау қолданыстағы технология жағдайында 2023 жылғы жиынтық шығарындылар көлемі 36,7 мың т/жыл құрайтынын көрсетеді, бұл көмір отынын пайдаланумен және қолданып отырған технологиялардың салыстырмалы түрде төмен экологиялық тиімділігімен түсіндіріледі.

Қарастырылған жаңғырту нұсқалары ластаушы заттар шығарындылары көлемінің едәуір төмендеуімен сипатталады. Атап айтқанда, 1-4 нұсқалар бойынша жиынтық шығарындылар көлемі тиісінше 2,4; 1,4; 8,0 және 2,5 мың т/жыл құрайды.

Алынған нәтижелер ЖЭО-ны жаңғырту бойынша жүргізілетін іс-шаралардың жоғары тиімділігін, әсіресе газ отынына көшу және заманауи энергетикалық технологияларды қолдану жағдайында айқын көрсетеді.

Экологиялық тұрғыдан ең тиімді болып 4-нұсқа саналады, онда газтурбиналық қондырғыларды пайдалану көзделген, бұл қала атмосфералық ауасына түсетін техногендік жүктеменің ең төмен деңгейін қамтамасыз етеді.

Осылайша, шығарындылардың салыстырмалы талдауы ЖЭО-ны жаңғыртудың газ негізіндегі нұсқаларын іске асырудың мақсатқа сай екенін растайды, бұл ластаушы заттардың атмосферада таралуын модельдеу нәтижелерімен және атмосфералық ауаға әсер ету маңыздылығын кешенді бағалаумен сәйкес келеді.

Ұсынылатын отынды жағу технологиялары мен газ тазарту жүйелері ең жақсы қолжетімді технологияларға сәйкес келеді, бұл Еуропалық одақтың талаптары деңгейінде қазандықтарда отынның әртүрлі түрлерін жағу кезінде қоршаған ортаға шығарындыларға қойылатын талаптардан аспайтын тазартудан кейінгі ластаушы заттардың деңгейін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді (1-кесте).

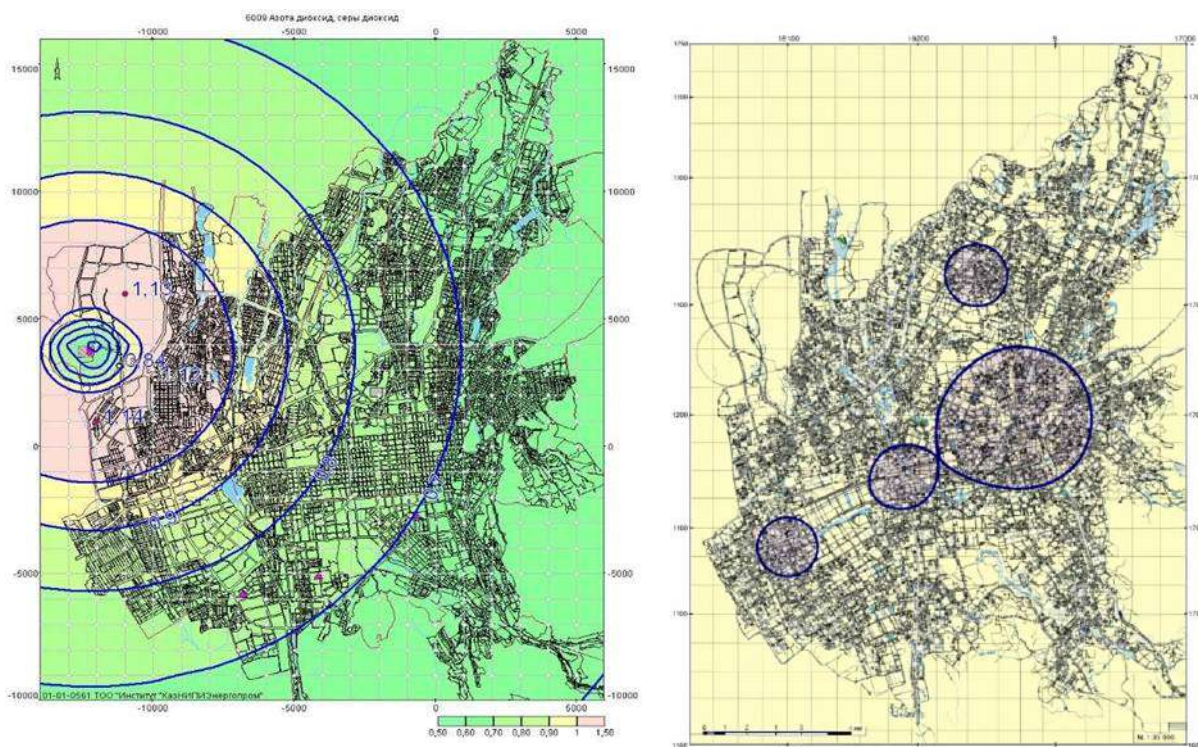
Кесте 1

ЖЭО-ты жаңғырту нұсқалары кезіндегі ластаушы заттардың шығарындылары, мг/нм³

Индикаторлар	Ағымдағы мәртебе	Қазақстан Республикасының талаптары	ЕО талаптары	Жылу электр станцияларын жаңарту нұсқалары			
				1	2	3	4
Жанармай	көмір	көмір/газ	көмір/газ	газ	көмір	көмір	газ
NO _x	650	650/125/50*	200/100/50*	100	200	200	50
SO ₂	1500	2000	200	-	200	200	-
Күл	400	400	20	-	20	20	-

Кестеден көріп отырғанымыздай, барлық нұсқалар бойынша жаңғыртудың нәтижесінде шығарындылар Еуропалық Одақтың түтін газдарындағы ластаушы заттардың нормаларына сәйкес келеді: азот диоксиді, күкірт оксиді және күл (әрқайсысы тиісінше 50 мг/нм³; 200 мг/нм³; 20 мг/нм³ көп емес).

ЖЭО-ның 4-нұсқа жаңғырту әдісі бойынша негізгі ластаушы заттардың таралу карталары (2-сурет) ағымдағы ластану деңгейімен салыстырғанда, қоршаған ортаға әсерді азайту тұрғысынан жоғары тиімділікті көрсетеді.



Жылу электр станциясының ағымдағы жағдайы

Модернизацияның нұсқасы (көмір-газ)

Сурет 2. Атмосфералық ауаның NO₂ ластануын бағалау

Қолайсыз метеорологиялық жағдайлар кезінде шығарындылардың әсер ету аймағы әртүрлі заттар бойынша шамамен 15-17 км құрайды, ал олардың ең үлкен бөлігі (60%-ға дейін) белсенді ластану аймағында, яғни ЖЭО-дан 5 км радиуста шөгеді.

Нақты метеорологиялық жағдайлар мен оңтүстік-шығыс және оңтүстік бағыттағы басым желдер кезінде ЖЭО-2 шығарындыларының әсеріне ең көп ұшырайтын аумақтар ретінде жақын орналасқан Көк-Қайнар, Саялды және Боролдай шағын аудандары айқындалады, мұндағы әсер деңгейі белгіленген нормативтік талаптар шегінде сақталады.

Жылу электр орталығының атмосфералық ауаға әсерінің кешенді бағасы, ағымдағы деңгейде де, жаңғырту нұсқалары бойынша да «күшті маңыздылықтағы әсер» ретінде сипатталады және әсердің кеңістік пен уақыт өлшемдерімен анықталады. Газ нұсқаларында әсердің қарқындылығы көмір нұсқаларымен салыстырғанда төмен (2-ші қауіптілік класы), ал көмір нұсқаларында – жоғары (1-ші қауіптілік класы).

Ағымдағы ЖЭО-ты жаңғыртудың көмірлік нұсқаларының «күшті маңыздылығы әсері» диапазонның жоғарғы шегінде орналасса (28-64 балл), газ нұсқаларында – осы диапазон ортасында орналасқан, бұл олардың басымдылығын көрсетеді.

Шығарындылардың таралуын есептеу нәтижелері максималды жүктеме кезінде ең жоғары үлес күкірт диоксидіне тиесілі екенін көрсетті - 98%. Сонымен қатар фондық ластану деңгейі шекті рұқсат етілген концентрациядан (ШРК) айтарлықтай төмен екенін атап өткен жөн – 0,038 мг/м³ (немесе 0,76 ШРК ең жоғарғы біржолғы мәні). Одан кейін үлесі 57% болатын қалқымалы заттар, азот диоксидінің (азот (IV) оксиді) үлесі 30% құрады, ал көміртек оксидінің әсері байқалмады. Орташа жылдық жүктеме жағдайында барлық ластаушы заттар бойынша ЖЭО-2-нің атмосфералық ауаны ластауға қосатын үлесі 1%-дан аспайды.

Жылу электр станциясының тұрақты газбен қамтамасыз етілуі жағдайында қаланың экологиялық жағдайына түсетін техногендік жүктемені төмендету тұрғысынан ең ұтымды нұсқа 4-нұсқа болып табылады. 4-нұсқадағы шығарындылар көлемі қолданылатын газтурбиналық қондырғылардың түріне байланысты айтарлықтай өзгермейді.

2-ші және 3-ші нұсқаларда қазандықтар күкіртті газдарды ұстауға арналған газ тазалау қондырғыларымен жабдықталып, көмір отыны пайдаланылған жағдайда, 2023

жылғы қолданыстағы деңгеймен салыстырғанда шығарындылар көлемінің төмендеуі 80%-ды құрайды.

ЖЭО-2-нің қоршаған табиғи ортаның құрамдас бөліктеріне тигізетін жиынтық әсері қолданыстағы деңгейде де, жаңғырту нұсқалары бойынша да «жоғары маңыздылықтағы әсер» ретінде сипатталады (балл саны ≥ 64).

4. ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген жұмыстың нәтижелері бойынша келесі негізгі қорытындылар тұжырымдалды. Жылдық шығарындылар көлемі бойынша жаңғырту нұсқаларына салыстырмалы бағалау жүргізілді. Алынған деректерге сәйкес, отын ретінде табиғи газ қолданылатын 1 және 4 нұсқалар жоғары тиімділік көрсетті. Шығарындылардың айтарлықтай қысқаруы (2023 жылмен салыстырғанда 92-94% төмендеу) қалқымалы бөлшектер мен күкірт диоксиді шығарындыларын толықтай жою, сондай-ақ азот диоксиді шығарындыларының едәуір төмендеуі есебінен қамтамасыз етіледі.

1 және 4 нұсқаларды салыстыру барысында 4-нұсқада отынды пайдалану тиімділігі 79% деңгейінде, ал 1-нұсқада бұл көрсеткіш 67% екенін көрсетті.

Сонымен қатар, 4-нұсқаны қолданыстағы ЖЭО аумағындағы жаңа алаңда іске асыру тәуекелі қолданыстағы тереңдетілген негізгі ғимарат шегінде қарастырылатын 1-нұсқамен салыстырғанда едәуір төмен екені анықталды.

Жылу электр орталығының әсер ету маңыздылығы санаты, ең алдымен, әсердің уақытша және кеңістіктік ауқымымен айқындалады. Қоршаған орта компоненттерінің сапасына қойылатын белгіленген нормативтер шегіндегі әсер ету қарқындылығы жағдайында әсер сипаты көмір пайдаланылатын нұсқаларда күшті, ал газ отыны қолданылатын нұсқаларда орташа деп бағаланады. Сонымен қатар, отын ретінде табиғи газ қолданылған жағдайда да, электростанцияның жоғары қуаттылығына байланысты, барлық нұсқалар бойынша әсер ету маңыздылығының санаты қолданыстағы деңгейде – 1-санатта сақталады.

Қоршаған орта компоненттеріне әсер ету көрсеткіштерін салыстырмалы талдау кешенді бағалау барысында шешуші фактор ретінде атмосфералық ауаның ластануына әсер ету алынатынын көрсетеді, себебі бұл әсер кеңістіктік тұрғыдан анағұрлым ауқымды сипатқа ие.

Қолайсыз метеорологиялық жағдайлар кезінде шығарындылардың әсер ету аймағы ластанушы заттардың түріне байланысты шамамен 15-17 км құрайды және қаланың дерлік бүкіл аумағын қамтиды. Шығарындылар ЖЭО-2-ден қашықтаған сайын әртүрлі қарқынмен шөгеді, олардың ең үлкен үлесі (60%-ға дейін) белсенді ластану аймағында, яғни қолайсыз метеорологиялық жағдайлар кезінде ЖЭО-2-ден шамамен 5 км радиуста байқалады.

Атмосфералық ауаға әсер ету тұрғысынан газ негізіндегі нұсқалардың артықшылығы ағын суларды бұру үшін осы нұсқаларда қарастырылған булану алаңдарының жер асты суларына тигізетін әсерімен едәуір дәрежеде теңестіріледі. Дегенмен, газ нұсқалары бойынша кешенді әсер ету көрсеткіші төмен деңгейде сақталады, бұл олардың басымдылығын айғақтайды.

Отын ретінде табиғи газды пайдалануға біртіндеп көшу көмір күлінен, күкірт диоксидінен және мазут күлінен туындайтын ауаның ластануын жоюға, сондай-ақ азот оксидтері, көміртек оксиді және парниктік газдар шығарындыларын атмосфераға таралуын азайтуға мүмкіндік береді.

Газтурбиналық жылу электр орталығын салу арқылы ЖЭО-ны газдандыру қолданыстағы сумен жабдықтау және су бұру инфрақұрылымын тиімді пайдалануға жағдай жасайды.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Осы зерттеуде пайдаланылған деректерді авторлар "Алматы электр станциялары" АҚ қызметінің жылдық есептерінен алды.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау – АСБ; деректерді басқару- СЕМ; Ресми талдау – АСБ, СЕМ; Әдістеме – ЖКМ, КАС; бағдарламалық қамтамасыз ету - КАС; бақылау – КАС, АҚЛ; визуализация – ЖКМ, АҚЛ; бастапқы жобаны жазу – АСБ, СЕМ; шолуды жазу және өңдеу – ЖКМ, КАС.

АЛҒЫС

Біз "Алматы электр станциялары" Акционерлік қоғамына осы жұмысты орындау кезінде деректерге қолдау көрсеткені үшін алғыс білдіреміз.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. «ЖЭО үшін ПЭК программасы» 2022-2032 жж. – 4 б. [Электрондық ресурс]. – 2022. – URL: <https://ecportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/60191> (жүгінген күні: 09.09.2024).
2. В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк, А. С. Прошин. Мунц, В. А. Котельные установки и парогенераторы [Электронный ресурс]. – 2020. - <https://ibooks.ru/products/382154> (дата обращения 09.09.2-24).
3. Mohammadjavad Soleimani, Fatemeh Negar Irani, Meysam Yadegar, Nader Meskin (2025). Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies Journal of Applied Energy. Vol. 401, Part C. P. 35-44. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126801
4. Yavorskiy O, Tarakhtii O., Zhukovskiy V., Panin V. (2024). Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system. Technology audit and production reserves. Vol. 6 No. 2(80). P. 50-57. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.320229
5. Қазақстан Республикасының экология кодексі. Қазақстан Республикасының 2021 жылғы 2 қаңтардағы № 400-VI ҚРЗ Кодексі [Электрон. ресурс]. – 2021. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K2100000400> (жүгінген күні: 04.06.2025).
6. Атмосфералық ауаға жол берілетін антропогендік әсер етудің нормативтерін айқындау қағидаларын бекіту туралы. Қазақстан Республикасы Экология, геология және табиғи ресурстар министрінің 2021 жылғы 14 қыркүйектегі № 375 бұйрығы [Электрон. ресурс]. – 2021. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2100024462> (жүгінген күні: 04.06.2024).
7. Ең үздік қолжетімді техникалар бойынша «Энергия өндіру мақсатында ірі қондырғыларда отын жағу» анықтамалығын бекіту туралы. Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2024 жылғы 23 қаңтардағы № 23 қаулысы [Электрон. ресурс]. – 2024. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2400000023/compare> (жүгінген күні: 04.06.2024).
8. Chen K., Liang Sh., Zhang Sh., Shen Zh., Wang, B. (2024). Zero carbon emission and cold energy recovery: Thermodynamic evaluation of a combined ammonia gas turbine and transcritical CO₂ cycle. Energy. Vol. 313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133714>
9. Yazdani A., Salimi M., Amidpour M., Yilmaz M. (2024). Techno-economic study of gas turbines with hydrogen, ammonia, and their mixture fuels. Heliyon. Vol. 10, Issue 23. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40727>
10. I-Fang Su, Yu-Chi Chung, Chiang Lee, Pin-Man Huang (2023). Effective PM_{2.5} concentration forecasting based on multiple spatial-temporal GNN for areas without monitoring stations. Expert Systems with Applications. Vol. 234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121074>
11. Puliang Du, Xiaomin Gong, Bei Han, Xuemei Zhao (2023). Carbon-neutral potential analysis of urban power grid: A multi-stage decision model based on RF-DEMATEL and RF-MARCOS. Expert Systems with Applications. Vol. 234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121026>
12. Lima R., Carvalho M., Glauber L. (2023). Analysis of Air Quality in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco. Revista Brasileira de Geografia Física Vol.16, n.6. P. 3168-3188. DOI: 10.26848/rbgf.v16.6.p3168-3188
13. Ceglinski, L. de V., Tavella, R. A., Boninfácio, A. da S., Santos, J. E. K., & Silva Júnior, F. M. R. (2022). Weekend effect on air pollutant levels in southernmost cities of Brazil with different economic activities. Environmental Monitoring and Assessment, 194(834). P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10518-6>.
14. Chen, S. P., Wang, C. H., Lin, W. D., Tong, Y. H., Chen, Y. C., Chiu, C. J., Chiang, H. C., Fan, C. L., Wang, J. L., & Chang, J. S. (2018). Air quality impacted by local pollution sources and beyond – Using a prominent petro-industrial complex as a study case. Environmental Pollution, Vol. 236. P. 699-705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.091>.
15. Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., & Chen, Z. (2021). A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fueled vessels. Science of the Total Environment. Vol. 766. P. 144319-144337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>.
16. Han, L., Zhou, W., Li, W., & Qian, Y. (2022). Challenges in continuous air quality improvement: An insight from the contribution of the recent clean air actions in China. Urban Climate. Vol. 46. P. 101328-101338. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101328>.
17. Hu, M., Wang, Y., Wang, S., Jiao, M., Huang, G., & Xia, B. (2021). Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China. Atmospheric Environment. Vol. 254. P. 118415-118428. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118415>.
18. Lin, Y. C., Lai, C. Y., & Chu, C. P. (2021). Air pollution diffusion simulation and seasonal spatial risk analysis for industrial areas. Environmental Research. Vol. 194. P. 110693-110718. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110693>

REFERENCES

1. «ЖЭО үшін ПЭК программасы» 2022-2032 жж. – 4 б. [Электрондық ресурс]. – 2022. – URL: <https://ecportal.kz/Public/PubHearings/LoadFile/60191> (жүгінген күні 09.09.2024).
2. В. А. Мунц, Е. Ю. Павлюк, А. С. Прошин. Мунц, В. А. Котельные установки и парогенераторы [Электронный ресурс]. – 2020. - <https://ibooks.ru/products/382154> (дата обращения 09.09.2-24).
3. Mohammadjavad Soleimani, Fatemeh Negar Irani, Meysam Yadegar, Nader Meskin (2025). Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies Journal of Applied Energy. Vol. 401, Part C. P. 35-44. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126801
4. Yavorskiy O, Tarakhtii O., Zhukovskiy V., Panin V. (2024). Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system. Technology audit and production reserves. Vol. 6 No. 2(80). P. 50-57. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.320229
5. Qazaqstan Respublikasynyñ ekologiya kodeksı. Qazaqstan Respublikasynyñ 2021 jylgy 2 qañtardağy № 400-VI QRZ Kodeksı [Elektron. resurs]. – 2021. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/K2100000400> (jügingen küni: 04.06.2025).
6. Atmosferalyq auağa jol beriletin antropogendik әser etudіñ normativterin aiqyndau qağidalaryn bekitu turaly. Qazaqstan Respublikasy Ekologiya, geologiya және tabiği resurstar ministriñniñ 2021 jylgy 14 qyrküiektegi № 375 büiryğy [Elektron. resurs]. – 2021. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/V2100024462> (jügingen küni: 04.06.2024).
7. Eñ üzдіk qoljetimді tehnikalar boiynsa «Energiya öndiru maqsatynda ırı qondyrğylarda otyñ jaғu» anyqtamalyğyn bekitu turaly. Qazaqstan Respublikasy Ükimetniñ 2024 jylgy 23 qañtardağy № 23 qaulysy [Elektron. resurs]. – 2024. – URL: <https://adilet.zan.kz/kaz/docs/P2400000023/compare> (jügingen küni: 04.06.2024).

8. Chen K., Liang Sh., Zhang Sh., Shen Zh., Wang, B. (2024). Zero carbon emission and cold energy recovery: Thermodynamic evaluation of a combined ammonia gas turbine and transcritical CO₂ cycle. *Energy*. Vol. 313. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133714>
9. Yazdani A., Salimi M., Amidpour M., Yilmaz M. (2024). Techno-economic study of gas turbines with hydrogen, ammonia, and their mixture fuels. *Heliyon*. Vol. 10, Issue 23. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40727>
10. I-Fang Su, Yu-Chi Chung, Chiang Lee, Pin-Man Huang (2023). Effective PM_{2.5} concentration forecasting based on multiple spatial-temporal GNN for areas without monitoring stations. *Expert Systems with Applications*. Vol. 234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121074>
11. Puliang Du, Xiaomin Gong, Bei Han, Xuemei Zhao (2023). Carbon-neutral potential analysis of urban power grid: A multi-stage decision model based on RF-DEMATEL and RF-MARCOS. *Expert Systems with Applications*. Vol. 234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121026>
12. Lima R., Carvalho M., Glauber L. (2023). Analysis of Air Quality in the Metropolitan Region of Recife, Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física* Vol.16, n.6. P. 3168-3188. DOI: 10.26848/rbgf.v16.6.p3168-3188
13. Ceglinski, L. de V., Tavella, R. A., Boninfácio, A. da S., Santos, J. E. K., & Silva Júnior, F. M. R. (2022). Weekend effect on air pollutant levels in southernmost cities of Brazil with different economic activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(834). P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10518-6>.
14. Chen, S. P., Wang, C. H., Lin, W. D., Tong, Y. H., Chen, Y. C., Chiu, C. J., Chiang, H. C., Fan, C. L., Wang, J. L., & Chang, J. S. (2018). Air quality impacted by local pollution sources and beyond – Using a prominent petro-industrial complex as a study case. *Environmental Pollution*, Vol. 236. P. 699-705. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.091>.
15. Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., & Chen, Z. (2021). A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fueled vessels. *Science of the Total Environment*. Vol. 766. P. 144319-144337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>.
16. Han, L., Zhou, W., Li, W., & Qian, Y. (2022). Challenges in continuous air quality improvement: An insight from the contribution of the recent clean air actions in China. *Urban Climate*. Vol. 46. P. 101328-101338. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101328>.
17. Hu, M., Wang, Y., Wang, S., Jiao, M., Huang, G., & Xia, B. (2021). Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China. *Atmospheric Environment*. Vol. 254. P. 118415-118428. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118415>.
18. Lin, Y. C., Lai, C. Y., & Chu, C. P. (2021). Air pollution diffusion simulation and seasonal spatial risk analysis for industrial areas. *Environmental Research*. Vol. 194. P. 110693-110718. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110693>

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ АЛМАТИНСКОЙ ТЭЦ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Айнур С. Бегимбетова* Ph.D, ассоциированный профессор, Светлана Е. Мананбаева, Жанна К. Мусаева к.б.н., Куралай А. Сагытаева, Акбота К. Лепесбай

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Қазақстан; a.begimbetova@aes.kz, s.mananbaeva@aes.kz, zh.musaeva@aes.kz, k.sagytayeva@aes.kz, a.lesbek@aes.kz

*Автор корреспонденции: Айнур С. Бегимбетова, a.begimbetova@aes.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

выбросы, загрязнение атмосферы, теплоэлектроцентраль, природный газ, уголь, оксид азота, зола, углерод, парниковые газы, газотурбинные установки

АБСТРАКТ

Переход деятельности тепловых электрических станций на природный газ является эффективным способом снижения вредных выбросов и улучшения качества воздуха в зоне влияния выбросов станций. Сжигание природного газа практически исключает загрязнение воздуха угольной золой, диоксидом серы и мазутной золой. Снижаются выбросы азота и оксида углерода, а также парниковых газов, сокращаются годовые выбросы загрязняющих веществ примерно на 80%. Процесс моделирования в данном исследовании представляет собой многоэтапную процедуру, направленную на определение оптимального технологического решения, которое минимизирует экологический ущерб при сохранении надежности энергоснабжения города. Оценка вклада существующих выбросов ТЭЦ в уровень загрязнения атмосферного воздуха выполнена путем моделирования процесса распределения выбросов загрязняющих веществ в атмосфере. Моделирование выполнено с использованием универсальной программы расчета загрязнения атмосферного воздуха "Эколог" (версия 3.0), разработанной фирмой "Интеграл" (г. С-Петербург) на основе Методики расчета рассеяния при максимальной нагрузке ТЭЦ и неблагоприятных метеорологических условиях,

По статье:

Получено: 23.10.2025

Пересмотрено: 28.02.2026

Принято: 27.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

способствующих накоплению примесей в атмосферном воздухе). Основная цель исследования заключалась в определении варианта модернизации Алматинской ТЭЦ, который позволит минимизировать воздействие на окружающую среду без ущерба обеспечения надежности и эффективности теплоснабжения и обеспечения энергоснабжения, при одновременном повышении мощности, надежности и безопасности эксплуатации. В исследовании рассматриваются два сценария развития деятельности тепловых станций: угольный и газовый. Предлагаемым вариантом модернизации является строительство нового источника энергии – газотурбинной ТЭЦ. Исследование вариантов на базе современных газовых турбин различных типов позволит выявить оптимальное решение, отвечающее требованиям покрытия электрической и тепловой нагрузок.

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF OPTIONS FOR MODERNIZATION OF THE ALMATY THERMAL POWER PLANT WITH THE AIM OF MINIMIZING THE ENVIRONMENTAL IMPACT

Ainur S. Begimbetova* Ph.D, Associate Professor, Svetlana E. Mananbaeva, Zhanna K. Musaeva Ph.D, Kuralai A. Sagytayeva, Akbota K. Lepesbay

Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan; a.begimbetova@aes.kz, s.mananbaeva@aes.kz, zh.musaeva@aes.kz, k.sagytayeva@aes.kz, a.lesbek@aes.kz

*Author correspondent: Ainur Begimbetova, a.begimbetova@aes.kz

KEY WORDS

emissions, air pollution, combined heat and power plant, natural gas, coal, nitrogen oxide, ash, carbon, greenhouse gases, gas turbine units

About article:

Received: 23.10.2025

Revised: 28.02.2026

Accepted: 27.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT




Converting combined heat and power plants (CHPs) to natural gas combustion is an effective way to reduce harmful emissions and improve air quality in the plant's footprint. Conversion to natural gas virtually eliminates air pollution from coal ash, sulfur dioxide, and fuel oil ash. It also reduces nitrogen and carbon oxide pollution, and lowers greenhouse gas emissions. Converting CHPs to natural gas combustion will reduce annual pollutant emissions by approximately 80%. The main objective of the study is to identify a modernization option for the Almaty CHP that minimizes environmental impact without compromising the reliability and efficiency of energy supply, while increasing installed capacity utilization, reliability, and operational safety. The study examines two CHP development scenarios: coal-fired and gas-fired. The recommended option for modernizing the combined heat and power plant is the construction of a new source - a gas turbine combined heat and power plant - with a variant study based on modern gas turbine units (GTU) of various types in order to determine the optimal option that will meet the requirements for covering electrical and thermal loads.

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



Scientific article

GEOCHEMICAL ANALYSIS OF SOILS OF DRY STEPPE ECOSYSTEMS OF THE EREYMENTAU DISTRICT OF THE AKMOLA REGION

Gulzira Gataulina^{1,*} , Yerbolat Mendybaev¹ , Candidate of Biological Sciences, professor, Turgut Tüzün Onay² , PhD, professor

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; gulziragataulina@gmail.com (GG), mendybayev_yekh@enu.kz (YM)

² Boğazici University, Istanbul, Turkey; onayturg@boun.edu.tr (TTO)

*Corresponding author correspondent: Gulzira Gataulina, gulziragataulina@gmail.com

KEY WORDS

heavy metals
dry steppe zone Ereymentau district
soil
degradation

ABSTRACT

This study is a long-term comparative analysis of the morphological and chemical characteristics of dark chestnut solonchic soils in the dry-steppe zone of the Ereymentau district of the Akmola region for the period 1979-2024. Based on archival soil surveys and modern laboratory data, changes in the humus content, pH, ionic composition and heavy metal concentration were estimated. The use of geostatistical mapping and GIS technologies allowed us to identify spatial patterns of soil cover transformation. The results showed a significant decrease in the organic matter content in the upper horizons, relative stability of pH in the slightly alkaline range, redistribution of exchangeable cations and vertical migration of trace elements, including plumbum and cadmium. Despite the fact that heavy metal concentrations remain below the established maximum permissible levels, the identified trends indicate progressive degradation and the need for systematic monitoring. Recommendations for sustainable land use, taking into account regional climatic and anthropogenic factors, are proposed.

About article:

Received: 30.09.2025

Revised: 14.01.2026

Accepted: 27.03.2026

Published: 01.04.2026

For citation:

Gataulina G., Mendybaev Y., Onay T. Geochemical analysis of soils of dry steppe ecosystems of the Ereymentau district of the Akmola region // Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 133-144.

1. INTRODUCTION

The study of soil composition, fertility, erosion, heavy metals, historical changes and recent events in Akmola region has become a critical area of research as they affect agricultural productivity, environmental sustainability and human health. The development of this area reflects the growing concerns about land degradation and environmental pollution, with initial studies focusing on soil fertility and land use dynamics [1, 2], and recent studies highlighting the anthropogenic impact and the influence of climate change on soil erosion and pollution [3, 4, 5]. Characterized by steppe landscapes and intensive agricultural use, Akmola region faces serious challenges including soil erosion rates reaching several tons per hectare per year [3, 6] and accumulation of heavy metals posing environmental and health risks [7, 8]. These issues have practical implications for food security and sustainable land management in Kazakhstan [9].

The specific problem under consideration relates to the complex interplay between soil degradation, heavy metal pollution and land use change in the Akmola region, which remains poorly understood in a comprehensive manner. Despite numerous studies on soil erosion [10], heavy metal pollution [7, 11] and land use dynamics [12], there is a notable gap in comprehensive assessments that take into account the physicochemical properties of soils, pollution levels and historical land use trends in this region [1, 3, 8]. Controversy remains regarding the relative contributions of natural and anthropogenic sources of heavy metals [13, 14] and the effectiveness of current soil conservation measures [3, 6]. Failure to address these gaps may worsen land degradation and undermine the sustainability of agriculture [9, 15].

Soil monitoring involves the assessment of chemical characteristics, including organic matter content, acidity levels, and macro- and micronutrient concentrations, which are key determinants of agronomic fertility and crop yields [16, 17]. Long-term analysis of soil

chemistry facilitates the development of strategies aimed at restoration and adaptive management of terrestrial resources in the context of changing environmental conditions [18, 19]. Modern soil monitoring methodologies prioritize not only the assessment of chemical metrics, but also complex geo-ecological systems using integrated methods that include remote sensing, geostatistics, and pollution detection techniques. Such complex systems have been effectively used to assess the state of the environment and manage pollution in river basins and agricultural ecosystems [20]. In the steppe ecosystems of Kazakhstan, this methodology is particularly relevant due to the combined effects of agricultural intensification and climate variability.

To improve soil fertility and promote sustainable land use in Northern Kazakhstan, internationally recognized methodologies are often applied. In Brazil, the widespread use of no-tillage systems significantly reduces mechanical soil disturbance, preserves vegetation cover, and mitigates humus depletion [21]. In China, liming and silicon-rich fertilizers are widely applied to prevent acidification under intensive agricultural practices [22]. The European Union enforces strict regulations on the use of phosphorus fertilizers containing heavy metals and applies wastewater filtration systems to prevent the accumulation of lead and cadmium in agricultural soils [23]. These international practices provide a valuable methodological context for understanding global approaches to soil protection and sustainable land management.

This study shows that degradation processes that have occurred over the past 45 years can be systematically quantified using geostatistical and remote sensing methodologies. The Eurasian steppe, a region of major global ecological importance, is undergoing land-use changes that remain poorly understood.

Remote sensing plays an important role in systematically monitoring spatial and temporal changes in the earth's soil cover. An analysis using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) over the past three decades has shown that approximately 22% of the earth's surface has been degraded, with notable cases occurring in particular in the steppes of Russia, Ukraine and Kazakhstan [24].

In addition to agronomic factors, the socio-political transformations that followed the collapse of the Soviet Union have had a significant impact on soil health. Historically, these steppes have undergone significant changes, particularly during the Soviet Virgin Lands campaign, which dramatically altered land use and ecosystem structure [25, 26]. Steppes provide key ecosystem services, including biodiversity conservation, carbon storage, and support for the livelihoods of pastoralists [27, 28]. Approximately 7.1% of Kazakhstan's territory is dry steppe, and the Akmola region is a key zone of typical steppe vegetation, dominated by species such as *Stipa lessingiana* [29]. The socio-economic and climatic importance of these ecosystems highlights the need for a comprehensive understanding and sustainable management [30].

The objective of this study is to assess long-term changes in soil cover and develop recommendations for sustainable land use. The study was conducted on the example of the Ereymentau district of the Akmola region. The dynamics of humus content, pH, heavy metals and salt concentrations in different soil horizons were analyzed for the period from 1979 to 2024. The study used eco-geographical methods, including geostatistical mapping, to identify spatial patterns of soil transformation. The results of the study will help to determine the influence of natural and anthropogenic factors, identify areas vulnerable to restoration and develop rational land use strategies. The study used ecological and geographical methodologies. The results of this study are expected to help clarify the impact of natural and anthropogenic factors, identify areas for restoration work, and develop rational land use strategies.

2. MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in the Ereymentau district, located in the east of Akmola region within the dry steppe zone of the northern Kazakh Upland, 800 m from the village of Karagaily (Fig. 1). The relief represents a hilly plain composed mainly of Quaternary loess-like loams and alluvial deposits. The vegetation cover belongs to typical steppe and dry-steppe formations dominated by cereal and forb-cereal associations, with sod grasses on flat areas and halophytes in depressions [1, 31].

To assess the long-term dynamics of soil properties, archival materials from a 1979 soil survey were used, combined with the results of field studies conducted in 2024. As part of the comparative analysis, two key sites were selected. At each site, complete soil profiles were described and samples were collected by genetic horizons.

Field investigations were conducted on 5 October 2024, during stable dry autumn conditions. Soil samples were collected by genetic horizons from fully described soil profiles in accordance with ISO 10381-4:2003. For the surface layer, the standard sampling depth of 0–20 cm was used for arable soils and 0–10 cm for virgin land.

Laboratory analyses were carried out in the accredited laboratory of Eco Project Company LLP using certified analytical equipment and standard analytical procedures. Soil pH was measured using an ITAN pH meter (serial No. 300927) in accordance with GOST 26425-85. Chloride, sulfate, and nitrate concentrations were determined photocolometrically using a KFK-3 photocolorimeter (serial No. 2170221), following the requirements of the same standard. Calcium and magnesium contents were determined titrimetrically, while organic matter (humus) was analyzed in accordance with GOST 26213-2021. Concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu, Co, Ni, Fe, and Mn) were measured by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) using an ICPE-9820 spectrometer (Shimadzu, Japan), serial No. B42046101615 CZ, in compliance with GOST ISO 22036-2014.

Measurement uncertainty was assessed using the instrumental method, based on the certified accuracy of the equipment and the methodological documentation provided by the laboratory. For humus, a relative uncertainty of 20% was applied for contents up to 3%, and 15% for contents above 3%. For ionic indicators, the following relative uncertainties were used: chlorides - 15%, sulfates - 10%, calcium and magnesium - 5%, and pH - 1% (Table 1). For heavy metals, the methodological relative uncertainties specified for ICP-AES were applied: Pb — 25%, Cd - 50%, Zn - 20%, Cu - 20%, Co - 40%, Ni - 35%, Fe - 28%, and Mn - 30% (Table 2). Archival data from 1979 are presented without uncertainty estimation, as the original laboratory protocols did not contain information on measurement error.

The absolute uncertainty was calculated using the formula $\Delta C = C \times \delta / 100$, and all results are presented in the format $C \pm \Delta C$, ensuring correct representation of measurement uncertainty and compliance with analytical standards.

The coordinates of the sampling points were recorded using GPS, and the spatial referencing and visualization of the results were performed in the ArcGIS environment. Historical maps (Atlas of the Virgin Lands, 1964) were georeferenced using ArcGIS 10.8 based on control points and the WGS 84 projection, UTM Zone 42N [32].

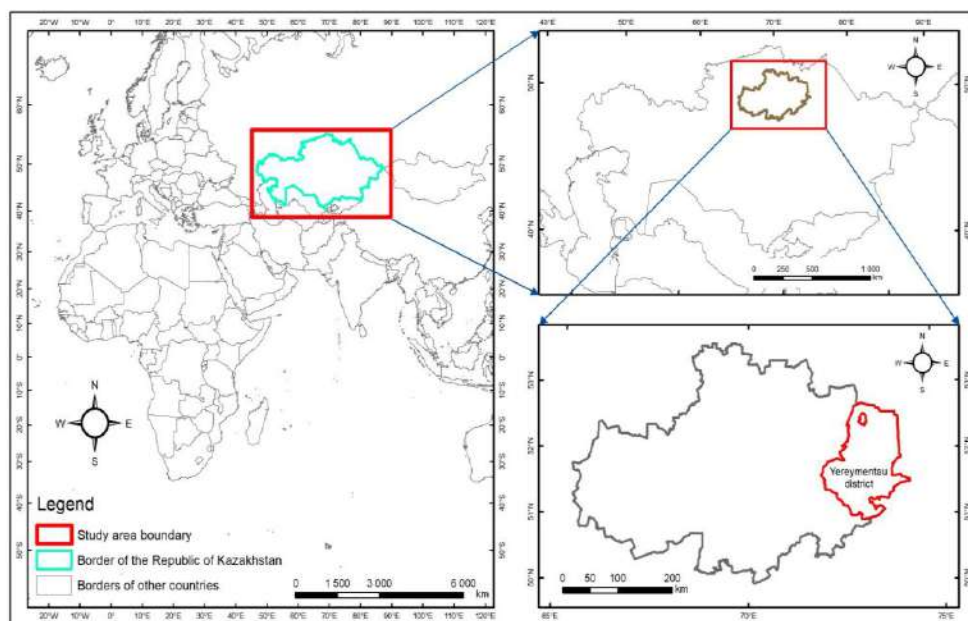


Figure 1. Geographical location of the site

To present the obtained data, comparative graphs were constructed using Python software and the Matplotlib and Pandas libraries. The analysis covered the humus content, pH values, and Cl^- and SO_4^{2-} ion concentrations in soil horizons for 1979 and 2024. Each group of indicators was visualized as color-coded diagrams with digital signatures and error bars indicated by thin lines. Cartographic materials were exported in PDF and JPEG formats (scale 1:1,000,000).

3. RESULTS AND DISCUSSION

To characterize the soil cover of the study area, two soil pits (No. 1, No. 2) were laid on October 5, 2024, at a distance of 800 meters from the village of Karagaily. The vegetation cover is represented by forb-cereal (*Medicago falcata*, *Stipa capillata*) and feather grass-fescue-wormwood (*Stipa lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia lerchiana*) associations. The dominant species are *Stipa capillata* and *Festuca valesiaca* with an admixture of *Artemisia spp.*, *Agropyron spp.*, *Phlomis spp.*, *Thymus spp.*, *Phleum spp.*, *Agrostis alba*, *Salvia spp.* and *Elytrigia spp* [31].

Projected and true vegetation cover:

Section No. 1: projected – 80%, true – 40%;

Section No. 2: projected – 70%, true – 35%.

Morphological characteristics of soil profiles

Section P-1 (dark chestnut solonetzic)

Effervescence from 10% HCl is observed from 37 cm.

Horizon A (0–24 cm): dark chestnut with a grayish tint, moist, heavy loam, lumpy-nutty, compacted, many roots, gradual transition.

Horizon B (24–36 cm): brown-grayish, moist, heavy loam, blocky, dense, few roots, clear transition.

Horizon BC (36–72 cm): gray-brown, moist, heavy loam, lumpy-blocky, dense, no roots, gradual transition.

Horizon C (72 cm...): light brown, heavy loam with carbonate deposits in the form of white spots.

Section P-2 (dark chestnut solonetzic)

Effervescence from 10% HCl is observed from 40 cm.

Horizon A (0–29 cm): Dark chestnut with a grayish tint, moist, heavy loam, lumpy-nutty, compacted, many roots, gradual transition.

Horizon B (29–49 cm): brownish-gray, moist, heavy loam, columnar, dense, no roots, abrupt transition.

Horizon BC (49–78 cm): gray-brown, moist, heavy loam, lumpy-blocky, dense, no roots, gradual transition.

Horizon C (78 cm...): brownish-yellow, heavy loam, carbonates are expressed as concretions, coatings, light inclusions.

According to mechanical composition, all soils are classified as heavy loamy, which is confirmed by laboratory tests (Table 1). Analysis of water extract indicates the absence of salinization.

Table 1

Composition of water extract of soils

№	Soil	Horizon and sampling depth. cm	Humus. %	pH	Mg-eq/ 100 g of soil		%	
					Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1979								
1	P- 1 dark chestnut solo-netzic	A 0-21	3.8	7.6	0.005±0.08	0.005±0.10	0.40	0.15
		B 21-46	3.66	7.8	0.017±0.28	0.005±0.10	0.80	0.30
		BC 46-74	2.97	7.9	0.005±0.08	0.005±0.10	0.50	0.20
		C 74...	2.09	7.7	0.010±0.16	0.005±0.10	0.40	0.15
2024								
1	P-1 dark chestnut solo-netzic	A 0-24	3.4±0.51	7.68±0.08	0.221±0.033	<0.5	0.91±0.046	0.7±0.035
		B 24-36	3.2±0.48	7.71±0.08	0.254±0.038	<0.5	0.95±0.048	0.98±0.049
		BC 36-72	3.0±0.060	7.79±0.08	0.271±0.041	<0.5	0.98±0.049	0.8±0.040
		C 72...	2.9±0.58	7.81±0.08	0.38±0.057	<0.5	0.78±0.039	0.8±0.040
2	P-2 dark chestnut solo-netzic	A 0-29	2.6±0.52	8.0±0.08	0.221±0.033	<0.5	0.88±0.044	1.0±0.050
		B 29-49	2.4±0.48	7.82±0.08	0.254±0.038	<0.5	0.84±0.042	0.9±0.045
		BC 49-78	2.2±0.44	7.75±0.08	0.271±0.041	<0.5	0.8±0.040	0.89±0.045
		C 78...	2.1±0.42	7.9±0.08	0.38±0.057	<0.5	0.79±0.040	0.98±0.049

Comparative data for 1979 and 2024 (Table 1) indicate a noticeable decrease in humus concentration in all genetic horizons:

Section P-1: Horizon A (0–24 cm): from 3.8% to 3.4%;

Section P-2: Horizon A (0–29 cm): from 3.8% to 2.6%;

These trends are illustrated in Fig. 2.

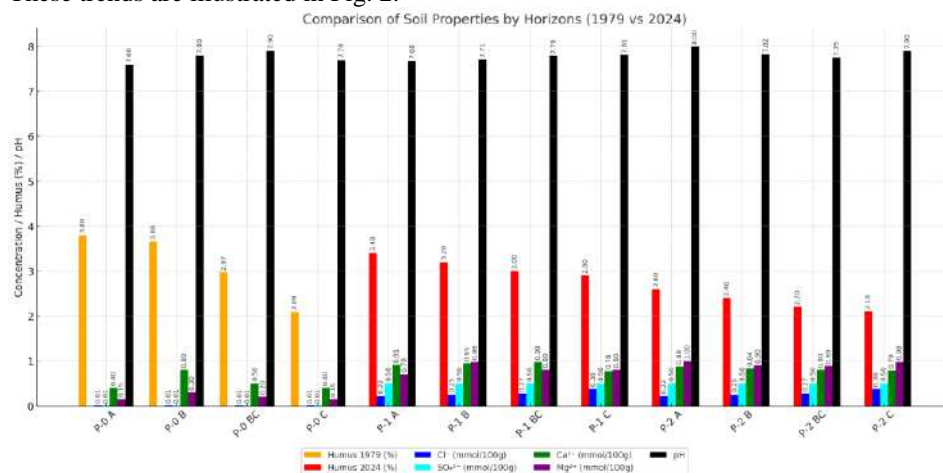


Figure 2. Comparison of Soil Properties Across Horizons (1979 vs. 2024)

The pH values in the studied soils remained in a stable alkaline range: from 7.6 to 7.9 in 1979 and from 7.68 to 8.0 in 2024. Minor pH fluctuations along the profile (see Fig. 2) reflect the preservation of the carbonate buffer potential of dark chestnut solonchaks, which is typical for areas with a moderately arid climate. The maximum pH value (8.0) was recorded in the upper horizon of section P-2, which may indicate the accumulation of exchangeable bases. (Fig. 2). The concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} showed a clear increase in 2024 compared to 1979. Thus, the Cl^- content in 1979 in all horizons did not exceed 0.017 mmol/100 g, whereas in 2024 it varied from 0.221 to 0.38 mmol/100 g, with the highest values in the C horizons (P-1 and P-2), which may indicate the accumulation of easily soluble salts in the lower part of the profile.

The concentration of SO_4^{2-} in 1979 was at the level of 0.005 mmol/100 g, while in 2024, in all sections, a value of less than 0.5 mmol/100 g was recorded, conditionally interpreted as 0.5 mmol/100 g for the purposes of visualization and comparison. This may indicate the entry of sulfur-containing compounds, possibly of technogenic origin or associated with changes in moisture conditions.

In section P-1, a slight decrease in the Ca^{2+} content was revealed in the upper horizon (0.91 mmol/100 g) compared to the subsurface (up to 0.98 mmol/100 g). This may be due to calcium leaching during surface moistening. In section P-2, the Ca^{2+} and Mg^{2+} content steadily decreases along the profile (Ca^{2+} : from 0.88 to 0.79 mmol/100 g; Mg^{2+} : from 1.0 to 0.98 mmol/100 g), which reflects the natural migration of exchangeable bases down the profile. Compared to 1979, in 2024 the concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} increased by 2–3 times, which may indicate an increase in mineralization and may be associated with anthropogenic impact (grazing, fertilizers, changes in water regime). The content of heavy metals in the aqueous extract is presented in Table 2.

Table 2

The concentration of heavy metals in the aqueous extract of soils

№	Soil	Horizon and Depth of sampling, cm	mg/kg							
			Pb	Cd	Zn	Cu	Co	Ni	Fe	Mn
	MPC*, mg/kg		32	0.5	23	3	5	4	Not stand.	1500
1	P-1 dark chestnut solonchak	A 0-24	0.051±0.013	0.0012±0.0006	0.01±0.0020	0.0015 3	0.008±0.0032	0.35 2	10.0±2.8 0	1.5±0.45
			0.042±0.011	0.0013±0.0007	0.009±0.0018	0.0011 2	0.07±0.028	0.3±0.10	11.0±3.0 8	1.5±0.45
		BC 36-72	0.045±0.045	0.002±0.0010	0.01±0.0020	0.0012 2	0.05±0.020	0.4±0.14	13.0±3.6 4	0.9±0.27

2 P-2 dark chestnut solonetzic

C 72...	0.04±0.010	0.0023±0.0012	0.008±0.0016	0.0012	±0.0002	0.06±0.024	0.3±0.10	15.0±4.20	1.0±0.30
A 0-29	0.054±0.014	0.0035±0.0018	0.004±0.0008	0.0013	±0.0003	0.08±0.032	0.5±0.18	12.0±3.36	1.1±0.33
B 29-49	0.045±0.011	0.0015±0.0008	0.006±0.0012	0.005±0.0010	0.08±0.032	0.44±0.1	11.0±3.05	0.9±0.27	
BC 49-78	0.046±0.012	0.004±0.0020	0.005±0.0010	0.004±0.0008	0.09±0.036	0.35±0.1	10.0±2.80	0.8±0.24	
C 78...	0.051±0.013	0.0035±0.0018	0.005±0.0010	0.001±0.0002	0.08±0.032	0.31±0.1	13.0±3.64	1.0±0.30	

* Maximum permissible concentrations (MPC) of heavy metals in agricultural soils

All values of heavy metal concentrations in soils of sections P-1 and P-2 are below the established MAC.

In section P-1, a slight increase in the content of Pb and Cd with depth is observed. Fe accumulation is noted in the C horizon (72+ cm), where its concentration reaches 15.0 mg/kg.

In section P-2, the maximum Fe content (12.0 mg/kg) is recorded in the B horizon (29–49 cm). Increased levels of Pb and Cd are noted in the upper horizons compared to the underlying layers.

Concentrations of Ni and Co in all soil horizons remain low and well below the MPC. Ni ranges between 0.3–0.5 mg/kg, while Co varies from 0.05 to 0.09 mg/kg, with no indication of accumulation in the upper horizons. The stable vertical distribution of both elements suggests their predominantly geogenic origin, associated with loess-like loams that constitute the parent material of dark chestnut soils. The low mobility of Ni and Co is further explained by the slightly alkaline soil reaction (pH 7.7–8.0), which promotes the formation of poorly soluble hydroxide and carbonate compounds. This limits their migration within the profile and reflects their natural background levels and conservative geochemical behavior under dry steppe conditions.

The dynamics of heavy metals are shown in Figures 3–10 (vertical and spatial distribution).

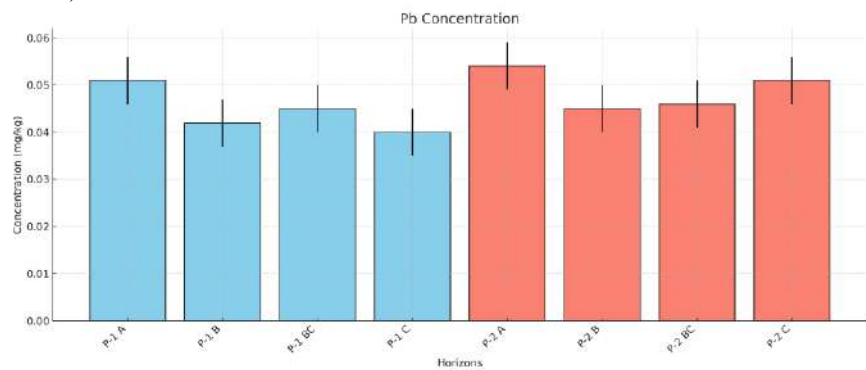


Figure 3. Lead (Pb) Concentration

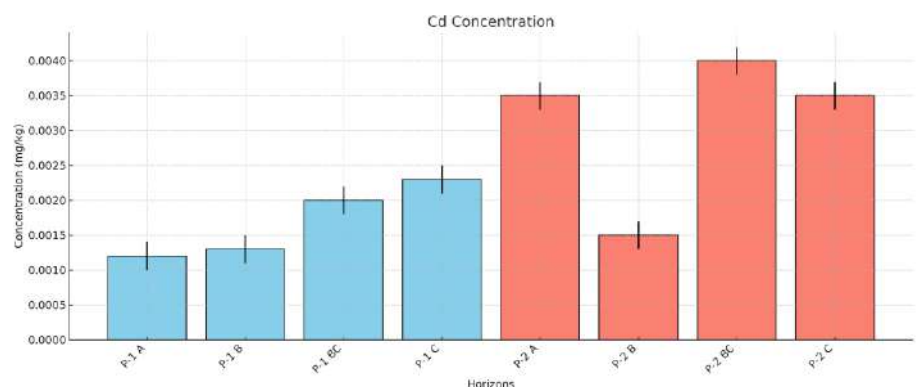


Figure 4. Cadmium (Cd) Concentration

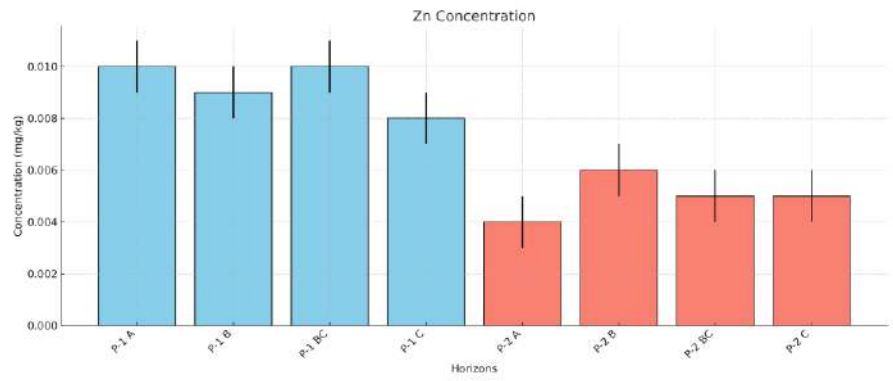


Figure 5. Zinc (Zn) Concentration

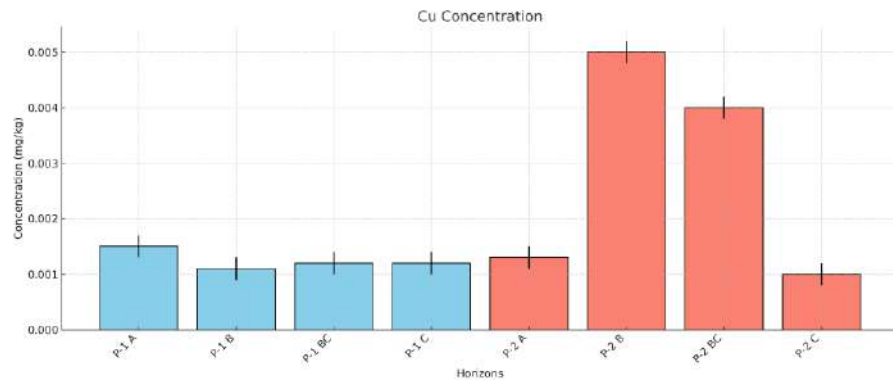


Figure 6. Copper (Cu) Concentration

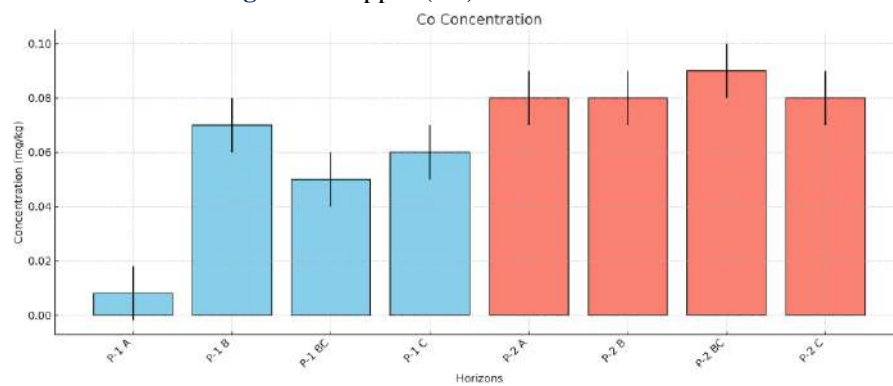


Figure 7. Cobalt (Co) Concentration

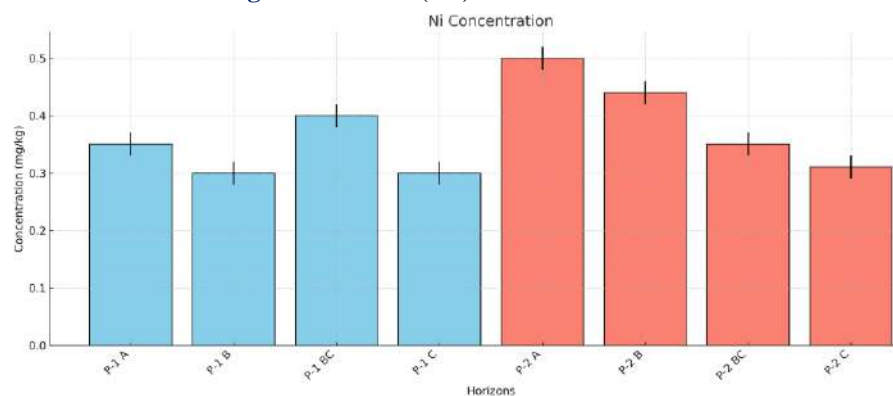


Figure 8. Nickel (Ni) Concentration

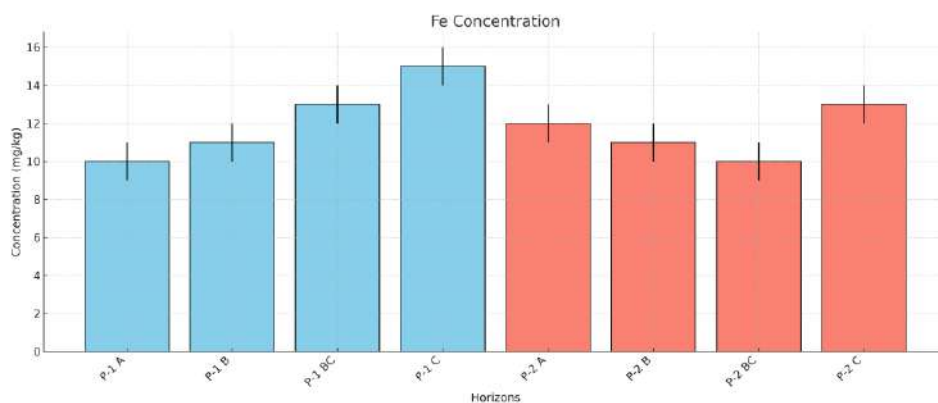


Figure 9. Iron (Fe) Concentration

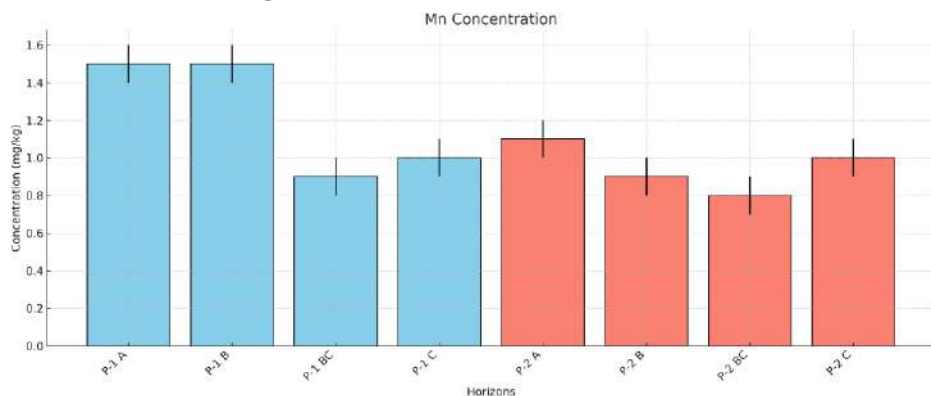


Figure 10. Manganese (Mn) Concentration

A comparative analysis of the chemical and morphological characteristics of dark chestnut solonchic soils for the period 1979-2024 revealed signs of soil degradation. The main indicator is a pronounced decrease in the humus content in all genetic horizons (Table 1, Fig. 2), which indicates the occurrence of dehumification processes. Humus depletion over the observation period was approximately 10.5% for P-1 and about 28.9% for P-2. This confirms the adverse effects of anthropogenic impact, including the cultivation of virgin lands, insufficient introduction of organic matter and disruption of soil formation processes [33-35].

Increased soil aeration as a result of intensive cultivation contributes to the acceleration of organic matter mineralization and humus loss [31]. An additional factor is climate change: rising temperatures and decreased precipitation in the steppe zone of Kazakhstan intensify mineralization processes [21, 36].

The pH value analysis (Table 1, Fig. 2) remains slightly alkaline, which reflects carbonate buffering.

The dynamics of the content of exchangeable cations Ca^{2+} and Mg^{2+} shows multidirectional changes. In the P-1 profile in the upper horizon (A), the concentration of Ca^{2+} decreased compared to the 1979 data, which may be associated with leaching processes under conditions of a changed water regime or with active biological absorption of calcium by vegetation. At the same time, a decrease in the Mg^{2+} content was recorded in a number of horizons, especially in the P-2 profile, which may reflect the general depletion of magnesium reserves in the soil. These changes may be the result of both natural biogeochemical processes and the impact of agricultural practices that lead to the removal of macroelements with the harvest and their subsequent loss from the soil profile (Table 1).

The chemical changes identified are not unique to the territory of the Ereimtau district. Similar trends have been recorded in other dry steppe regions of Kazakhstan, including a decrease in humus content, increased salinization processes, and vertical migration of dissolved substances. A good example is Betpak-Dala, where the shallow occurrence of saline groundwater in combination with the heavy granulometric composition of the soils contributes to the capillary rise of moisture and the accumulation of salts under the root layer [37].

The content of heavy metals requires special attention (Table 2, Fig. 3-10). The increase in Pb and Cd concentrations in the upper horizons (by 10–15%) indicates their

accumulation due to emissions from transport, fertilizers, pesticides, and industrial sources. The accumulation of Fe and Mg in deeper horizons, especially in profiles P-1 and P-2, indicates vertical migration of elements associated with changes in the soil water regime and secondary enrichment [38].

Comparative interpretation of humus and heavy metal concentrations in the upper horizons reveals a possible correlation between the loss of organic matter and the increased mobility and accumulation of Pb and Cd. As humus content decreases, the ability of the soil to bind metals decreases, increasing the bioavailability and upward migration of toxic elements. This suggests that dehumification may increase the mobility of heavy metals, especially under conditions of intensive land management and low levels of organic fertilizers [39].

To restore degraded soils, it is necessary to understand the mechanisms underlying the accumulation and desorption of various elements. Studies show that sorption and desorption dynamics play a key role in regulating the mobility of heavy metals in soils characterized by different humus contents and pH levels. The use of materials such as biochar, bentonite, and organic compounds enhances the capacity of soils to retain elements while reducing the leaching of heavy metals [40]. Furthermore, phytoremediation strategies using tolerant plant species have demonstrated significant effectiveness in immobilizing and extracting lead (Pb) and cadmium (Cd) from contaminated soil matrices [39]. Implementing these methodologies into land management systems can promote long-term soil restoration.

The following measures are recommended for Kazakhstan:

- limit the use of fertilizers with high heavy metal content;
- introduce phytoremediation and use of green manures on contaminated soils;
- promote the use of organo-mineral fertilizers;
- introduce GIS and remote sensing technologies for spatial monitoring of land degradation [35, 38, 41].

The results of the investigation highlight the need to develop an integrated methodology for soil protection and restoration. The sustainability of agroecosystems requires regular soil monitoring, the introduction of adaptive agronomic technologies and the use of evidence-based land management practices. In the context of climate change, preserving soil organic carbon and minimizing heavy metal pollution are critical to ensuring food security and achieving the UN Sustainable Development Goals (SDGs) [42].

4. CONCLUSION

During the observation period from 1979 to 2024, a decrease in the humus content in the upper horizons was revealed: by 10.5% in the P-1 profile and 28.9% in the P-2 profile, which indicates the development of dehumification processes. At the same time, the pH of the environment remains slightly alkaline (pH 7.68-8.0), which is associated with a stable carbonate buffer. Concentrations of Cl^- and SO_4^{2-} in 2024 increased significantly compared to 1979, especially in the upper layers, which may indicate a decrease in technogenic load or increased salt leaching under the influence of changed climatic conditions.

The analysis of exchangeable cations revealed various trends: in the P-1 profile, the concentration of Ca^{2+} in the upper horizon decreased, and at several horizons, especially in P-2, a decrease in the Mg^{2+} content was observed, indicating depletion of macronutrient reserves. The levels of heavy metals (Pb, Cd, Zn, Cu, Co) at all horizons are significantly below the maximum permissible concentrations, indicating the absence of technogenic pollution. Nevertheless, elevated concentrations of Pb and Cd in the upper horizons, as well as the accumulation of iron in the lower layers, indicate vertical migration and secondary enrichment of elements.

DATA AVAILABILITY

The data used in this study were obtained as a result of laboratory analysis of soil samples.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Conceptualization – GG, YM, TTO, KA; resources – GG; formal analysis – GG, YM, KA; methodology – GG, YM; software – GG; supervision – YM, TTO; visualization – GG; writing—original draft preparation – GG; writing—review and editing – GG.

FUNDING

This research was carried out as part of a scientific project for grant funding and was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (AR23485030).

REFERENCES

1. Salikhov T. K., Salikhova T. S. (2019). Izuchenie pochvennogo pokrova Atbasarskogo rajona Akmolinskoj oblasti na osnove primeneniya GIS-tehnologij. [Study of the soil cover of the Atbasar district of Akmola region based on the use of gis technologies]. *Vestnik NYaTs RK*, Vol. 0(1), pp. 34–39. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2019-1-34-39> [in Russian].
2. Saparov A. (2014). Soil resources of the Republic of Kazakhstan: Current status, problems and solutions. *Environmental Science and Engineering*, Vol. 0, pp. 61–73. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_2
3. Shakenova Zh. K., Ozeranskaya N. L. (2024). Anthropogenic impact on agricultural landscapes of the Akmola region of the Republic of Kazakhstan. *Problems of AgriMarket*, Vol. 2, pp. 213–226. <https://doi.org/10.46666/2024-2.2708-9991.18>
4. Rakhimova M., Zulpkyharov K., Assylbekova A., Zhengissova N., Taukebayev O. (2024). Using the Revised Universal Soil Loss Equation and Global Climate Models (CMIP6) to predict potential soil erosion associated with climate change in the Talas District, Kazakhstan. *Sustainability*, Vol. 16(2), pp. 574. <https://doi.org/10.3390/SU16020574>
5. Gulzira G., Yerbolat M., Nuriya A., Zharas B., Gulshat A., Kairat S., Assiya D., Aidana B., Saltanat A. (2025). Ecological and geochemical characteristics of the content of heavy metals in steppe ecosystems of the Akmola Region, Kazakhstan. *Sustainability*, Vol. 17(14), pp. 6576. <https://doi.org/10.3390/SU17146576>
6. Kaliyeva D., Tokbergenova A., Mirzabaev A., Zulpkyharov K., Bissenbayeva S., Taukebayev O., Qadir M. (2024). Assessing soil erosion risk in Kazakhstan: A RUSLE-based approach for land rehabilitation. *Authorea Preprints*. <https://doi.org/10.22541/AU.171008910.03978930/V1>
7. Obukhov Y., Tshshkovskaya Y., Oralova A., Aleinikov V., Tsoy N. (2023). Assessment of soils of mining regions for the content of heavy metals (on the example of Akmola Region and the Northern part of Karaganda Region). *Trudy Universiteta*, Vol. 2. https://doi.org/10.52209/1609-1825_2023_2_104
8. Yessimsitova Z. B., Konysbayeva A. A., Toktar M., Akimbayeva A. B., Nuraly A. M. (2024). Ecological problems of technogenic land pollution in the Republic of Kazakhstan. *Novosti nauki Kazakhstana*, Vol. 2, pp. 63–76. https://doi.org/10.53939/1560-5655_2024_2_63
9. Almagambetov N., Grigoruk V. (2008). Degradation of soil in Kazakhstan: Problems and challenges. In: *Soil Chemical Pollution, Risk Assessment, Remediation and Security*, pp. 309–320. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8257-3_27
10. Xiong J., Wu H., Wang X., Ma R., Lin C. (2024). Response of soil fertility to soil erosion on a regional scale: A case study of Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 434, pp. 140360. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140360>
11. Nde S. C., Felicite O. M., Aruwajoye G. S., Palamuleni L. G. (2024). A meta-analysis and experimental survey of heavy metals pollution in agricultural soils. *Journal of Trace Elements and Minerals*, Vol. 9, pp. 100180. <https://doi.org/10.1016/j.jte-min.2024.100180>
12. Alipbeki O., Mussaif G., Alipbekova C., Kapassova A., Grossul P., Aliyev M., Mineyev N. (2023). Untangling the integral impact of land use change, economic, ecological and social factors on the development of Burabay District (Kazakhstan) during the period 1999–2021. *Sustainability*, Vol. 15(9), pp. 7548. <https://doi.org/10.3390/su15097548>
13. Shi H., He Z., Deng C., Liu A., Feng Y., Li L., Ji G., Xie M., Liu X. (2024). How has the source apportionment of heavy metals in soil and water evolved over the past 20 years? A bibliometric perspective. *Water*, Vol. 16(22), pp. 3171. <https://doi.org/10.3390/w16223171>
14. Qi C., Xu M., Liu J., Li C., Yang B., Jin Z., Liang S., Guo B. (2024). Source analysis and contribution estimation of heavy metal contamination in agricultural soils in an industrial town in the Yangtze River Delta, China. *Minerals*, Vol. 14(3), pp. 279. <https://doi.org/10.3390/min14030279>
15. Apoorva M. S., Kundlas K. (2024). Negative impacts of intensive agricultural practices on environment and ecosystem: A review. *International Journal of Research in Agronomy*, Vol. 7(12), pp. 285–289. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.V7.I12D.2146>
16. Bogunovic I., Pereira P., Brevik E. C. (2017). Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. *Science of the Total Environment*, Vol. 584–585, pp. 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.062>
17. Gozukara G., Akça E., Dengiz O., Kapur S., Adak A. (2022). Soil particle size prediction using Vis-NIR and pXRF spectra in a semiarid agricultural ecosystem in Central Anatolia of Türkiye. *Catena*, Vol. 217, pp. 106514. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106514>
18. Takoutsing B., Martín J. A. R., Weber J. C., Shepherd K., Sila A., Tondoh J. (2017). Landscape approach to assess key soil functional properties in the highlands of Cameroon: Repercussions of spatial relationships for land management interventions. *Journal of Geochemical Exploration*, Vol. 178, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.03.014>
19. Ozlu E., Gozukara G., Acar M., Bilen S., Babur E. (2022). Field-scale evaluation of the soil quality index as influenced by dairy manure and inorganic fertilizers. *Sustainability*, Vol. 14(13), pp. 7593. <https://doi.org/10.3390/su14137593>
20. Rakhymberdina M., Daumova G., Apshevik B., Shults R., Toguzova M., Assylkhanova Zh., Kolpakova V., Kapasov A. (2024). Integrated chemical-geoecological monitoring and engineering approaches for pollution reduction in the Yertis River. *Engineered Science*, Vol. 32, pp. 1328. <https://doi.org/10.30919/es1328>
21. Guimarães M. F., Fonseca I. C. B., Brossard M., Portella C. M. R., Brito O. R., Ritchie J. C. (2008). Monitoring changes in the chemical properties of an oxisol under long-term no-tillage management in subtropical Brazil. *Soil Science*, Vol. 173(6), pp. 408–416. <https://doi.org/10.1097/ss.0b013e31817739fb>
22. Behera S. K., Mathur R. K., Shukla A. K., Suresh K., Prakash C. (2018). Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. *Catena*, Vol. 165, pp. 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.008>
23. Guo P., Xie Z. L., Li J., Kang C. L., Liu J. H. (2005). Relationships between fractionations of Pb, Cd, Cu, Zn and Ni and soil properties in urban soils of Changchun, China. *Chinese Geographical Science*, Vol. 15(2), pp. 179–185. <https://doi.org/10.1007/s11769-005-0013-y>
24. Dent D., Bai Z. (2017). The last steppes: New perspectives on an old challenge. In: *Soil Science Working for a Living: Applications of Soil Science to Present-Day Problems*, pp. 45–55. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_4

25. Werger M. J. A., van Staalduinen M. A. (Eds.) (2012). *Eurasian steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world*, Vol. 6. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-3886-7>
26. Chibilev A. A., Levykin S. V., Kazachkov G. V. (2023). Developing institutional support for rational steppe land use. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 250, pp. 45–57. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78083-8_5
27. Wagner V., Bragina T. M., Nowak A., Smelansky I. E., Vanselow K. A. (2020). Grasslands and shrublands of Kazakhstan and Middle Asia. In: *Encyclopedia of the World's Biomes: Volumes 1–5*, Vol. 1–5, pp. V3-750–V3-758. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12043-3>
28. Tishkov A., Belonovskaya E., Smelansky I., Titova S., Trofimov I., Trofimova L. (2020). Temperate grasslands and shrublands of Russia. In: *Encyclopedia of the World's Biomes: Volumes 1–5*, Vol. 1–5, pp. V3-725–V3-749. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12457-1>
29. Bragina T. T. (2016). Soil macrofauna (invertebrates) of Kazakhstani *Stipa lessingiana* dry steppe. *Hacquetia*, Vol. 15(2), pp. 105–112. <https://doi.org/10.1515/hacq-2016-0017>
30. Ojima D. S., Chuluun T., Bolortsetseg B., Tucker C. J., Hicke J. (2004). Eurasian land use impacts on rangeland productivity. *Geophysical Monograph Series*, Vol. 153, pp. 293–301. <https://doi.org/10.1029/153GM22>
31. Bajtenov M.S., Vasil'eva A.N., Gamayunova A.P., Goloskokov V.P., Karmysheva N.H., Myrzakulova P., Orazova A., Polyakov P.P., Roldugin I.I., Semiotrocheva N.L., Terekhov V.I., Filatova N.S., Fisyun V.V., Cagohova V.G. (1969) *Illyustrirovannyj opredelitel' rastenij Kazahstana*. [The illustrated determinant of plants of Kazakhstan]. – Alma-Ata: Nauka KazSSR, 1969. – T. 1. – 459 s. [in Russian].
32. Cachada A., Rocha-Santos T. A. P., Duarte A. C. (2018). Soil and pollution: An introduction to the main issues. In: *Soil Pollution: From Monitoring to Remediation*, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849873-6.00001-7>
33. Rahayu A., Utami S. R., Prijono S. (2015). The changes of soil physical and chemical properties of Andisols as affected by drying and rewetting processes. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, Vol. 3(1), pp. 439–446. <https://doi.org/10.15243/JDMLM.2015.031.439>
34. Dai Z., et al. (2017). Potential role of biochars in decreasing soil acidification – A critical review. *Science of the Total Environment*, Vol. 581–582, pp. 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.169>
35. Johnson B. G., Verburg P. S. J., Arnone J. A. (2014). Effects of climate and vegetation on soil nutrients and chemistry in the Great Basin studied along a latitudinal-elevational climate gradient. *Plant and Soil*, Vol. 382(1–2), pp. 151–163. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2144-3>
36. Prijono S., Laksmana M. T. S., Suprayogo D. (2016). Effects of hedgerow systems on soil moisture and unsaturated hydraulics conductivity measured by the Libardi method. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, Vol. 3(2), pp. 491–498. <https://doi.org/10.15243/JDMLM.2016.032.491>
37. Smanov Zh., Duisenbayev S., Zulpykharov K., Laishanov Sh., Turymtayev Zh., Kozhayev Zh., Atasoy E., Taukebayev O. (2025). Soil salinization and its impact on the degradation of agricultural landscapes of the Talas district, Kazakhstan. *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA*, Vol. 75(2), pp. 233–250. <https://doi.org/10.2298/IJGI2502233S>
38. Chen S., Chen X., Zuo H., Yan M., Wang H., Li X. (2024). Soil compounding promotes the improvement of aeolian sandy soil in the Mu Us Sandy Land. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 12, pp. 1435618. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1435618>
39. Rehman G., Muhammad J., Ilyas M., Subhanullah M., Ullah K., Massimzhan M., Toktar M., Bektay Y., Kalybekov M., Ydyrys A., Zhakypbek Y. (2024). Phytoremediation of heavy metals from soil and their effects on plant physiology – A review. *ES Materials & Manufacturing*, Vol. 26, pp. 1298. <https://doi.org/10.30919/esmm1298>
40. Sharma A. V., Somadas P., Udayashankar H. N., Balakrishna K. (2024). A study on adsorption kinetics of copper and zinc through agricultural soils. *ES Food and Agroforestry*, Vol. 17. <https://doi.org/10.30919/esfaf1185>
41. Halászová K., Lackóová L., Panagopoulos T. (2024). Long-term evaluation of surface topographic and topsoil grain composition changes in an agricultural landscape. *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 12, pp. 1445068. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1445068>
42. Lal R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, Vol. 7(5). <https://doi.org/10.3390/su7055875>

АҚМОЛА ОБЛЫСЫ ЕРЕЙМЕНТАУ АУДАНЫНЫҢ ҚҰРҒАҚ ДАЛА ЭКОЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ТОПЫРАҚТАРЫН ГЕОХИМИЯЛЫҚ ТАЛДАУ

Гульзира А. Гатаулина^{1,*}, Ерболат Х. Мендыбаев¹, биология ғылымдарының кандидаты, профессор, Тургут Тузун Онай², PhD, профессор

¹ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан; gulziragataulina@gmail.com (ГАГ), mendybayev_yekh@enu.kz (EXM)

² Богазичи Университеті, Стамбул, Түркия; onayturg@boun.edu.tr (ТТО)

*Автор корреспонденциясы: Гульзира А. Гатаулина, gulziragataulina@gmail.com

ТҮЙІН СӨЗДЕР

ауыр металдар
құрғақ дала аймағы
Ерейментау ауданы
топырақ
деградация

Мақала жайында:

Алынды: 30.09.2025
Қайта қаралды: 14.01.2026
Қабылданды: 27.03.2026
Жарияланды: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Берілген зерттеме Ақмола облысы Ерейментау ауданының құрғақ дала аймағындағы күңгірт-каштан сортаңды топырақтарының морфологиялық және химиялық сипаттамаларына жүргізілген, 1979-2024 жылдар кезеңін алып жатқан мерзімді салыстырмалы талдау болып табылады. Мұрағаттан алынған топырақ зерттеулері мен заманауи зертханалық мәліметтер негізінде гумус, рН, иондық құрам және ауыр металдар концентрациясының өзгеруі бағаланды. Топырақ жамылғысының өзгеруінің кеңістіктік заңдылықтарын анықтау мүмкіндігін геостатистикалық картография мен ГАЗ технологиялары берді. Алынған нәтижелер жоғарғы горизонттардағы органикалық заттардың айтарлықтай төмендеуін, аз сілтілі ауқымдағы рН-тың салыстырмалы тұрақтылығын, алмасу катиондарының қайта бөлінуінің және микроэлементтердің, қорғасын мен кадмий-ді қоса алғанда, жоғарыдан төмен таралуын көрсетті. Ауыр металдардың шоғырлануы белгіленген шекті рұқсат етілген деңгейден төмен болып тұрса да, анықталған үрдістер үдемелі деградацияның барын көрсетіп, жүйелі бақылау қажеттілігін көрсетеді. Аймақтық климаттық және антропогендік факторларын ескере отырып, жерді тұрақты пайдалану бойынша ұсыныстар ұсынылды.

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВ СУХОСТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЕРЕЙМЕНТАУСКОГО РАЙОНА АҚМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Гульзира А. Гатаулина^{1,*}, Ерболат Х. Мендыбаев¹, кандидат биологических наук, профессор, Тургут Тузун Онай², PhD, профессор

¹ Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан; gulziragataulina@gmail.com (ГАГ), mendybayev_yekh@enu.kz (ЕХМ)

² Университет Богазичи, Стамбул, Турция; onayturg@boun.edu.tr (ТТО)

*Автор корреспонденции: Гульзира А. Гатаулина, gulziragataulina@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

тяжёлые металлы
сухостепная зона
Ерейментауский район
почва
деградация

По статье:

Получено: 30.09.2025
Пересмотрено: 14.01.2026
Принято: 27.03.2026
Опубликовано: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Данное исследование представляет собой долгосрочный сравнительный анализ морфологических и химических характеристик темно-каштановых солонцеватых почв сухостепной зоны Ерейментауского района Ақмолинской области за период 1979–2024 гг. На основе архивных почвенных обследований и современных лабораторных данных оценены изменения содержания гумуса, рН, ионного состава и концентраций тяжёлых металлов. Применение геостатистического картографирования и технологий ГИС позволило выявить пространственные закономерности трансформации почвенного покрова. Результаты показали значительное снижение содержания органического вещества в верхних горизонтах, относительную стабильность рН в слабощелочном диапазоне, перераспределение обменных катионов и вертикальную миграцию микроэлементов, включая свинец и кадмий. Несмотря на то, что концентрации тяжёлых металлов остаются ниже установленных предельно допустимых уровней, выявленные тенденции указывают на прогрессирующую деградацию и необходимость систематического мониторинга. Предложены рекомендации по устойчивому землепользованию с учётом региональных климатических и антропогенных факторов.







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



Гидрометеорология и экология

Научная статья

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДА АЛМАТЫ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

Аманкул Д. Акбасова¹, д.т.н. , Гульмира Б. Кезембаева^{1*}, PhD , Алмас С. Жумагулов¹ PhD , Александр В. Логвиненко¹ , Умбеталы К. Сарсембин¹ PhD , Дархан Е. Муратов² , Алишер М. Избакиев³

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан. a.akbassova@satbayev.university (АДА), g.kezembayeva@satbayev.university (ГБК), a.zhumagulov@satbayev.university (АСЖ), u.sarsembin@satbayev.university (УКС),

²ТОО «Еко Project Company» ecoproject.company@bk.ru (ДЕМ),

³ТОО «Экосервис-С» izbakiyev.a@ecoservice.kz (АМИ).

*Автор корреспонденции Г.Б. Кезембаева, e-mail: g.kezembayeva@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

атмосферный воздух, автотранспорт, мониторинг Алматы, здоровье населения, эмиссия загрязнителей

АБСТРАКТ

Статья посвящена комплексной оценке и взаимосвязи состояния автотранспортной системы и экологии города Алматы. Собраны данные, характеризующие транспортные, метеорологические, инфраструктурные, экологические, медицинские и другие параметры. Показано, что высокий уровень загрязнения воздуха Алматы связано не только расположением города в котловине, но и существованием ряда дополнительных факторов. Значительный вклад вносит часто встречающиеся нарушения, допущенные при городской застройке без учета розы ветров. При слабом ветре менее 3 м/с и плотной застройке концентрация $PM_{2,5}$ достигает 110 мкг/м³, PM_{10} 170 мкг/м³ и NO_2 95 мкг/м³. Согласно статистическим данным за 2025 год, эксплуатируются свыше 159413 единиц автотранспорта годом выпуска более 20 лет, из них $\geq 40\%$ не снабжены катализаторами. Отмечено многократное превышение ПДК в воздушном бассейне Алматы по содержанию тонкодисперсных частиц $PM_{2,5}$, особенно данное состояние характерно при приземной инверсии температуры. В совокупности рассмотрены действия основных факторов, способствующие частому попаданию Алматы в список самых загрязненных городов мира. Отмечены основные причины возрастания заболеваемости населения верхних дыхательных путей. Выявлено, что на состояние здоровья людей влияет на 50-55% образ жизни, на 20-23% наследственность, на 20-25% состояние окружающей среды и на 8-12% работа системы здравоохранения. В статье проанализирован состав автотранспортных средств по видам и качеству используемого топлива, возраст и динамика их роста в городе Алматы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во многих странах мира активно ведутся научно-практические исследования, направленные на минимизацию воздействий антропогенных источников на окружающую среду. Одним из основных жизненно важных элементов окружающей нас среды является атмосферный воздух. За сутки человек вдыхает около 12...15 м³ кислорода, а выделяет приблизительно 580 л углекислого газа [1]. Из различных антропогенных источников (промышленные выбросы, ТЭЦ, автотранспорт, отопление частного сектора) в организм человека через воздух попадает ряд вредных компонентов, вызывающих различные заболевания. Наряду с этим антропогенные выбросы в атмосферу оказывают влияние и на климат. Особенно это касается эмиссии шести основных парниковых газов (ПГ):

По статье:

Получено: 21.01.2026

Пересмотрено: 03.03.2026

Принято: 27.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

Для цитирования:

Акбасова А.,
Кезембаева Г.,
Жумагулов А.,
Логвиненко А.,
Сарсембин У., Муратов
Д., Избакиев А Оценка
качества атмосферного
воздуха города Алматы
и его влияния на
здоровье населения // *Гидрометеорология и
экология*, 121 (1), 2026,
145-162.

диоксид углерода (CO₂), метан (CH₄), закись азота (N₂O), гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ) и гексафторид серы (SF₆).

Успешно проводятся комплекс планомерных работ, которые направлены на выполнение ряда международных обязательств, включая Рамочную Конвенцию ООН об изменении климата, Киотский протокол и другие документы [2,3,4]. Казахстан ратифицировал Рамочную конвенцию ООН об изменении климата 4 мая 1995 года, согласно указу Президента РК № 2260. Ранее 29 апреля 1994 года Казахстан присоединился к конвенции, что было закреплено постановлением Кабинета Министров РК № 244 от 4 мая 1994 года, 22 января 2015 года Премьер-министром Республики Казахстан (РК) и Генеральным секретарем Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) был подписан меморандум, нацеленный на снижение уровня загрязнения воздуха и сокращение выбросов парниковых газов в транспортном секторе [5, 6]. А также Казахстан подписал и ратифицировал Парижское соглашение, согласно которого взял обязательства достичь углеродной нейтральности к 2060 году [7].

На основе результатов медицинских исследований выявлена зависимость удельного веса различных факторов, обуславливающих здоровье населения [8]. Согласно данным ВОЗ и отечественных экспертов на состояние здоровья людей влияет на 50...55% образ жизни, на 20...23% наследственность, на 20...25% состояние окружающей среды и на 8...12% работа системы здравоохранения. Эти данные свидетельствуют о том, что более 70% здоровья зависят от самого человека и его образа жизни, включая питание, физическую активность, вредные привычки и психоэмоциональное состояние [9,10].

В последние годы экологические проблемы остро стоят в больших городах и требуют незамедлительного выхода из критических состояний. К примеру, самый красивый и зеленый город Казахстана Алматы потенциально входит в список загрязненных городов мира. Согласно данным РГП «Казгидромет» с 2014г. по 2024 г. качество воздуха Алматы был низким по сравнению с 2025г., ухудшение составляет на 30%. Индекс загрязнения атмосферного воздуха колебался в пределах с 10,5 (2010...2014 гг.) до 5,8 (2015...2024 гг.). Степень загрязнения атмосферы оценивается как высокая. В середине января 2025 года южная столица оказалась на 1-м месте, а 16 сентября 2025 г. на 2-м месте в списке из 126 самых загрязненных мегаполисов мира. По данным IQAir на 28 октября 2025 г. Алматы после Лахора, Пекина и Дели занял 4-е место, средний уровень PM_{2.5} и PM₁₀ составил 174 мкг/м³, что является вредным для здоровья, превышает допустимое нормативное значение ВОЗ (5 мкг/м³) в 34,8 раза [11, 12].

Экологические проблемы города Алматы в основном связаны с авто-, аэро- и железнодорожным транспортом, включая обслуживающие их подвижные и стационарные объекты. Весомый вклад в загрязнение атмосферного воздуха также вносят промышленные предприятия, ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, автономные котельные (9 крупных и 76 малых) и жилой не газифицированный (уголь/печи) частный сектор, находящиеся в городской черте и на территориях, прилегающих к городу. Употребляемое этими объектами количество высокосольного Экибастузского угля в год составляют в среднем около 3,6 млн. тонн, в том числе ТЭЦ-2 – ≥ 2 млн. тонн, ТЭЦ-3 – ~ 0,79 млн. тонн, частный сектор – остальное [13].

Главными загрязнителями являются выбросы в атмосферу от наземных и воздушных видов транспорта, шумовое загрязнение, твердые, газообразные и жидкие отходы. Очень высокий уровень загрязнения воздуха, связанное со значительными концентрациями токсичных оксидов SO₂, NO₂, CO, CO₂, твердых частиц (PM_{2,5}, PM₁₀), O₃, бенз(а)пирена и других органических соединений, часто создают проблему смога. Устойчивый смог, представляющий собой густой туман с высокими концентрациями примесей едких газов и аэрозолей, обычно наблюдается при безветренной погоде [14, 15, 16].

Город Алматы находится в межгорной котловине. Котловинная форма рельефа обуславливает высокую повторяемость штилевой погоды (скорость ветра не превышает 0,5 м/с), являющейся причиной накопления загрязняющих веществ в атмосфере города. Редкость ветров часто способствует образованию горно-долинной инверсии температур. При инверсионном распределении температур слой теплого воздуха, находясь сверху, препятствует поднятию вверх насыщенного загрязнителями холодного воздуха. Появление смога не только связано с выбросами вредных веществ от транспортных средств и производственных предприятий, но и с постройкой домов без учета розы ветров. Это дополнительно приводит к созданию условий непродуваемости и, соответственно, к возникновению препятствий для рассеивания в воздухе примесей вредных компонентов.

Отсутствие свободной циркуляции воздуха является одной из причин накопления в значительных количествах токсичных веществ в нижних слоях атмосферного воздуха. При таких условиях очень часто у жителей города может наблюдаться одышка, кашель, головные боли, бессонница, воспаление слизистых оболочек глаз, носа и гортани, а также увеличение числа людей, требующих госпитализацию от респираторных и сердечных заболеваний. Кроме того на физиологическое состояние людей оказывает весомое влияние климат Алматы, которому свойственны резкие перепады сезонных и суточных температур, жаркое лето с интенсивной солнечной радиацией, достаточно холодная зима, низкая ветровая активность, влажный атмосферный воздух и значительное количество осадков.

Проведенный анализ научно-практических результатов различных исследователей, свидетельствует о том, что заболеваемость населения отражает спектр неблагоприятного экологического состояния среды обитания [17, 18, 19, 20]. В связи с этим сделать объективную оценку условий проживания в крупных городах невозможно без понимания климатических и экологических изменений. С каждым годом повышается уровень загрязнения атмосферного воздуха городов газообразными веществами и мелкодисперсной пылью, что требует непрерывного осуществления расширенных всесторонних мониторинговых исследований. Особенно поиск путей улучшения качества воздуха и снижения роста «экологических заболеваний», таких как болезни дыхательной, сердечнососудистой, крови и кроветворной систем является актуальной задачей.

Основной целью данной работы является исследование взаимосвязи между экологическим состоянием атмосферного городского воздуха Алматы и показателями здоровья населения.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Город Алматы состоит из 8 районов: Алатауский, Алмалинский, Ауэзовский, Бостандыкский, Жетысуский, Медеуский, Наурызбайский и Турксибский. Площадь территории Алматы составляет 68,3 тыс. га или 683 км². Средний возраст жителей составляет 33,5 года [21].

Анализ широкого спектра данных осуществляли из значений, представленных в ежегодных статистических сборниках [22, 23, 24,25], 2020...2025 гг. и частного фонда «Almaty Air Initiative» [26].

В Алматы мониторинг состояния атмосферного воздуха регулярно проводится РГП «Казгидромет» на 16 постах, из них 11 автоматических постов, 5 постов ручного отбора проб. В разных районах города также командой ААИ установлены 50 датчиков, разработанные международной компанией Clarity.

Авторами статьи использованы методы: онлайн-анкетирование на платформе Google forms и офлайн-интервью в КазНИТУ имени К.И.Сатпаева, КазНАУ, КазНУ им. Аль-Фараби, АО «Академии гражданской авиации», Алматинский университет менеджмента, Каспийского общественного университета Алматы для проведения опроса о состоянии атмосферного воздуха и автопарка.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Здоровье населения – динамичное явление, зависящее от многочисленных факторов: природно-климатических, социально-экономических, санитарно-гигиенических, экологических, медико-демографических и других. Неблагоприятная экологическая обстановка в любом регионе сказывается на здоровье его жителей. Проведенный авторами анализ состояния объектов окружающей среды города Алматы показал, что одним из самых главных проблем является наличие значительно высокого уровня загрязненности атмосферного воздуха.

В таблицах 1 и 2 представлены данные, характеризующие транспортную систему города Алматы(письмо от Департамента полиции - ответ на запрос вх. № ЖТ-2025-03106701 от 09.09.2025 года).

Таблица 1

Данные по транспортной системе города Алматы на сентябрь 2025 г.

Срок эксплуатации	Количество зарегистрированного транспорта
до 3-х лет экспл.	133958
от 3-х до 7 лет экспл.	118381
свыше 7 лет экспл.	451380
Свыше 20 лет эксплуатации, отечественные.	41452
Свыше 20 лет эксплуатации, иномарки.	177961

Основным самым опасным источником загрязнения в городе является автотранспорт, работающие на бензиновом и дизельном топливах. Данные в таблицах 1 и 2 предоставлены Управлением цифровизации и департаментом полиции города (письмо от Департамента полиции - ответ на запрос вх. № ЖТ-2025-03106701 от 09.09.2025 года).

Таблица 2

Количество автотранспорта по видам потребляемого топлива

Тип топлива	Бензин	Дизель	Газ	Смешанный	Электрический
Легковые автомашины	540826	19987	1730	21190	11698
Грузовые автомашины	8518	36612	76	813	9
Автобусы	3660	5323	2017	441	225
Специальные	305	923	12	83	4
Мотоциклы	17607	0	0	0	451
Всего по типам топлива	570916	62845	3835	22527	12387

В Алматы на 1 января 2025 года зарегистрировано 667,6 тыс. транспортных средств, из них 611 тыс. легковых машин (почти 190 тыс. из них старше 20 лет), 42 тыс. грузовиков и 14,9 тыс. автобусов [27]. С 2024 года в Алматы запрещена закупка дизельных автобусов, автопарк обновляется газовыми и электрическими моделями. В 2025 г. дополнительно завезено около 11,3 тысяч электромобилей (из России), а также запланировано в 2026 г. закуп 600 газовых автобусов [28]. В таблице 3 приведены данные о зарегистрированных транспортных средствах в 2025 году [27].

Таблица 3

Учетная характеристика автотранспортных средств города

Вид автотранспорта	Учетные транспортные средства, находящиеся в собственности*					
	2024	2025	Физических лиц		Юридических лиц	
			2024	2025	2024	2025
Всего, без мотоциклов	<u>644343</u>	<u>667629</u>	<u>572107</u>	<u>593348</u>	<u>72236</u>	<u>74281</u>
	100	100	88,8	88,9	11,2	11,1
Легковые	<u>589268</u>	<u>611062</u>	546868	567170	42400	43892
	91,4	90,0				
Грузовые	<u>40592</u>	<u>41862</u>	19123	19965	21469	21897
	6,3	6,2				
Автобусы	<u>14483</u>	<u>14705</u>	6116	6213	8367	8492
	2,3	3,8				
Мототранспорт зарегистрированный	17607	18058	Нет точных сведений (всего около 61670 единиц в Алматы)			

*Примечание: вверху единиц, внизу %

Согласно исследованию аналитиков, IT компании (Sergek Group), для комфортного передвижения на дорогах Алматы должны быть не более 170 тысяч транспортных средств. В связи с этим городу для оздоровления атмосферного воздуха следует развивать инфраструктуру для велосипедов и электросамокатов [29]. В реальности, включая транзитных, ежедневно по территории города продвигаются около 1 млн. автомобилей. Резкое увеличение количества личного автотранспорта, низкое качество горюче-смазочных материалов, неудовлетворительное техническое состояние как автомобилей, так и дорог способствуют повышению уровня загрязненности городского атмосферного воздуха [30]. Наряду с парниковыми газами выбрасываются в атмосферный воздух очень опасные для здоровья людей угарный газ (CO), оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO₂, SO₃), озон (O₃), углеводороды,

канцерогенный бенз(а)пирен, формальдегид, сажа, зола, свинец и другие дисперсные частицы [31].

Особенно резкое увеличение количеств отработанных газов наблюдается при снижении скорости движения в часы пик, когда создаются многочасовые пробки из-за высокой перегруженности автомагистралей, скопления транспортных средств на перекрестках и у светофоров (рисунок 1, таблица 4).

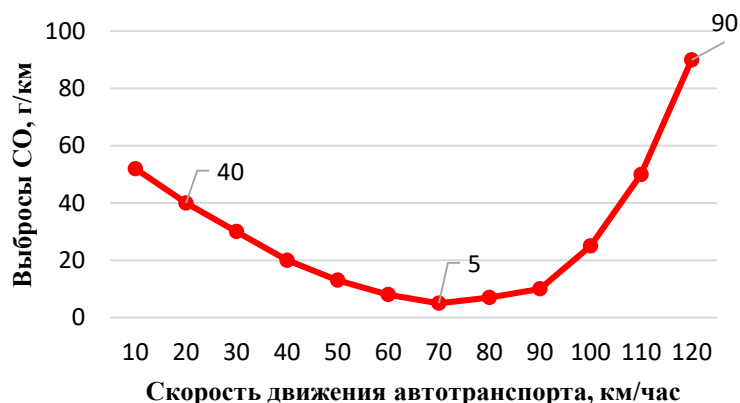


Рисунок 1. Зависимость выбросов CO от скорости

Таблица 4

Выброс CO и NO₂ в окружающую воздушную среду при нахождении автотранспорта в различных состояниях (% по объему)

Холостой ход		При постоянной скорости		При разгоне от 0 до 40 км/час		При торможении от 40 км/час и менее	
CO	NO ₂	CO	NO ₂	CO	NO ₂	CO	NO ₂
0,5...6,5	0,005...0,01	0,3...3,5	0,1...0,2	2,5...5,0	0,12...0,19	1,8...4,5	0,003...0,005

В таблице 5 представлены сведения по выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта за последние 5 лет. Наблюдаемое увеличение массы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от передвижных источников обусловлено ростом с каждым годом их количеств. Наибольшую долю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от автомобильного транспорта составляют оксид углерода – 80,2 % и углеводороды – 9,6 % [32].

Таблица 5

Оценка выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспортных средств Алматы, тыс. т (2021...2025 гг.)

Наименование загрязняющих веществ	2021	2022	2023	2024	2025
Углерода оксид	65,0	67,8	70,5	72,5	76,1
Углеводороды	10,2	10,6	11,0	11,3	11,9
Диоксид азота	7,6	7,9	8,2	8,5	8,9
Диоксид серы	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15
Сажа	1,20	1,25	1,30	1,35	1,42
Свинец	0,0040	0,0041	0,0042	0,0043	0,0045

Многие компоненты оказывают негативное воздействие на здоровье людей, приводят к деградации объектов экосистем (таблица 6) [31].

Таблица 6

Воздействие на организм населения некоторых загрязняющих веществ

Загрязняющее вещество	ПДКм.р., мг/м ³	ПДКс.с., мг/м ³	Механизм воздействия	Влияние на здоровье
Угарный газ (CO)	5	3	Образует стойкое соединение с гемоглобином крови, блокируя перенос кислорода	Гипоксия, отравление; при содержании CO \geq 10% в воздухе возможен летальный исход в течение нескольких минут (ПДК = 0,0008%)
Оксиды азота (NO _x)	0,4	0,06	При контакте с влажными поверхностями образуют кислоты	Раздражение слизистых оболочек, поражение бронхов и лёгочной ткани
Оксиды серы (SO _x)	0,5	0,05	Образуют сернистые и серные кислоты при взаимодействии с влагой	Повреждение слизистых оболочек, заболевания органов дыхания
Углеводороды	-	1	Токсическое воздействие на организм	Нарушение функционального состояния центральной нервной системы
Бенз(а)пирен	-	0,000001	Канцерогенное и токсическое воздействие	Поражение ЦНС, канцерогенный риск

Значительную опасность для здоровья населения также создает свинец, образующийся при сжигании этилированного бензина. Соединение свинца у человека приводит к нервным расстройствам, малокровию, потере памяти, слепоте и бесплодию [32].

Опираясь на результаты многочисленных НИР, ВОЗ сделал вывод, что наиболее опасным загрязнителем воздуха для здоровья человека являются взвешенные тонкодисперсные частицы PM_{2,5} и PM₁₀. Рекомендуемые ВОЗ и Россией предельно допустимые для них в воздухе среднесуточные (СС), среднегодовые (СГ) и разовые значения приведены в таблице 7.

В Алматы 2024 году объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников составил около 189 тысяч тонн/год, а от автотранспорта дополнительно около 112 тысяч тонн/год. С одного автотранспорта при сжигании топлива в окружающую среду выбрасываются около 800 кг CO, 40 кг NO₂ и более 200 кг различных вредных компонентов, включая углеводороды. Автотранспорт в процессе сжигания топлива осуществляет выбросы непосредственно на поверхности земли в зоне области дыхания людей. В безветренной или слабо ветреной обстановке тяжелые

выхлопные газы и продукты сгорания застилают приземную территорию, образуя густой туман и смог.

Таблица 7

Нормативно допустимые значения $PM_{2,5}$ и PM_{10} в воздухе, $мг/м^3$

Вид норматива	Рекомендуемые концентрации				Примечание
	ВОЗ		Россия (ПДК)		
	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PM_{10}	
ПДсс	0,015	0,045	0,035	0,06	$PM_{2,5}$ при вдыхании воздуха, не задерживаясь на слизистой оболочке носа, рта, горла, легко всасываются в кровь, накапливаясь повреждают легкие, вызывая болезни органов дыхания, бронхит, сердечный приступ, инсульт, преждевременную смерть
ПДСг	0,005	0,015	0,025	0,04	
Разовая	-	-	0,16	0,3	

Согласно отчету частного фонда «Almaty Air Initiative» (AAI), среднегодовая концентрация $PM_{2,5}$ в Алматы в 2024 году составила 24,1 $мг/м^3$, а в 2023 г. – 30,3 $мг/м^3$, что указывает на превышение нормы ВОЗ (5 $мг/м^3$), соответственно, в 4,8 и 6,0 раз. В четвертом квартале 2024 года уровень загрязнения воздуха в Алматы был оценен очень высоким. РГП «Казгидромет», сравнивая данные последних пяти лет, отметил постоянный рост с каждым годом уровня загрязнения воздуха в мегаполисе. В четвертом квартале 2020...2023 годов его оценивали как высокий, однако в 2024 году уровень загрязнения воздуха перешел в категорию «очень высокий» [27].

В настоящее время в мире для характеристики воздушного бассейна используется индекс качества воздуха (AQI), для его вычисления применяются концентрации в окружающем воздухе следующих основных загрязнителей: $PM_{2,5}$; PM_{10} ; оксид углерода (CO); диоксиды серы и азота; приземной озон (O_3) и связанных с ними риски для здоровья (рисунок 2).

Если согласно статистическим данным в мире свыше 2 млн. людей ежегодно умирают от заболеваний, связанных с загрязнением воздуха, а именно, от болезней сердца, легких и онкологии; то в Казахстане (общая численность населения на 2 декабря 2025 года: 20 442 823 человек) около 16 тысяч человек, а в Алматы (численность населения – 2337 тыс.) около 1808 человек в год. В последние годы (2023...2024) преждевременно умерли от инсульта, ишемии, инфекции дыхательных путей в пределах от 1747 до 2549 человек или в среднем 139 смертей приходится на каждые 100 000 алматинцев [33].

Значения	Индекс качества воздуха (ИКВ = AQI)	Уровни concernа здравоохранения
0 – 50	Хорошо	Качество воздуха считается удовлетворительным, и загрязнение воздуха представляется незначительным в пределах нормы.
51 -100	Удовлетворительное	Качество воздуха является приемлемым; однако некоторые загрязнители могут представлять опасность для людей, являющихся особо чувствительным к загрязнению воздуха.
101-150	Нездоровый для чувствительных групп	Может оказывать эффект на особо чувствительную группу лиц. На среднего представителя не оказывает видимого воздействия.
151-200	Нездоровый	Каждый может начать испытывать последствия для своего здоровья; особо чувствительные люди могут испытывать более серьезные последствия.
201-300	Очень Нездоровый	Опасность для здоровья от чрезвычайных условий. Это отразится, вероятно, на всем населении.
300+	Опасный	Опасность для здоровья: каждый человек может испытывать более серьезные последствия для здоровья

Рисунок 2. Уровень загрязнения атмосферы свободными, твердыми частицами размерами $\leq 2,5$ мкм (PM_{2,5}) и их влияние на состояния здоровья населения

По данным бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам республики Казахстан за январь-сентябрь 2025 г. число родившихся составило 24332 человека (на 6,7% меньше, чем в январе-сентябре 2024 года), общее число умерших - 9157 человек (на 0,3% больше, чем в январе-сентябре 2024г.). Согласно статистическим данным за 2024 год, по Казахстану самое высокое число умерших наблюдалось в Алматы – 12,2 тыс., против 12,0 тыс. человек годом ранее (на 1,7% больше), что свидетельствует о росте смертности населения с каждым годом [33].

В связи с этим авторами для выяснения взаимосвязи между качеством окружающей природной среды и состоянием здоровья населения проведен статистический анализ медико-демографической ситуации Алматы. Изучение демографической ситуации начато с оценки общей численности населения, его возрастно-половой структуры. В этнической структуре города Алматы преобладают казахи, доля которых составляет 62,4%, русские – 20,5%, уйгуры – 5,4%, корейцы – 1,8%, татары – 1,5%, украинцы – 1%, азербайджанцы – 0,9%, узбеков – 0,6%, ингушей – 0,1%, представители других национальностей – 5,8%. Причем 46,4% населения представлены мужским полом и 53,6% – женским. Данные 2025 г. свидетельствуют о преобладании численности детей до 15 лет (37,7%) по сравнению с числом лиц старше 50 лет (12,4%), что указывает на прогрессивный тип возрастной структуры населения г. Алматы. По данным Бюро национальной статистики и Центра развития молодежной политики Алматы, в мегаполисе проживает около 700 тысяч молодых людей – почти треть населения города. Можно назвать Алматы городом молодежи, так как 75,2% приходится на долю населения возрастом до 35 лет (~54% – девушки, 46% – юноши) [28].

Авторами статьи был составлен опросник и проведён независимый социологический опрос среди студентов КазНИТУ им. К.И. Сатпаева, КазНАУ, КазНУ им. Аль-Фараби, АО «Академии гражданской авиации», Алматинского университета менеджмента, Каспийского общественного университета, школьников и других жителей города. Целью опроса являлась

сбор информации для проведения дальнейших научно-практических исследований и предложений по улучшению качества воздуха. Всего добровольно участвовали более 250 человек. Большинство ответов охарактеризовали качество воздуха неудовлетворительным или очень плохим (86%). Выразили недоверие официальными данными о качестве воздуха (Казгидромет, городской мониторинг) (27%). Большинство придерживаются мнения о необходимости увеличения площади зеленых зон (42%), улучшения состояния транспортной инфраструктуры (54%), а именно путем перехода на газовый и электрический виды топлива, обновления и запрета старых автомобилей (более 20 лет), полного снабжения их катализаторами для снижения концентраций выбросов в окружающую среду, создания условий для повышения доли населения, пользующихся общественным транспортом взамен личного.

Как известно, неблагоприятное состояние окружающей среды оказывает влияние на демографические показатели. Главным демографическим показателем является число рождаемости и смертности. В связи с этим проведен анализ статистических данных, характеризующие в динамике структуру смертности взрослого населения и младенцев за последние 15 лет (2010...2024 гг.).

Смертность среди мужского населения трудоспособного возраста обусловлена несчастными случаями, отравлениями, травмами (12...13%), болезнями системы кровообращения (45...50%), новообразованиями органов пищеварения и мочеполовой системы (14...15%), болезнями органов дыхания (9...9,5%) и инфекционными, паразитарными болезнями ($\approx 3\%$). В последние годы причиной смерти часто являются болезни сосудов головного мозга (инсульт). Одной из ведущих причин смерти связана с ишемической болезнью сердца, основная часть которых приходится на мужчин в возрасте 60 лет и старше. Количество онкобольных зарегистрированных в 2024 г. составляет 34,2 тыс., по сравнению с 2022 г. выросло на 5,8%.

В таблице 6 приведены усредненные значения общей и младенческой смертности населения за 15 лет. Отмечено увеличение как младенческой, так и общей смертности населения. Показатель смертности за январь–сентябрь 2025 года составил 5,84 на 1000 живорожденных, что на 19,3% ниже уровня аналогичного периода 2024 года (7,24). Смертность детей (на 1000 родившихся) до 5 лет: 2022г. – 12,04; 2023 г. – 11,25; 2024 г. – 10,47. Прогресс стал результатом системного развития первичной медпомощи, укрепления служб материнства и детства и внедрения современных протоколов ухода за новорожденными.

Таблица 6

Сопоставительная динамика общей и младенческой смертности населения за 2010...2024 гг. (использованы данные демографического ежегодника РК)

Название города	Смертность на 1000 человек			Средний прирост в % (+,-)	Средний уровень за 2010... 2024г.	2025г. за 9 месяцев
	2010... 2014г.	2015... 2019г.	2020... 2024г.			
общая смертность						
Алматы	6,8	7,8	7,7	+8,8	7,4	8,98
младенческая смертность						
Алматы	2,68	3,04	3,98	+20,5	3,23	5,84

В последние годы (2023...2025 гг.) у детей до года наблюдается рост смертности (на 1000 родившихся) из-за лидирования болезни органов дыхания (с 5,04 до 8,59), ОРВИ, грипп, пневмония (с 4,15 до 7,64), инфекционные и паразитарные заболевания (с 3,5 до 5,09). Одним из показателей, наиболее чувствительных к негативному влиянию загрязнения окружающей среды является мертворождаемость. Их количество на 1000 родов составляет от 8,0 (2016...2020 гг.) до 10,8 (2021...2025 гг.). Это связано с одной стороны, с несвоевременным обращением к врачам (в женские консультации), попытками прерывания беременности на ранних стадиях, с другой стороны, с ухудшением показателя здоровья.

Индекс здоровья женщин для города Алматы составляет около 20%. Согласно документа Международного информационного агентства «КазИнформ» (<https://www.inform.kz>) каждая вторая женщина детородного возраста по Казахстану ($\geq 45\%$) и около 23,2% по Алматы страдает железодефицитной анемией (ЖДА). Несмотря на то, что во многих странах проводятся научные исследования по ЖДА, проблема остается до сих пор нерешенной [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39].

Согласна статистическим данным за 2025 г. анемия у женщин встречается значительно чаще (23,2%), то у мужчин в 2 раза реже (10,3%). Подобная зависимость распространенности анемии от возраста и пола была отмечена в работе казахстанских ученых [34]. По их данным наибольшее распространение анемии выявлено у женщин в возрасте 18-49 лет, встречаемость данной болезни у женщин составляла 22,1%, у мужчин – 8,1%. Наблюдаемая разница наверняка в определенной степени связана с ежемесячной потерей крови женщинами при менструациях.

Чаще всего достоверно ($p < 0,001$) выявлены: анемия у женщин во время беременности ($63 \pm 3,6$), а перенесенные матерью ОРВИ ($p < 0,05$) равно $24,9 \pm 4,1$. Выявлены также высокие показатели токсикоза ($p < 0,05$) первой половины беременности равные $28,0 \pm 4,3$. Эти закономерности и сдвиги в демографических показателях в значительной мере, на наш взгляд, обусловлены отрицательным влиянием интенсивного загрязнения основных объектов окружающей среды тонкодисперсными частицами $PM_{2.5}$. Кроме того, широкое потребление рафинированных продуктов, не содержащих микроэлементов и витаминов, оказывает существенное влияние на уровень материнской и младенческой смертности, что также является причиной задержки физического и умственного развития детей.

Здоровье населения является общественным достоянием любой страны, оно в первую очередь зависит от интенсивности загрязнения окружающей среды. В связи с этим, чтобы установить взаимосвязь медико-демографических показателей с состоянием окружающей среды, проведен анализ заболеваемости населения разных полов и возрастных категорий. Общий уровень заболеваемости населения по городу Алматы представлен на рисунках 3 и 4.



Рисунок 3. Уровень заболеваемости по городу Алматы в 2020... 2024 гг.

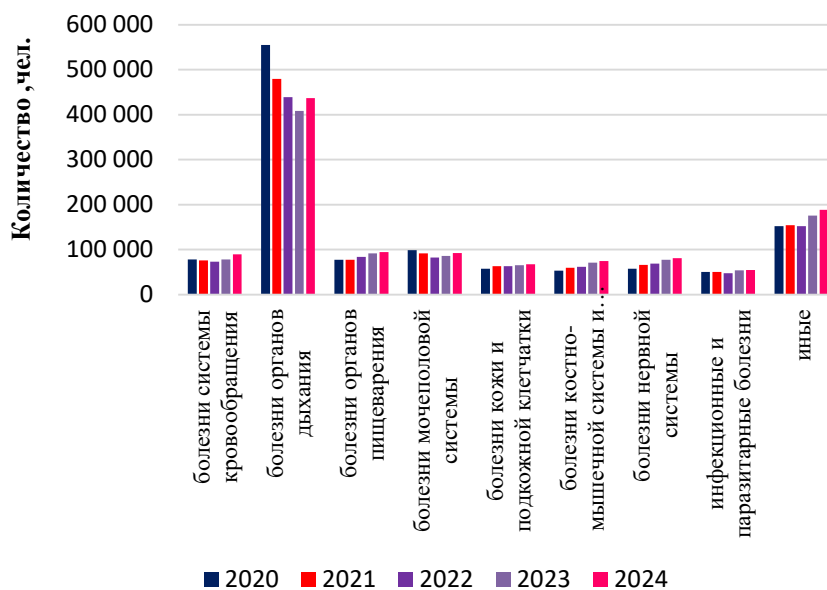


Рисунок 4. Уровень заболеваемости по городу Алматы за 2020... 2024 гг.

К иным (рис.4) относятся заболевания: болезни системы кровообращения, болезни глаза и его придаточного аппарата, болезни уха и сосцевидного отростка (мастоидит), болезни органов дыхания, болезни органов пищеварения, болезни мочеполовой системы, осложнения беременности, родов и послеродового периода, болезни кожи и подкожной клетчатки, болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани, травмы и отравления.

Картина заболеваемости за 2025 г. следующая. Среди взрослых (18 лет и старше) было зарегистрировано 60930 больных, из них с диагнозом, установленным впервые в жизни – 42302, под диспансерным наблюдением на конец года состояло 18115 человек. У подростков (15...17 лет включительно),

соответственно, такие показатели – 6763; 5914 и 1032, а среди детей (до 14 лет включительно) всего больных 50341, в том числе с первично установленным диагнозом 8759. Удельный вес больных с первично установленным диагнозом у взрослых 69,4%, у подростков – 87,4%, у детей до 14 лет – 17,4%. Данный показатель свидетельствует о том, что подростки более подвержены различным заболеваниям.

Наибольший уровень обращаемости как взрослого населения, так и подростков, и детей связан с болезнями органов дыхания. В структуре данного класса наибольший удельный вес приходится на грипп и острые инфекции верхних дыхательных путей (95%). Заболеваемость дыхательной системы: у детей на 1000 человек $591,3 \pm 7,3$, у подростков $408,7 \pm 4,7$. Второе место у детей до 14 лет занимают инфекционно-паразитарные болезни – $173,8 \pm 4,3$, третье место болезни органов пищеварения – $171,1 \pm 4,3$. У подростков (15-17 лет включительно) второе место принадлежит болезням кожи и подкожной клетчатки – $188,5 \pm 2,9$, затем следует класс болезней органов пищеварения – $167,8 \pm 2,7$.

Одним из наиболее опасных эффектов воздействия химических загрязнителей является развитие злокачественных новообразований. Имеются сведения об увеличении риска развития рака легкого и почек в связи с воздействием свинца и других тяжелых металлов. В Алматы число вновь зарегистрированных больных с новообразованием составляет в среднем 35 человек на 100 000 населения.

Высокий уровень общей заболеваемости зарегистрирован в возрасте от 1 до 18 лет на 1000 человек (2327) по сравнению с населением старше 18 лет (1367), что обусловлено низким уровнем обращаемости в ЛПУ лиц пожилого и старческого возраста, а также связано с их лечением в негосударственных лечебно-профилактических организациях, у частнопрактикующих врачей и у народных целителей – экстрасенсов.

Таким образом уровень как общей, так и вновь выявленной заболеваемости взрослых, подростков и детей за последнее пятилетие имеет стойкую тенденцию к росту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено исследование, по оценке загрязнения атмосферного воздуха города Алматы. Установлено, что выбросы загрязняющих веществ в сочетании с метеорологическими условиями и особенностями городской застройки ведут к опасному для здоровья населения загрязнению воздушного бассейна Алматы. Концентрации взвешенных частиц ($PM_{2,5}$ и PM_{10}), диоксида азота, серы, оксида углерода в атмосферном воздухе всех районов города превышают предельно допустимые нормативы.

2. На основе сопоставления составов загрязненного воздуха и медицинских данных, взятых из республиканских отчетов, выявлено, что одной из главных причин преждевременной смертности является наличие мелких твердых частиц размерами менее $\leq 2,5$ мкм. При вдыхании загрязненного воздуха они легко всасываются в кровь и, накапливаясь в организме, повреждают ткани легких, вызывают болезни органов дыхания, бронхит, сердечный приступ, инсульт, а также увеличивают риск смертности особенно среди людей старше 65 лет.

3. Предлагается замена устаревшего городского автобусного парка на современные транспортные средства, работающие на следующих видах

топлива: а) сжатый природный газ (СПГ); б) сжиженный нефтяной газ (СНГ); в) дизельное топливо стандарта Евро-5; г) электричество (аккумуляторные и безаккумуляторные троллейбусы).

4. Переход населения с личных автомобилей на немоторизованные виды транспорта (ходьба, велопоездки, самокаты) или на общественный транспорт.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность редакционной коллегии и будущим рецензентам за замечания, предложения и рекомендации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по гранту AP26194771 (№ госрегистрации 0125PK00848).

ВКЛАД АВТОРОВ

Концепция статьи – АДА; написание текста – АДА, ГБК; обзор литературы – АДА, АВЛ; проведение исследований – АДА, ГБК, АМИ, ДЕМ; оформление рисунков и таблиц – АДА, ГБК, АСЖ. анализ материала – АДА, ГБК, АМИ, АСЖ; статистическая обработка – АСЖ, АВЛ, УКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева И. М. Устойчивое развитие человечества. Часть 2. [Текст]: монография / И. М. Афанасьева, А. В. Иванов, Е. Н. Петрова; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2013.– С. 85.
2. WHO. Ambient (Outdoor) Air Pollution. 2022. Accessed September 02, 2024. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
3. Dechezleprêtre A., Rivers N., Stadler B. (2019). The economic cost of air pollution: Evidence from Europe. OECD Economics Department Working Papers, 1584. <https://doi.org/10.1787/56119490-en>.
4. Schleussner C.F., Rogelj J., Schaeffer M., et al. (2016). Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. Nature Climate Change, 6, pp. 827-835. <https://doi.org/10.1038/nclimate3096>.
5. Указ Президента Республики Казахстан от 25 августа 2011 года №145 "О принятии Поправки к приложению В к Киотскому протоколу к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата".
6. OECD. (2021). Поддержка экологически чистого городского общественного транспорта в Казахстане, Кыргызстане и Молдове: Сводный отчет о реализации проекта за период с 2016 по 2019 год. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/411cc0b0-ru>.
7. Закон Республики Казахстан от 4 ноября 2016 года № 20-VI «О ратификации Парижского соглашения»
8. Nameed S., Karim N., Wasay M., et al. (2024). Emerging Stroke Risk Factors: A Focus on Infectious and Environmental Determinants. Journal of Cardiovascular Development and Disease, 11(1), pp. 19. <https://doi.org/10.3390/jcdd11010019>.
9. Концевая А.В., Анциферова А.А., Муканеева Д.К., Ипатов П.В., Драпкина О.М. Концепция «Единое здоровье»: комплексный подход к здоровью человека, животных и окружающей среды. Профилактическая медицина. - 2024. - №27(11). – С.7-12.
10. Нурмадиева Г.Т., Жетписбаев Б.А. Влияние экосистемы на здоровье человека в промышленно развитых регионах Казахстана. Обзор литературы. // Наука и Здравоохранение. - 2018. - 4 (Т.20). - С. 107-132.
11. Ежедневный бюллетень состояния воздушного бассейна (НМУ) - <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhednevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-basseyna-nmu>.
12. <https://orda.kz/almaty-voshel-v-pjaterku-samyh-grjaznyh-gorodov-mira-po-kachestvu-vozduha-408422/>
13. Хасенов А.К. Перспектива перевода алматинских электростанций на природный газ //Вестник КазНУ. - 2021. - №6. – С. 107-122. - <https://www.ales.kz/almatinskaya-tecz-3>.
14. Барикаева Н.С. Совершенствование системы мониторинга загрязнения воздуха придорожных территорий городов мелкодисперсной пылью. – Дис. канд. техн. наук, Волгоград, 2018. – 159с.
15. Балабанов Д.С. Перенос и рассеяние над урбанизированной территорией отработанных газов автомобильного транспорта //Дисс. на соиск. канд. техн. наук. - Пермь, 2011. – 148 с.
16. Kerimray A., Azbanbayev E., Kenessov B., Plotitsyn P., Alimbayeva D., Karaca F. (2020). Spatiotemporal Variations and Contributing Factors of Air Pollutants in Almaty, Kazakhstan. Aerosol and Air Quality Research, 20(6), pp. 1340–1352. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0464>.
17. Лещук С.И., Суркова И.В. Сенкевич Н.В. Взаимосвязь загрязнения окружающей среды и экологически обусловленной заболеваемости населения на территории техногенного загрязнения //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2017. - №2. – С.110-117.

18. Andersen ZJ, Kristiansen LC, Andersen KK. et al. (2012) Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide: a cohort study // *Stroke*. -V. 43. - P. 3200-3255.
19. T. Yorifuji, S. Kashima, T. Tsuda, et al. (2013). Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of death from hemorrhagic stroke and lung cancer in Shizuoka, Japan // *Science of the Total Environment*. - V. 443. - pp. 397-402.
20. Tak-sun Yu, H. Qiu, X. Wang et al. (2013). Synergy between particles and nitrogen dioxide on emergency hospital admissions for cardiac diseases in Hong Kong // *International Journal of Cardiology*. - V.168(3). - P.2831-2836.
21. P.J. Villeneuve, J.Y.M. Johnson, D. Pasichnyk, et al. (2012). Short-term effects of ambient air pollution on stroke: Who is most vulnerable? // *Science of the Total Environment*. - V. 430. - pp. 193-201.
22. ПЛАН РАЗВИТИЯ ГОРОДА АЛМАТЫ НА 2021-2025 ГОДЫ, Приложение к решению маслихата города Алматы от «9» декабря 2022 года № 192. Приложение к решению маслихата города Алматы от «15» января 2021 года №5. Алматы, 2022г.
23. Статистический сборник «Здоровья населения РК и деятельность организации здравоохранения», Министерство здравоохранения Республики Казахстан. Астана. – выпуски 2019...2025.
24. Национальный доклад о состоянии окружающей среды и об использовании природных ресурсов. //Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам республики Казахстан //Официальный интернет-ресурс. www.stat.gov/kz; <http://ecogofond.kz>, Астана, 2023.
25. Информационные бюллетени о состоянии окружающей среды Республики Казахстан, 2014...2025. Электронный ресурс: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy>
26. Государственный Фонд экологической информации (ГФЭИ), 2020...2025гг. Электронный ресурс // <https://ecogofond.kz/ltty-bajandama/>.
27. Материалы частного фонда «Almaty Air Initiative» (AAI), 2024. <http://air.org.kz>.
28. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/spreadsheets/?year=&name=19198&period=&type=>
29. <https://gosrating.com/2350.html>
30. https://autoreport.kz/news/skol-ko-avtomobilej-dolzno-byt-v-almaty-dla-komfortnogo-peredvizhenia?utm_source=chatgpt.com
31. A. Jullien M. Dauvergne V. Cerezo A. (2014). Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. -2014. - V. 29. - p. 56-65.
32. Вострикова М.А., Шкода В.В. Характеристика основных выбросов автотранспорта и их влияние на растения // *Международный научный журнал «Инновационная наука»*. - 2015. - №11. – С. 65-66.
33. Статистический сборник Министерства здравоохранения РК «Здоровье населения РК и деятельность организаций здравоохранения в 2024г.». – Астана, 2025. – 400с.
34. WHO, UNICEF, UNU, Iron Deficiency Anaemia: Assessment, Prevention and Control, A Guide for Programme Managers, WHO, UNICEF, UNU. – Geneva, Switzerland, 2001.
35. Breymann, C. (2017). Diagnosis and treatment of iron-deficiency anaemia in pregnancy and postpartum / C. Breymann, C. Honegger, I. Hösli, D. Surbek // *Arch Gynecol Obstet*. – 2017. - Vol. 296(6). – P. 1229-1234.
36. Gaillard, R. (2014). Risk factors and consequences of maternal anaemia and elevated haemoglobin levels during pregnancy: a population-based prospective cohort study / R. Gaillard, P.H. Eilers, S. Yassine et al. // *Paediatr Perinat Epidemiol*. – 2014. - Vol. 28 (3). - P. 213-226.
37. Bitzer J, Heikinheimo O, Nelson AL, Calaf-Alsina J, Fraser IS. (2015). Medical management of heavy menstrual bleeding: a comprehensive review of the literature. *Obstet Gynecol Surv* 2015; 70:115-30.
38. Smith C, Teng F, Branch E, Chu S, Joseph KS. (2019). Maternal and perinatal morbidity and mortality associated with anemia in pregnancy. *Obstet Gynecol*. 2019;134(6):1234–44. doi: 10.1097/AOG.0000000000003557.
39. Ракишева А.Г., Беркинбаев С.Ф., Джунусбекова Г.А., Мусагалиева А.Т., Матекова А.Е. Сравнительный анализ распространенности анемии в городе Алматы, Алматинской и Актюбинской областях // *Medicine (Almaty)*. - 2017. – №5(179). – С. 66-71.

REFERENCES

1. Afanasyeva, I. M. *Sustainable Development of Humanity. Part 2* [Text]: monograph / I. M. Afanasyeva, A. V. Ivanov, E. N. Petrova; Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering. – Nizhny Novgorod: NNGASU, 2013. – p. 85.
2. WHO. Ambient (Outdoor) Air Pollution. 2022. Accessed September 02, 2024. [https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
3. Dechezleprêtre A., Rivers N., Stadler B. (2019). The economic cost of air pollution: Evidence from Europe. OECD Economics Department Working Papers, 1584. <https://doi.org/10.1787/56119490-en>.
4. Schleussner C.F., Rogelj J., Schaeffer M., et al. (2016). Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change*, 6. - P. 827-835. <https://doi.org/10.1038/nclimate3096>.
5. Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated August 25, 2011, No. 145 "On the adoption of the Amendment to Annex B of the Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. [in Russian].

6. OECD (2021), Supporting Clean Urban Public Transport in Kazakhstan, Kyrgyzstan and Moldova: Summary Report on Project Implementation 2016...2019, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/411cc0b0-en>. [in Russian].
7. Law of the Republic of Kazakhstan dated November 4, 2016 No. 20-VI "On ratification of the Paris Agreement". [in Russian]
8. Hameed S., Karim N., Wasay M., et al. (2024). Emerging Stroke Risk Factors: A Focus on Infectious and Environmental Determinants. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*. - № 11(1). - P. 19. <https://doi.org/10.3390/jcdd11010019>.
9. Kontsevaya A.V., Antsiferova A.A., Mukaneeva D.K., Ipatov P.V., Drapkina O.M. The "One Health" concept: an integrated approach to the health of humans, animals and the environment. *Preventive medicine*. - 2024. - №. 27 (11). - P. 7 - 12. [in Russian].
10. Nurmadiyeva G.T., Zhetpisbaev B.A. Influence of the ecosystem on human health in the industrial developed regions of Kazakhstan. A literature review. // *Science and Healthcare*. 2018. - (Vol.20) 4. - P. 107-132. [in Russian].
11. Daily Air Conditions Bulletin (UMC). <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhednevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-basseyna-nmu>.
12. <https://orda.kz/almaty-voshel-v-pjaterku-samyh-grjaznyh-gorodov-mira-po-kachestvu-vozduha-408422/>.
13. Khasenov A.K. (2021), Prospects for converting Almaty power plants to natural gas // *Vestnik of KazNITU*. - №6. - P. 107-122. <https://www.ales.kz/almatinskaya-tecz-3>. [in Russian].
14. Barikaeva N.S. Improving the system for monitoring air pollution in roadside areas of cities with fine dust. – Diss. Cand. Tech. Sciences, Volgograd, 2018. - 159 p. [in Russian].
15. Balabanov D.S. Transfer and dispersion of exhaust gases from motor vehicles over urbanized areas / diss. for a Ph.D. in Engineering Sciences. - Perm, 2011. - 148 p. [in Russian].
16. Kerimray, A., Azbanbayev, E., Kenessov, B., Plotitsyn, P., Alimbayeva, D. and Karaca, F. (2020). Spatiotemporal Variations and Contributing Factors of Air Pollutants in Almaty, Kazakhstan. *Aerosol Air Qual. Res.* 20: - P. 1340–1352. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0464>.
17. Leshchuk S.I., Surkova I.V. Senkevich N.V. The relationship between environmental pollution and environmentally caused morbidity of the population in the territory of technogenic pollution//*News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences*, 2017. - No. 2. - P. 110-117. [in Russian].
18. Andersen ZJ, Kristiansen LC, Andersen KK. et al. (2012) Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide: a cohort study // *Stroke*. -V. 43. - P. 3200-3255.
19. T. Yorifuji, S. Kashima, T. Tsuda, et al. (2013). Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of death from hemorrhagic stroke and lung cancer in Shizuoka, Japan // *Science of the Total Environment*. - V. 443. P. 397-402.
20. Tak-sun Yu, H. Qiu, X. Wang et all. (2013). Synergy between particles and nitrogen dioxide on emergency hospital admissions for cardiac diseases in Hong Kong // *International Journal of Cardiology*. - V.168(3). - P.2831-2836.
21. P.J. Villeneuve, J.Y.M. Johnson, D. Pasichnyk, et al. (2012). Short-term effects of ambient air pollution on stroke: Who is most vulnerable? // *Science of the Total Environment*. - V. 430. - P. 193-201.
22. Development Plan of the City of Almaty for 2021–2025, Appendix to the Decision of the Almaty City Maslikhat dated December 9, 2022 No. 192. Appendix to the Decision of the Almaty City Maslikhat dated January 15, 2021 No. 5. Almaty, 2022.
23. Statistical digest "Health of the population of the Republic of Kazakhstan and activities of healthcare organizations", Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. Astana. – issues 2019...2025. [in Russian].
24. National report on the state of the environment and the use of natural resources // Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan // Official Internet resource. [www.stat.gov/kz; http://ecogofond.kz](http://ecogofond.kz), Astana, 2023. [in Russian].
25. Information bulletins on the state of the environment of the Republic of Kazakhstan, 2014...2025. Electronic resource: https://www.kazhydromet.kz/ru_/ecology/ezhemesyachnyy-informacionnyy-byulleten-o-sostoyanii-okruzhayushey-sredy. [in Russian].
26. State Fund for Environmental Information, 2020–2025. Electronic resource // <https://ecogofond.kz/lty-bajandama/>. [in Russian].
27. Materials of a private fund "Almaty Air Initiative" (AAI), 2024. <http://air.org.kz>. [in Russian].
28. <https://stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-transport/spreadsheets/?year=&name=19198&period=&type=>
29. <https://gosrating.com/2350.html>
30. https://autoreport.kz/news/skol-ko-avtomobilej-dolzno-byt-v-almaty-dla-komfortnogo-peredvizhenia?utm_source=chatgpt.com
31. A. Jullien M. Dauvergne V. Cerezo A. (2014). Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. -2014. - V. 29. - P. 56-65.
32. Vostrikova M.A., Skoda V.V. Characteristics of the main emissions from motor vehicles and their impact on plants // *International scientific journal "Innovative Science"*, 2015. - №11. – P. 65-66. [in Russian].
33. Statistical collection of the Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan "Health of the population of the Republic of Kazakhstan and the activities of healthcare organizations in 2024". – Astana, 2025. – 400p. [in Russian].

34. WHO, UNICEF, UNU, Iron Deficiency Anaemia: Assessment, Prevention and Control, A Guide for Programme Managers, WHO, UNICEF, UNU. – Geneva, Switzerland, 2001.
35. Breyman, C. (2017). Diagnosis and treatment of iron-deficiency anaemia in pregnancy and postpartum / C. Breyman, C. Honegger, I. Hösli, D. Surbek // Arch Gynecol Obstet. – 2017. - Vol. 296(6). – P. 1229-1234.
36. Gaillard, R. (2014). Risk factors and consequences of maternal anaemia and elevated haemoglobin levels during pregnancy: a population-based prospective cohort study / R. Gaillard, P.H. Eilers, S. Yassine et al. // Paediatr Perinat Epidemiol. – 2014. - Vol. 28 (3). - P. 213-226.
37. Bitzer J, Heikinheimo O, Nelson AL, Calaf-Alsina J, Fraser IS. (2015). Medical management of heavy menstrual bleeding: a comprehensive review of the literature. Obstet Gynecol Surv 2015; 70:115-30.
38. Smith C, Teng F, Branch E, Chu S, Joseph KS. (2019). Maternal and perinatal morbidity and mortality associated with anemia in pregnancy. Obstet Gynecol. 2019;134(6):1234–44. doi: 10.1097/AOG.0000000000003557.
39. Rakisheva A.G., Berkinbaev S.F., Dzhunusbekova G.A., Musagalieva A.T., Matekova A.E. Comparative analysis of the prevalence of anemia in the city of Almaty, Almaty and Aktobe regions //Medicine (Almaty). 2017. – №5(179). – С. 66-71. [in Russian].

АЛМАТЫ ҚАЛАСЫНЫҢ АТМОСФЕРАЛЫҚ АУА САПАСЫН ЖӘНЕ ОНЫҢ ХАЛЫҚ ДЕНСАУЛЫҒЫНА ӘСЕРІН БАҒАЛАУ

Аманкүл Д. Ақбасова¹, д.т.н., Гулмира Б. Кезембаева^{1*}, PhD, Алмас С. Жұмағұлов¹ PhD, Александр В. Логвиненко¹, Үмбеталы Қ. Сәрсембин¹ PhD, Дархан Е. Муратов², Әлішер М. Избакиев³.

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан. a.akbassova@satbayev.university (АДА), g.kezembayeva@satbayev.university (ГБК), a.zhumagulov@satbayev.university (АСЖ), u.sarsembin@satbayev.university (УКС),

² «Еко Project Company» ЖШС ecoproject.company@bk.ru (ДЕМ),

³ «Экосервис-С» ЖШС izbakiyev.a@ecoservice.kz (АМИ).

* Байланыс үшін жауапты автор: Г.Б. Кезембаева, g.kezembayeva@gmail.com

ТҮЙІНДІ СӨЗДЕР

атмосфералық ауа,
автокөлік, Алматы
мониторингі, халық
денсаулығы, ластағыштар
эмиссиясы

Мақала жайында:

Алынды: 21.01.2026

Қайта қаралды: 03.03.2026

Қабылданды: 27.03.2026

Жарияланды: 01.04.2026

АННОТАЦИЯ

Мақала Алматы қаласының автокөлік жүйесінің жағдайы мен экологиясының өзара байланысын кешенді бағалауға арналған. Көлік, метеорологиялық, инфрақұрылымдық, экологиялық, медициналық және басқа да параметрлерді сипаттайтын деректер жинақталды. Алматыдағы ауаның жоғары деңгейде ластануы тек қаланың ойпатта орналасуымен ғана емес, сонымен қатар бірқатар қосымша факторлардың болуымен байланысты екені көрсетілді. Қалалық құрылысты жел өрнегін (жел раушанын) ескермей жоспарлау кезінде жиі жіберілетін бұзушылықтар елеулі үлес қосады. Желдің жылдамдығы 3 м/с-тан төмен болғанда және тығыз құрылыс жағдайында PM_{2,5} концентрациясы 110 мкг/м³-ке, PM₁₀ - 170 мкг/м³-ке және NO₂ - 95 мкг/м³-ке дейін жетеді.

2025 жылғы статистикалық деректерге сәйкес, пайдалануда жүрген автокөліктердің ішінде шығарылғанына 20 жылдан асқан 159 413-тен астам көлік бар, олардың ≥40%-ы каталитикалық бейтараптандырғыштармен жабдықталмаған. Алматының ауа бассейнінде PM_{2,5} ұсақ дисперсті бөлшектерінің мөлшері бойынша шекті рұқсат етілген концентрацияның бірнеше есе артуы байқалған, әсіресе бұл жағдай жерге жақын температуралық инверсия кезінде тән.

Негізгі факторлардың жиынтық әсері Алматының әлемдегі ең ластанған қалалар тізіміне жиі енуіне себеп болатыны көрсетілді. Халық арасында жоғарғы тыныс жолдары ауруларының көбеюінің негізгі себептері атап өтілді. Адам денсаулығына өмір салты — 50–55%, тұқымқуалаушылық — 20–23%,

қоршаған ортаның жағдайы — 20–25% және денсаулық сақтау жүйесінің жұмысы — 8–12% деңгейінде әсер ететіні анықталды.

Мақалада Алматы қаласындағы автокөлік құралдарының түрлері, қолданылатын отын сапасы, жасы және олардың өсу динамикасы талданды.

ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN ALMATY AND ITS IMPACT ON POPULATION HEALTH

Amankul D. Akbassova¹, doctor of Technical Sciences, professor, Gulmira B. Kezembayeva¹ PhD, Almas S. Zhumagulov¹, PhD, Aleksandr.V. Logvienko¹, master of Engineering Sciences, Umbetaly K. Sarsembin¹, PhD, associate Professor, Darkhan E. Muratov², master of Science, Alisher M. Izbakiyev³, master of Ecology.

¹Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan

²«Eco Project Company» LLP.

³«ECOSERVIS-S» LLP

*Corresponding author: G.B. Kezembraeva, g.kezembraeva@gmail.com

ТҮЙІНДІ СӨЗДЕР

atmospheric air, motor transport, monitoring of Almaty, public health, pollutant emissions

About article:

Received: 21.01.2026

Revised: 03.03.2026

Accepted: 27.03.2026

Published: 01.04.2026

АБСТРАКТ

The article is devoted to a comprehensive assessment of the interrelationship between the condition of the road transport system and the environmental state of the city of Almaty. Data characterizing transport, meteorological, infrastructural, environmental, medical, and other parameters were collected. It is shown that the high level of air pollution in Almaty is associated not only with the city's location in a basin but also with the presence of a number of additional factors. A significant contribution is made by frequent violations in urban development carried out without consideration of the wind rose. Under low wind speeds of less than 3 m/s and dense urban development, PM_{2.5} concentrations reach 110 µg/m³, PM₁₀ - 170 µg/m³, and NO₂ - 95 µg/m³.

According to statistical data for 2025, more than 159,413 vehicles over 20 years old are in operation, of which ≥40% are not equipped with catalytic converters. Multiple exceedances of the maximum permissible concentration (MPC) for fine particulate matter PM_{2.5} in the air basin of Almaty have been observed, particularly under conditions of surface temperature inversion.

The combined effects of the main factors contributing to Almaty's frequent inclusion in the list of the most polluted cities in the world are examined. The primary causes of the increasing incidence of upper respiratory tract diseases among the population are identified. It was found that human health is influenced by lifestyle (50–55%), heredity (20–23%), environmental conditions (20–25%), and the performance of the healthcare system (8–12%).

The article analyzes the composition of motor vehicles in Almaty by type and fuel quality, as well as their age structure and growth dynamics.

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



Ғылыми мақала

МАҚАТ АУДАНЫНДАҒЫ ВЕГЕТАЦИЯНЫҢ КЕҢІСТІКТІК-УАҚЫТТЫҚ ЖАЙЫ: ТЕХНОГЕНДІК ИНФРАҚҰРЫЛЫМ ЖӘНЕ КЛИМАТТЫҚ ФОН (2000–2024 жж.)

Сактагуль У. Кузбулова , Нургуль Е. Рамазанова  PhD, профессор м.а

¹Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан; sakta_72@mail.ru (СУК), ramazanova_nye@enu.kz (HEP)

Автор корреспонденциясы: Сактагуль У. Кузбулова, sakta_72@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

NDVI, техногендік ластану, климаттық факторлар, өсімдік жамылғысы, уақыттық динамика, Мақат ауданы.

АБСТРАКТ

Зерттеудің мақсаты — Мақат ауданында техногендік қысым жағдайында өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық динамикасын сандық бағалау. 2000, 2010, 2015, 2021 және 2024 жылдардың маусым айына сәйкес келетін жерсеріктік кескіндер негізінде NDVI есептеліп, нәтижелер «Қазгидромет» РМК мәліметтеріндегі маусым айының орташа температурасы мен жауын-шашын мөлшерімен салыстырылды.

Маусым айы бойынша аудандық орташа NDVI 2000 ж. шамамен 0,14 болса, 2010–2021 жж. $\approx 0,10$ – $0,09$ деңгейіне дейін төмендеп, 2024 ж. $\approx 0,21$ қайта өсті. Кеңістіктік талдау өндірістік алаңдар, құбыр желілері мен ілеспе инфрақұрылым маңында тұрақты төмен NDVI дақтарының сақталатынын көрсетті. Бұл учаскелерде төмен (C1–C2) және орташа кластардың үлесі жоғары, ал жоғары вегетациялық класс (C5) үлесі қысқарған кезеңдерде (2010–2021 жж.) ең аз мәндерге дейін төмендеді; 2024 ж. қайта өскенімен, негізгі өндірістік белдеулерде салыстырмалы түрде төмен күйде қалды. NDVI сәуір-маусым айындағы жиынтық жауын-шашынмен оң, ал ауа температурасының жоғарылауымен теріс байланыс көрсетеді; демек, шөлейт жағдайда су тапшылығы жылдар бойынша өзгергіштікті айқындайды, ал техногендік жүктеме (шаң-газ шығарындылары, мұнай өнімдері мен тұзды сулардан ластану, топырақтың тұздануы, құрылымының бұзылуы, факелдік жану) нақты учаскелерде өсімдік жамылғысының жергілікті әлсіреуін күшейтеді. Бұл нәтижелер климаттық фоннан тәуелсіз түрде техногендік ықпал аймақтарында NDVI-дің тұрақты төмендеу трендінің көрсетеді және табиғи кешендердің осал учаскелерін айқындауға мүмкіндік береді.

Нәтижелер климаттық факторлар мен техногендік жүктеменің бірлескен ықпалын айқындап, маусым айына стандартталған NDVI өңір геожүйелерінің күйін мониторингтеудің қолданбалы құралы екенін дәлелдейді.

1. КІРІСПЕ

Қазіргі кезеңде мұнай-газ өндірісінің қарқынды дамуы табиғи ортаның экологиялық тұрақтылығына айтарлықтай әсер етуде. Өндірістік кәсіпорындардың қызметі нәтижесінде топырақ пен су құрамына зиянды заттардың түсуі, газдың факельдік жануы және шаң-тозаң эмиссиялары өсімдік жамылғысының деградациясын үдетуі мүмкін [1-3].

Қазақстанның батыс аймақтарында, әсіресе Атырау облысының Мақат ауданында мұнай-газ инфрақұрылымының шоғырлануы табиғи геожүйелердің техногендік жүктемеге бейімделуін зерттеуді өзекті етеді.

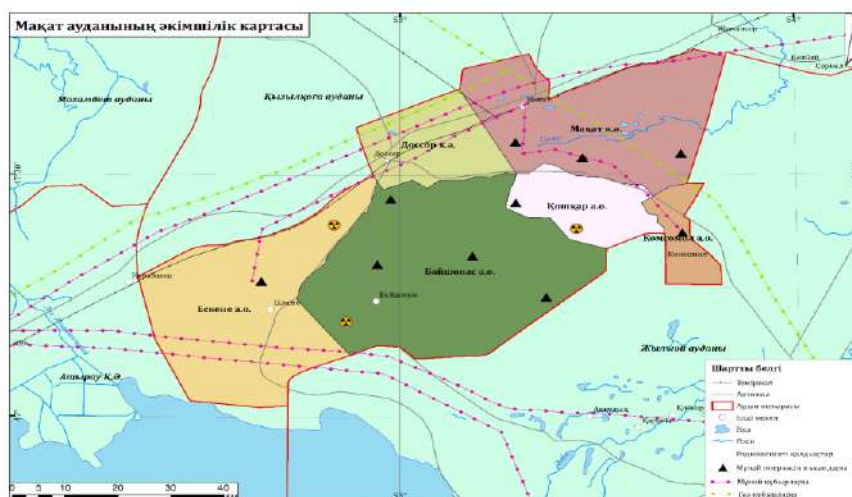
Өсімдік жамылғысы геожүйелердің экологиялық жай-күйін бағалауда негізгі биоиндикатор болып табылады. Вегетациялық өзгерістерді қашықтықтан зондтау әдістері арқылы талдау экологиялық мониторингтің тиімді құралдарының бірі болып саналады. Солардың ішінде NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) көрсеткіші өсімдіктердің фотосинтетикалық белсенділігін, биомассаның жағдайын және деградация дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді [4-5].

Климаттық факторлар да өсімдік жамылғысына тікелей әсер етеді. Әсіресе шөлейтті және құрғақ аймақтарда жауын-шашын мөлшерінің азаюы мен температураның жоғарылауы вегетациялық белсенділікті әлсіретіп, техногендік факторлармен ұштасқанда синергиялық әсер туғызады [6-8]. Сондықтан техногендік жүктеме мен климаттық өзгерістердің бірлескен ықпалын бағалау ландшафттық тұрақтылықты зерттеуде маңызды бағыттардың бірі болып табылады.

Осыған байланысты, зерттеудің мақсаты – Мақат ауданында NDVI негізінде өсімдік жамылғысының кеңістіктік-уақыттық құрылымын сандық сипаттап, NDVI-дің маусым айындағы температура мен жауын-шашынмен байланысын бағалау.

2. МӘЛІМЕТТЕР МЕН ӘДІСТЕР

Мақат ауданы Атырау облысының оңтүстік шығысында, Каспий маңы ойпатының шегінде орналасқан — Қазақстанның мұнай-газ өнеркәсібі дамыған тарихи аудандарының бірі. Аудан батысында Махамбет ауданы және Атырау қаласымен, солтүстігінде Қызылқоға ауданымен, оңтүстігінде Жылыой ауданымен шектеседі. Жер аумағы 9,1 мың км². Халқы 29,2 мың адам (2024). Ауданда Мақат, Доссор, Байшонас, Комсомол, Ескене, Қошқар кенттері бар (1–сурет).



Сурет 1. Мақат ауданының әкімшілік картасы

Жер бедері жазықты, толқынды-ойпаңды формалар басым. Биіктік абсолюттік деңгейі теңіз деңгейінен төмен – 24 м-ден 68 м-ге дейін өзгереді. Эолды және

Мақала жайында:

Жіберілді: 16.09.2025
Қайта қаралды: 19.02.2026
Қабылданды: 31.03.2026
Жарияланды: 01.04.2026

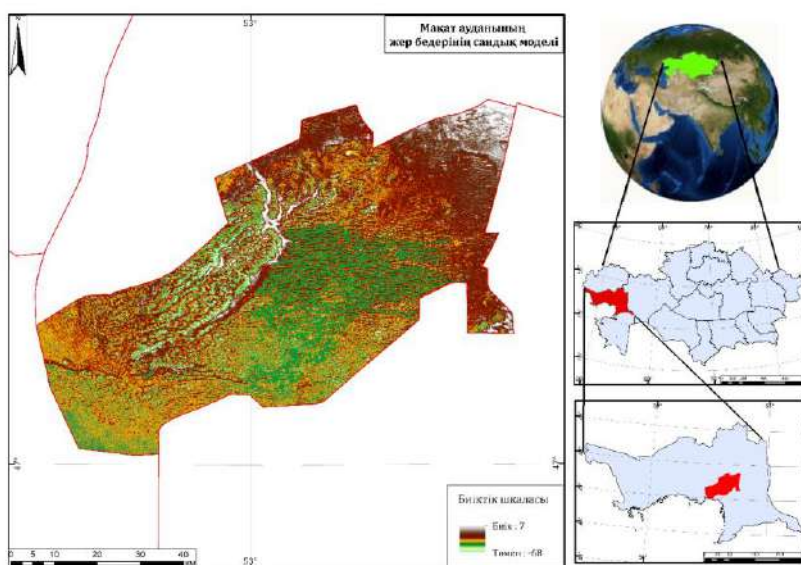
Дәйексөз үшін:

Кузбулова С.,
Рамазанова Н. Мақат ауданындағы вегетацияның кеңістіктік-уақыттық жайы: техногендік инфрақұрылым және климаттық фон (2000–2024 жж.)
// Гидрометеорология и экология, 121 (1), 2026, 163–175.

делювиальды процесс басым дамыған[8-9]. Жазықты аймақта ойыстар мен тұзды шағын сорлар, құрғақ арналар (сайлар), шағылды формалар жиі кездеседі.

Бұл көрсеткіштер Мақат ауданының едәуір бөлігінің Каспий теңізі деңгейінен төмен жатқандығын көрсетеді. Ол топырақ ылғалдылығының жоғарылауына, жер асты суларының жақын орналасуына және кей жерлерде сор мен батпақты алқаптардың қалыптасуына ықпал етеді(2–сурет).

Жазық және төмен бедердің басым болуы, әсіресе, климаттық және техногендік факторлармен бірге, өсімдік жамылғысының шоғырлануы мен сипатына тікелей әсер етеді. Су ағымының әлсіз немесе болмауы, рельефтің төмендігі жер үсті сулардың жиналуына, дренаждың нашарлығына себеп болады. Бұл факторлар NDVI көрсеткіштерімен бірге қарастырылғанда, ландшафтық құрылым мен деградация деңгейін бағалауға мүмкіндік береді.



Сурет 2. Мақат ауданының жер бедерінің сандық моделі

Мақат ауданы қатаң континенттік климаттық белдеуде орналасқан, бұл аймаққа жаздың ыстық және құрғақ, ал қыстың суық және қарсыз болуы тән. Орташа жылдық температура $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ шамасында. Қаңтар айындағы орташа температура $-10\text{...}-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, шілдеде $+30\text{...}+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ дейін жетеді. Жылдық жауын-шашын мөлшері $100\text{--}150\text{ мм}$ аралығында, бұл — шөлді климатқа тән көрсеткіш. Жел бағыты негізінен солтүстік-шығыстан және солтүстіктен соғады, кей кездері $15\text{--}20\text{ м/с}$ жылдамдықпен соғатын күшті желдер тіркеледі. Климаттың құрғақтығы және буланудың жоғары болуы геожүйелердің ылғалмен қамтамасыз етілуін шектейді[10-13].

Өсімдік жамылғысы шөлге бейімделген ксерофитті түрлерден тұрады. Көпжылдық бұталар мен жартылай бұталар (қара жусан, сораң, теріскен, көкпек) басым.

Ауданның су ресурстары мардымсыз. Тұрақты ағын сулар жоқ.

Бұл өңірде мұнай өндіру ісі алғаш рет XX ғасырдың басында, 1911 жылы орыс-ағылшын бірлескен кәсіпорнының бастамасымен қолға алынды. Ірі мұнай кен орындары Мақат, Доссор, Қошқар, Ескене, Комсомол, Байшонас, Ботақан.

Жылдық мұнай өндіру көлемі облыстық көрсеткіштің айтарлықтай бөлігін құрайды. Соңғы онжылдықта аудан бойынша мұнай өндіру жылына орта есеппен $1,2\text{--}1,5$ млн тонна деңгейінде тұрақтаған.

Аудан арқылы республикалық және халықаралық деңгейдегі бірқатар магистральдық құбырлар өтеді. Солардың ішінде «Атырау – Самара» мұнай құбыры және өндірістік инфрақұрылымға қызмет көрсететін жергілікті құбыр жүйелері бар. Бұл

желілер Қазақстанның батыс өңірлерін Ресей Федерациясымен және әлемдік нарықпен байланыстыратын стратегиялық маңызы бар көлік инфрақұрылымын құрайды.

Сонымен қатар аудан аумағы арқылы «Теңіз – Новороссийск» магистральдық мұнай құбыры және «Мақат – Солтүстік Кавказ» магистральдық газ құбыры өтеді. Бұл құбырлар Каспий маңы мұнай-газ кешенінің өнімдерін сыртқы нарыққа жеткізуде негізгі бағыттардың бірі болып табылады.

Дереккөздер және іріктеу: Зерттеу 2000, 2010, 2015, 2021 және 2024 жылдардың маусым айына сәйкес спутниктік кескіндерге негізделді: Landsat 7 ETM+ (2000; 2010 — SLC-off жолақ артефактілері масқаланған), Landsat 8 OLI (2015), Sentinel-2 MSI (2021, 2024). Бұлттылық критерийі ≤20% қолданылды. Деректер USGS EarthExplorer және Copernicus Open Access Hub платформаларынан алынды [14-15].

Алдын ала өңдеу. Кескіндер радиометриялық және атмосфералық түзетуден өткізіліп, бұлт, көлеңке пиксельдері масқаланды (Landsat — Fmask/LaSRC, Sentinel-2 — Sen2Cor) [16-18]. Барлық растрлар WGS84 / UTM Zone 39N проекциясына келтірілді және кеңістіктік ажыратымдылығы 30 м деңгейінде біріздендірілді [19-20]

NDVI есептеу және картографиялау.

Өсімдік жамылғысының күйі NDVI арқылы бағаланды(1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \tag{1}$$

Мұндағы:

NIR (Near Infrared) – жақын инфрақызыл диапазондағы шағылысу мәні (өсімдік бұл диапазонда жақсы шағылыстырады),

RED (Қызыл) – қызыл жарық диапазонындағы шағылысу мәні (өсімдік бұл диапазонда көп сіңіреді).

NDVI класстандыруы барлық талданған жылдарда (2000, 2010, 2015, 2021, 2024 жж.) бірдей тұрақты шектермен жүргізілді: C1–C5 (өте төменнен жоғарыға дейін). Жіктеу шектері мен түстік интерпретациясы төмендегі кестеде келтірілген; бұл біріздендіру жылдар бойынша салыстырмалылықты қамтамасыз етеді (1–кесте).

Кесте 1

NDVI кластар және интерпретациясы (барлық жылдарға ортақ шектер)

Класс	NDVI аралығы	Түстік интерпретация	Қысқаша түсіндірме
C1	-0,520...-0,102	Қызыл	Өте төмен, теріс NDVI: су, жалаңаш, тұзданған топырақ, техногендік беттер
C2	-0,102... 0,049	Сарғыш	Төмен NDVI: сирек, әлсіз вегетация, стресс
C3	0,049... 0,138	Сары- ашық жасыл	Орташа NDVI:
C4	0,138... 0,181	Жасыл	Орташа жоғары NDVI: қалыпты өсімдік жамылғысы
C5	0,181... 0,704	Қою жасыл	Жоғары NDVI: тығыз, белсенді вегетация

Есептеулер мен картографиялау ArcGIS 10.8 ортада жүргізілді.

«Техногендік контекст сапалық түрде бағаланды: NDVI карталары өндірістік инфрақұрылым элементтерімен (ұңғымалар, құбыр трассалары, жол-көлік және өндірістік алаңдар) визуалды салыстырылды. Буферлік немесе зоналық сандық талдау жүргізілмегендіктен, интерпретация индикативті сипатта берілді.»

Ландшафтық жүйелердегі өзгерістердің климаттық жағдайлармен байланысын анықтау үшін “Қазгидромет” РМК-ның көпжылдық метеорологиялық бақылаулары пайдаланылды. Сонымен қатар, индустриялық ластану контекстін сипаттау мақсатында 2021 жылдың маусым айына қатысты Қазгидромет бекеттерінде тіркелген күкіртті сутек (H₂S) концентрациясының ШРК-дан асу эпизодтары қолданылды (толық дерек тізімі — 4–кесте) [10].

Климаттық фонды сипаттау үшін 2000, 2010, 2015, 2021 және 2024 жылдарға қатысты жылдық орташа температура және жылдық жауын-шашын мәндері кесте түрінде келтірілді. Негізгі статистикалық салыстыру маусым айына стандартталған:

NDVI маусым айының температурасы және жауын-шашынымен, қосымша түрде сәуір–маусым айларындағы жиынтық жауын-шашынымен салыстырылды; жылдық агрегаттар тек климаттық контекст үшін пайдаланылды (2,3–кесте)

Бұл әдіс климаттық факторлар мен техногендік әсердің біріктірілген ықпалын бағалауға мүмкіндік береді.

Кесте 2

Атырау метеостанция бойынша орташа айлық және жылдық ауа температурасы, °C (2000, 2010, 2015, 2021, 2024 жж.)

Метеостанция Атырау	Айлар												ЖЫЛ
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2000	-3,33	-0,44	3,75	15	15	23,2	27	25,6	16,3	7	-0,61	-2,01	10,55
2010	-3,08	-0,55	3,79	14,5	14,8	22,3	27	25,6	16,3	7	0,6	-2,7	10,46
2015	-5,88	-6,43	0,10	10,8	23,4	28,9	27,02	24,6	20,44	7,5	2,6	0,6	11,10
2021	-3,6	-4,7	0,58	14,3	24,6	28,7	29,4	30,4	17,7	9,6	2,3	-0,8	12,3
2024	-5,7	-2,9	2,5	17,8	17,3	27,4	28,3	25,8	19,9	10,6	3,1	-2,6	11,8

Кесте 3

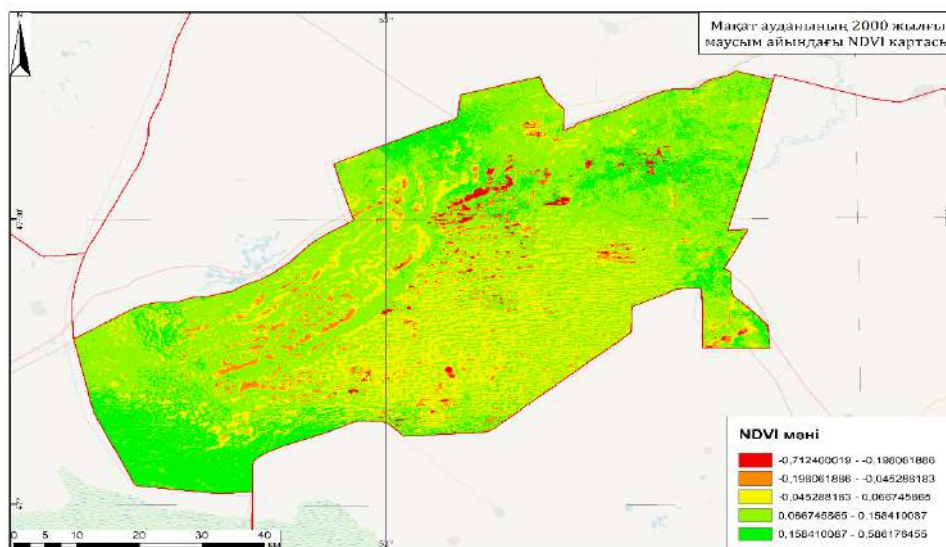
Атырау метеостанция бойынша орташа айлық, жылдық және маусымдық жауын шашын мөлшері, мм (2000, 2010, 2015, 2021, 2024 жж.)

№	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	жыл	маусым	
														XI-III	IV-X
2000	4	9,3	3,9	17	57,3	41,4	7,3	40,9	6,7	31,2	28,4	18	265,4	63,6	201,8
2010	7,3	10,7	16,2	21	41,1	0	12,4	1,2	0	26,1	3,7	2,9	142,6	40,8	101,8
2015	7,7	12,1	18	14	93	0	27,1	3,4	12,3	7,8	24	48,9	268,3	110,7	157,6
2021	6	25,7	11,1	11	2,1	4,2	6,2	0	6,6	9,5	22,4	17,8	122,6	83	39,6
2024	15,3	39	27,2	10	32,8	20,7	7,8	3,7	2,2	25,2	32,3	14,2	230,4	128	102,4

3. НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ТАЛҚЫЛАУ

2000, 2010, 2015, 2021 және 2024 жылдар аралығындағы NDVI көрсеткіштері аудан аумағында өсімдік жамылғысының әркелкі кеңістіктік таралуын көрсетті.

2000 жыл (кластар бойынша). Аудандық орташа NDVI ≈0,14(3–сурет). Кеңістікте C4 класы басым (≈52,8%), бұл «орташа–жоғары» вегетациялық фонды көрсетеді. C5— жоғары вегетация үлесі ≈16,0%. Төмен кластардың үлесі: C2 — ≈24,5%, C3— ≈2,7%, C1 — ≈4,0%. Жалпы алғанда, 2000 жылы аумақта C3–C4 кластар үстем, C5 аймақтары ылғал жиналатын жер бедермен (өзен аңғарлары, ойпаңдар) сәйкес келеді, ал C1–C2 сирек өсімдікті, стресс жағдайындағы учаскелерінде шоғырланған. (Кластар шектері мен түсіндірмелері — 1–кесте)



Сурет 3. Мақат ауданының 2000 жылғы NDVI көрсеткіші

Метеодеректердегі жылдық температура мен жауын-шашын өңірдің аридті климаттық фонын көрсетеді; алайда NDVI-дің уақыттық динамикасын түсіндіруде негізгі мәнге маусым айындағы климат және оның алдындағы ылғал (сәуір–маусым айлары) ие.

2000 жылғы Атырау метеобекетінің орташа жылдық температурасы $+10,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ болды. Айлық көрсеткіштер қыста $-3,33 - 0,44\text{ }^{\circ}\text{C}$ аралығында болса, жазда $+23,2 +27\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа жеткен (2–кесте).

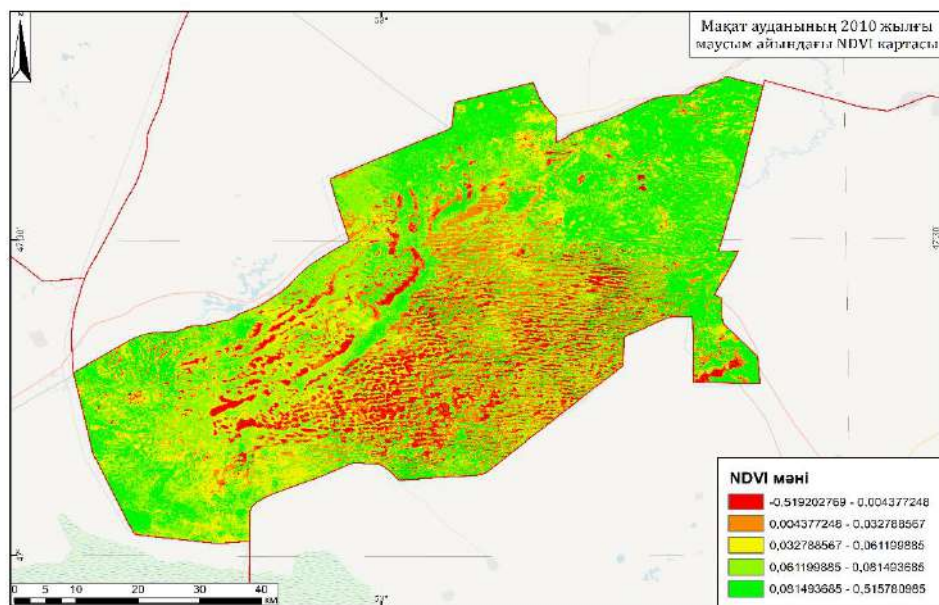
Жылдық жауын-шашын мөлшері 265,4 мм, оның ішінде вегетациялық кезеңде (сәуір–қазан) 201,8 мм, ал суық кезеңде (қараша–наурыз) 63,6 мм түскен (3–кесте).

Осы климаттық фон жағдайында, ауданның басым бөлігінде вегетациялық күй орташа деңгейде сақталды. Алайда өндірістік нысандарға іргелес аумақтарда NDVI тұрақты төмен деңгейде қалды; бұл құбылыс техногендік жүктеменің жоғары болуымен кеңістіктік тұрғыда үйлеседі және климаттық өзгерістен гөрі, техногендік жүктеменің ықтимал әсерімен түсіндіріледі.

2010 жылы орташа жылдық ауа температурасы $10,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ болып, көпжылдық нормаға жуық келді; жылдық жауын-шашын 142,6 мм-ге дейін азайып, 2000 жылмен салыстырғанда шамамен екі есеге төмен болды (2-3–кесте). Бұл тапшылық вегетациялық кезеңде топырақ ылғалдылығының айқын кемуіне алып келгенін көрсетеді.

Осы климаттық көрсеткіш аясында 2010 ж. маусым айында аудандық орташа NDVI $\approx 0,10$ тіркеліп, вегетациялық белсенділік ортадан төмен деңгейде болды. Кеңістіктік құрылым мозаикалық сипатта: жоғары NDVI аймақтары (C4–C5) негізінен гидроморфты элементтермен—өзен аңғарлары мен ойпаңдармен—шектеледі, ал төмен кластар (C1–C2) көбіне өндірістік инфрақұрылымға іргелес аумақтарда және жол–құбыр дәліздері бойында шоғырланады (4–сурет; кластар: 1–кесте).

Бұл кеңістіктік сәйкестік 2010 жылғы ылғал тапшылығының NDVI-ді төмендетудегі негізгі рөлін, ал техногендік жүктеменің (индустриялық алаңдар мен желілер маңы) жергілікті деңгейде төмен мәндерді индикативті түрде күшейтуі мүмкін екенін меңзейді.



Сурет 4. Мақат ауданының 2010 жылғы NDVI көрсеткіші

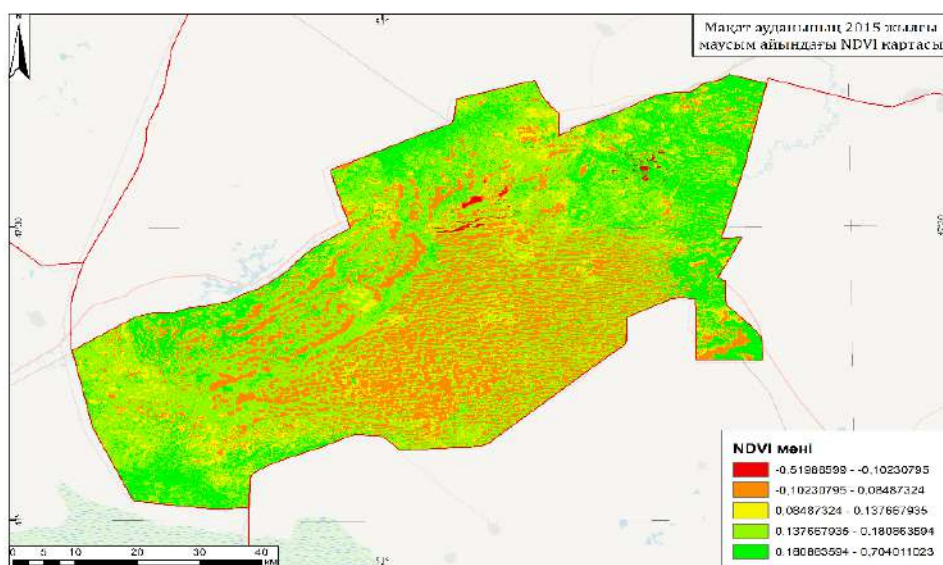
2015 жылдың маусым айында ауа температурасы өте жоғары болды ($28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), ал жауын-шашын тіркелмеді (0 мм) (2-3–кесте). Мұндай ыстық әрі қуаң фон вегетацияның су тапшылығын күшейтіп, фотосинтетикалық белсенділікті шектейді. Осы жағдайға сәйкес аудандық орташа NDVI $\approx 0,10$ тіркеліп, вегетациялық белсенділік орташа деңгейден төмен болды (5–сурет).

Жоғары NDVI аймақтары (C5, $NDVI \geq -0,18$) негізінен гидроморфты элементтерде — өзен аңғарлары, ойпаңдар, уақытша сулы алаптар — шоғырланған және аумақтың шамамен 22,3%-ын құрайды.

Өте төмен NDVI (C1, $NDVI < -0,10$) үлесі $\approx 17,0\%$; олар көбіне жалаңаш, тұзданған беттермен және өндірістік инфрақұрылымға (ұңғымалар, құбыр, жол дәліздері, техногендік алаңдар) іргелес учаскелермен сәйкес келеді.

Қалған аумақта төмен және орта кластар (C2–C3) басым, бұл шөлейт ландшафттардағы ылғалмен шектелуді көрсетеді.

2015 ж. маусым айындағы қатты ыстық пен жауын-шашынның болмауы аудан бойынша NDVI-дің төмен деңгейін айқындады; жоғары мәндер тек гидроморфты учаскелерде сақталды. Төмен немесе теріс NDVI дақтарының өндірістік белдеулер маңында жиі кездесуі техногендік жүктеменің жергілікті әлсіретуші ықпалын аңғартады.



Сурет 5. Мақат ауданының 2015 жылғы NDVI көрсеткіші

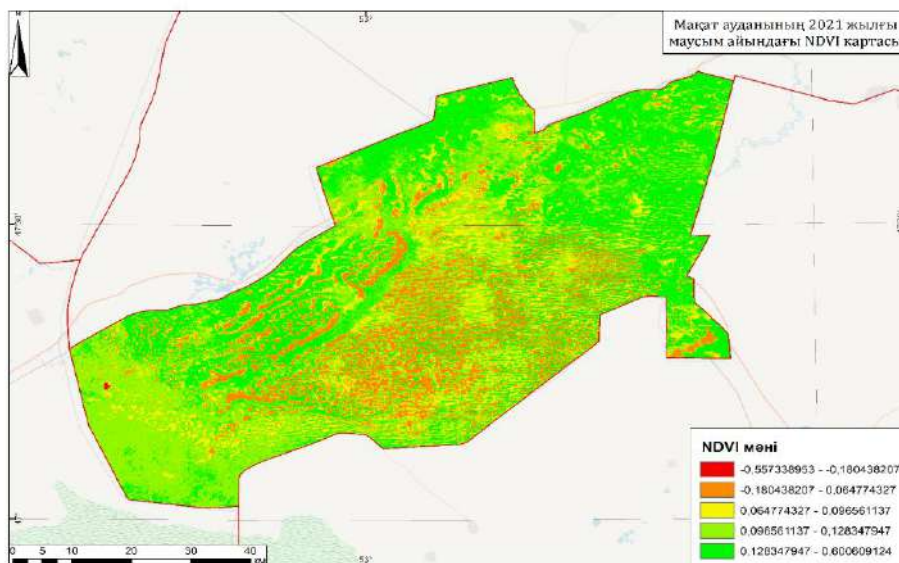
Климаттық жағдай. 2021 ж. маусым айында ауа температурасы айтарлықтай жоғары, жауын-шашын өте аз болды (айлық орташа $T = 28,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 4,2 \text{ мм}$; жылдық $T_{\text{жыл}} = 12,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{жыл}} = 122,6 \text{ мм}$; 2-3-кесте). Мұндай қуаң әрі ыстық фон вегетациялық кезеңде топырақ ылғалының жетіспеуін күшейтті.

Маусым айындағы аудандық орташа NDVI $\approx 0,09$, вегетациялық белсенділік ортадан төмен деңгейде. Жоғары класстың үлесі (C5) $\approx 0,4\%$ ғана; төмен және орта кластар (C1–C3) басым. Жоғары NDVI ошақтары (C4–C5) тек гидроморфты элементтермен (өзен аңғарлары, ойпаңдар) шектеледі, ал өте төмен, теріс NDVI (C1) дақтары өндірістік инфрақұрылымға (ұңғымалар, құбыр, жол дәліздері, техногендік алаңдар) іргелес аумақтарда жиілейді (сурет 6).

Техногендік эпизод (H_2S). Қазгидромет деректері бойынша маусым айының 15–30 күндері аралығында Мақат кентіндегі №102 «Самал» автоматтандырылған бекетінде H_2S бойынша 21 рет жоғары ластану тіркелген; анықталған концентрациялар 10,91–29,27 ШПК аралығында (Кесте 4). Осы кезеңде өңірдегі басқа бекеттерде де ШПК-дан артық мәндер байқалды (Доссор, Мақат, Ескене, Таскескен).

2021ж. NDVI-дің аудандық деңгейде төмен болуы ең алдымен ылғал тапшылығымен түсіндіріледі (күрғақ әрі ыстық кезең). Сонымен қатар, H_2S ластануының тіркелген эпизодтары уақыт жағынан NDVI-дің төмен режимімен мезгілдес және төмен, теріс кластардың өндірістік белдеулер маңында шоғырлануымен кеңістіктік тұрғыда үйлеседі. Бұл фактілер техногендік стресс ықтималдығын білдіреді.

2021ж. маусымдағы құрғақшылық NDVI-ді төмендетудің негізгі климаттық драйвері болды; күкіртті сутектің шамадан тыс концентрациялары өндірістік белдеулерде вегетацияның төмен күйін жергілікті деңгейде күшейтетін қосымша стресс ретінде көрінді.



Сурет 6. Мақат ауданының 2021 жылғы NDVI көрсеткіші

Кесте 4

Күкіртті сутек (H₂S) концентрациясының ШРК-дан асуы. (2021 жылғы маусым, Казгидромет мәліметі)

Станция	ПДК-дан асу (есе)	Бағалау
Доссор	3,17	Рұқсат нормасынан 3 есе жоғары
Мақат	2,22	Рұқсат нормасынан 2 есе жоғары
Ескене (кент)	4,81	Рұқсат нормасынан 5 есе жоғары
Ескене (станция)	4,36	Рұқсат нормасынан 4 есе жоғары
Таскескен	4,48	Рұқсат нормасынан 4,5 есе жоғары
Самал шағ. ауд.	29,27	Өте жоғары, 29 есе артық

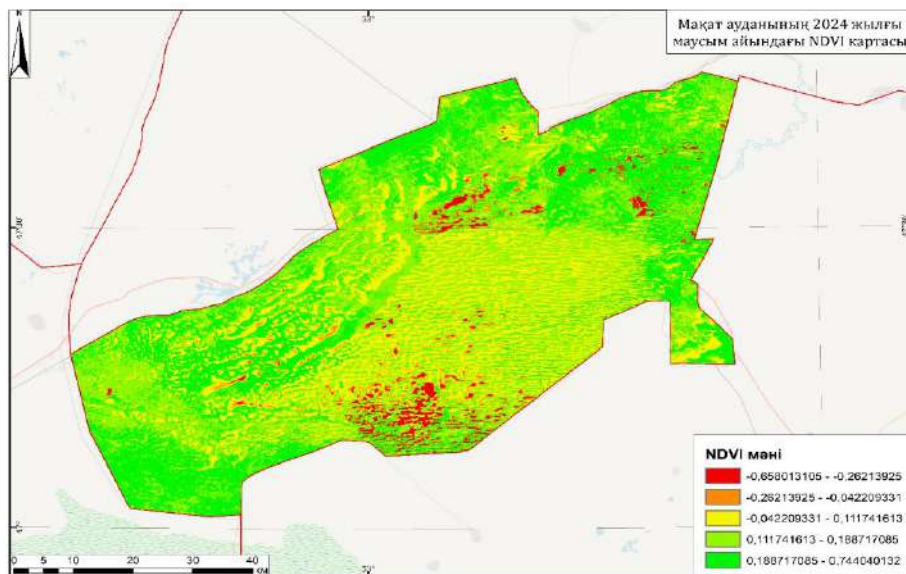
2024 жылдың жылдық орташа температура 11,8 °С болды (2–кесте). Маусым айында T = 27,4 °С, жауын-шашын 20,7 мм түсті; жылдық жауын-шашын 230,4 мм, оның IV–X айлар кезеңінде 102,4 мм, XI–III айлар кезеңінде 128 мм тіркелді (3–кесте). Бұл ылғалмен қамтылу деңгейі 2010 және 2021 жж. қуаңшылық фонынан жоғары, демек вегетация үшін су қолжетімділігі жақсырақ болды.

Маусым айындағы аудандық орташа NDVI ≈ 0,21; жоғары вегетация класы C5-тің үлесі ≈29%, ал өте төмен кластың (C1) үлесі аз. Жоғары NDVI (C4–C5) өзен аңғарлары, ойпаңдар және ылғал жиналатын микрорельефтермен кеңінен сәйкес келеді; төмен, орта кластар (C2–C3) шөлейт жайылымдарда сақталғанымен, олардың аумағы қуаң жылдармен салыстырғанда тарылған. Картада C1–C2 дақтарының өндірістік инфрақұрылыммен (ұңғымалар, құбыр, жол дәліздері, техногендік алаңдар) ішінара қабаттасуы байқалады (7–сурет).

2024 ж. маусым айындағы ылғалдың салыстырмалы молдығы (айлық жауын-шашын және жылдық жиынтық) мен ыстықтың 2015, 2021 жылдардан гөрі жұмсақырақ фоны NDVI-дің айқын қалпына келуімен (орташа мәннің ≈0,21-ға өсуі, C5 үлесінің ~30%-ға жетуі) үйлеседі. Дегенмен өндірістік белдеулерге жақын төмен NDVI ошақтарының сақталуы жергілікті техногендік стресстің бар екенін білдіреді.

2024 жылы климаттық фон (ылғалдың артуы, маусым айында P=20,7 мм) вегетацияның айлық күйін жақсартып, NDVI-дің аудандық деңгейде жоғарылауына алып

келді; кеңістіктік құрылымда жоғары кластардың (C4–C5) таралуы ұлғайды. Техногендік инфрақұрылым маңындағы төмен кластардың (C1–C2) тұрақты ошақтары, тіпті ылғалды жылдың өзінде, жергілікті антропогендік әсердің сақталып отырғанын көрсетеді.



Сурет 7. Мақат ауданының 2024 жылғы NDVI көрсеткіші

NDVI динамикасы Мақат ауданында климаттық шектеулер (әсіресе ылғал тапшылығы) мен техногендік жүктеменің қосарланған әсеріне сезімтал екенін байқатады.

Өндірістік инфрақұрылым маңында NDVI төмен деңгейде тұрақты қалып отыр. 2024 жылғы қолайлы климат NDVI қалпына келуіне ықпал етті, бірақ ластану аймақтарында толық қалпына келу шектелді.

4. ҚОРЫТЫНДЫ

2000–2024 жж. аралығында Мақат ауданы бойынша маусым айындағы аудандық орташа NDVI $\approx 0,14$ (2000) деңгейінен 2010–2021 жж. аралығында $\approx 0,10$ – $0,09$ дейін төмендеп, 2024 ж. $\approx 0,21$ -ға дейін қайта өсті. Жоғары вегетациялық класс C5 үлесі 2000 ж. $\approx 16\%$, 2021 ж. $\approx 0,4\%$, 2024 ж. $\approx 29\%$ болды; 2015 ж. жоғары класс $\approx 22,3\%$, ал өте төмен NDVI (C1, $< -0,10$) $\approx 17,0\%$ үлеске жетті. Бұл нәтижелер 2010–2021 жж. қуаң кезең, 2024 жылы ылғалдырақ фон болғанын көрсетеді.

Жоғары NDVI (C4–C5) өзен аңғарлары, ойпаңдар және ылғал жиналатын микрорельефтермен тұрақты сәйкеседі; төмен кластар (C1–C2) шөлейт жайылымдар мен индустриялық инфрақұрылымға (ұңғымалар, құбыр-жол дәліздері, өндірістік алаңдар) іргелес учаскелерде шоғырланады. 2024 жылы ылғалдың артуына қарамастан, осы белдеулерде төмен NDVI ошақтарының сақталуы жергілікті антропогендік стресс ықтималдығын индикативті түрде меңзейді.

2010 ж. жылдық жауын-шашын 142,6 мм (2000 ж. 265,4 мм-ден шамамен екі есе аз) болды; 2015 ж. маусымында $T=28,9$ °C, $P=0$ мм; 2021 ж. маусым айында $T=28,7$ °C, $P=4,2$ мм; 2024 ж. маусым айында $T=27,4$ °C, $P=20,7$ мм (жылдық 230,4 мм). Осы деректер NDVI төмендеуінің негізгі климаттық драйвері — ылғал тапшылығы, ал 2024 жылы ылғалдың артуы NDVI-дің қалпына келуімен қабаттасқанын көрсетеді.

2021жылы маусым айының 15–30 күні аралығында «Самал» АББ-да 21 рет жоғары ластану тіркеліп, H_2S концентрациялары 10,91–29,27 ШПК шегінде болды; өзге бекеттерде де ШПК-дан асу байқалды (10–кесте). Бұл эпизод 2021 ж. төмен NDVI режимімен уақыт жағынан мезгілдес, төмен теріс кластардың өндірістік белдеулер маңында жиілеуімен кеңістіктік тұрғыда үйлеседі.

NDVI карталары осал учаскелерді (C1–C2) айқындауға, деградацияланған жайылымдарды және индустриялық белдеулердегі тұрақты төмен дақтарды мониторингілеуге мүмкіндік береді. 2024 ж. қолайлы климатта да мұндай дақтардың сақталуы жергілікті геожүйелік қысымды көрсетеді.

Қорыта келе Мақат ауданындағы вегетациялық кезеңнің динамикасы ылғалмен шектелу жағдайында жылдар бойынша айтарлықтай өзгерді; 2010–2021 жж. құрғақшылық фонында төмендеп, 2024 ж. ылғалдың артуына қарай қалпына келді. Климаттық фонға тәуелсіз қайталанатын, өндірістік инфрақұрылымға іргелес орналасқан төмен NDVI аймақтары локалды техногендік стрессті көрсетеді. Аталған аумақтар табиғи кешендерді басқаруда басым мониторинг жүргізуді және рекультивациялық шараларды қажет етеді.

ДЕРЕКТЕРДІҢ ҚОЛ ЖЕТІМДІЛІГІ

Деректер USGS EarthExplorer және Copernicus Open Access Hub платформаларынан алынды. Есептеулер мен картографиялау ArcGIS 10.8 ортада жүргізілді.

АВТОРЛАРДЫҢ ҚОСҚАН ҮЛЕСІ

Тұжырымдамалау- Кузбулова С.У; Деректерді басқару -Рамазанова Н.Е; Ресми талдау- Кузбулова С.У; Әдістеме- Кузбулова С.У; Бағдарламалық қамтамасыз ету -Рамазанова Н.Е; Қадағалау-Рамазанова Н.Е; Визуализация- Кузбулова С.У; Бастапқы жобаны жазу- Кузбулова С.У; Шолу жазу және редакциялау- Кузбулова С.У;

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Жамалова А.Ж. Мұнай-газ өнеркәсібінің қоршаған ортаға әсері // ҚР ҰҒА Хабарлары. Сер. геология және техникалық ғылымдар. – 2018. – №6. – 45–52.
2. Сапаров А.С., Ерғалиев Ш. Экологиялық мониторингтің әдістері. – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 210 б.
3. Базарбаева С.Т. Батыс Қазақстандағы антропогендік ландшафттардың өзгеру ерекшеліктері // ҚазҰУ хабаршысы. География сериясы. – 2020. – №2(53). – 33–41.
4. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. – 1979. – 8(2). – 127–150.
5. Pettorelli N. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unlikely to go out of fashion // International Journal of Remote Sensing. – 2013. – 34(9–10). – 3273–3294.
6. Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models // Nature Climate Change. – 2013. – 3. – 52–58.
7. Li J. et al. Synergistic effects of climate variability and human activities on vegetation dynamics in arid Central Asia // Sci. Total Environ. – 2020. – 698. – 134203.
8. Джаналиева Г.М. Климаттық өзгерістердің аймақтық экожүйеге әсері // География және табиғатты пайдалану. – 2020. – №4. – 45–52.
9. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // Trends Ecol. Evol. – 2005. – 20. – 503–510.
10. Қазгидромет. Атырау облысының климаттық ерекшеліктері жөніндегі көпжылдық деректер жинағы. – Атырау: РМК «Қазгидромет», 2023.
11. Құлманова Ж.Ж., Махамбетов М.М. Атырау облысының мұнай-газ өнеркәсібінің қалыптасу тарихы. – Атырау: КИМУ баспасы, 2018. – 145 б.
12. «Ембімұнайгаз» АҚ. Жылдық есептер (2010–2023). – Атырау, 2023.
13. Құрманғалиева А. Мұнай-газ құбырларының экожүйеге әсері // ҚазҰУ хабаршысы. География сериясы. – 2019. – №1. – 61–66.
14. USGS. EarthExplorer: Landsat/EO деректеріне қолжеткізу платформасы. United States Geological Survey, 2024.

15. Copernicus Programme / ESA. Copernicus Open Access Hub / Copernicus Data Space Ecosystem: Sentinel деректер мұрағаты. 2024.
16. ESA. Sen2Cor User Guide. European Space Agency, 2023.
17. USGS. Landsat Surface Reflectance Code (LaSRC) Product Guide. U.S. Geological Survey, 2023.
18. USGS. Landsat 8 (OLI/TIRS) Overview. U.S. Geological Survey, 2024.
19. Didan K. MODIS Vegetation Indices (MOD13) User Guide (Collection 6). NASA/University of Arizona, 2015.
20. Piao S., et al. Changes in vegetation activity and their driving factors in China // *Global Change Biology*. – 2015. – 21. – 1601–1609.

REFERENCES

1. Zhamalova, A. Z. (2018). Environmental impacts of the oil and gas industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*, (6), 45–52.
2. Saparov, A. S., & Yergaliyev, Sh. (2016). *Methods of environmental monitoring*. Almaty: Kazakh University Press.
3. Bazarbayeva, S. T. (2020). Features of anthropogenic landscape changes in Western Kazakhstan. *Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University. Geography Series*, 2(53), 33–41.
4. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
5. Pettorelli, N. (2013). The normalized difference vegetation index (NDVI): Unlikely to go out of fashion. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9–10), 3273–3294.
6. Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3, 52–58.
7. Li, J., et al. (2020). Synergistic effects of climate variability and human activities on vegetation dynamics in arid Central Asia. *Science of the Total Environment*, 698, 134203.
8. Dzhanalieva, G. M. (2020). Impacts of climate change on regional ecosystems. *Geography and Nature Management*, (4), 45–52.
9. Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503–510.
10. Kazhydromet. (2023). Long-term climate data for the Atyrau region. Atyrau: RSE Kazhydromet.
11. Kulmanova, Zh. Zh., & Makhambetov, M. M. (2018). *History of the development of the oil and gas industry in the Atyrau region*. Atyrau: KIMU Publishing.
12. Embimunaigas JSC. (2023). *Annual reports (2010–2023)*. Atyrau.
13. Kurmagaliyeva, A. (2019). Impact of oil and gas pipelines on ecosystems. *Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University. Geography Series*, (1), 61–66.
14. U.S. Geological Survey. (2024). EarthExplorer: Platform for accessing Landsat/EO data.
15. Copernicus Programme / European Space Agency. (2024). Copernicus Open Access Hub / Copernicus Data Space Ecosystem: Sentinel data archive.
16. European Space Agency. (2023). Sen2Cor user guide.
17. U.S. Geological Survey. (2023). Landsat Surface Reflectance Code (LaSRC) product guide.
18. U.S. Geological Survey. (2024). Landsat 8 (OLI/TIRS) overview.
19. Didan, K. (2015). MODIS vegetation indices (MOD13) user guide (Collection 6). NASA / University of Arizona.
20. Piao, S., et al. (2015). Changes in vegetation activity and their driving factors in China. *Global Change Biology*, 21, 1601–1609.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ МАКАТСКОГО РАЙОНА: ТЕХНОГЕННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА И КЛИМАТИЧЕСКИЙ ФОН (2000–2024 гг.).

Сактагуль У. Кузбулова , Нургуль Е. Рамазанова  PhD, и.о профессора.

¹ЕНУ им. Л. Гумилев, Астана, Казахстан; sakta_72@mail.ru (СВК), ramazanova_nye@enu.kz (НЕР)
Автор корреспонденции: Сактагуль У. Кузбулова, sakta_72@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

NDVI; техногенное загрязнение; факторы; покров; межгодовая динамика; Макатский район; климатические факторы; растительный покров;

По статье:

Получено: 16.09.2025
Пересмотрено: 19.02.2026
Принято: 31.03.2026
Опубликовано: 01.04.2026

АБСТРАКТ

Цель исследования — количественно оценить пространственно-временную динамику растительного покрова в условиях техногенной нагрузки в пределах Макатского района. NDVI, рассчитанный по спутниковым снимкам за июнь 2000, 2010, 2015, 2021 и 2024 гг., сопоставлялся с данными РГП «Казгидромет» о среднемесячной температуре и сумме осадков за июнь. Средний по району NDVI составил около 0,14 в 2000 г., снизился до $\approx 0,10$ – $0,09$ в 2010–2021 гг. и вновь вырос до $\approx 0,21$ в 2024 г. Пространственный анализ выявил устойчивые пятна низкого NDVI вблизи производственных площадок, трубопроводов и сопутствующей инфраструктуры: здесь доля низких (C1–C2) и средних классов повышена, тогда как доля высокого класса (C5) в засушливые годы (2010–2021) сокращалась до минимальных значений и, несмотря на рост в 2024 г., в ключевых индустриальных зонах оставалась сравнительно низкой. Связь NDVI с июньскими осадками положительная, а с повышенной температурой — отрицательная, что указывает на определяющую роль дефицита влаги в аридных условиях; при этом техногенная нагрузка (пылегазовые выбросы, загрязнение нефтепродуктами и солёными водами, засоление/нарушение структуры почв, факельное сжигание) усиливает локальное ослабление растительности.

Полученные результаты демонстрируют стабильно пониженный уровень NDVI в зонах техногенного влияния независимо от климатического фона и позволяют выделить наиболее уязвимые участки природных комплексов. Итогово показывается совместное влияние климатических факторов и техногенной нагрузки и подтверждается, что «июньский» стандартизованный NDVI является прикладным инструментом мониторинга состояния экосистем региона.

SPATIOTEMPORAL STATE OF VEGETATION IN THE MAKAT DISTRICT: TECHNOGENIC INFRASTRUCTURE AND CLIMATIC BACKGROUND (2000–2024)

Saktagul Kuzbulova , Nurgul Ramazanova  PhD, Acting Professor

L.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; sakta_72@mail.ru, ramazanova_nye@enu.kz

Author correspondent: Saktagul Kuzbulova, sakta_72@mail.ru

KEY WORDS

NDVI; industrial (technogenic) pollution; climatic factors; vegetation; inter-annual dynamics; Makat District.

About article:

Received: 16.09.2025

Revised: 19.02.2026

Accepted: 31.03.2026

Published: 01.04.2026

ABSTRACT

Objective — to quantitatively assess the spatio-temporal dynamics of vegetation under industrial pressure in Makat District. June NDVI was computed from satellite imagery (2000, 2010, 2015, 2021, 2024) and compared with Kazhydromet (RSE) records of June mean temperature and precipitation. The district-level mean NDVI was ~ 0.14 in 2000, declined to ≈ 0.10 – 0.09 during 2010–2021, and recovered to ≈ 0.21 in 2024. Spatial analysis revealed persistent low-NDVI patches around production sites, pipelines and associated infrastructure: these areas exhibit elevated shares of low (C1–C2) and medium classes, whereas the high-vegetation class (C5) contracted to minima in dry years (2010–2021) and, although it increased in 2024, remained comparatively low within the main industrial belts.

NDVI relates positively to June precipitation and negatively to higher temperatures, indicating water limitation as the primary driver in this arid setting; at the same time, industrial loads (dust-gas emissions, contamination by petroleum products and saline waters, soil salinization/structure degradation, flare combustion) intensify local weakening of vegetation. The results demonstrate consistently depressed NDVI in zones of technogenic influence irrespective of the climatic background and delineate vulnerable landscape units. Overall, the study highlights the combined effects of climate and industrial pressure and supports the use of a June-standardized NDVI as an applied tool for ecosystem-condition monitoring in the region.

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



Обзорная статья

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К МОНИТОРИНГУ ПАВОДКОВ

Жанат З. Толеубекова^{ID} к.т.н., ассоциированный профессор, Забида Н. Курмангалиева*^{ID},
Тамерлан Курмангалиев^{ID}

НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени Сакена Сейфуллина», Астана, Казахстан;
jtoleubekova@mail.ru (ЖЗТ), zabida_98@mail.ru (ЗНК), tzer_95@mail.ru (ТК)

*Автор корреспонденции: Забида Н. Курмангалиева, zabida_98@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

весеннее половодье;
снежный покров;
влажность почв;
современные
технологии;
спутниковый
мониторинг; ДЗЗ; ИИ-
модуль; имитационная
модель.

АБСТРАКТ

В условиях усиливающегося влияния климатических изменений и учащения экстремальных гидрометеорологических явлений задача повышения эффективности мониторинга паводков становится одной из ключевых для обеспечения безопасности территорий. Настоящее исследование направлено на проведение комплексного обзора современных методов наблюдения за паводковой активностью и возможности их интеграции в рамках единой комплексной системы. В статье рассматриваются ключевые факторы возникновения весенних половодий, современные технологии для мониторинга паводков, использование спутниковых продуктов дистанционного зондирования Земли, применение гидрометеорологических данных РГП «Казгидромет», данные международных платформ и департамента ЧС, а также возможность разработки ИИ-модуля и имитационной модели в ходе дальнейших исследований.

Важными условиями повышения эффективности мониторинга являются модернизация технической инфраструктуры, развитие цифровых платформ для обмена данными, а также укрепление междисциплинарного взаимодействия между научными и административными структурами.

Проведённый обзор показал, что наличие разнородных наблюдательных данных, включая данные РГП «Казгидромет», материалы паспортов безопасности, спутниковые продукты дистанционного зондирования земли и данные международных платформ, создаёт основу для комплексной интеграции в рамках единой автоматизированной системы мониторинга паводков.

По статье:

Получено: 13.12.2025

Пересмотрено: 03.03.2026

Принято: 20.03.2026

Опубликовано: 01.04.2026

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на территории Казахстана наблюдаются изменения климатических условий, проявляющиеся в росте среднегодовых температур и увеличении пространственно-временной неравномерности осадков. По данным ежегодного бюллетеня РГП «Казгидромет», 2023 год стал самым тёплым за весь период инструментальных наблюдений с 1941 года. Среднегодовая температура воздуха превысила климатическую норму, при этом на станции Каратобе был зафиксирован абсолютный максимум температуры +46,0 °С. Распределение осадков характеризовалось высокой неравномерностью: весенний период отличался дефицитом осадков (53...56 % нормы), тогда как осенью наблюдалось их избыточное количество (до 149 % нормы). Такая изменчивость климатических условий способствует увеличению частоты экстремальных гидрометеорологических явлений, включая засухи и паводки, что повышает требования к системам мониторинга водных ресурсов и прогнозирования паводковой обстановки [1].

Для цитирования:

Толеубекова Ж.,
Курмангалиева З.,
Курмангалиев Т.
Комплексный подход к
мониторингу паводков //
Гидрометеорология и
экология, 121 (1), 2026,
176-191.

Для территории Северного Казахстана ключевое значение в формировании весеннего половодья имеют характеристики снежного покрова и состояние почвенного слоя. Объём талых вод и интенсивность поверхностного стока напрямую зависят от снегозапасов, глубины промерзания почв и условий инфильтрации [2]. Дополнительное влияние оказывают географические условия и антропогенная деятельность, включая изменения в землепользовании и застройке территорий [3...4].

Многофакторная природа формирования паводков и рост связанных с ними рисков создают серьёзную угрозу для безопасности населения, устойчивости инфраструктуры и экономической стабильности страны [5], чем определяют необходимость интеграции разнородных данных для получения достоверной оценки паводковой обстановки.

Целью данной статьи является проведение комплексного обзора существующих методов мониторинга весеннего половодья с использованием современных инструментов дистанционного зондирования Земли, гидрометеорологических наблюдений и методов пространственного анализа применительно к условиям Республики Казахстан. Особое внимание уделено анализу роли снежного покрова, водного эквивалента снега, глубины промерзания почв и их инфильтрационной способности как ключевых факторов формирования весеннего стока и паводковой активности.

В статье рассматриваются возможности применения современных спутниковых и спутниково-модельных продуктов мониторинга снежного покрова, включая специализированный инструмент обработки спутниковой информации MODSNOW-Tool и портал FEWS NET, предоставляющий сведения о глубине снежного покрова, водном эквиваленте снега и их аномалиях. Дополнительно используются официальные гидрометеорологические бюллетени РГП «Казгидромет», архивные материалы наблюдений и применение данных Паспортов безопасности департамента по ЧС.

В работе анализируются перспективы создания ИИ-модуля и имитационной модели развития паводков на основе комплексного использования спутниковых, гидрометеорологических и геопространственных данных, что предполагает формирование единой базы многолетних наблюдений и интеграцию различных пространственных источников информации.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ключевые факторы паводковой активности

В рамках данного исследования под паводками понимаются кратковременные повышения уровня воды в водотоках, возникающие в результате интенсивного снеготаяния, выпадения обильных осадков или их сочетания. Следует отметить, что паводки дождевого генезиса по определяющим факторам формирования существенно отличаются от весенних половодий, которые носят сезонный характер и обусловлены преимущественно процессами таяния снежного покрова. Для северных регионов Республики наибольшую опасность представляют весенние половодья. Объём весеннего паводка в степной зоне Казахстана формируется под влиянием двух ключевых факторов: водного эквивалента твёрдых осадков, накопленных в зимний период, и инфильтрационной способности почвогрунтов в период активного снеготаяния [2].

Согласно исследованиям [6], объём весеннего половодья на реках казахстанского типа в значительной степени определяется впитывающей способностью почв. В Северном Казахстане наименьшая полевая влагоёмкость почвенного слоя 0...100 см составляет в среднем 160...240 мм, что сопоставимо с половиной годовой суммы осадков. Однако инфильтрация талых вод существенно ограничивается зимним промерзанием почв, глубина которого в холодные зимы может достигать 2 м. В период весеннего снеготаяния избыточная вода, не удерживается почвой и снежным покровом, в следствие чего формирует

поверхностный сток и определяет объём весеннего половодья, который зависит от погодных условий таяния снега и впитывания талой воды почвой.

Наряду с инфильтрационными свойствами почв, важнейшим фактором формирования весеннего половодья является объём накопленных за зимний период снежных запасов, количественно характеризуемый параметрами высоты снежного покрова и его водного эквивалента, которые в свою очередь оказывают непосредственное влияние на масштабы паводка: увеличение объёма, накопленного за зимний период снега, приводит к росту объёма талых вод, поступающих в речную сеть в период интенсивного снеготаяния. В горных районах сочетание снеготаяния и выпадения осадков может вызывать быстрый подъём уровня воды в реках, тогда как в равнинных условиях паводки, как правило, развиваются медленнее, но охватывают значительные территории. Измерение характеристик снежного покрова может осуществляться с использованием снегомерных реек для определения высоты снега и весовых снегомеров для оценки плотности снежного слоя, а в труднодоступных районах применяются специализированные транспортные средства [7].

Основными факторами формирования экстремально высокого паводка в сезоне 2023...2024 гг. стали аномально высокая осенняя влажность почв перед установлением снежного покрова (близкая к многолетним максимальным значениям на ряде территорий), повторяющиеся оттепели в течение зимнего периода и мощное арктическое вторжение в конце зимы, сопровождавшееся экстремально низкими температурами воздуха. Указанные условия способствовали формированию глубокого промерзания водонасыщенных почв. В результате глубоко промёрзший почвенный слой практически утрачивает инфильтрационную способность, что приводит к увеличению поверхностного стока и ускоренному поступлению талых вод в речную сеть [8].

Гидрометеорологические данные РГП «Казгидромет»

Практический и технический уровень мониторинга снежного покрова в РГП «Казгидромет» является достаточно высоким и включает комплекс наземных инструментальных наблюдений, регулярных маршрутных снегомерных съёмок и использования современных методов обработки гидрометеорологических данных. Система наблюдений основана на сети метеорологических станций, на которых выполняются регулярные измерения высоты снежного покрова, плотности снега, расчёт водного эквивалента снежного покрова и др.

В таблице 1 приведены средние значения высоты снежного покрова по областям Республики Казахстан за февраль 2024 года, полученные из Метеорологической базы РГП «Казгидромет» [9].

Таблица 1

Наивысшие показатели высоты снежного покрова по Казахстану за февраль 2024 года

	Область	Станция	Средние значения за февраль месяц (см)
Северный Казахстан	Акмолинская область	Коргалжын	116
		Атбасар	92
		Балкашино	71
	Северо-Казахстанская область	Кышкенеколь	102
		Тимирязево	100
		Петропавловск	46

	Область	Станция	Средние значения за февраль месяц (см)
Центральный Казахстан	Карагандинская область	Кзылтау	53
		Актогай	49
		Бектауата	37
	Область Ұлытау	Кзылжар	24
		Жана-Арка	18
Западный Казахстан	Актюбинская область	Родниковка	82
		Кос-Истек	51
		Карабутак	42
	Западно-Казахстанская область	Каратюба	36
		Джамбейты	30
Южный Казахстан	Алматинская область	Большое Алматинское озеро	70
		Шымбулак	66
		Мынжилки	45
	Туркестанская область	Шуылдак	79
		Шымкент	18
Восточный Казахстан	Восточно-Казахстанская область	Заповедник Маркаколь	138
		Зыряновск	117
		Теректы	92
	Область Абай	Кокпекты	59
		Уржар	59

Согласно данных Бюллетени «Снежный покров Казахстана» РГП «Казгидромет», проведённых исследований, в зимнем сезоне 2025...2026 гг. формирование снежного покрова на территории Казахстана до 10 января происходило в условиях выраженного малоснежья. Наблюдаемое в последние годы потепление климата может сопровождаться изменением характеристик Сибирского антициклона в начальный период зимы, что приводит к снижению высоты снежного покрова на территории Республики. Анализ наблюдений за последние девять лет показывает отсутствие зимних сезонов с устойчивым формированием значительных снеготпасов в начале зимнего периода, что позволяет рассматривать малоснежье декабря–января как формирующуюся многолетнюю климатическую особенность. Исключение составляет восточная часть Республики, где многолетняя изменчивость высоты снежного покрова не демонстрирует устойчивой тенденции к учащению малоснежных сезонов (рисунок 1) [8].

В период с 1 по 10 января 2026 года наблюдались незначительные твёрдые осадки, что существенно не повлияло на параметры снежного покрова, включая его высоту и водный эквивалент (рисунок 2). Средняя высота снежного покрова по территории Республики составляла около 15 см, что соответствует условиям малоснежного зимнего режима [8].

По состоянию на 10 января 2026 года снежный покров характеризуется широкой территориальной распространённостью при относительно небольшой высоте снежного слоя. Положительные аномалии водного эквивалента снежного покрова отмечаются в Во-

сточно-Казахстанской области и в предгорных районах Джунгарского Алатау на территории Жетысуской области. При этом высокогорные зоны формирования стока крупнейших рек Центральной Азии (Сырдарья, Чу, Иле, Талас и др.) характеризуются дефицитом снежных запасов вследствие недостаточного количества осадков (рисунок 3) [8].

Картографические материалы в рамках Бюллетени «Снежный покров Казахстана» были сформированы на основе портала данных FEWS NET [8...10].

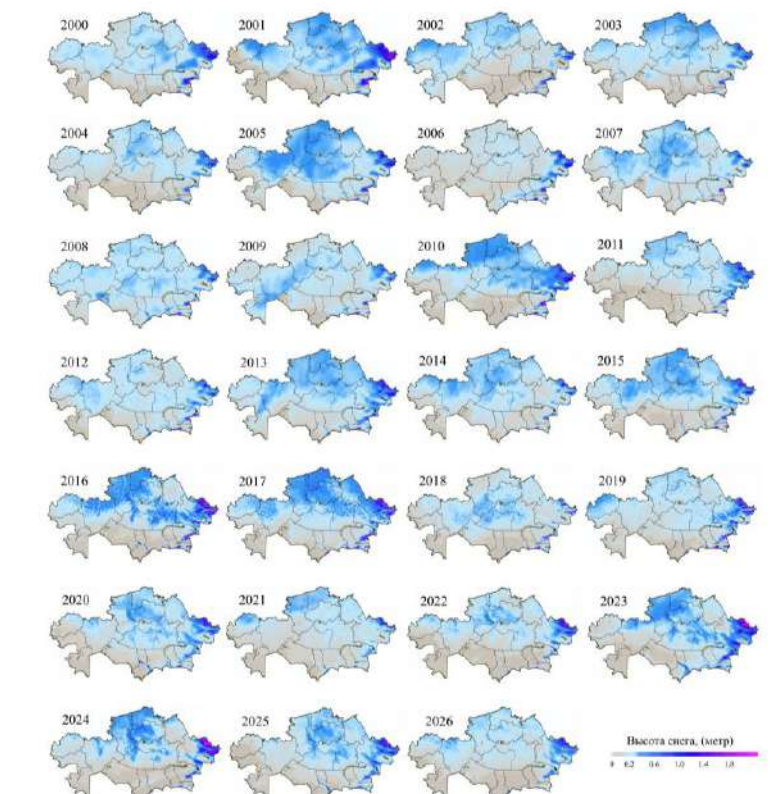


Рисунок 1. Результаты мониторинга состояния снежного покрова (высота снега) Казахстана на 10 января в период 2000...2026 гг. по данным FEWS USGS [8]

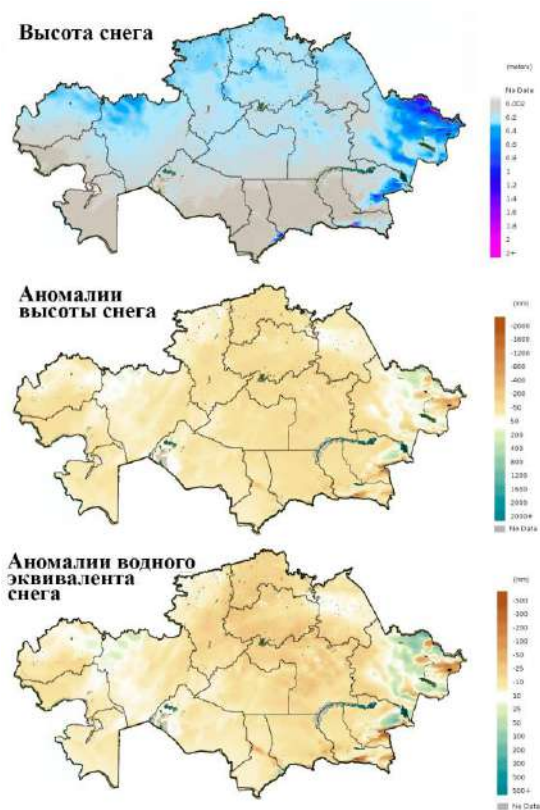


Рисунок 2. Основные характеристики снежного покрова (высота, аномалия высоты, аномалия водного эквивалента) на территории Казахстана на 10 января 2026 г. (карты FEWS NET) [8]

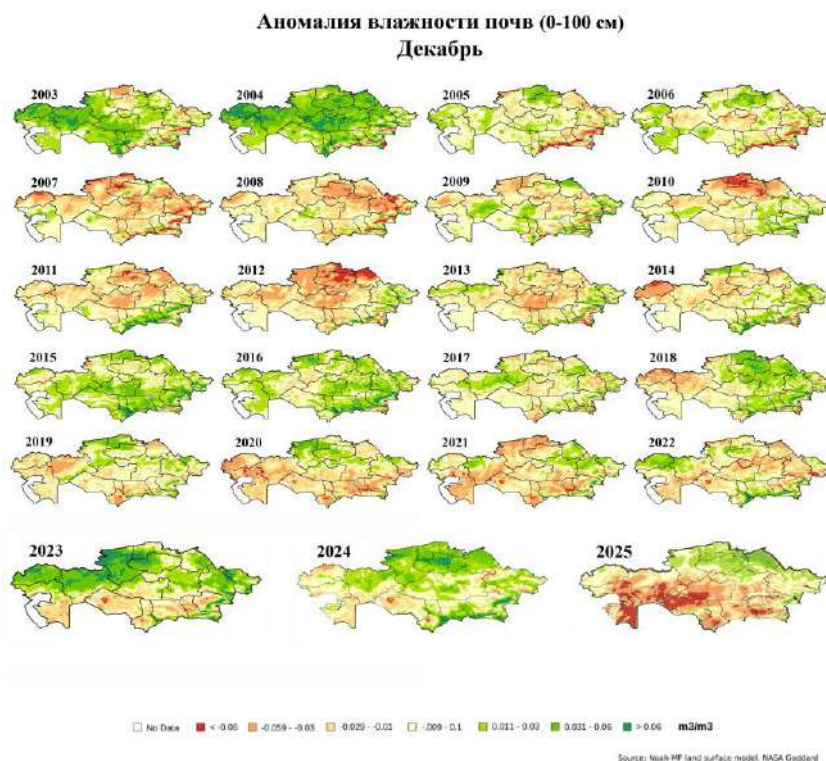


Рисунок 3. Мониторинг аномалий влажности почвенного слоя 0...100 см на первую декаду декабря (период перед установлением устойчивого снежного покрова) для территории Казахстана в период 2003...2025 гг. Результат обработки данных SD FEWS NET [8]

Современные технологии для мониторинга паводков

Современный уровень развития дистанционного зондирования Земли предполагает использование специализированных автоматизированных продуктов мониторинга снежного покрова, поскольку анализ отдельных спутниковых снимков не обеспечивает необходимой полноты и сопоставимости данных. В настоящее время снежный покров описывается широким спектром специализированных продуктов, часть из которых применяется на практике в Казахстане.

Для анализа характеристик снежного покрова применяется, в том числе портал данных FEWS NET (Famine Early Warning Systems Network), который предоставляет доступ к геопространственным данным, производным наборам данных и спутниковым продуктам дистанционного зондирования, включая глубину снежного покрова (Snow Depth), аномалии глубины снежного покрова (Snow Depth Anomaly), водный эквивалент снега (Snow Water Equivalent) и аномалии водного эквивалента снега (Snow Water Equivalent Anomaly). Данный портал поддерживается проектом USGS FEWS NET, который входит в направление раннего предупреждения Центра наблюдения и науки о ресурсах Земли (Earth Resources Observation and Science, EROS) Геологической службы США (USGS) [10].

Данные о снежном покрове имеют важное значение для оценки водных запасов, прогнозирования сезонной водообеспеченности и анализа опасных явлений (например, усиленное снеготаяние). В частности, разработаны операционные инструменты ежедневного мониторинга снежного покрова на основе данных MODIS, например, MODSNOW-Tool [11]. MODSNOW-Tool использует пошаговый алгоритм устранения облачности и формирует безоблачные карты снежного покрова с расчетом статистических характеристик площади снежного покрова. Валидация результатов показала среднюю точность около 94 % на основе анализа 84 дней с минимальной облачностью в бассейне реки Карадарья (Центральная Азия). Инструмент может работать как в автоматическом режиме с ежедневным обновлением данных, так и в режиме обработки архивных временных рядов. В настоящее время MODSNOW-Tool используется национальными гидрометеорологическими службами стран Центральной Азии, включая Казахстан, для задач прогнозирования сезонной водообеспеченности [12].

Для регионов с преимущественно снеговым питанием рек, включая Северный Казахстан, параметры снежного покрова выступают определяющим фактором формирования весеннего половодья и требуют обязательного учета в комплексных системах мониторинга и прогнозирования паводков.

Реализация комплексного мониторинга паводков предполагает не только анализ факторов их формирования, но и картографирование фактических зон затопления на основе спутниковых наблюдений. Спутниковые снимки эпизодов весеннего половодья 2024 г. на примере города Петропавловск представлены на рисунках 4 и 5. Снимки взяты из системы Google Earth и сцен Sentinel-2, Landsat 8.

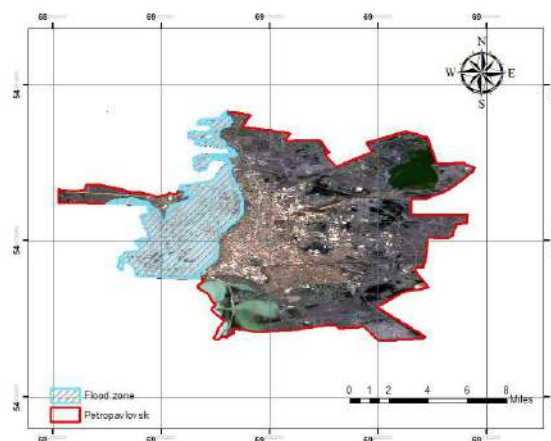


Рисунок 4. Зона затопления в городе Петропавловск



Рисунок 5. До и после весеннего половодья 2024 года в городе Петропавловск

Использование технологий дистанционного зондирования Земли существенно улучшает точность и оперативность определения зон затопления. Спутниковые системы охватывают обширные территории, включая труднодоступные районы, что невозможно обеспечить исключительно наземными методами. Анализ архивных спутниковых снимков предоставляет возможность выявления долгосрочных тенденций паводков и планирования превентивных мероприятий [13].

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), или дроны, всё чаще используются для мониторинга паводков, особенно в удалённых и труднодоступных районах. Оснащённые различными сенсорами, включая тепловизоры и камеры высокого разрешения, дроны способны осуществлять наблюдение как днём, так и ночью. Основные их преимущества — это быстрота реагирования, мобильность, а также возможность проведения детального анализа разрушений и оценки состояния инфраструктурных объектов. Они эффективно применяются для обследования территорий, пострадавших от затоплений, определения границ паводков, расчёта ущерба, а также мониторинга состояния защитных сооружений, таких как дамбы и насыпи [14].

Использование искусственного интеллекта (ИИ) позволяет анализировать большие объемы данных и делать более точные прогнозы. Преимуществами является возможность прогнозирования паводков, включая различные сценарии развития ситуации, интеграция данных с различных источников [15].

Исторический анализ паводков в Казахстане

Казахстан часто сталкивается с разрушительными наводнениями и селевыми потоками, которые оказывают значительное влияние на социальные проблемы и на экономику страны. Эти природные явления становятся причиной крупных разрушений, человеческих жертв и значительных материальных ущербов [16].

В 2010 году в Алматинской области прорыв дамбы Кызылагашского водохранилища стал крупнейшей техногенной катастрофой с жертвами и огромными разрушениями. В 2012 году интенсивные дожди и таяние снега вызвали наводнения в Южно-Казахстанской области, затопившие 25 населённых пунктов и требующие значительных затрат на ликвидацию последствий. В 2014 году в Карагандинской области произошло масштабное наводнение: из-за прорыва плотины Кокпектинского водохранилища вода затопила около сотни домов, в связи с чем, погибло пять человек, многие пострадавшие были госпитализированы с переохлаждением. В 2017 году таяние снега и разрушение дамбы в нескольких областях вызвали масштабные затопления. В 2018 году Восточный Казахстан пережил сильные наводнения с разрушениями в Усть-Каменогорске и окрестных сёлах. В 2023 году паводковые воды затопили несколько районов Казахстана, включая Актюбинскую, Костанайскую и Туркестанскую области, вызвав эвакуацию жителей и ущерб [17].

Паводок 2024 года в Казахстане стал самым масштабным за последние восемь десятилетий, охватив значительную часть территории страны и продолжившись почти два месяца (рисунок 6). Сведения об основных событиях произошедших в данных областях, представлены в таблице 2.

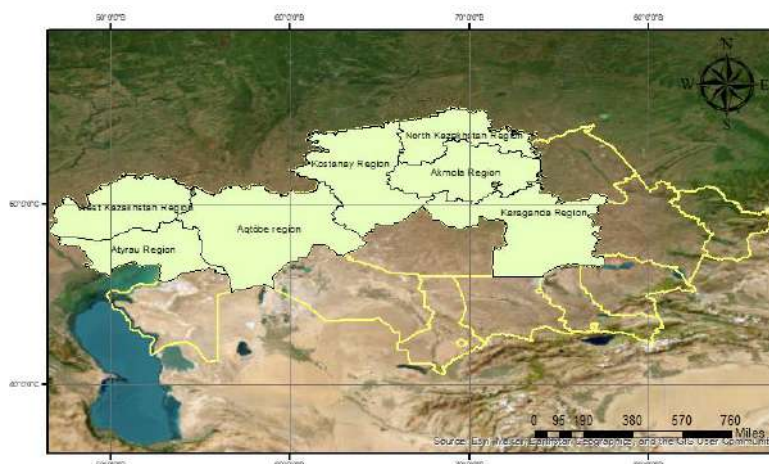


Рисунок 6. Области Республики Казахстан подвергшиеся затоплениям в 2024 году.

Таблица 2

Сведения об основных событиях произошедших в регионах в 2024 году

Регион	Затоплено домов	Эвакуировано людей	Основные события
Актюбинская область	1 400	11 600	Прорыв плотин, разрушения, сель
Атырауская область	2 800	36 000	Разлив реки Жем в Кульсары
Костанайская область		9 000	Повышение уровня воды в реке Тобол
Западно-Казахстанская область	1 500	14 000	Подъема уровня воды, размыв дорог
Северо-Казахстанская область	3 800	14 000	Талые воды, угроза в Петропавловске
Карагандинская область	60		Подтопления в Шетском районе
Акмолинская область	837	2 800	ЧС природного характера были объявлены в городе Кокшетау и пяти районах

Власти Республики Казахстан приняли комплексные меры по ликвидации последствий паводков и поддержке пострадавших граждан. Пострадавшим выплатили единовременные пособия, компенсации за утраченное имущество, ремонт жилья и павший скот. Семьи, лишившиеся жилья, получили новые квартиры или дома, в ряде регионов началось массовое строительство индивидуального жилья. Параллельно проводилась масштабная оценка ущерба и техническое обследование пострадавших домов. Были задействованы мобильные группы, которые обходили дома, консультировали жителей и помогали с оформлением выплат. Поступала гуманитарная помощь – продукты, вода, одежда и другие необходимые вещи. Работали консультационные центры, куда жители могли обращаться по всем вопросам, связанным с восстановлением. Инфраструктура активно восстанавливалась: откачивали воду, расчищали завалы, ремонтировали дороги, восстанавливали насосные станции и возводили временные дамбы. Детей из пострадавших семей отправили в оздоровительные лагеря, а эвакуированные постепенно возвращаются в свои дома [18].

Данные Паспортов безопасности департамента по ЧС

Для комплексного мониторинга паводков важен не только инструментальный дистанционного зондирования, но и достоверная описание самой территории. Министерство по чрезвычайным ситуациям сформировало и регулярно обновляет уникальный банк данных о характерных для Казахстана чрезвычайных ситуациях, основанный на паспортах безопасности всех административно-территориальных единиц страны. Подготовка таких паспортов для областей, городов республиканского значения, столицы и районов является частью мероприятий гражданской защиты, направленных на предупреждение ЧС.

Паспорта безопасности территорий Республики Казахстан содержат структурированные данные о рисках чрезвычайных ситуаций природного характера, гидрологических опасных явлениях, паводкоопасных территориях и населённых пунктах, зонах возможного затопления, участках транспортной инфраструктуры, подверженных подтоплению, и пунктах эвакуации населения, что позволяет использовать их в качестве одного из немаловажных источников данных при интеграции в цифровые системы мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки [19].

Паспорта безопасности используются как инструмент для оценки и прогнозирования природных и техногенных рисков, определения возможных последствий, разработки мер по снижению опасности и смягчению ущерба, а также для установления потенциальных зон распространения чрезвычайных ситуаций.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рекомендации к управлению паводковой активностью

Для эффективной борьбы с паводками необходимо комплексное внедрение мер, включая строительство и эксплуатацию водозаборных и противопаводковых сооружений, создание водохранилищ для управления избыточными водами, улучшение систем дренажа и водоотведения в населенных пунктах, а также регулярное обслуживание водоотводных систем [20...21], также важно разработать планы эвакуации и аварийных мероприятий, провести обучение населения мерам предотвращения наводнений.

Использование талой воды в сельскохозяйственных целях может быть связано с концепцией накопительных систем для паводков, что является важным элементом эффективного управления водными ресурсами в регионах, подверженных паводковым рискам. В условиях, когда снежный покров сохраняется до шести месяцев в году, накопительные резервуары могут служить не только для регулирования водных потоков в период паводков, но и для сбора и хранения талой воды [22], [7]. Данные резервуары позволяют задерживать избыточные паводковые воды в период весеннего таяния снега и высоких дождевых осадков, минимизируя угрозу затоплений, а также обеспечивая возможность использования накопленной воды для орошения в периоды дефицита осадков.

Рекомендации к разработке ИИ-модуля и имитационной модели

Наличие значительного объёма разнородных наблюдательных данных, включая данные РГП «Казгидромет», материалы паспортов безопасности территорий Республики Казахстан, спутниковые продукты дистанционного зондирования Земли и данные международных информационных платформ, создаёт предпосылки для создания единой автоматизированной системы на основе комплексной интеграции всех этих данных.

В рамках дальнейших исследований рассматривается возможность разработки ИИ-модуля и имитационной модели развития паводковых процессов. Планируемая разработка ИИ-модуля сегментации затопленных территорий будет ориентироваться на анализ многовременных спутниковых изображений, полученных до и после паводковых событий. В составе ИИ-модуля рассматривается возможность реализации нейросетевой архитектуры сегментационного типа, разработанной с учётом особенностей задачи выявления зон затопления по данным дистанционного зондирования. Модель будет выполнять пиксельную классификацию территории с формированием бинарных масок затопления на основе анализа пространственных и временных изменений спектральных характеристик подстилающей поверхности.

Входными данными модели будут являться многоканальные спутниковые изображения Sentinel-2, включающие каналы видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, а также данные аэросъёмки, полученные с беспилотных летательных аппаратов, используемые для повышения пространственного разрешения и уточнения границ зон затопления. На этапе предварительной обработки выполняется радиометрическая нормализация изображений, пространственное совмещение сцен, а также формирование дополнительного признакового пространства на основе расчёта водных спектральных индексов, в частности нормализованного дифференциального водного индекса NDWI.

Формирование обучающей выборки будет осуществляться с использованием полуавтоматической генерации масок затопления на основе спектрального анализа водных поверхностей с последующей экспертной корректировкой результатов в геоинформационной среде.

Алгоритм функционирования ИИ-модуля будет включать последовательные этапы загрузки и предварительной обработки спутниковых данных, формирования многомерного признакового пространства, обучения нейросетевой модели сегментации, автоматической генерации масок затопления, постобработки результатов сегментации с применением морфологических фильтров и автоматической подготовки данных для использования в геоинформационных системах и средах пространственного моделирования.

Отличительной особенностью данного подхода будет являться возможность прямого использования результатов нейросетевой обработки в системах трёхмерного геопространственного моделирования. ИИ-модуль будет интегрирован в среду трёхмерного моделирования на базе Unreal Engine 5, что обеспечивает автоматическое формирование цифровых моделей затопления на основе результатов сегментации. Полученные маски затопления планируется использовать для генерации динамических водных поверхностей и последующего имитационного моделирования распространения паводковых вод с использованием специализированных гидродинамических модулей симуляции.

Система будет обеспечивать возможность динамического изменения параметров моделирования, включая изменение уровня воды, характеристик рельефа, параметров поверхностного стока, параметров городской инфраструктуры и сценариев развития паводковой ситуации. Предполагается, что высокая степень модульности программной архитектуры обеспечит гибкость системы и возможность её адаптации под различные территории, гидрологические условия и сценарии развития чрезвычайных ситуаций.

Оценку точности работы метода планируется выполнять с использованием стандартных метрик качества сегментации изображений, включая коэффициент пересечения объединения (Intersection over Union, IoU), F1-меру, а также сравнительный анализ площадей затопления с эталонными картами паводков и архивными данными наблюдений.

Научная новизна работы заключается в реализации технологии прямой интеграции результатов нейросетевого анализа в среду трёхмерного пространственного моделирования с возможностью последующего имитационного моделирования распространения паводковых вод в цифровой модели территории.

На рисунках 7 и 8 изображены предварительные модели 3D симуляции в г.Петропавловск во время весеннего половодья и после.



Рисунок 7. Начальная модель 3D симуляции в г.Петропавловск во время затопления



Рисунок 8. Начальная модель 3D симуляции в г.Петропавловск после затопления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый обзор показал, что ключевую роль в формировании весеннего половодья играют параметры снежного покрова, состояние почвенного слоя и гидрометеорологические условия, что определяет необходимость их комплексного учёта при мониторинге паводковой обстановки.

Рассмотренные современные технологии мониторинга, включая спутниковые продукты дистанционного зондирования Земли, данные международных информационных платформ, гидрометеорологические наблюдения РГП «Казгидромет», а также сведения паспортов безопасности территорий, позволяют формировать базу разнородных наблюдательных данных. Проведённый обзор подтвердил возможность их комплексной интеграции в рамках единой автоматизированной системы мониторинга паводков.

Практическая значимость исследования заключается в обосновании подходов к формированию единой цифровой среды анализа паводковых процессов, которая может использоваться при мониторинге, оценке рисков и прогнозировании паводковой обстановки.

В ходе дальнейших исследований рассматривается возможность разработки ИИ-модуля прогнозирования паводковой обстановки и имитационной модели развития паводков на основе интеграции спутниковых, гидрометеорологических и геопространственных данных, что позволит повысить точность прогнозирования и оперативность принятия решений в условиях изменяющегося климата.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация - ЖЗТ, ЗНК; управление данными – ЗНК, ТК; формальный анализ - ЗНК; методология - ЖЗТ, ЗНК, ТК; программное обеспечение – ЗНК, ТК; отслеживание - ЗНК; Визуализация – ЗНК, ТК; написание исходного проекта – ЗНК, ТК; написание и редактирование обзора – ЖЗТ, ЗНК, ТК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РГП «Казгидромет». Обзор об особенностях климата на территории Казахстана. – [Электрон. ресурс]. – <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/obzor-ob-osobennostyah-klimata-na-territorii-kazahstana>, дата обращения: 16.11.2025.
2. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Тиллякарим Т. А., Серикбай Н. Т. О взаимосвязи между количеством снега и объёмом весеннего половодья в Северном Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2023. –Т. 20. № 1. –С. 323–328. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-323-328>.
3. 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. <https://doi.org/10.3390/urbansci9010020>
4. Alborzi A., Zhao Y., Nazemi A., Mirchi A., Mallakpour I., Moftakhari H., Ashraf S., Izad R., Aghakouchak A. (2022). The tale of three floods: From extreme events and cascades of highs to anthropogenic floods, Weather and Climate Extremes. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100495>

5. Aitzhanova M., Zhaparova S. (2023). Environmental Risk Assessment of Spring Floods in the Akmola Region of Kazakhstan, *International Journal of Sustainable Development and Planning*. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181033>
6. 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>
7. Teleubay Z., Yermekov F., Tokbergenov I., Toleubekova Z., Assylkhanova A., Balgabayev N., Kovács, Z. (2023). Identification of Potential Farm Pond Sites for Spring Surface Runoff Harvesting Using an Integrated Analytical Hierarchy Process in a GIS Environment in Northern Kazakhstan, *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15122258>
8. РГП «Казгидромет». Бюллетень «Снежный покров Казахстана» 2026.
9. Метеорологическая база РГП «Казгидромет». – [Электрон. ресурс]. – http://ecodata.kz:3838/dm_climat_ru/, дата обращения: 25.11.2025.
10. Famine Early Warning Systems Network. – [Электрон. ресурс]. – <https://fews.net/>, дата обращения: 09.02.2026.
11. Gafurov, A., Lüdtke, S., Unger-Shayesteh, K. et al. (2016). MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data, *Environ Earth Sci* 75, 1078. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5869-x>
12. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 19, EGU2017-15884, 2017. EGU General Assembly 2017. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-15884.pdf>
13. Zou S., Abuduwaii J., Ding J., Duan W., Maeyer P., Voorde T. (2020). Description and Attribution Analysis of the 2017 Spring Anomalous High Temperature Causing Floods in Kazakhstan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. P. 1353-1368. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-070>
14. Munawar H., Ullah F., Qayyum S., Khan S., Mojtahedi M. (2021). UAVs in Disaster Management: Application of Integrated Aerial Imagery and Convolutional Neural Network for Flood Detection. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU13147547>
15. Saravi S., Kalawsky R., Joannou D., Casado M., Fu G., Meng F. (2019). Use of Artificial Intelligence to Improve Resilience and Preparedness Against Adverse Flood Events. *Water*. <https://doi.org/10.3390/W11050973>
16. Spivak L., Arkhipkin O., Pankratov V., Vitkovskaya I., Sagatdinova G. (2004). Space monitoring of floods in Kazakhstan. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. P. 4582-4584. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2004.06.018>
17. Sputnik Kazakhstan [Электрон. ресурс]. – <https://ru.sputnik.kz/20240409/pavodki-v-kazahstane-samyekrupnye-navodneniya-v-istorii-strany-43561178.html> (дата обращения: 19.11.2025).
18. Kazinform [Электрон. ресурс]. – <https://www.inform.kz/ru/hroniki-navodneniya-kak-regioni-kazahstana-perezhlili-nebivaliy-pavodok-949756> (дата обращения: 20.11.2025).
19. Департамент по чрезвычайным ситуациям Северо-Казахстанской области. – [Электрон. ресурс]. – <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer-sko?lang=ru>, дата обращения: 22.11.2025
20. Ward P., Ruiter M., Mård J., Schröter K., Loon A., Veldkamp T., Uexkull N., Wanders N., Aghakouchak A., Arnbjerg-Nielsen K., Capewell L., Llasat M., Day R., Dewals B., Baldassarre G., Huning L., Kreibich H., Mazzoleni M., Savelli E., Teutschbein C., Berg H., Heijden A., Vincken J., Waterloo M., Wens, M. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies, *Water Security*. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070>
21. Li F., Yan X., Duan H. (2019). Sustainable Design of Urban Stormwater Drainage Systems by Implementing Detention Tank and LID Measures for Flooding Risk Control and Water Quality Management, *Water Resources Management*. P. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02300-0>
22. Nordmark A. (2002). Overview on survey of water installations underground: underground water-conveyance and storage facilities, *Tunnelling and Underground Space Technology*. P. 163-178. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00012-3)

REFERENCES

1. Kazhydromet RSE. Overview of climate features across Kazakhstan. Available at: <https://www.kazhydromet.kz/ru/klimat/obzor-ob-osobennostyah-klimata-na-territorii-kazahstana> (Accessed: 16 November 2025).
2. Terekhov, A.G., Abaev, N.N., Tillyakarim, T.A., Serikbai, N.T. (2023). O vzaimosvyazi mezhdru kolichestvom snega i obyomom vesennego polovodya v Severnom Kazakhstane [On the relationship between snow amount and spring flood volume in Northern Kazakhstan]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 20(1), pp. 323–328. [in Russian]
3. 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*. <https://doi.org/10.3390/urbansci9010020>
4. Alborzi, A., Zhao, Y., Nazemi, A., Mirchi, A., Mallakpour, I., Moftakhari, H., Ashraf, S., Izad, R., Aghakouchak, A. (2022). The tale of three floods: From extreme events and cascades of highs to anthropogenic floods. *Weather and Climate Extremes*. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100495>
5. Aitzhanova, M., Zhaparova, S. (2023). Environmental Risk Assessment of Spring Floods in the Akmola Region of Kazakhstan. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181033>
6. Terekhov, A.G., Sairov, S.B., Abaev, N.N., Sagatdinova, G.N., Amirgaliev, E.N. (2024). O vozmozhnykh prichinakh iskluchitelno bolshikh vesennikh pavodkov 2024 goda v Kazakhstane [On possible causes of extremely large spring floods

- in Kazakhstan in 2024]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 21(3), pp. 331–338. [in Russian]
7. Teleubay, Z., Yermekov, F., Tokbergenov, I., Toleubekova, Z., Assylkhanova, A., Balgabayev, N., Kovács, Z. (2023). Identification of Potential Farm Pond Sites for Spring Surface Runoff Harvesting Using an Integrated Analytical Hierarchy Process in a GIS Environment in Northern Kazakhstan. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15122258>
 8. Kazhydromet RSE. Snow Cover of Kazakhstan Bulletin (2026).
 9. Kazhydromet Meteorological Database. Available at: http://ecodata.kz:3838/dm_climat_ru/ (Accessed: 25 November 2025).
 10. Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET). Available at: <https://fewsn.net/> (Accessed: 9 December 2025).
 11. Gafurov, A., Lüdtke, S., Unger-Shayesteh, K., et al. (2016). MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1078. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5869-x>
 12. Gafurov, A., et al. (2017). MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017-15884.
 13. Zou, S., Abuduwaili, J., Ding, J., Duan, W., Maeyer, P., Voorde, T. (2020). Description and Attribution Analysis of the 2017 Spring Anomalous High Temperature Causing Floods in Kazakhstan. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-070>
 14. Munawar, H., Ullah, F., Qayyum, S., Khan, S., Mojtahedi, M. (2021). UAVs in Disaster Management: Application of Integrated Aerial Imagery and Convolutional Neural Network for Flood Detection. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU13147547>
 15. Saravi, S., Kalawsky, R., Joannou, D., Casado, M., Fu, G., Meng, F. (2019). Use of Artificial Intelligence to Improve Resilience and Preparedness Against Adverse Flood Events. *Water*. <https://doi.org/10.3390/W11050973>
 16. Spivak, L., Arkhipkin, O., Pankratov, V., Vitkovskaya, I., Sagatdinova, G. (2007). Space monitoring of floods in Kazakhstan. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
 17. Sputnik Kazakhstan. Major floods in Kazakhstan history. Available at: <https://ru.sputnik.kz/20240409/pavodki-v-kazahstane-samy-e-krupnye-navodneniya-v-istorii-strany-43561178.html> (Accessed: 19 November 2025).
 18. Kazinform. Chronicle of floods in Kazakhstan regions. Available at: <https://www.inform.kz/ru/hroniki-navodneniya-kak-regioni-kazahstana-perezhlili-nebivaliy-pavodok-949756> (Accessed: 20 November 2025).
 19. Department of Emergency Situations of North Kazakhstan Region. Available at: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer-sko?lang=ru> (Accessed: 22 November 2025).
 20. Ward, P., Ruiter, M., Mård, J., et al. (2020). The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies. *Water Security*. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070>
 21. Li, F., Yan, X., Duan, H. (2019). Sustainable Design of Urban Stormwater Drainage Systems. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02300-0>
 22. Nordmark, A. (2002). Overview on survey of water installations underground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00012-3)

СУ ТАСҚЫНЫНА МОНИТОРИНГ ЖАСАУДЫҢ КЕШЕНДІ ТӘСІЛІ

Жанат З. Толеубекова, т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Забида Н. Курманғалиева*, Тамерлан Курманғалиев

«С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан; jtoleubekova@mail.ru (ЖЗТ), zabida_98@mail.ru (ЗНК), tzer_95@mail.ru (ТК)

*Автор корреспондент: Забида Н. Курманғалиева, zabida_98@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

көктемгі су тасқыны; қар жамылғысы; топырақ ылғалдылығы; заманауи технологиялар; спутниктік мониторинг; ЖҚЗ деректері; жасанды интеллект модулі; имитациялық модель.

АБСТРАКТ

Климаттық өзгерістердің күшеюі және экстремалды гидрометеорологиялық құбылыстардың жиілеуі жағдайында су тасқынын мониторингтеу тиімділігін арттыру аумақтардың қауіпсіздігін қамтамасыз етудің негізгі міндеттерінің біріне айналуға. Осы зерттеу су тасқыны белсенділігін бақылаудың заманауи әдістеріне кешенді шолу жасауға және оларды бірыңғай интеграцияланған жүйе шеңберінде біріктіру мүмкіндіктерін бағалауға бағытталған. Мақалада көктемгі су тасқындарының қалыптасу факторлары, су тасқынын мониторингтеудің заманауи технологиялары, Жерді қашықтан зондтау спутниктік өнімдерін қолдану, «Қазгидромет» РМҚ гидрометеорологиялық деректері, халықаралық деректер платформалары мен төтенше жағдайлар қызметтерінің деректері,

Мақала жайында:

Алынды: 13.12.2025

Қайта қаралды: 03.03.2026
 Қабылданды: 20.03.2026
 Жарияланды: 01.04.2026

сондай-ақ болашақ зерттеулер аясында жасанды интеллект модулі мен имитациялық модельді әзірлеу мүмкіндіктері қарастырылған. Мониторинг тиімділігін арттырудың маңызды шарттарына техникалық инфрақұрылымды жаңғырту, деректер алмасуға арналған цифрлық платформаларды дамыту және ғылыми және әкімшілік құрылымдар арасындағы пәнаралық өзара іс-қимылды күшейту жатады. Жүргізілген шолу «Қазгидромет» РМК деректерін, аумақтардың қауіпсіздік паспорттары материалдарын, ЖҚЗ спутниктік өнімдерін және халықаралық ақпараттық платформалардың деректерін қамтитын әртүрлі бақылау деректерінің болуы су тасқынын мониторингтеудің бірыңғай автоматтандырылған жүйесі шеңберінде кешенді интеграция жүргізуге мүмкіндік беретінін көрсетті.

A COMPREHENSIVE APPROACH TO FLOOD MONITORING

Zhanat Toleubekova candidate of technical sciences, Associate Professor, Zabida Kurmangalieva*, Tamerlan Kurmangaliyev

Saken Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan; jtoleubekova@mail.ru, zabida_98@mail.ru, tzer_95@mail.ru

*Corresponding author: Zabida Kurmangalieva, zabida_98@mail.ru

KEY WORDS

spring flood; snow cover; soil moisture; advanced technologies; satellite monitoring; remote sensing data; AI module; simulation model

About article:

Received: 13.12.2025
 Revised: 03.03.2026
 Accepted: 20.03.2026
 Published: 01.04.2026

ABSTRACT

Under the growing influence of climate change and the increasing frequency of extreme hydrometeorological events, improving the efficiency of flood monitoring has become a key task for ensuring territorial safety. This study is aimed at providing a comprehensive review of modern flood monitoring approaches and assessing their integration potential within a unified monitoring system. The paper examines the key factors driving spring flood formation, modern flood monitoring technologies, the use of satellite remote sensing products, hydrometeorological data from RSE "Kazhydromet", data from international information platforms and emergency management agencies, as well as the potential development of an AI-based module and a simulation model in future research.

Improving monitoring efficiency requires modernization of technical infrastructure, development of digital data exchange platforms, and strengthening interdisciplinary cooperation between scientific and administrative institutions.

The review demonstrates that the availability of diverse observational datasets, including Kazhydromet data, territorial safety passport materials, remote sensing satellite products, and international platform data, provides a foundation for comprehensive integration within a unified automated flood monitoring system.

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