

ВЕСТНИК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ М.К. АММОСОВА.
VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.
СЕРИЯ “НАУКИ О ЗЕМЛЕ. EARTH SCIENCES”

Сетевое научное периодическое издание
Издается с 2016 года
Издание выходит 4 раза в год

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

№ 2 (42) 2026

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Главный редактор
А.Н. Николаев, д. б. н.

Заместитель главного редактора
Е.Э. Соловьев, к. г. – м. н.
Выпускающий редактор
С.Н. Левина, к.г.н.

Члены редакционной коллегии:

Верчеба А. А., доктор геолого-минералогических наук; Витченко А. Н., доктор географических наук; Данилов Ю. Г. кандидат географических наук; Лопух П. С., доктор географических наук; Мартынов В. Л., доктор географических наук; Михно В. Б., доктор географических наук; Нестеров Ю. А., кандидат географических наук; Никифорова З. С., доктор геолого-минералогических наук; Носонов А. М., доктор географических наук; Округин А. В., доктор геолого-минералогических наук; Полуфунтикова Л. И., кандидат геолого-минералогических наук; Присяжный М. Ю., доктор географических наук; Саввинова А. Н., кандидат географических наук; Семенов Ю. М., доктор географических наук; Скоринцева И. Б., доктор географических наук; Тесленок С. А., кандидат географических наук; Толстов А. В., доктор геолого-минералогических наук; Фридовский В. Ю., доктор геолого-минералогических наук; Часовский В. И., доктор географических наук.

Адрес учредителя и издателя: 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58

Адрес редакции: 677013, г. Якутск, ул. Ойунского ул., 27
Тел./факс: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>
Северо-Восточный федеральный университет
<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

VESTNIK OF NORTH-EASTERN FEDERAL UNIVERSITY.
«EARTH SCIENCES»

Network scientific periodical

Published since 2016

The frequency of publication is 4 times a year

The founder and publisher is Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“The M. K. Ammosov North-Eastern Federal University”

No. 2 (42) 2026

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

Editor-in-Chief

A. N. Nikovaev, Doctor of Biological Sciences

Deputy Editor-in-Chief

E. E. Solovyov, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

S.N. Levina, Candidate of Geographical Sciences

Members of the Editorial Board of the Series:

A. A. Vercheba, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *Vitchenko A.N.*, Doctor of Geographical Sciences; *Y. G. Danilov*, Candidate of Geographical Sciences; *Lopuh P. C.*, Doctor of Geographical Sciences; *V. L. Martynov*, Doctor of Geographical Sciences; *V. B. Mikhno*, Doctor of Geographical Sciences; *Y. A. Nesterov*, Candidate of Geographical Sciences; *Z. S. Nikiforova*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *A. M. Nosonov*, Doctor of Geographical Sciences; *A. V. Okrugin*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *L. I. Polufuntikova*, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; *M. Y. Prisyazny*, Doctor of Geographical Sciences; *A. N. Savvinova*, Candidate of Geographical Sciences; *Y. M. Semenov*, Doctor of Geographical Sciences; *I.B. Skorintseva*, Doctor of Geographical Sciences; *S. A. Teslenok*, Candidate of Geographical Sciences; *A. V. Tolstov*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *V. Y. Fridovsky*, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences; *V. I. Chasovsky*, Doctor of Geographical Sciences.

Founder and publisher address: The North-Eastern Federal University, Belinsky str, 58, Yakutsk, 677000.

Editors Office address: The North-Eastern Federal University, Oyunsky st, 27, Yakutsk, 677013

Telephone/Fax: +7 (4112) 36-15-18. e-mail: vestnik_geo@mail.ru. <https://vfuzeml.elpub.ru/jour/index>

<http://s-vfu.ru/universitet/rukovodstvo-i-struktura/strukturnye-podrazdeleniya/unir/vestnik-svfu/>

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

- Ощепкова М.Г., Угапьева С.С., Павлушин А.Д., Олейников О.Б., Горяинов С.В., Громилов С.А.* Минеральные фазы на поверхности кристаллов алмаза VII разновидности из карнийских (верхнетриасовых) отложений Булкурской антиклинали 5
- Словогородский С.А., Богуславский М.А.* Анализ обогащения глин Юго-Западного участка Лукошкинского месторождения керамических глин Липецкой области методом дезинтеграции 17
- Соловьев Е.Э., Саввинов И.И., Федоров А.А., Федоров М.А.* Применение метода переходных процессов при поисках подземных вод в Центральной Якутии 33

ГЕОГРАФИЯ

- Khadzhaev R.N., Fazilova D. Sh.* A spatial assessment of environmental vulnerability in the Akhangaran river basin, Uzbekistan 44
- Ушницкая Л.А., Егоров А.В., Субетто Д.А., Пестрякова Л.А.* Оценка качества воды магистрального водовода Лена-Туора-Кюель (Лена-Амгинское междуречье)..... 68

CONTENT

GEOLOGY

- Oshchepkova M.G., Ugapeva S.S., Pavlushin A.D., Oleinikov O.B., Goryainov S.V., Gromilov S.A.*
 Mineral phases on the surface of Variety VII diamond crystals from Carnian (Upper Triassic) deposits
 of the Bulkur anticline 5
- Slovogorodskiy S.A., Boguslavskiy M.A.* Determining mineralogical and chemical differences
 in flanks of the Lukoshkinskoye ceramic clay deposit of the Lipetsk region by disintegration..... 17
- Solovyov E.E., Savvinov I.I., Fedorov A.A., Fedorov A.M.* Application of the method
 of transient processes in the prospecting of groundwater in Central Yakutia 33

GEOGRAPHY

- Хаджаев Р.Н., Фазилова Д.Ш.* Пространственная оценка экологической уязвимости
 бассейна реки Ахангаран (Узбекистан) 44
- Ushnitskaya L.A., Egorov A.V., Subetto D.A., Pestryakova L.A.* Assessment of the water quality
 of the Lena–Tuora-Kuel main water pipeline (Lena-Amga interfluve)..... 68

ГЕОЛОГИЯ

УДК 549.211 (571.56)

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-5-16>

Оригинальная научная статья

МИНЕРАЛЬНЫЕ ФАЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА VII РАЗНОВИДНОСТИ ИЗ КАРНИЙСКИХ (ВЕРХНЕТРИАСОВЫХ) ОТЛОЖЕНИЙ БУЛКУРСКОЙ АНТИКЛИНАЛИ

М.Г. Ощепкова^{1*}, С.С. Угайева¹, А.Д. Павлушин¹, О.Б. Олейников¹, С.В. Горяйнов², С.А. Громилов³

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

²Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Институт неорганической химии им. А. В. Николаева СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

*oshchepkovamg28@mail.ru

Аннотация. Карнийские отложения в пределах Булкурской антиклинали характеризуются высокой и «ураганной» алмазоносностью. Среди кристаллов типичных для кимберлитовых трубок присутствуют алмазы V-VII разновидности невыясненного генезиса. Согласно литературным данным отличительной особенностью данной разновидности алмазов является легкий изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ от -17 до -25 ‰ и высокое содержание примеси азота 1200-2000 ppm. Коренной источник этих алмазов до сих пор не обнаружен. В целях установления генетической связи минеральных фаз на поверхности алмазов и вмещающих отложений в настоящей работе представлены результаты комплексного минералогического исследования алмазов VII разновидности (по классификации Ю.Л. Орлова) из карнийских (верхнетриасовых) отложений Булкурской антиклинали. Методами сканирующей электронной микроскопии, ЭДС анализа химического состава и Рамановской спектроскопии идентифицированы хлорит (предположительно шамозит), иллит, нонтронит, выполняющие трещины и образующие корочки на поверхности поликристаллических агрегатов алмаза. Установлено, что шамозит образует вставки и чешуйчатые агрегаты в трещинах, в то время как иллит и нонтронит формируют тонкие (менее 20 мкм) мелкочешуйчатые корочки. Данная ассоциация минералов характерна для процессов низкотемпературного гидротермального изменения и диагенеза вулканогенно-осадочных толщ в морской среде. По данным КР спектров на одном фрагменте расколотого поликристалла алмаза идентифицирован апатит. Формирование апатита связано с гипергенными изменениями первичных вмещающих пород перед их преобразованием гидротермальными процессами в условиях морского мелководья.

Полученные результаты дополняют представления о посткристаллизационных преобразованиях алмазов из россыпных месторождений севера Сибирской платформы и могут быть использованы для реконструкции условий формирования карнийских алмазоносных отложений.

Ключевые слова: алмаз VII разновидности, Сибирская платформа, Булкурская антиклиналь, верхний триас, карнийские отложения, Рамановская спектроскопия, апатит, иллит, нонтронит, шамозит.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-27-20056).

Для цитирования: Ощепкова М.Г., Угайева С.С., Павлушин А.Д., Олейников О.Б., Горяйнов С.В., Громилов С.А. Минеральные фазы на поверхности кристаллов алмаза VII разновидности из карнийских (верхнетриасовых) отложений Булкурской антиклинали. *Вестник СВФУ*. 2026;(2): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-16

MINERAL PHASES ON THE SURFACE OF VARIETY VII DIAMOND CRYSTALS FROM CARNIAN (UPPER TRIASSIC) DEPOSITS OF THE BULKUR ANTICLINE

Maria G. Oshchepkova^{1}, Sargylana S. Ugapeva¹, Anton D. Pavlushin¹, Oleg B. Oleinikov¹,
Sergey V. Goryainov², Sergey A. Gromilov³*

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS,
Yakutsk, Russian Federation

²V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

³A. V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

*oshchepkovamg28@mail.ru

Abstract. Carnian deposits within the Bulkur anticline are characterized as “hurricane-like” diamondiferous. Among crystals typical for kimberlite pipes there are diamonds of V–VII varieties of unknown genesis. According to earlier researches a distinctive feature of this diamond variety is a light carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) ranging from -17 to -25% and a high nitrogen content of 1200–2000 ppm. The primary source of these diamonds has not yet been identified. In order to establish genetic relationship between mineral phases on diamond surface and host deposits, this paper presents the results of a comprehensive mineralogical study of variety VII diamonds (according to Yu.L. Orlov’s classification) from Carnian (Upper Triassic) deposits of the Bulkur anticline. A set of analytical methods were used to identify chlorite (presumably chamosite), illite, and nontronite that fill cracks and form crusts on the surface of polycrystalline diamond aggregates. It was established that chamosite presented as ingrowths and foliate-flaky aggregates in cracks, while illite and nontronite form thin fine-flaky crust (less than 20 μ). This mineral assemblage is characteristic of low-temperature hydrothermal alteration and diagenesis of volcano-sedimentary strata in a marine environment. Raman spectra revealed apatite in a fragment of a crushed diamond polycrystal. Apatite formation is associated with hypergene alteration of primary host rocks prior to their transformation by hydrothermal processes in shallow marine environments. The results obtained complement the understanding of diamonds postgenetic changes from placer deposits in the north of the Siberian Platform and can be used to reconstruct conditions of formation of Carnian diamond-bearing deposits.

Keywords: VII variety diamond crystals, Siberian platform, Bulkur anticline, Upper Triassic, Carnian deposits, Raman spectroscopy, apatite, illite, nontronite, chamosite

Funding. The study was funded by Russian Science Foundation grant (project No. 25-27-20056).

For citation: Oshchepkova M.G., Ugapeva S.S., Pavlushin A.D., Oleinikov O.B., Goryainov S.V., Gromilov S.A. Mineral phases on the surface of Variety VII diamond crystals from Carnian (Upper Triassic) deposits of the Bulkur anticline. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(2): 5-16. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-16

Введение

Первый алмаз в карнийских отложениях верхнего триаса на северо-востоке Сибирской платформы был обнаружен в 1979 г. на о. Таас-Ары. Последующие поисковые и тематические работы привели к открытию в пределах Булкурской антиклинали карнийских отложений с высокой и «ураганной» алмазоносностью. Комплексные минералогические, стратиграфические и палеогеографические исследования показали, что коренные источники алмазов расположены в непосредственной близости [1].

Алмазы из туфогенных пород Булкурской антиклинали были объектом изучения многих исследователей [2-7]. В районе Булкурской антиклинали, как и в россыпях Прианабарья (Эбелях, Маят и др.), присутствуют алмазы, совершенно нехарактерные для известных кимберлитовых тел Якутской провинции, к которым относятся кристаллы V-VII разновидности по минерало-

гической классификации Ю.Л. Орлова. Отличительной особенностью данной разновидности алмазов является легкий изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ от -17 до -25% и высокое содержание примеси азота 1200–2000 ppm [2, 7–11].

В настоящее время в качестве возможных источников алмазов карнийского яруса Булкурской антиклинали рассматриваются несколько гипотез. Согласно [10], выдвинуто предположение о транспортировке алмазоносных пород позднетриасовыми вулканитами основного и ультраосновного состава со щелочным уклоном. В работе [9] рассматривается существование обширного эруптивного вулканизма с участием магм лампроитового генезиса, которые стали источниками экзотических для Якутской алмазоносной провинции алмазов V–VII разновидностей. В свете новых данных, полученных в результате изучения включений циркона в алмазе V разновидности из россыпи р. Моргогор – определения возраста $262,5 \pm 2,7$ и $232,6 \pm 3,0$ млн лет, содержания Th и U менее 90 ppm, предполагается, что алмазы были транспортированы из мантии в ходе триасового кимберлитового магматизма. При этом в процессе образования алмазов V–VII разновидностей принимал участие материал океанической коры, включающий: изотопно-легкую по углероду и обогащенную азотом биогенную составляющую; низкотемпературно измененные океанические базальты, обогащенные тяжелым изотопом кислорода [11]. Однако ни здесь, ни в других районах Сибирской платформы до сих пор не обнаружены вулканические постройки, которые могли бы служить источником этих туфов. Таким образом, вопрос о происхождении алмазов карнийских (верхнетриасовых) отложений Булкурской антиклинали остаётся открытым. В целях установления генетической связи минеральных фаз на поверхности алмазов и вмещающих отложений в настоящей работе представлены результаты их комплексного изучения.

Методы исследования

Особенности морфологии кристаллов алмаза изучены на стереоскопическом микроскопе Olympus SZX-12 (Olympus Corp., Tokyo, Japan). Микроморфология кристаллов алмаза и минеральные образования на их поверхности, в трещинах исследованы с помощью электронного сканирующего микроскопа JEOL JSM-6480LV (Jeol Ltd., Токио, Япония).

Химический состав минеральных фаз определен с применением приставки к сканирующему электронному микроскопу энергетического дисперсионного спектрометра Energy 350 Oxford, при напряжении 20 кВ, ток 1 нА, диаметр пучка 1 мкм. КР спектры регистрировались на дисперсионном микроскопе комбинационного рассеяния (КР) SENTERRA фирмы Bruker, оснащённом лазером с длиной волны 532 нм (ИПНГ СО РАН, г. Якутск), а также на спектрометре LabRam HR800 «Horiba Jobin Yvon» с 1024-канальным LN/CCD-детектором (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Рентгенографическое исследование проведено в схеме Дебая-Шеррера на дифрактометре Bruker D8 Venture (микрофокусная трубка Incoatec $\text{I}\mu\text{S } 3,0$, $\text{CuK}\alpha$ -излучение, монохроматизация и фокусировка с помощью многослойных зеркал Монтеля, трехкружный гониометр, программное обеспечение APEX3 [12]) (ИНХ СО РАН, г. Новосибирск). Детектор PHOTON III (разрешение 768×1024 , размер пикселя 135×135 мкм²) был установлен на расстоянии 96,5 мм под углом $2\theta_D = 35^\circ$, калибровка этого положения проведена по эталонному образцу CeO_2 – SRM674b [13]. При переходе от дебаеграммы к стандартному виду дифрактограммы $I/(2\theta)$ использована программа DIOPRAS [14].

Результаты

Образцы представляют собой значительно растворенные агрегаты беспорядочно ориентированных октаэдров желтовато-серого и серого цвета, относимые к VII разновидности по минералогической классификации Ю.Л. Орлова [15]. Размеры агрегатов не превышают 5 мм. В углублениях поверхности имеются минеральные фазы черного и темно-серого цвета (рис. 1).

Согласно данным [4, 7], кристаллы алмаза VII разновидности карнийских отложений Булкурской антиклинали являются классическими представителями «изотопно легких»

алмазов. Специфический «легкий» диапазон значения $\delta^{13}\text{C}$ (от $-17,2\%$ до $-24,7\%$) служит важным диагностическим признаком, отличающим их от кристаллов из палеозойских кимберлитов (с тяжелым изотопным составом около $-2,1 \dots -5,74\%$).

В алмазах VII разновидности примесь азота наблюдается главным образом в агрегированных формах А, В1, В2 дефектов, что характерно для алмазов типа IaA/B по физической классификации [16]. Общее содержание азота (суммарно рассчитанные концентрации в форме дефектов А и В1) составляет не менее 1000 ppm [4, 7, 11, 17].



Рис. 1. Сrostки октаэдрических кристаллов алмаза VII разновидности (а-в)

Fig. 1. Octahedral diamond crystals intergrowths of VII variety (а-в)

С помощью сканирующего электронного микроскопа установлены силикатные минералы в виде пластинчато-чешуйчатых масс, выполняющих трещины и углубления в рельефе, образующих корочку, а также растущих в интерстиции кристаллов в агрегатах алмаза. Цвет силикатов белый с желтовато-ржавым оттенком, либо темно-зеленые почти черные разновидности. Темные силикаты по химическому составу соответствуют шамозиту (табл. 1). В поликристалле 8001 восток шамозита выступает из алмаза (рис. 2, а). Структура востка скрытокристаллическая, прямоугольной формы ($1 \times 0,5 \times 0,5$ мм), поверхность гладкая, с мелкими кавернами. Шамозит, заполняющий трещины в агрегатах алмаза, представлен в виде чешуйчатых выделений и повторяет форму и изломы трещин (рис. 2, б), местами нарастая корочкой за их пределами.

Таблица 1

Представительные анализы химического состава минералов на поверхности кристаллов алмаза из россыпных месторождений севера Сибирской платформы

Table 1

Representative analyses of the chemical composition of minerals on the surface of diamond crystals from placer deposits in the northern part of the Siberian Platform

Минерал	№ алмаза	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MgO	CaO	K ₂ O	Total
Шамозит	8001	29,64	20,50	36,01	4,55	0,39	0,53	91,62
	8001	29,18	22,12	33,22	4,66	-	-	89,18
	8002	28,51	24,49	38,44	3,57	-	0,55	95,56
	8011	28,81	26,95	37,08	5,00	-	-	97,84
	8011	36,53	24,03	30,80	4,45	-	-	95,81
Иллит	8002	53,27	33,47	2,09	1,17	1,05	6,57	97,62
	8002	52,54	31,03	3,53	0,95	-	9,42	97,47
	8002	50,13	30,64	4,80	-	-	8,12	93,68
	8011	46,76	28,87	6,14	1,23	-	8,41	91,42
	8011	51,61	29,38	2,67	1,07	-	6,89	91,62
Нонтронит	8002	36,18	25,39	24,42	3,30	0,62	3,48	93,40
	8002	38,49	26,09	23,38	2,38	0,63	3,51	94,49

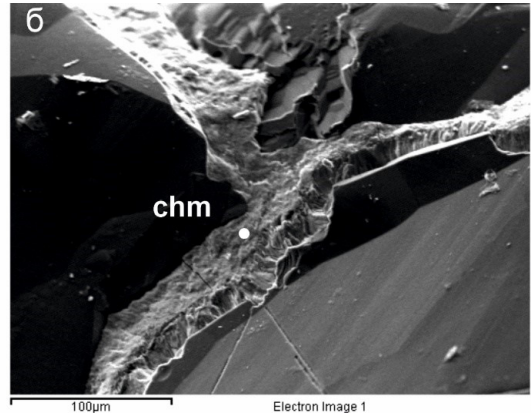
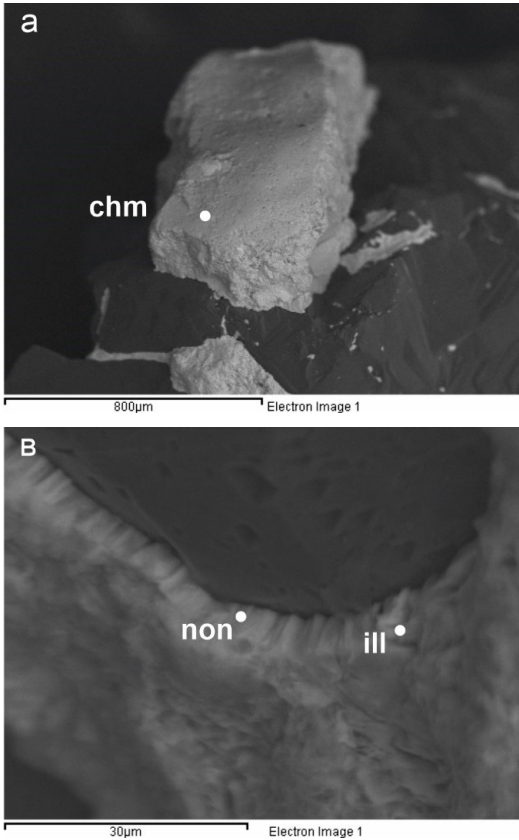


Рис. 2. Вросток (а), листовато-чешуйчатые выделения (б) шамозита в трещине и корочка из мелкочешуйчатого нонтронита и иллита (в) на поверхности агрегатов алмаза

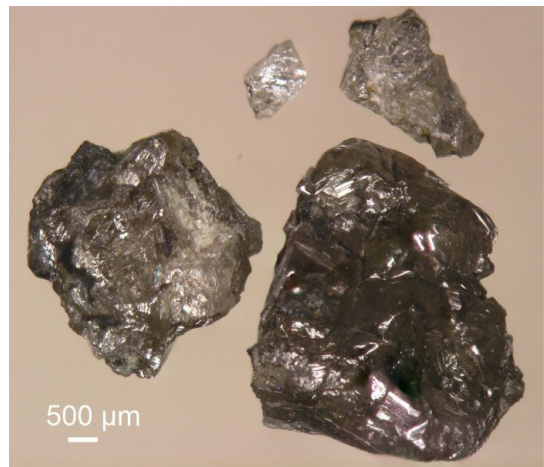
Fig. 2. Chamosite ingrowth (a) and foliate-flaky (b) mass in a crack and nontronite and illite fine-flaky crust (c) on the surface of diamond aggregates

Силикатные минералы светлого цвета, на поверхности остальных алмазных агрегатов, представлены мелкочешуйчатыми, спутанными массами иллита и нонтронита (табл. 1), формирующими тонкие корочки, толщиной менее 20 µm (рис. 2). Так же, как и шамозит, минералы приурочены к отрицательным формам рельефа и выполняют трещины. Поверхность корочки неровная, местами сглаженная, видно чешуйчатое строение.

После изучения образцов неразрушающими методами, кристалл 8001 был расколот с целью дальнейшего детального исследования минеральных образований методами рентгенографического анализа и КР спектроскопии (рис. 3).

Рис. 3. Расколотый поликристаллический агрегат алмаза 8001

Fig. 3. Crushed polycrystal diamond aggregate 8001



Методом Рамановской спектроскопии изучена поверхность темных минеральных фаз в трещинах и углублениях кристаллов алмаза VII разновидности. Полученные данные показывают сложный полиминеральный состав. Доминирующую фазу составляют минералы группы слоистых силикатов (шамозит? нонтронит?). В незначительном количестве присутствуют примеси фосфатов. На рис. 4 показан КР спектр, характерный для апатита с дополнительными полосами неупорядоченного графита и гидрата с частотой валентных О-Н колебаний при 3277 см^{-1} .

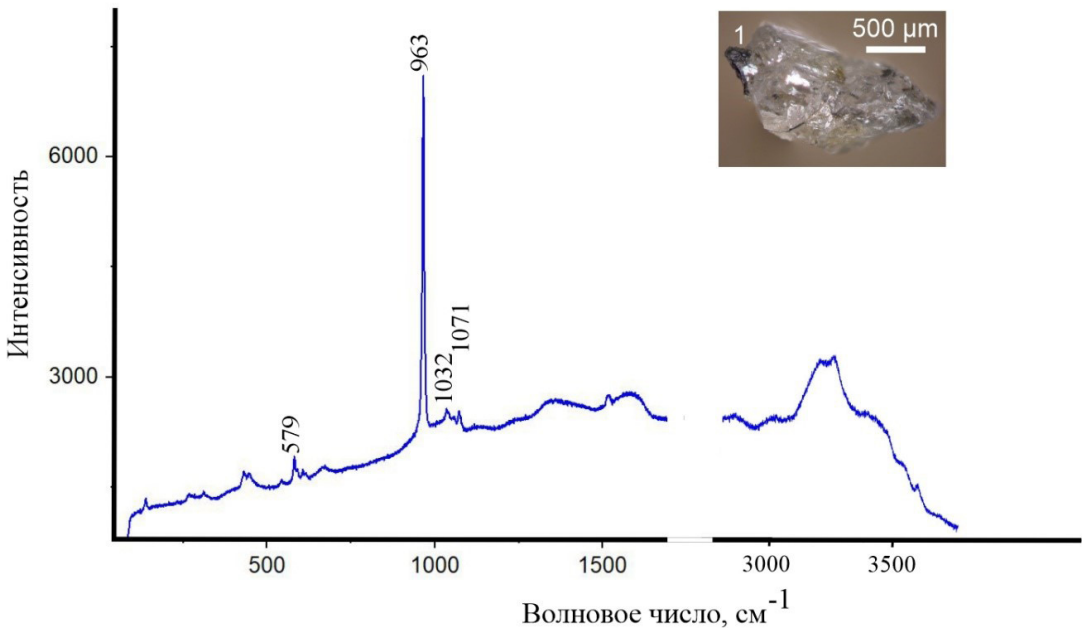


Рис. 4. КР спектр, полученный от поверхности черной минеральной фазы

Fig. 4. Raman spectrum of the black mineral phase

Характеристические полосы КР-спектра ($199, 276, 387, 545, 664, 3565, 3624\text{ см}^{-1}$) востка, диагностированного по химическому составу как шамозит, позволяют отнести основную фазу к шамозиту (рис. 5). Присутствие дополнительных полос свидетельствует о полифазном составе образца: примеси силиката (1026 см^{-1}) и неупорядоченного графита (1601 см^{-1}). Полосами неупорядоченного графита можно пренебречь, так как алмазы были покрыты углеродной пленкой.

Для проведения рентгенофазового исследования из востка шамозита был приготовлен образец с линейными размерами не более 80 мкм . Дифрактограмма образца соответствует минералу из группы хлорита (шамозит?) (рис. 6). Достоверно определить минерал затруднительно, т.к. отсутствует малоугловая область $4\text{-}10^\circ 2\theta$ ($d\ 17\text{-}8\text{ \AA}$).

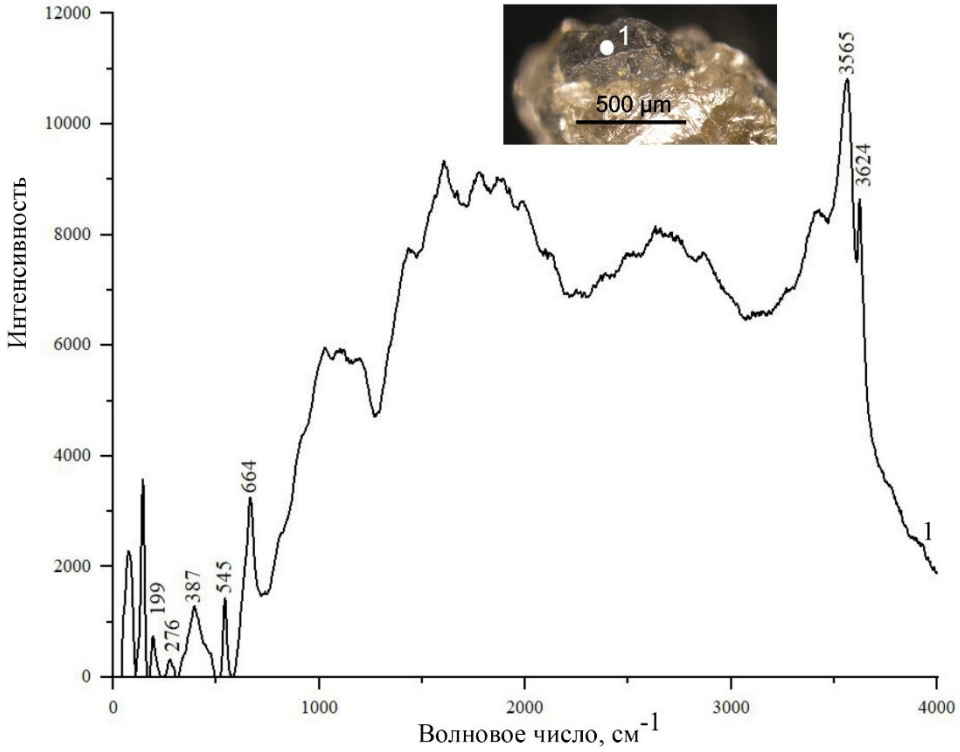


Рис. 5. КР спектр вроска шамозита
 Fig. 5. Chamosite ingrowth Raman spectrum

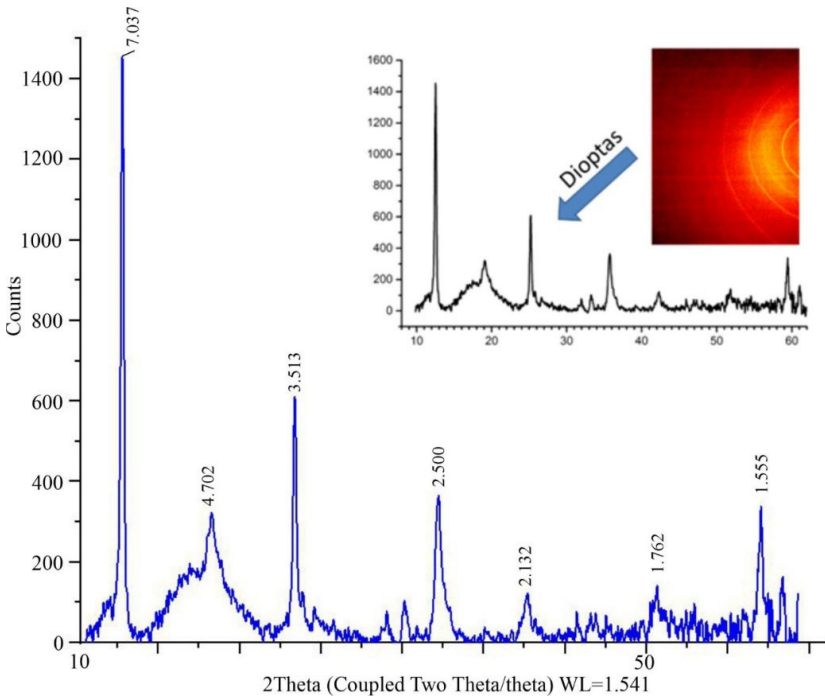


Рис. 6. Диффрактограмма изученного образца. На вставке показан переход от исходной рентгенограммы к стандартному виду $I/(2\theta)$ с помощью программы Dioptas
 Fig. 6. Diffractogram of the studied sample. The insert shows the transition from the original X-ray diffraction pattern to the standard form $I/(2\theta)$ using the Dioptas program

Обсуждение результатов и выводы

На основе исследования методами электронной микроскопии на поверхности исследованных поликристаллических агрегатов алмаза из карнийских отложений Булкурской антиклинали установлены следующие минеральные фазы: хлорит (предположительно шамозит), иллит и нонтронит. При дальнейшем изучении вростка в алмазе 8001 методами рентгенографического анализа и Рамановской спектроскопии получены подтверждающие результаты: основные полосы КР спектра вростка относятся к шамозиту, дифрактограммы соответствуют минералу из семейства хлоритов. Поверхностные фазы семейства хлоритов и гидрослюд привязаны к отрицательным формам рельефа, проникают в трещины и образуют тонкую корочку. Эти минералы характерны для алмазов участка Булкур. Так, выделения шамозита были обнаружены в углублениях с кварцем и пиритом, в трещинах и в виде тонкой корочки на поверхности кубоида алмаза III разновидности [18]. Также на кристаллах алмаза I, III, V и VII разновидностей из карнийских отложений были обнаружены аналогичные силикаты, а также гранат и жадеит (с кварцем) и дополнительные минеральные фазы как сульфиды, галогениды, оксиды, кислородные соли и самородные соединения [3]. К сравнению, на кристалле алмаза V разновидности из россыпного месторождения Холмолоох идентифицированы только полевые шпаты, самородные соединения и оксиды – рутил, ильменит, титаномагнетит и циркон [19]. На алмазах россыпи Эбелях силикатные пленки обладают менее железистым составом, чем на кристаллах участка Булкур [20]. Согласно [10, 21] минералы семейства хлоритов и гидрослюд широко распространены в карнийских отложениях Булкурской антиклинали. Различные туфы, туффиты, метатуфы, туфопесчаники и т.д., состоят из измененного вулканокластического материала, вулканического стекла, лапиллей (тоже сложенные смесью септешамозитов и септехлоритов), цементированных криптокристаллическим агрегатом из смеси септехлоритов, септешамозитов и различных гидрослюд, что и отражается на поверхности кристаллов алмаза. Формирование вторичных силикатов связано с гидротермальными процессами в морской воде. Иллит также образуется в зонах гидротермальных изменений, может быть продуктом низкотемпературных гидротермальных процессов при гидратации слюд. Наличие данного комплекса минералов на алмазах свидетельствует о том, что кристаллы находились в зоне активного низкотемпературного флюидного режима, в ходе которого происходила гидратация первичных минералов с возможным переходом железистых хлоритов в глинистые фазы по мере остывания системы [3].

Кроме силикатных минералов методом КР спектроскопии на поверхности алмаза VII разновидности идентифицирован апатит (рис. 4). Микровключения апатита описаны в волокнистых кубоидах алмаза (тр. Удачная, россыпи Бразилии) и алмазах в оболочке. Наличие апатита в этих алмазах связывают с их кристаллизацией из карбонатитовых расплавов [22, 23]. В нашем случае, основываясь только на данных КР спектроскопии, нельзя утверждать о происхождении кристалла. Наиболее вероятно, что образование апатита в межзерновом пространстве агрегата алмаза произошло в стадии гипергенеза первичных пород до гидротермальных изменений в условиях морского мелководья [24].

Исследованная ассоциация минеральных фаз на поверхности поликристаллов алмаза соответствует ранее изученным алмазам I, III, V и VII разновидности из карнийских отложений северо-востока Сибирской платформы [3, 18]. Они представляют комплекс минеральных парагенетических ассоциаций, отражающих этапы низкотемпературного гидротермального диагенеза вулканогенно-осадочных пород в условиях морского режима. Хорошая сохранность силикатной корочки на поверхности алмазов, наличие в отложениях мелких и крупных кристаллов, индикаторных минералов кимберлитов, келифитовых кайм на поверхности пиропов указывает на минимальный перенос материала [10].

Литература

1. Граханов С.А., Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Соболев Н.В. Алмазоносные туфогенно-осадочные породы триаса Арктической зоны Сибири. *Геология и геофизика*. 2022;63(4):550-578.
2. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО Недра-Бизнесцентр; 2003. 603 с.
3. Павлушин А.Д., Граханов С.А., Смелов А.П. Парагенетические ассоциации минералов на поверхности кристаллов алмаза из отложений карнийского яруса северо-востока Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2010;(5):45-51.
4. Молотков А.Е., Павлушин А.Д., Смелов А.П., Граханов С.А., Олейников О.Б. Дефектно-примесный состав кристаллов алмаза из отложений карнийского яруса северо-востока Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2014;(5):74-79.
5. Граханов С.А., Молотков А.Е., Олейников О.Б., Павлушин А.Д. Типоморфизм и изотопия алмазов триасовых туффигов Булкурской антиклинали. *Отечественная геология*. 2015;(5):16-21.
6. Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm. *Ore Geology Reviews*. 2022;147:104980. <https://doi.org/...>
7. Логвинова А.М., Угапова С.С., Николенко Е.И., Серебрянников А.О., Афанасьев В.П. Полигенность алмазов из отложений карнийского яруса Булкурской антиклинали северо-востока Сибирской платформы. *Записки Горного института*. 2025;276(2):3-17.
8. Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Коптиль В.И., Митюхин С.И., Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И. Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2011;52(3):335-353.
9. Летникова Е.Ф., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Изох А.Э., Николенко Е.И. Источники поступления обломочного материала в карнийский алмазоносный горизонт северо-востока Сибирской платформы. *Доклады академии наук*. 2013;451(2):193-196.
10. Граханов С.А., Смелов А.П., Егоров К.Н., Голубев Ю.К. Осадочно-вулканогенная природа основания карнийского яруса – источника алмазов северо-востока Сибирской платформы. *Отечественная геология*. 2010;(5):3-12.
11. Реутский В.Н., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Калинина В.В., Земнухов А.Л. Возраст округлых алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2026. <https://doi.org/10.15372/GiG2025202>
12. Bruker AXS Inc. APEX3 V.2019.1-0, SAINT V.8.40A and SADABS-V.2016/2. Madison, Wisconsin, USA: Bruker Advanced X-ray Solutions; 2019.
13. Small J.A., Choquetti S.J. Standard Reference Material 674b. Certificate. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2017. 7 p.
14. Prescher C., Prakapenka V.B. DIOPTAS: a program for reduction of two-dimensional X-ray diffraction data and data exploration. *High Pressure Research*. 2015;35(3):223-230.
15. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука; 1973. 224 с.
16. Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., и др. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука; 1986. 220 с.
17. Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Зедгенизов Д.А. Новые данные о составе среды кристаллизации алмазов V разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Доклады Академии наук*. 2009;425(4):527-531.
18. Pavlushin A.D., Ugapeva S.S., Biller A.Y., Oleinikov O.B. Genetic features of variety III cuboid diamonds from placers of the northeastern Siberian Platform. *Minerals*. 2025;15(12):1321. <https://doi.org/...>
19. Олейников О.Б., Павлушин А.Д., Попов А.В. Постгенетические минералы и микростекла кристалла алмаза V разновидности из россыпного месторождения Холомолах и их генезис. *Отечественная геология*. 2007;(5):77-83.
20. Олейников О.Б., Барашков Ю.П. Особенности химического состава силикатных пленок на кристаллах алмаза из россыпного месторождения Эбелях и их генезис. *Отечественная геология*. 2005;(5):42-47.
21. Проскурнин В.Ф., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Наумов М.В. Признаки эксплозивно-обломочного генезиса алмазоносного карнийского горизонта Усть-Оленекского района. *Геология и геофизика*. 2012;53(6):698-711.

22. Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Sobolev N.V. Carbonatitic melts in cuboid diamonds from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia): evidence from vibrational spectroscopy. *Mineralogical Magazine*. 2004;68(1):61-73.

23. Ширяев А.А., Израэли Е.С., Хайри Э.Г., Захарченко О.Д., Навон О. Химические, оптические и изотопные особенности волокнистых алмазов из Бразилии. *Геология и геофизика*. 2005;46(12):1207-1222.

24. Шамшина Э.А. Минералы кимберлитовых пород в разновозрастных отложениях севера Сибирской платформы. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1986. 112 с.

References

1. Grakhanov S.A., Proskurnin V.F., Petrov O.V., Sobolev N.V. Diamond-bearing tuffaceous-sedimentary rocks of the Triassic of the Arctic zone of Siberia. *Geology and Geophysics*. 2022;63(4):550–578 (in Russian).

2. Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Typomorphism of diamonds of the Siberian Platform*. Moscow: Nedra-Business Center LLC; 2003. 603 p. (in Russian).

3. Pavlushin A.D., Grakhanov S.A., Smelov A.P. Paragenetic associations of minerals on the surface of diamond crystals from the Carnian stage deposits of the northeastern Siberian Platform. *Russian Geology*. 2010;(5):45–51 (in Russian).

4. Molotkov A.E., Pavlushin A.D., Smelov A.P., et al. Defect-impurity composition of diamond crystals from Carnian deposits of the northeastern Siberian Platform. *Russian Geology*. 2014;(5):74–79 (in Russian).

5. Grakhanov S.A., Molotkov A.E., Oleinikov O.B., Pavlushin A.D. Typomorphism and isotopy of diamonds from Triassic tuffites of the Bulkur Anticline. *Russian Geology*. 2015;(5):16–21 (in Russian).

6. Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P. Approaches to the diamond potential of the Siberian craton: A new paradigm. *Ore Geology Reviews*. 2022;147:104980. <https://doi.org/...>

7. Logvinova A.M., Ugapueva S.S., Nikolenko E.I., et al. Polygenicity of diamonds from the Carnian stage deposits of the Bulkur Anticline of the northeastern Siberian Platform. *Journal of Mining Institute*. 2025;276(2):3–17 (in Russian).

8. Afanasiev V.P., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., et al. Polygenesis of diamonds in the Siberian Platform. *Geology and Geophysics*. 2011;52(3):335–353 (in Russian).

9. Letnikova E.F., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., et al. Sources of detrital material in the Carnian diamond-bearing horizon of the northeastern Siberian Platform. *Doklady of the Russian Academy of Sciences*. 2013;451(2):193–196 (in Russian).

10. Grakhanov S.A., Smelov A.P., Egorov K.N., Golubev Yu.K. Sedimentary-volcanic nature of the base of the Carnian stage – the source of diamonds in the north-east of the Siberian Platform. *Russian Geology*. 2010;(5):3–12. (in Russian).

11. Reutsky V.N., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., et al. Age of rounded diamonds from placers in the northeast of the Siberian Platform. *Geology and Geophysics*. 2026. <https://doi.org/10.15372/GiG2025202> (in Russian).

12. Bruker AXS Inc. *APEX3 V.2019.1-0, SAINT V.8.40A and SADABS-V.2016/2*. Madison, Wisconsin, USA: Bruker Advanced X-ray Solutions; 2019.

13. Small J.A., Choquetti S.J. *Standard Reference Material 674b. Certificate*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2017:7.

14. Prescher C., Prakapenka V.B. DIOPTAS: a program for reduction of two-dimensional X-ray diffraction data and data exploration. *High Pressure Research*. 2015;35(3):223–230.

15. Orlov Yu.L. *Diamond mineralogy*. Moscow: Nauka; 1973:224 (in Russian).

16. Bokiy G.B., Bezrukov G.N., Klyuev Yu.A., et al. *Natural and synthetic diamonds*. Moscow: Nauka; 1986:220 (in Russian).

17. Ragozin A.L., Shatsky V.S., Zedgenizov D.A. New data on the composition of the crystallization environment of diamonds of variety V from placers of the north-east of the Siberian Platform. *Doklady of the Russian Academy of Sciences*. 2009;425(4):527–531 (in Russian).

18. Pavlushin A.D., Ugapeva S.S., Biller A.Y., Oleinikov O.B. Genetic features of variety III cuboid diamonds from placers of the northeastern Siberian Platform. *Minerals*. 2025;15(12):1321. <https://doi.org/...>

19. Oleynikov O.B., Pavlushin A.D., Popov A.V. Postgenetic minerals and microglasses of diamond crystal of variety V from the Kholomolokh placer deposit and their genesis. *Russian Geology*. 2007;(5):77–83 (in Russian).

20. Oleynikov O.B., Barashkov Yu.P. Features of the chemical composition of silicate films on diamond crystals from the Ebelyakh placer deposit and their genesis. *Russian Geology*. 2005;(5):42–47 (in Russian).

21. Proskurnin V.F., Vinogradova N.P., Gavrish A.V., Naumov M.V. Signs of explosive-clastic genesis of the diamond-bearing Carnian horizon of the Ust-Olenek region. *Geology and Geophysics*. 2012;53(6):698–711 (in Russian).

22. Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Sobolev N.V. Carbonatitic melts in cuboid diamonds from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia): evidence from vibrational spectroscopy. *Mineralogical Magazine*. 2004;68(1):61–73.

23. Shiryayev A.A., Izraeli E.S., Khairi E.G., et al. Chemical, optical and isotopic features of fibrous diamonds from Brazil. *Geology and Geophysics*. 2005;46(12):1207–1222 (in Russian).

24. Shamshina E.A. *Minerals of kimberlite rocks in sediments of different ages in the northern Siberian Platform*. Yakutsk: Yakutsk Branch of the USSR Academy of Sciences; 1986:112 (in Russian).

Сведения об авторах

ОЩЕПКОВА Мария Геннадиевна – младший научный сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-код: 2649-5300

УГАПЬЕВА Саргълана Семеновна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 57190070067, ORCID 0000-0002-3999-0270, SPIN-код: 7211-0290

ПАВЛУШИН Антон Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 8950107200, ORCID 0000-0001-7991-1947, SPIN-код: 7520-4908

ГОРЯЙНОВ Сергей Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Scopus ID: 55927004900

ГРОМИЛОВ Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Scopus ID: 7005166133

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, Scopus ID: 8953279700, ORCID 0000-0003-1010-7592, SPIN-код: 1692-8581

About the authors

Mariya G. OSHCHEPKOVA – Junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Scopus ID: 58627916500, ORCID 0000-0002-2777-0449, SPIN-code: 2649-5300

Sargylana S. UGAPEVA – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Scopus ID: 57190070067, ORCID 0000-0002-3999-0270, SPIN-code: 7211-0290

Anton D. PAVLUSHIN – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Scopus ID: 8950107200, ORCID 0000-0001-7991-1947, SPIN-code: 7520-4908

Sergey V. GORYAINOV – Cand. Sci. (Mathematics and Physics), Senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Scopus ID: 55927004900

Sergey A. GROMILOV – Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Head of the Lab, Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Scopus ID: 7005166133

Oleg B. OLEINIKOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Lead researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Scopus ID: 8953279700, ORCID 0000-0003-1010-7592, SPIN-code: 1692-8581

Вклад авторов

Ощепкова М.Г. – концепция исследования, проведение исследований, обработка материала, литературный обзор, выводы

Угапьева С.С. – концепция исследования, проведение исследований, обработка материала, графическое оформление, литературный обзор, выводы

Павлушин А.Д. – проведение исследований, обработка материала

Олейников О.Б. – сбор данных, обработка материала

Горяинов С.В. – проведение исследований, обработка материала

Громилов С.А. – проведение исследований, обработка материала

Authors contribution

Mariya G. Oshchepkova – research concept, research implementation, data processing, literature review, conclusions

Sargylana S. Ugapeva – research concept, research implementation, data processing, graphic design, literature review, conclusions

Anton D. Pavlushin – research implementation, data processing

Oleg B. Oleinikov – data collection, data processing

Sergey V. Goryainov – research implementation, data processing

Sergey A. Gromilov – research implementation, data processing

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Корреспондент имеет право и полномочия выступать от имени всех авторов по этому исследованию.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest. The corresponding author has the right and authority to speak on behalf of all authors in this study

Поступила в редакцию / Submitted 28.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 19.05.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026

АНАЛИЗ ОБОГАЩЕНИЯ ГЛИН ЮГО-ЗАПАДНОГО УЧАСТКА ЛУКОШКИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ГЛИН ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ МЕТОДОМ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ

С.А. Словогородский, М.А. Богуславский*

Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова

г. Москва, Российская Федерация

*slovogorodskiysa@my.msu.ru

Аннотация. Лукошкинское месторождение керамических глин (Липецкая область) состоит из трех изолированных участков. Основной акцент в данном исследовании был сделан на Юго-Западном участке, однако единичные пробы были взяты и на Юго-Восточном участке. Глины полезной толщи на данном месторождении предыдущими исследователями отнесены к аптскому ярусу нижнего отдела меловой системы, а перекрывающие суглинки к неоплейстоцену [1]. Исследование проводилось комплексное: изучался минеральный и химический состав продуктивной толщи глин, а также суглинков, являющихся вскрышными породами. Отдельно рассматривался вопрос возможности обогащения всех разновидностей с помощью дезинтегратора. Качество сырья во многом зависит от содержания каолинита (прямое влияние на огнеупорность и на коридор спекаемости для фасадного кирпича), а также от количества вредных примесей: красящие (железо, титан), а также влияющих на температуру плавления (фосфор). Толща 1 и 2 содержат значимое количество каолинита (до 20 %) и кварца (до 60 %). Для толщи 1 и толщи 2 метод дезинтеграции показал себя эффективным: содержание каолинита увеличилось до 70 %, а количество железа в пробах удалось снизить более чем в два раза. Суглинки вскрышных пород содержат более сложный состав: содержание каолинита не превышает 12 % и почти такое же количество хлорита, слюд и смектита. Метод обогащения привел к резкому увеличению до 46 % количества смектита, что требует дополнительных исследований по возможному использованию этих пород. Сейчас все эти суглинки складировуют в отвал.

Ключевые слова: дезинтеграция, керамические глины, Лукошкинское месторождение, рентген-флюоресцентный анализ, рентген-дифракционный анализ, минеральный состав глин, каолинит, обогащение глин, вредные примеси, комплексное использование.

Для цитирования. Словогородский С.А., Богуславский М.А. Анализ обогащения глин Юго-Западного участка Лукошкинского месторождения керамических глин Липецкой области методом дезинтеграции. *Вестник СВФУ.* 2026;(2): 17-32. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-17-32

Original article

DETERMINING MINERALOGICAL AND CHEMICAL DIFFERENCES IN FLANKS OF THE LUKOSHKINSKOE CERAMIC CLAY DEPOSIT OF LIPETSK REGION BY DISINTEGRATION

Semyon A. Slovogorodskiy, Mikhail A. Boguslavskiy*

Moscow State University

Moscow, Russia

*slovogorodskiysa@my.msu.ru

Abstract. The Lukoshkinskoye ceramic clay deposit (Lipetsk region) consists of three isolated areas. The main focus of this study was the South-West area, but individual samples were also taken in the South-East area. Previous researchers have attributed the clays of the productive layer at this deposit to the Aptian stage of the lower part of the Cretaceous system, and the overlying loams to the Neopleistocene [1]. A comprehensive study

was conducted: the mineral and chemical composition of the productive clay layer, as well as overburden loams rocks, were studied. The possibility of enriching all varieties using a disintegrator was separately considered. The quality of the raw materials largely depends on the kaolinite content (directly influencing the refractoriness and the sintering corridor for facade bricks), as well as the amount of harmful impurities: coloring (iron, titanium), and those affecting the melting point (phosphorus). Layers 1 and 2 contain significant amounts of kaolinite (up to 20 %) and quartz (up to 60 %). For Layers 1 and 2, the disintegration method proved effective: the kaolinite content increased to 70 %, and the iron content in the samples was reduced by more than half. The loams of the overburden that are stored in a waste heap have a more complex composition: the kaolinite content does not exceed 12 % and almost the same amount of chlorite, micas, and smectite. The enrichment method led to a sharp increase in the smectite content to 46 %, necessitating further research into the potential uses of the rocks that are currently stored in stockpiles.

Keywords: disintegration, ceramic clays, Lukoshkinskoye deposit, X-ray fluorescence analysis, X-ray diffraction analysis, mineral composition of clays, kaolinite, clay enrichment, harmful impurities, complex use

For citation: Slovogorodskiy S.A., Boguslavskiy M.A. Determining mineralogical and chemical differences in flanks of the Lukoshkinskoye ceramic clay deposit of the Lipetsk region by disintegration. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(2): 17-32. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-17-32

Введение

Лукошкинское месторождение тугоплавких глин расположено в Задонском и Елецком районах Липецкой области на расстоянии 0.5-3 км к югу от железнодорожного разъезда «215 км», который находится на железнодорожной ветке Воронеж-Орел, в 20 км к востоку от г. Ельца и 60 км к западу от г. Липецка. Ближайшие населенные пункты: села Лукошкино, Аркатово, Новоселье. Лукошкинское месторождение состоит из трех крупных, пластообразно-линзовидных залежей тугоплавких глин, к которым относятся 3 ценных участка: Центральный, Юго-Восточный и Юго-Западный (рис. 1).

Юго-Восточный участок располагается в восточной части месторождения и занимает большую водораздельную площадь (0,6 кв. км) между балками Горшков Лог и Теплый Лог. Он вытянут в северо-западном направлении вдоль водораздела. Во время полевого выезда был посещен восточный борт рекультивированного Юго-Западного участка карьера.

Юго-Западный участок располагается в 1,5-3 км к югу от Юго-Восточного. В плане он вытянут в западном направлении, охватывая водораздельную площадь (1,2 км²) между балкой Теплый Лог и ее правым отводом. С юга участок ограничен защитной зоной газопровода (шириной 350 м) и одной из линий ЛЭП-110 кВ, расположенной рядом. На западном и восточном продолжении, которое проходит вдоль осевой части водораздела, полезная толща участка не имеет замкнутых форм и ограничена крайними разведочными выработками. Для сторон других направлений граница участка связана с контурными формами залежи, которые вызваны общим снижением уровня четвертичной эрозии на склонах водораздела. С восточного края юго-восточной части карьера были взяты пробы и проведены исследования по изучению химико-минералогических характеристик слоев месторождения, а также составлен подробный разрез края.

Полезная толща Юго-Западного участка имеет более простые условия залегания, по сравнению с Юго-Восточным. Форма ее подошвы на значительной части площади близка к почти горизонтальной поверхности, среднее положение которой составляет высоты в пределах 179-181 м.

Согласно исследованиям А.В. Крайнова Лукошкинского месторождения, установлено, что все продуктивные пласты характеризуются содержанием глинозёма, соответствующим классу полуокислых пород (28-14 %), а также повышенным уровнем красящих оксидов железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 3\%$) и титана ($\text{TiO}_2 = 1,5-3\%$) [1, 2, 3, 4, 5].

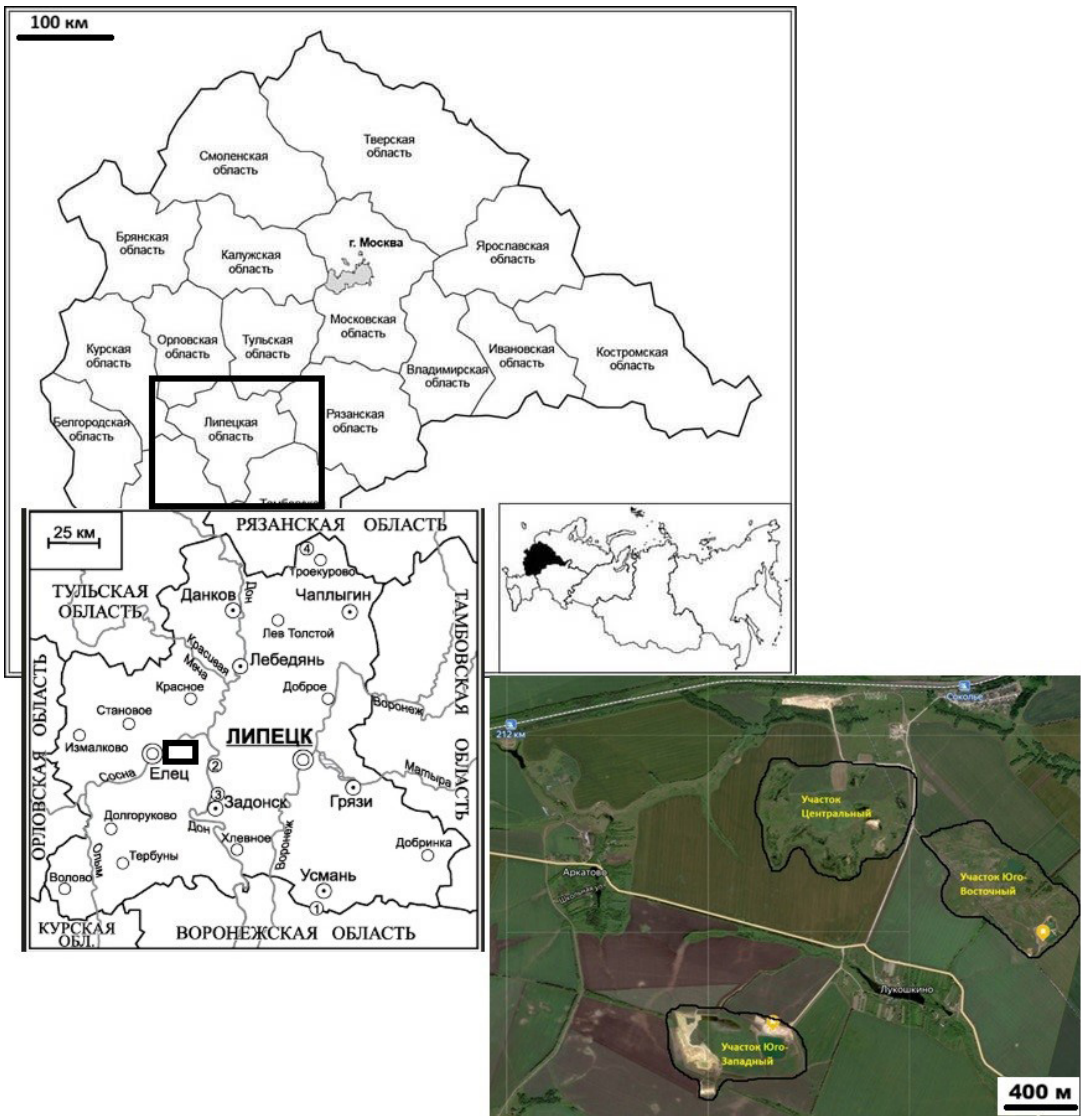


Рис. 1. Карта расположения Лукошкинского месторождения, Липецкая область, Россия

Fig. 1. Map of the location of the Lukoshkinskoye deposit, Lipetsk region, Russia

Качество глин

По данным многолетней эксплуатации Лукошкинского месторождения, многочисленным технологическим испытаниям, проведенным при оценке качества тугоплавких глин в составе глиноносной толщи апта, выделяется четыре керамические группы в зависимости от определенного соотношения вещественного состава (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав и показатель огнеупорности глин Лукошкинского месторождения [1]

Table 1

Chemical composition and fire resistance index of clays of the Lukoshkinskoye deposit [1]

Керамические группы	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	Огнеупорность, С
I	61,66-70,04	17,43-25,25	2,25-7,07	1525-1570
II	66,06-74,50	14,67-19,84	2,25-7,07	1485-1610
III	61,12-81,88	17,40-22,19	1,18-7,25	1520-1600
IV	61,10-71,80	14,70-22,87	5,04-7,25	1385-1550

Группа I – Высокодисперсные, среднепластичные глины с низким содержанием красящих оксидов. Эти глины имеют преимущественно светло-серый или серый цвет, иногда с красноватыми или вишневыми оттенками из-за слабого ожелезнения. Они полуокислые и содержат мало красящих оксидов. Отличаются очень мелкой фракцией: более 60 % частиц имеют размер менее 0,005 мм, а от 45,6 % до 66,1 % – менее 0,001 мм. Фракция от 0,06 до 0,01 мм составляет 22-30 %. Пластичность этих глин находится в диапазоне 15,0-22,7. Они умеренно чувствительны к сушке (коэффициент 0,91-1,07) и спекаются при температуре 1200-1280 °С, образуя светло-оранжевый черепок.

Группа II – Глины с переменной пластичностью и примесью песка, дающие темно-оранжевый или коричневый черепок. В эту группу входят серые, красновато-бурые и вишневые глины, которые могут значительно различаться по пластичности. Они содержат небольшое количество песка. Более 50 % частиц имеют размер менее 0,005 мм, а фракция 0,06-0,01 мм составляет в среднем 23 % (диапазон 11,55-27,63 %). Содержание кремнезема (SiO₂) колеблется от 66,06 % до 74,50 % (в среднем 70,71 %). По сравнению с первой группой, содержание оксида алюминия (Al₂O₃) здесь ниже, а оксида железа (Fe₂O₃) немного выше. При обжиге эти глины дают темно-оранжевый или коричневый черепок, который уплотняется несколько хуже, чем черепок глин первой группы.

Группа III – Грубодисперсные, умеренно пластичные глины с примесью песка и алеврита, не спекающиеся при обжиге. Эти глины имеют серый, светло-серый, бурый, желтовато-бурый или красный цвет и содержат до 5-7 % мелкозернистого песка и алеврита. Они умеренно пластичны и, как правило, грубодисперсны. Главное отличие от первых двух групп – значительно меньшее количество тонкодисперсной фракции (30-40 %) и большее содержание фракции 0,006-0,01 мм (32-40 %). При обжиге эти глины не спекаются, а их черепок приобретает яркие цвета. Прочность на сжатие варьируется от 231 до 616 кг/см² [6, 7, 8, 9, 10].

Группа IV – глины, близкие к I группе, но склонные к вспучиванию из-за высокого содержания железа. Эта группа включает красновато-бурые, красные, пятнистые и плотные глины с мелкими включениями глинистого песка. Они преимущественно полуокислые, реже кислые, и характеризуются высоким содержанием красящих оксидов. Несмотря на то, что их количество невелико, по большинству параметров они схожи с глинами первой группы, за исключением повышенного содержания оксида железа (III). Именно это высокое содержание гидроксидов железа приводит к вспучиванию материала при обжиге.

Фосфор является вредной примесью для каждого производства, где используются подобные типы глины. Фосфор действует как сильный плавень. Соединения фосфора при обжиге значительно снижают температуру плавления, вызывая преждевременное спекание, деформацию изделий, уменьшение огнеупорности и образование хрупкой стеклофазы, что ухудшает механические свойства продукции. Фосфор образует легкоплавкие эвтектики (например, с железом и алюминием), из-за чего глина плавится при более низких температурах, что недопустимо для огнеупорных материалов. Из-за раннего образования жидкой фазы при обжиге изделия теряют

форму, усаживаются неравномерно, что приводит к браку. Фосфор способствует образованию хрупких кристаллических фаз, снижая вязкость и прочность керамики. Присутствие фосфора ухудшает спекаемость и структуру, делая черепок более хрупким и чувствительным к термическим ударам. В нашем исследовании этот вопрос рассматривается отдельно.

А.В. Крайнов выделял указанные выше группы глин на Юго-Восточном участке месторождения. По визуальному восприятию в забое Юго-Западного участка была предпринята попытка выделить эти группы (рис. 2)



Рис. 2. Сортовое деление глин Юго-Западного участка по аналогии с Юго-Восточным участком

Fig. 2. Varietal division of clays in the South-West section by analogy with the South-East section

Глины Лукошкинского месторождения поставляются потребителям в двух категориях, определяемых их керамическими свойствами, а также химическим и гранулометрическим составом. Первая категория предназначена для изготовления облицовочной керамической плитки, а вторая – преимущественно для производства лицевого кирпича.

Помимо этого, огнеупорные глины Лукошкинского месторождения находят широкое применение в строительстве. Из них производят дренажную плитку для полов, кислотоупорный кирпич, керамические стеновые блоки, канализационные и дренажные трубы, различные

кислотоупорные керамические изделия. Также эти глины могут служить сырьем для получения минеральных красок и терразитов – цветных штукатурных смесей.

Для производства лицевого кирпича марок М-100 и М-125 светлых, розовых и оранжевых оттенков чаще всего используются глины III керамической группы. Их применяют как в чистом виде, так и в качестве добавки (от 20 до 50 %) к легкоплавким, чувствительным к сушке глинам, в составе шихты наряду с легкоплавкими суглинками, песком и шамотом.

Глины II керамической группы, содержащие не менее 17 % Al_2O_3 , подходят для изготовления облицовочных и фасадных плиток. В этом случае требуется добавление плавней и отошителей.

Для производства напольной плитки коричневого и светло-коричневого цвета используются глины I керамической группы с содержанием Al_2O_3 не менее 19 %. Чтобы расширить интервал спекания, в состав шихты необходимо вводить плавни, такие как пегматит, полевые шпаты или нефелиновый сиенит. Оптимальный состав шихты включает 70 % огнеупорных глин, 20 % нефелинового сиенита и 10 % стеклобоя. Для этой массы оптимальное количество электролитов составляет 0,08 % соды и 0,35 % жидкого стекла при влажности 50 % [9,10].

Из глин IV керамической группы можно получать минеральные краски красивых бежевых, розовых и желтых тонов. При повышенном содержании песка из них также производят терразиты желтого, красного и серого цветов, оттенок которых зависит от минерального состава.

Материалы и методы

Рентгendifракционный анализ проб был проведен на рентгеновском дифрактометре «MiniFlex 600» (кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова).

Исследования выполнены с использованием Аналитического комплекса на базе рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного спектрометра ЭКРОС XRF-9700 (Экросхим, Россия), приобретенного по Программе развития МГУ (кафедра геохимии геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова).

Анализ валовых проб методом дезинтеграции проводился на приборе ЭГДЛ-10 (технологический отдел ФГБУ ВИМС, г. Москва).

Исследование обогатимости полезной толщи

Обогащение глин направлено на улучшение качественных показателей сырьевых ресурсов, удаление вредных примесей и достижение необходимого уровня чистоты. На рисунках 3 и 4 отображены основные способы и методы обогащения глин.



Рис. 3. Методы обогащения глин
Fig. 3. Methods of clay enrichment

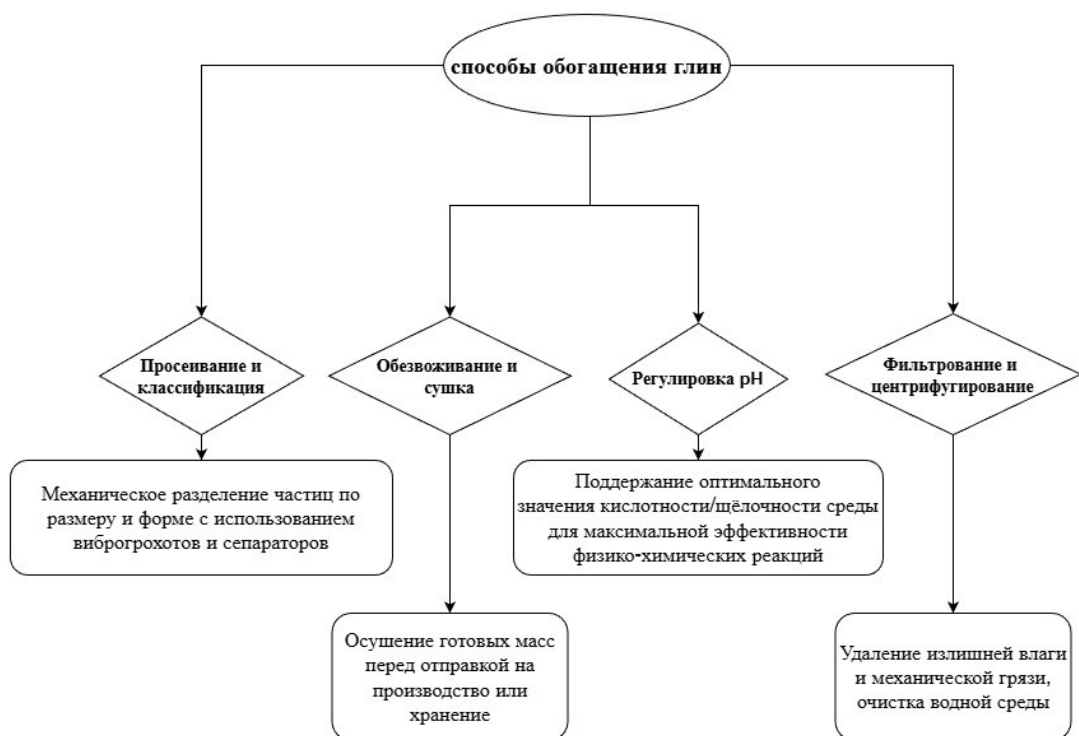


Рис.4. Способы обогащения глины

Fig.4. Methods of clay enrichment

Цель обогащения – снизить содержание загрязняющих примесей, таких как железо, марганец, алюминий, титан и прочие элементы, ухудшающие качество сырья. Или отделить глинистые минералы для увеличения температуры спекаемости.

Метод, применяемый в данной работе для подготовки шихты к обогащению (метод дезинтеграции), отличается своей простотой и экономичностью. Одной из ключевых задач исследования было оценить его эффективность и дать заключение о возможном использовании на данном месторождении.

Электрогидравлическая установка ЭГДЛ-10, предназначенная для разрушения геологических и технологических образцов весом до 10 килограммов, состоит из следующих компонентов: активатора, размещенного на раме с приемной емкостью; воздушного компрессора; пульта управления; источника питания, включающего в себя низковольтную и высоковольтную части; воздушного разрядника, выполняющего роль коммутатора высоковольтных импульсов. В состав гидросистемы установки входят ванна, бак, гидроциклонный узел очистки воды УГО35-4 и циркуляционные насосы.

ЭГДЛ-10 – это установка закрытого типа с циклическим режимом работы, где техническая вода циркулирует по замкнутому контуру. В нижнюю часть активатора подается рабочая жидкость. Очистка этой жидкости осуществляется с помощью гидроциклонной установки. Загрузка пробы выполняется оператором через откидную крышку сверху. Отмытый минеральный материал выгружается через пневматический пережимной клапан, расположенный в нижней части активатора, в сменный накопитель.

Измельченная фракция и глинистая суспензия покидают активатор через патрубок, расположенный в его верхней части. Размер вымываемых частиц зависит от производительности циркуляционного насоса и диаметра патрубка (настройка режимов осуществляется индивидуально в соответствии с потребностями пользователя). (рис. 5).

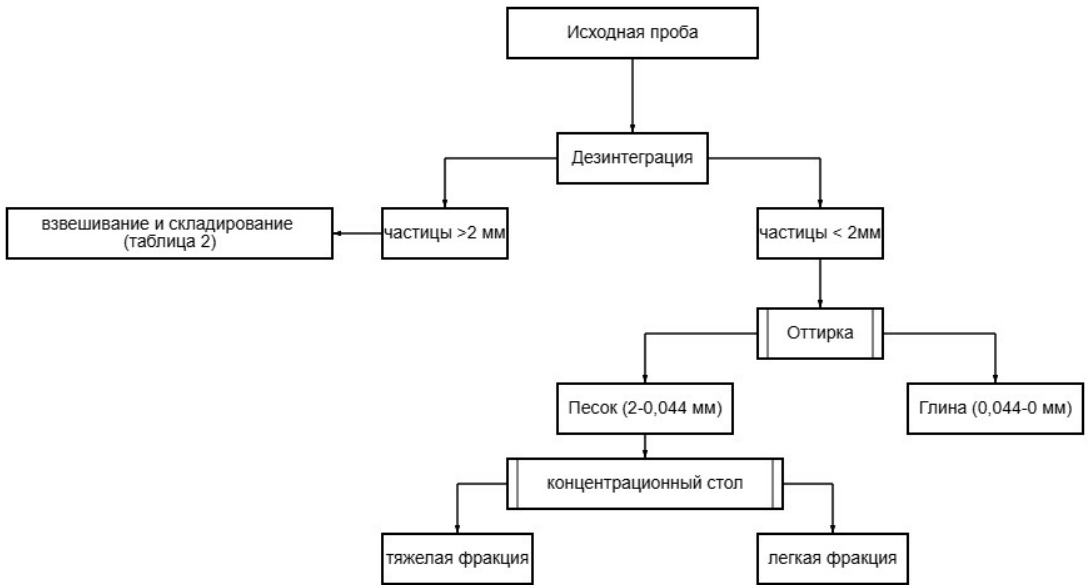


Рис. 5. Схема обработки проб путем дезинтеграции

Fig. 5. Scheme of sample processing by disintegration

Полевые работы

По работам предшественников [11, 12, 13, 14], состав глин данного месторождения является выдержанным по площади с преобладанием каолинита с примесью смешанослойного иллит-сметитового минерала (содержание каолинита в среднем 54-60 %, иллита 32-36 %). Однако исследования проводились на Центральном и Юго-Восточном участках и пробы продуктивной толщи отбирались из бортов действующих на тот момент карьеров.

В ходе полевых работ были отобраны пробы с разрабатываемого Юго-Западного карьера (рис. 6), а также из доступной стенки оработанного Юго-Восточного участка.



Рис.6. Места отбора проб (Карьер Юго-западный, восточная стенка)

Fig.6. Sampling sites (Southwest quarry, eastern wall)

Результаты

Результаты обработки пяти проб (толщи 1-3 Юго-Западного участка, а также борта рекультивированного карьера Юго-Восточного участка) дезинтегратором приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты обработки проб дезинтегратором

Table 2

Results of sample treatment with a disintegrator

№	Образец	Масса исходного образца, г	Масса образцов после дезинтеграции фракция +2 мм, г	Масса образцов после оттирки, г		Концентрационный стол		
				класс 2-0,044 мм	класс <0,044 мм	масса концентрата, г	масса П/П, г	масса хвостов, г
1	Лк-5	8114	381,7	3303	4878	49,5	240,8	2945,7
2	ЛК-Н-3	8962	40	2943	5367	28,4	101	2813,6
3	ЛК-Н-6	9234	53,5	3291,4	6008,7	26,5	206,2	2992,6
4	ЛК-Н-8	7585	74	2295	5334,3	22,9	155,7	2072,1
5	ЛК-Н-10	4194	9,6	1224,7	2982	9,6	545,2	657,2

Для глинистой фракции, выделенной в результате процесса дезинтеграции, был сделан рентгенофлуоресцентный и рентгендифракционный анализы и произведено сравнение с анализами «первичных» пород (таблица 3-4) с целью сделать вывод об эффективности метода дезинтеграции и возможном его применении в промышленных масштабах.

Таблица 3

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа исходных образцов (исх.) и образцов (Дз) из дезинтегратора Лукошкинского месторождения

Table 3

Results of X-ray fluorescence analysis of the initial samples and samples from the disintegrator of the Lukoshkinskoye deposit

№ п/п	Обр.	Описание образца	Хар-ка образца	ППП %	Na ₂ O %	MgO %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	K ₂ O %	TiO ₂ %	P ₂ O ₅ %	Сумма %
1	ЛК-5	Глина светло-серая, чистая, песчаная, не жирная на ощупь	Исх.	5,64	0,19	0,45	26,75	63,08	0,22	0,90	0	1,08	1,22	0,05	99,6
2	ЛК-5		Дз	9,22	0,18	0,53	26,05	57,00	0,32	3,76	0,01	1,28	1,50	0,09	99,9
3	ЛК-п-3	песчанистая глина серовато-бежеватого цвета, рассыпчатая	Исх.	7,15	0,27	0,41	23,25	57,45	0,25	7,81	0	2,02	1,10	0,14	99,9
4	ЛК-п-3		Дз	12,78	0,08	0,51	31,06	47,64	0,52	3,46	0,01	1,04	1,02	0,02	99,8

5	ЛК-Н-6	Глина ожелезненная серовато-бежевого цвета с прослоями оранжевых линз. Жирная на ощупь	Исх.	4,09	0,27	0,43	22,14	69,49	0,14	0,77	0	1,41	0,87	0,05	99,6
6	ЛК-Н-6		Дз	6,32	0,31	0,50	24,80	63,23	0,28	1,27	0	2,01	1,10	0,07	99,9
7	ЛК-Н-8	Глина серовато-розово-желтая, песчаная, жирная на ощупь	Исх.	2,92	0,20	0,22	16,99	76,96	0,08	1,20	0	0,76	0,60	0,05	100,0
8	ЛК-Н-8		Дз	8,04	0,20	0,41	25,77	59,16	0,22	3,23	0,01	1,55	0,97	0,07	99,6
9	ЛК-Н-10	Суглинок серо-коричневый со стяжениями белой хрупкой не жирной глины	Исх.	9,79	0,58	1,46	14,14	64,26	1,73	4,66	0,09	2,14	0,82	0,09	99,8
10	ЛК-Н-10		Дз	11,05	0,58	1,74	15,82	57,22	4,39	6,09	0,04	1,89	0,85	0,05	99,7

Таблица 4

Результаты рентген-дифракционного анализа исходных и отмученных образцов Лукошкинского месторождения

Table 4

Results of X-ray diffraction analysis of the initial and ground samples of the Lukoshkinskoye deposit

№ п/п	Обр.	Хар-ка образца	слюда	смешано-слоистый слюда-сметит	сметит	Хлорит (шамозит)	каолинит	кварц	КПП	Плагио-клас	Анальим	Кальцит	сидерит	гетит	сумма
1	ЛК-5	Исх.	7	0	0	0	36	53	следы	1	0	0	0	3	100
	ЛК-5	Дз	15	0	9	10	46	16	следы	следы	не опр.	0	0	4	100
2	ЛК-Н-3	Исх.	12	4	0	5	17	46	9	1	0	0	0	6	100
	ЛК-Н-3	Дз	4	0	5	7	71	11	следы	следы	не опр.	0	0	2	100
3	ЛК-Н-6	Исх.	14	1	0	0	19	61	2	1	0	0	0	2	100
	ЛК-Н-6	Дз	13	4	0	11	36	26	следы	1	не опр.	0	9	0	100
4	ЛК-Н-8	Исх.	6	0	0	0	22	69	0	1	0	0	0	2	100
	ЛК-Н-8	Дз	14	2	0	6	41	28	1	3	не опр.	0	0	5	100
5	ЛК-Н-10	Исх.	11	0	12	9	16	40	2	4	4	1	0	1	100
	ЛК-Н-10	Дз	8	0	42	1	3	28	1	3	не опр.	9	0	5	100

На основании рентгенофлуоресцентного анализа выявлено, что во всех исследуемых образцах после проведения дезинтеграции наблюдается снижение содержания кремнезёма.

Образец ЛК-5

Минеральный состав исходного образца ЛК-5 характерен для фланга месторождения и включает в себя кварц, каолинит, слюду и малую долю гетита. Анализ минерального состава образца ЛК-5 до и после дезинтеграции демонстрирует резкое уменьшение концентрации кварца, а также выявление новых минералов – хлорита и смектита, которые в исходной породе находились ниже порога обнаружения. Содержание каолинита увеличилось с 36 % до 46 %. По результатам рентгенофлуоресцентного анализа наблюдается незначительное увеличение содержания оксидов кальция, калия и магния. Также наблюдается значительное увеличение содержания оксида железа, в то время как содержание гетита остается относительно стабильным, что свидетельствует о том, что оксид железа не входит в состав «оболочки» кварцевых зёрен, а появляется вследствие присутствия в образце минералов, таких как слюда, хлорит и другие, содержащие железо в своём составе. Это позволяет обнаруживать его с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Удвоение содержания слюды произошло на фоне умеренного снижения доли кварца (с 63 % до 57 %) и кардинальное уменьшение количества кварцевых зёрен (с 53 % до 16 %). Колебание содержания оксида фосфора незначительно (0,05 % и 0,09 %).

Образец ЛК-Н-3

Минеральный состав исходного образца ЛК-Н-3 (толща 1) характеризуется высоким содержанием гетита и, следовательно, оксидов железа, а также присутствием оксидов марганца и калия, обусловленных повышенным содержанием слюды и слюдистых минералов. После дезинтеграции отмечается снижение содержания железа и кварца, что указывает на их взаимосвязь. Также стоит обратить внимание на значительный рост содержания каолинита (с 17 % до 71 %). Гранулометрический анализ фракции 0,044+ мм, полученной после дезинтеграции, показывает, что зерна кварца покрыты корками гетита и лимонита. После дезинтегратора присутствует только смектит, при этом не обнаруживаются смешаннослойные смектит-хлориты и иллит. Также зафиксировано уменьшение количества слюды, что подтверждается результатами рентгенофлуоресцентного анализа. Также хочется отметить значительное сокращение содержания оксида фосфора (0,19 % до 0,02 %).

Образец ЛК-Н-6

Минеральный состав исходного образца ЛК-Н-6 (толща 2) характеризуется высоким содержанием кварца и слюдистых минералов и небольшим содержанием каолинита. В результате дезинтеграции удалось удалить крупнозернистый (кварц с размерами зерен крупнее 0,044 мм) кварц, (содержание упало с 61 % до 26 %), однако значительного увеличения каолинита не последовало (увеличение с 19 % до 36 %). Вместо этого, в результате очистки образца был обнаружен хлорит и сидерит. По результатам XRF анализа наблюдается подтверждение: незначительное увеличение оксида алюминия (с 22,14 до 24,8 %), и незначительное уменьшение оксида кремния (с 69,5 до 63,2 %). Также незначительно увеличилось содержание оксида железа, титана и калия. Колебание содержания оксида фосфора незначительно (0,05 % и 0,06 %).

Образец ЛК-Н-8

Минеральный состав исходного образца ЛК-Н-8 (толща 3) характеризуется высоким содержанием кварца, малым содержанием слюды (6 %) и достаточно малым (1,2 %) содержанием гетита. После процесса дезинтеграции образца минеральный состав достаточно сильно изменился: резко повысилось содержание оксида железа. Увеличение содержания калия, магния и кальция во много раз свидетельствует о наличии мелкозернистой слюды, что подтверждается ростом доли слюдистых минералов в рентген-дифракционной картине (с 6 % до 14 %). Появление хлорита, минералов КППШ и группы плагиоклазов связано с уменьшением содержания кварца, что подчеркивает то, что кварц в образце крупнозернистый и дезинтегратор может его отделить. Почти в два раза (с 22 % до 41 %) зафиксировано повышение содержания каолинита. Колебание содержания оксида фосфора незначительно (0,08 % и 0,05 %).

Образец ЛК-Н-10

В минеральном составе исходного образца, помимо уже ранее встречавшихся минералов (хлоритов, каолинита, кварца, гетита), встречен анальцит и кальцит. В результате дезинтеграции исключен кварц с размерами зерен крупнее 0,044 мм, что позволило выявить по данным рентген-дифракционного анализа присутствие мелких зерен кальцита и повысить долю смектита. Анализы XRF показали увеличение содержания оксидов железа и кальция, в то время как концентрация кремнезема снизилась. В процессе дезинтеграции резко уменьшилось содержание каолинита (с 16 % до 3 %) и хлорита (с 9 % до 1 %). На основании минералогических и химических данных можно заключить, что данная глина преимущественно состоит из смектитовых минералов, а содержание кальцита и гетита существенно, тогда как каолинит практически отсутствует. Колебание содержания оксида фосфора незначительно (0,05 % и 0,09 %).

Результаты и обсуждение

На восточном борту рекультивированного карьера Юго-Восточного участка Лукошкинского месторождения толща глин (образец ЛК-5) содержит крупнозернистый кварц, иногда в рубашках гетитового состава, что подтверждает гранулометрический анализ фракций, полученных в процессе дезинтеграции (фракций 2+ мм (5 %) и фракций 2-0,044 мм (41 %)). Из исходного образца массой 8,15 кг искомого «продуктивного» вещества (класс <0,044 мм) после обогащения дезинтегратором получили 4,8 кг (60,5 % исходного веса). Метод мог бы быть рекомендован к обогащению данной толщи, так как на выходе после дезинтеграции мы получаем чистый каолинит с малым содержанием железа и высокоэффективным отделением кварца.

На Юго-Западном участке Лукошкинского месторождения верхняя толща глин (толща 1, образец ЛК-Н-3) содержит крупнозернистый кварц в рубашках железистых минералов, что подтверждает гранулометрический анализ фракций, полученных в процессе дезинтеграции (фракций 2+ мм (1,1 %) и фракций 2-0,044 мм (38,3 %)). Из исходного образца массой 8,962 кг искомого «продуктивного» вещества (класс <0,044 мм) после обогащения дезинтегратором получили почти 5,4 кг (59,8 % исходного веса). Метод дезинтеграции может быть рекомендован к обогащению данной толщи, так как на выходе после дезинтеграции мы получаем чистый каолинит с малым содержанием железа и высокоэффективным отделением кварца.

Кварц второй толщи глин (образец ЛК-Н-6) представлен чистыми (белыми) зернами без оторочек. Из исходного образца массой 9,234 кг искомого «продуктивного» вещества (класс <0,044 мм) после обогащения дезинтегратором получили почти 6,01 кг (65,1 % исходного веса). Оставшийся материал (фракция 2+ мм (0,6 %) и фракция 2-0,044 мм (34,7 %)). Метод дезинтеграции помог убрать крупнозернистый кварц, однако достаточного обогащения каолинитом данной толщи не произошло из-за высокого содержания мелких (размерность менее 0,044 мм) пластин слюдяных минералов, а также наличия мелкозернистого до алевритистого размеров зерен хлорита и сидерита.

Толща 3 (образец ЛК-Н-8) содержит сростки крупнозернистого кварца с глинистым цементом, что подтверждает гранулометрический анализ фракций, полученных в процессе дезинтеграции (фракций 2+ мм (0,9 %) и фракций 2-0,044 мм (28,9 %)). Из исходного образца массой 7,856 кг искомого «продуктивного» вещества (класс <0,044 мм) после обогащения дезинтегратором получили 5,34 кг (70,3 % исходного веса). Метод дезинтеграции может быть рекомендован к обогащению данной толщи, так как на выходе после дезинтеграции мы получаем чистый каолинит с малым содержанием железа и высокоэффективным отделением кварца.

Неогеновый суглинок, который идет в отвал (образец ЛК-Н-10) содержит мелкозернистый кварц, который тяжело убрать методом дезинтеграции. Гранулометрический анализ фракций 2+ мм (0,23 %) и 2-0,044 мм (28,6 %) это подтверждает. Из исходного образца массой 4,194 кг искомого «продуктивного» вещества (класс <0,044 мм) после обогащения дезинтегратором получили 2,98 кг (71,1 % исходного веса). Более того, после применения метода содержание каолинита упало в 4 раза, что негативно повлияло на возможность практического применения

данных суглинков в керамической промышленности. Метод дезинтеграции оказался не эффективным в данном случае.

Подводя итог, метод дезинтеграции для проб с Лукошкинского месторождения оказался достаточно эффективным. К положительным сторонам можно отнести очищение проб от фракции 2+ мм, хотя ее содержание в данных глинах составляет менее 5 %. В процессе оттирки в соотношении 1:3 были выделены фракции 2-0,044 мм и менее 0,044 мм. На выходе после процесса дезинтеграции получается, что нужная нам фракция глины составляет от 60 % (ЛК-5) до 71 % (ЛК-Н-8). Данный метод позволил эффективно убрать крупноразмерные частицы, которые снижают качество конечной продукции, однако не позволил убрать вредную примесь оксида фосфора, который может быть, как и включен в состав гетита и слюд, так и давать свои собственные минералы, которые не могут быть очищены дезинтегратором из-за размера своих частиц.

Интересна закономерность изменений содержаний оксида железа. На основании гранулометрического анализа наблюдается две формы оксида железа: лимонитовые корочки на кварцевых зернах и более мелкие зерна лимонит-гетита. Значительный рост содержания оксида железа после дезинтеграции при одновременном стабильном уровне гетита указывает на железо в структурных позиции в глинистых минералах.

Уменьшения содержаний кремнезема в результате дезинтеграции, привело к выявлению слюдястых минералов (из-за превышения порога обнаружения) и получить материал для дальнейшей классификации минеральных агрегатов.

В целом, применение дезинтегратора для глинистых пород Лукошкинского месторождения способствовало значительному повышению содержания каолиновой глины – в 3,5 раза, а сама глина стала более очищенной. Вычищение проб от кварца происходит значительно лучше в образцах, где кварц представлен крупнозернистыми агрегатами.

Заключение

Анализ рентгенфлюоресцентного исследования показал, что после дезинтеграции во всех образцах происходит снижение содержания кремнезема, что свидетельствует об эффективности метода для очистки глин Лукошкинского месторождения.

XRD подтверждает уменьшение количества кварца (и в ряде случаев, серьезное уменьшение содержание железа), что положительно влияет на качество глин. В некоторых образцах заметно увеличивается содержание слюды. В отдельных случаях эффективность метода была ниже, например, у образца ЛК-Н-6, где наблюдалось минимальное изменение состава. По всей видимости из-за тонкости зерен всех минеральных фаз.

Метод не позволил решить проблему с исключением вредной примеси оксида фосфора во всех толщах, кроме первой.

Обработка глин Лукошкинского месторождения методом дезинтеграции доказала свою способность улучшить качество исходных пород из двух продуктивных толщ (№ 1 и № 2), где преобладают каолиновые глины и крупнозернистый кварц.

На третьей толще эффективность оценивается как средняя. В случае с третьей толщей из-за обилия слюдястых минералов, иллита и малого количества крупнозернистого кварца.

Неоплейстоценовые суглинки вскрышных пород содержат более сложный состав: содержание каолинита не превышает 12 % и почти такое же количество хлорита, слюд и смектита. Метод обогащения привел к резкому увеличению до 46 % количества смектита, что требует дополнительных исследований по возможному использованию этих пород.

Литература

1. Крайнов А.В., Дмитриев Д.А. Характеристика вещественного состава и строения глинистых пород аптского яруса (Липецкая область, Елецкий район). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2010;(1):296-299.

2. Крайнов А.В., Дмитриев Д.А. Керамические глины кайнозоя Центрально-Черноземного района. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019;(2):81-87.
3. Крайнов А.В. Геология и минерагения керамических и огнеупорных глин аптского яруса Воронежской антеклизы. М.: [б.и.]; 2016. 131 с.
4. Савко А.Д., Новиков В.М., Крайнов А.В. Особенности минерального состава аптских глин Воронежской антеклизы. В кн.: Минеральные индикаторы литогенеза: Материалы Российского совещания с международным участием. Сыктывкар: Геопринт; 2011:229-231.
5. Андреенков В.В. Аптские керамические глины Липецкой области. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2000;10(5):148-158.
6. Крайнов А.В. Вещественный состав керамических глин аптского яруса северной части ЦЧЭР. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015;(2):31-36.
7. Крайнов А.В. Литология и фации аптских отложений северной части ЦЧЭР в связи с поисками керамических глин. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2015;(1):29-40.
8. Савко А.Д., Новиков В.М., Крайнов А.В., Давыдов Д.Н., Ратников В.Ю. Минерагения аптских отложений Воронежской антеклизы. Статья 1. Огнеупорные и керамические глины. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2011;(2):116-136.
9. Савко А.Д. Минералого-генетическая характеристика аптских глин северного склона Воронежской антеклизы. В кн.: Литология и стратиграфия осадочного чехла Воронежской антеклизы. Вып. 4. Воронеж; 1977:3-10.
10. Семенов В.Ф. К минералогии аптских глин Липецкой области. В кн.: Геологический сборник. Труды ВГУ. Воронеж; 1963;62:158-166.
11. Савко А.Д. Историческая геология: учебное пособие. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2006. 450 с.
12. Неверов И.А., Орешкин В.П. Отчет о поисково-разведочных работах на Лукошкинском месторождении тугоплавких глин и железных руд, проведенных в 1963–65 гг. Липецк; 1965.
13. Крайнов А.В., Татьяначенко Т.В. Аптские глины континентальных и прибрежно-морских обстановок на примере Большекарповского и Лукошкинского месторождений. В кн.: Материалы Всероссийского совещания, посвященного 100-летию основателя Ленинградской литологической школы Льва Борисовича Рухина. Санкт-Петербург; 2012;1:209-211.
14. Крайнов А.В. Сравнительная характеристика аптских глин континентальных и прибрежно-морских обстановок на примере Большекарповского и Лукошкинского месторождений. В кн.: Актуальные проблемы геологии, прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых: Материалы Международной научно-практической конференции (17–23 сент. 2012 г., Симферополь–Судак). К.: Академперіодика; 2012:106-108.
15. Словогородский С.А. Определение возможности обогащения глин флангов Лукошкинского месторождения керамических глин Липецкой области методом дезинтеграции. В кн.: Геология в развивающемся мире: Сборник научных трудов по материалам XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пермь: Изд-во ПГНИУ; 2018:24-29.

References

1. Kraynov A.V., Dmitriev D.A. Characteristics of the material composition and structure of clayey rocks of the Aptian stage (Lipetsk region, Yelets district). *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2010;(1):296–299 (in Russian).
2. Kraynov A.V., Dmitriev D.A. Cenozoic ceramic clays of the Central Black Earth Region. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2019;(2):81–87 (in Russian).
3. Kraynov A.V. *Geology and minerageny of ceramic and refractory clays of the Aptian stage of the Voronezh anteclyse*. Moscow; 2016:131 (in Russian).
4. Savko A.D., Novikov V.M., Kraynov A.V. Features of the mineral composition of Aptian clays of the Voronezh anteclyse. In: *Mineral indicators of lithogenesis: Proceedings of the Russian meeting with international participation*. Syktyvkar: Geoprint; 2011:229–231 (in Russian).
5. Andreenkov V.V. Aptian ceramic clays of the Lipetsk region. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2000;10(5):148–158 (in Russian).

6. Kraynov A.V. Material composition of ceramic clays of the Aptian stage of the northern part of the Central Black Earth Region. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2015;(2):31–36 (in Russian).
7. Kraynov A.V. Lithology and facies of the Aptian deposits of the northern part of the Central Black Earth Region in relation to the prospecting for ceramic clays. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2015;(1):29–40 (in Russian).
8. Savko A.D., Novikov V.M., Kraynov A.V., et al. Minerageny of the Aptian deposits of the Voronezh antecline. Article 1. Refractory and ceramic clays. *Vestnik of Voronezh State University. Series: Geology*. 2011;(2):116–136 (in Russian).
9. Savko A.D. Mineralogical and genetic characteristics of the Aptian clays of the northern slope of the Voronezh antecline. In: *Lithology and stratigraphy of the sedimentary cover of the Voronezh antecline*. Issue 4. Voronezh; 1977:3–10 (in Russian).
10. Semenov V.F. On the mineralogy of Aptian clays of the Lipetsk region. In: *Geological collection. Proceedings of Voronezh State University*. Voronezh; 1963;62:158–166 (in Russian).
11. Savko A.D. *Historical geology: a textbook*. Voronezh: Voronezh State University; 2006:450 (in Russian).
12. Neverov I.A., Oreshkin V.P. *Report on prospecting and exploration work at the Lukoshkinskoye deposit of refractory clays and iron ores, carried out in 1963–65*. Lipetsk; 1965 (in Russian).
13. Kraynov A.V., Tat'yanchenko T.V. Aptian clays of continental and coastal-marine settings: the example of the Bolshekarповskoye and Lukoshkinskoye deposits. In: *Proceedings of the All-Russian Conference dedicated to the 100th anniversary of the founder of the Leningrad lithological school, Lev Borisovich Rukhin*. St. Petersburg; 2012;1:209–211 (in Russian).
14. Kraynov A.V. Comparative characteristics of Aptian clays of continental and coastal-marine settings: the example of the Bolshekarповskoye and Lukoshkinskoye deposits. In: *Actual problems of geology, forecasting, prospecting, and evaluation of solid mineral deposits: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, Sept. 17–23, 2012, Simferopol–Sudak. Kyiv: Akademperiodika; 2012:106–108 (in Russian).
15. Slovgorodsky S.A. Determination of the feasibility of enriching clays from the flanks of the Lukoshkinskoye ceramic clay deposit in the Lipetsk region by the disintegration method. In: *Geology in the developing world: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates, and young scientists*. Perm: Publishing House of PSNRU; 2018:24–29 (in Russian).

Сведения об авторах

СЛОВГОРОДСКИЙ Семен Андреевич – аспирант кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, ORCID: 0009-0009-3289-476X, Researcher ID: 517630924

E-mail: slovgorodskiy@my.msu.ru

БОГУСЛАВСКИЙ Михаил Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. ORCID: 0000-0003-0133-7185, Researcher ID: 3356995

E-mail: mboguslavskiy@yandex.ru

Author Information

Semyon A. SLOVGORODSKIY – Postgraduate student, Department of Geology, Geochemistry, and Mineral Economics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0009-0009-3289-476X, Researcher ID: 517630924

E-mail: slovgorodskiy@my.msu.ru

Mikhail A. BOGUSLAVSKIY – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Department of Geology, Geochemistry, and Mineral Economics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0133-7185, Researcher ID: 3356995

E-mail: mboguslavskiy@yandex.ru

Вклад авторов

Словгородский С.А. – разработка концепции, проведение статистического анализа, проведение исследования, визуализация.

Богуславский М.А. – методология, руководство исследованием.

Authors' contribution

Semyon A. Slovogorodskiy – conceptualization, formal analysis, investigation, visualization.

Mikhail A. Boguslavskiy – methodology, supervision.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 06.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 15.05.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОИСКАХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

Е.Э. Соловьев^{1}, И.И. Саввинов¹, А.А. Федоров², М.А. Федоров²*

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
г. Якутск, Российская Федерация

*solov.evg@yandex.ru

Аннотация. Обеспечение населения качественным питьевым и хозяйственно-бытовым водоснабжением является важной государственной задачей и определяет социально-экономическое благополучие страны. В настоящее время, потребность в дополнительных водных ресурсах испытывают населенные пункты Центральной Якутии. Поэтому актуальным становится поиск и использование подземных источников для бесперебойного снабжения населенных пунктов водой.

В настоящей статье рассмотрены результаты геофизических исследований методом переходных процессов при поисках подземных вод в Центральной Якутии в условиях криолитозоны. Обосновано применение индуктивной импульсной электроразведки в условиях криолитозоны. Объектом изучения являлся локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный-верхнеюрский терригенный водоносный комплекс (Q-J3), распространенный под руслами р. Лена и её наиболее крупных притоков в пределах подрусловых таликов. Геофизические исследования проведены в пределах группы озер Маччия, расположенных на территории Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия).

Зондирование методом переходных процессов выполнено в профильном режиме в соосном варианте «Q-q». По результатам электроразведочных работ построены геоэлектрические разрезы. Установлено, что разрез изучаемой площади имеет однотипное геоэлектрическое строение. Разрезы имеют выраженный горизонтально-слоистый характер и состоят из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости. По результатам обработки и интерпретации электроразведочных работ проведено бурение заверочной скважины НБТ-1 для получения более подробной информации о геологическом строении исследуемой территории. Сопоставление данных бурения и электроразведки показало высокую сходимость. Анализ геофизических данных показал, что водонасыщенные горизонты в пределах изучаемой площади выделяются пониженными значениями кажущейся продольной проводимости.

Ключевые слова: Электроразведка, зондирование методом переходных процессов, геоэлектрические разрезы, аномалии, подземные воды, водоносные горизонты

Для цитирования: Соловьев Е.Э., Саввинов И.И., Федоров А.А., Федоров М.А. Применение метода переходных процессов при поисках подземных вод в Центральной Якутии. *Вестник СВФУ*. 2026;(2): 33-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-33-43

APPLICATION OF THE TRANSIENT ELECTROMAGNETIC FIELD SOUNDING IN THE PROSPECTING OF GROUNDWATER IN CENTRAL YAKUTIA

Evgeny E. Solovyov^{1}, Innokenty I. Savvinov¹, Aleksey A. Fedorov², Mikhail A. Fedorov²*

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russian Federation

²P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
Yakutsk, Russian Federation

*solov.evg@yandex.ru

Abstract. Providing the population with high-quality drinking and household water supply is an important state task and determines the socio-economic well-being of the country. Currently, the need for additional water resources is being experienced by the settlements of Central Yakutia. Therefore, it is becoming urgent to search for and use underground sources for uninterrupted supply of water to settlements.

This article discusses the results of geophysical studies using the transient electromagnetic field sounding in the search for groundwater in Central Yakutia in the cryolithozone. The reasons for the use of inductive pulse electrical exploration in cryolithozone conditions are given. The object of study was the locally aquiferous cryogenic-talic Quaternary-Upper Jurassic terrigenous aquifer complex (Q-J3), distributed under the beds of the Lena River and its largest tributaries within the subsurface talics. The geophysical studies were carried out within the Machchia group of lakes located on the territory of the Megino-Kangalassky district of the Sakha Republic (Yakutia).

The transient electromagnetic field sounding is performed in profile mode in the coaxial “Q-q” version. Geoelectric sections were constructed based on the results of electrical exploration. It was established that the section of the studied area has the same type of geoelectric structure. The sections have a pronounced horizontally layered character and consist of alternating electrical anomalous layers with different values of apparent longitudinal conductivity. Based on the results of the processing and interpretation of the electrical exploration work, the NBT-1 test well was drilled to obtain more detailed information about the geological structure of the studied area. A comparison of drilling and electrical exploration data showed high convergence. An analysis of the geophysical data showed that the water-saturated horizons within the studied area are distinguished by reduced values of apparent longitudinal conductivity.

Keywords: Electrical prospecting, transient electromagnetic field sounding, geoelectric sections, anomalies, groundwater, aquifers

For citation: Solovyov E.E., Savvinov I.I., Fedorov A.A., Fedorov A.M. Application of the method of transient processes in the prospecting of groundwater in Central Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences.* 2026;(2): 33-43. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-33-43

Введение

Обеспечение населения качественным питьевым и хозяйственно-бытовым водоснабжением является важной государственной задачей и определяет социально-экономическое благополучие страны. В настоящее время, потребность в дополнительных водных ресурсах испытывают населенные пункты Центральной Якутии, где невозможно организовать надежное водоснабжение за счет поверхностных вод из-за сезонности стока малых рек и высокой подверженности загрязнению водотоков и водоемов. Поэтому актуальным становится поиск и использование подземных источников для бесперебойного обеспечения населенных пунктов водой.

Поиски водоносных горизонтов, опирающиеся на исключительно геологическое картирование и поисковое бурение сопряжены с высокой стоимостью и локальностью полученных данных. Для получения детальной и непрерывной информации о гидрогеологической обстановке исследуемых площадей широко применяются геофизические методы разведки, преимущество которых заключается в оперативности, экологической безопасности и минимальных затратах.

Ведущая роль при поисках и локализации водовмещающих структур в различных геолого-гидрогеологических условиях отводится электроразведке методами сопротивлений, характеризующихся высокой чувствительностью к изменению водонасыщенности, пористости, трещиноватости и минерализации [1]. К недостаткам традиционных контактных методов электроразведки на постоянном токе относятся низкая эффективность из-за экранирующего влияния непроводящих мерзлых пород, влияния сезонной геоэлектрической изменчивости состояния деятельного слоя, большие трудозатраты на осуществление гальванического контакта электродов на сухих или мерзлых приповерхностных отложениях, а также недостаточной глубинности и детальности исследований [2].

В связи с этим, при поисках подземных вод внимание привлекает зондирование методом переходных процессов [3, 4]. Достоинства метода заключаются в отсутствии необходимости заземления, высокой чувствительности по отношению к проводникам, перекрытых слабопроводящими экранами и значительной глубине зондирования [5, 6].

В настоящей статье представлены результаты электроразведочных исследований при поисках подземных вод для решения проблем водоснабжения п. Нижний Бестях Мегино-Кангаласского района Республики Саха (Якутия).

Объект исследований

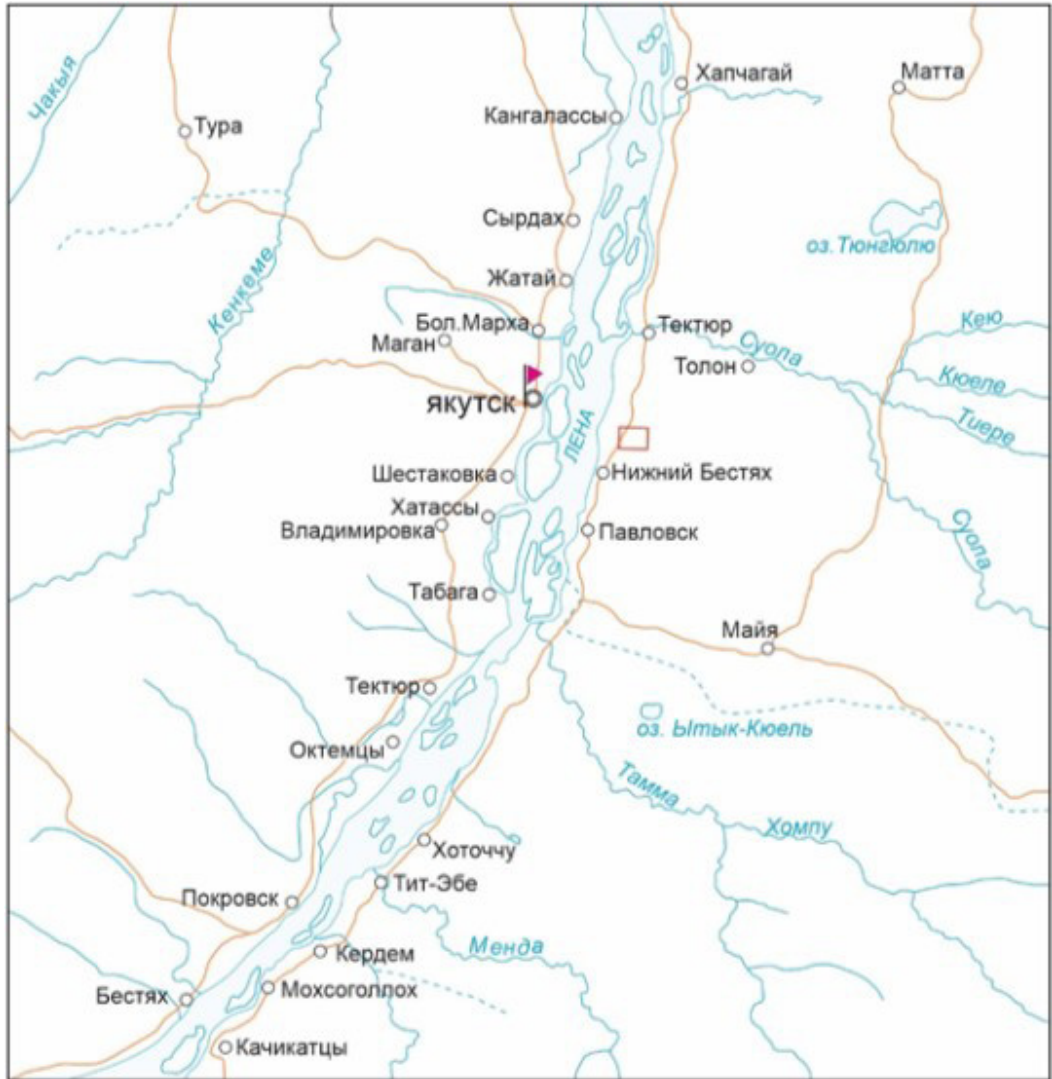
Исследуемая территория расположена на правом берегу в пределах Мегино-Кангаласского района (рис. 1). В орографическом отношении площадь работ расположена в пределах Центрально-Якутской низменности. Рельеф территории района представлен эрозионно-аккумулятивным типом, который сформировался в результате аккумулятивной деятельности постоянного водного потока – р. Лены. Климат резко континентальный. Продолжительная холодная зима и низкие среднегодовые температуры воздуха обуславливают глубокое промерзание осадочных толщ и наличие многолетнемерзлых пород.

Объектом изучения является локально-водоносный криогенно-таликовый четвертичный-верхнеюрский терригенный водоносный комплекс (Q-J₃), распространенный под руслами р. Лена и её наиболее крупных притоков в пределах подрусловых таликов, а также под озерными и аласными котловинами по обоим берегам р. Лены. Водовмещающими породами являются отложения четвертичного и юрского возраста, составляющие единые комплексы, объединенные общностью условий формирования и питания таликовых вод. Питание таликовых водоносных комплексов осуществляется за счет инфильтрации речных и озерных вод. Этим объясняется высокое положение статических уровней подземных вод, привязанных к уровням рек и озер, а также их сезонные колебания.

Методика исследований

Зондирование методом переходных процессов (ЗМП) применяется для поисков проводящих объектов. Сущность метода основана на изучении переходного процесса после пропускания через генераторную петлю П-образных импульсов длительностью в несколько миллисекунд. После подачи импульса тока в незаземленную петлю, включается приемная петля, где с помощью измерительного прибора исследуют характер изменения переходного процесса в интервале от 0 до 0,1 с. При наличии проводящего объекта в зоне действия питающего устройства, после выключения тока в нем индуцируются вихревые токи, которые в первоначальный момент возникают на его поверхности и далее распространяются к его центру, постепенно затухая. Затухание происходит за счет тепловых потерь, которые увеличиваются с ростом удельного сопротивления объекта. Этот процесс носит название становление поля в земле, а зависимость напряжения в измерительной петле от времени, прошедшего с момента переключения тока в питающей петле – кривой становления поля.

Таким образом, чем больше его проводимость, тем медленнее в нем происходит затухание вторичных вихревых токов [7, 8]. Переменное магнитное поле вторичных токов индуцирует в приемной петле электродвижущую силу (ЭДС). Причем ЭДС в приемной петле пропорционально скорости изменения магнитного потока.



Условные обозначения

- | | |
|-----------------|-------------------|
| ○ Нижний Бестях | населенные пункты |
| | реки и ручьи |
| | автодороги |
| | территория работ |

Рис. 1. Обзорная карта района проведения исследований

Fig. 1. Overview map of the research area

Зондирование методом переходных процессов выполнено в профильном режиме в соосном варианте «Q-q» (геометрические центры приемной и генераторной петель совпадают). При выполнении исследований применялись генераторные петли с разными геометрическими моментами. Для изучения приповерхностной части разреза до глубины 20 м использовалась петля с малой размерностью 7,5 x 7,5 м. Исследования более глубоких горизонтов до 100 м проведены с генераторной петлей с геометрическим моментом 25x25 м. Применяемая аппаратура – телеметрическая станция Импульс-Десант [9].

Работы проведены при следующих параметрах: период импульса подаваемого тока – 10 мс, сила тока – 10 А, момент приемной петли – 20 м², размеры генераторной петли составляли 56 и 625 м². Для исключения случайных ошибок, количество накоплений сигналов на одной точке зондирования составляло 32 измерения. Синхронизация между генератором и измерителем проводилась через GPS-приемники.

Камеральная обработка и интерпретация полевых материалов проводилась с помощью компьютерной программы «АВС» (разработчик ООО «СибГеоТех») и включала следующие итерации:

- визуализацию геофизических измерений;
- экспресс-анализ данных с отбраковкой и фильтрацией кривых ЭДС;
- вычисление координат точек наблюдений;
- построение схемы обработки участка;
- построение геоэлектрических разрезов S_{τ} ;
- сопоставление геоэлектрических разрезов с данными бурения.

Основу параметрической интерпретации и решения обратной задачи составляет трансформация поля в функции кажущейся продольной проводимости S (S_t) и глубины ее залегания (H_t), предложенная В.А. Сидоровым, В.В. Тикшаевым [4, 10].

$$\text{Плоскость } S$$

$$S_{\tau} = \frac{2}{\mu_0} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot Mg \cdot Mi \cdot \mu_0} \right)^{1/3} \cdot \left[\frac{t_{i+1} - t_i}{\frac{1}{(E_{i+1})^{1/2}} - \frac{1}{(E_i)^{1/4}}} \right]^{4/3}, \quad (1)$$

$$h_{\tau} = \left[\frac{3 \cdot Mg \cdot Mi}{16 \cdot \pi \cdot S \cdot \varepsilon_i} \right]^{1/4} - \frac{t_i}{\mu_0 \cdot S}, \quad (2)$$

$$H_s = k \cdot \left(h_{\tau} + \frac{t}{\mu_0 \cdot S} \right), \quad (3)$$

$$H_m = k \cdot \sqrt{\rho_{\tau} \cdot t}, \quad (4)$$

где $Mg = Sg \cdot n_g \cdot (M^2)$ – момент генератора, $Mi = Si \cdot n_i \cdot (M^2)$ – момент измерителя, t – время (с), $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\pi = 3.1415\dots$, E – ЭДС (В), k – некоторый коэффициент, определяемый экспериментально, h_{τ} – кажущаяся глубина (м), H_s – текущая глубина зондирования (м), H_m – текущая глубина для полупространства (м).

Результаты и обсуждение

Геофизические исследования методом ЗМПП выполнены в пределах группы озер Маччия на 9 профилях по сети наблюдений 100 x 25 м (рис. 2). По результатам электроразведочных работ построены геоэлектрические разрезы. Анализ геофизических материалов показал, что

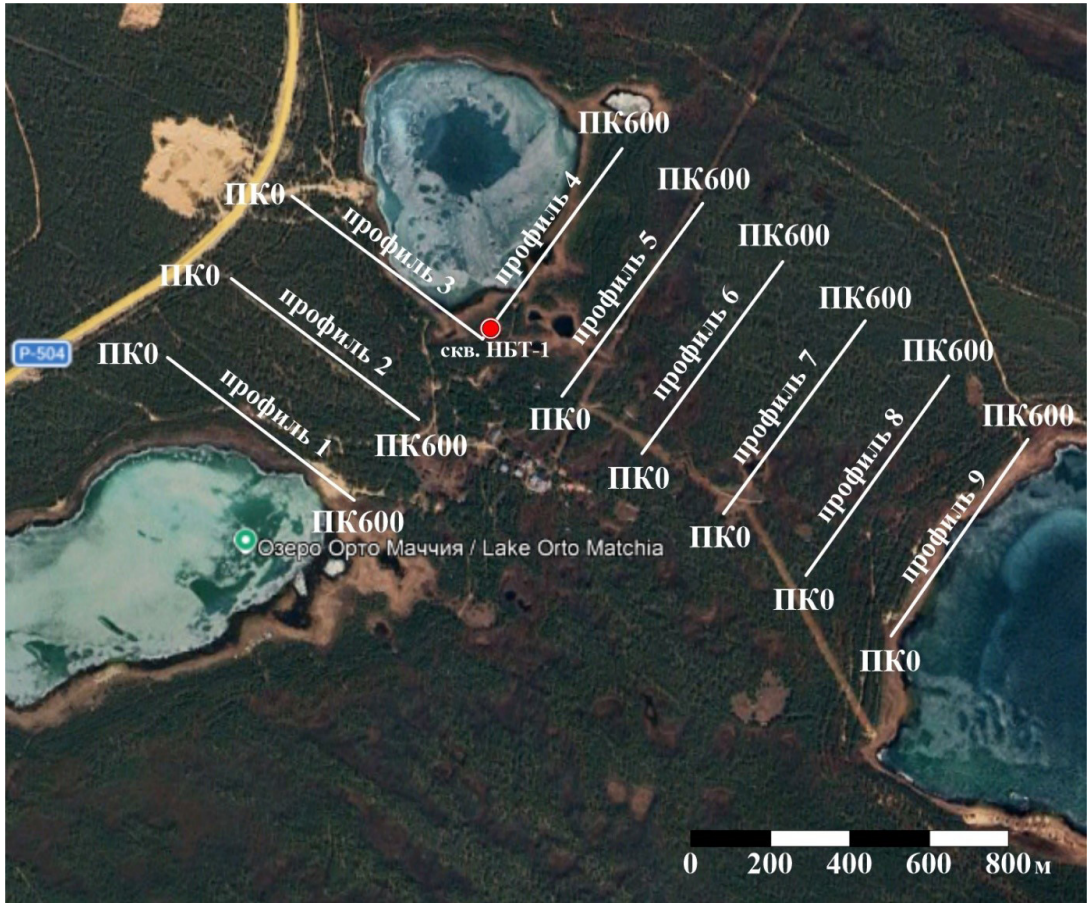


Рис. 2. Схема геофизических профилей (карты Google Earth)

Fig. 2. The scheme of geophysical profiles (Google Earth maps)

приповерхностная часть разреза изучаемой площади имеет однотипное геоэлектрическое строение (рис. 3). Разрезы имеют выраженный горизонтально-слоистый характер и состоят из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости.

Слои с пониженными значениями продольной проводимости 0,72-0,8 мСм/м фиксируются в интервалах глубин 7,8-10 м и от 15 до 17 м и ниже. Слой повышенных значений продольной проводимости интенсивностью 1-1,12 отмечается, в основном, в интервалах глубин 10,5 – 14,8 м.

Геоэлектрические разрезы в интервале глубин 20 – 100 м в пределах изученной площади характеризуются двухслойным строением (рис. 4). В верхней части разрезов повсеместно фиксируется геоэлектрический слой с пониженными значениями кажущейся продольной проводимости интенсивностью 0,25-0,35 мСм/м. Глубина залегания нижней границы данного геоэлектрического слоя изменяется, в основном, от 56 до 73 м. Исключение составляет профиль 7, где подошва описываемого геоэлектрического слоя фиксируется на глубине 93 м.

Нижний слой представлен геоэлектрическими аномалиями пониженных значений кажущейся продольной проводимости, значения которых варьируют от 1,3 до 6,8 мСм/м.

По результатам обработки и интерпретации электроразведочных работ выбрано место заложения заверочной скважины НБТ-1 на профиле 4 пикете 25 для получения более подробной информации о геологическом строении исследуемой территории. Сопоставление геоэлектрических разрезов по данным ЗМПП с данными бурения представлены на рисунках 5 и 6.

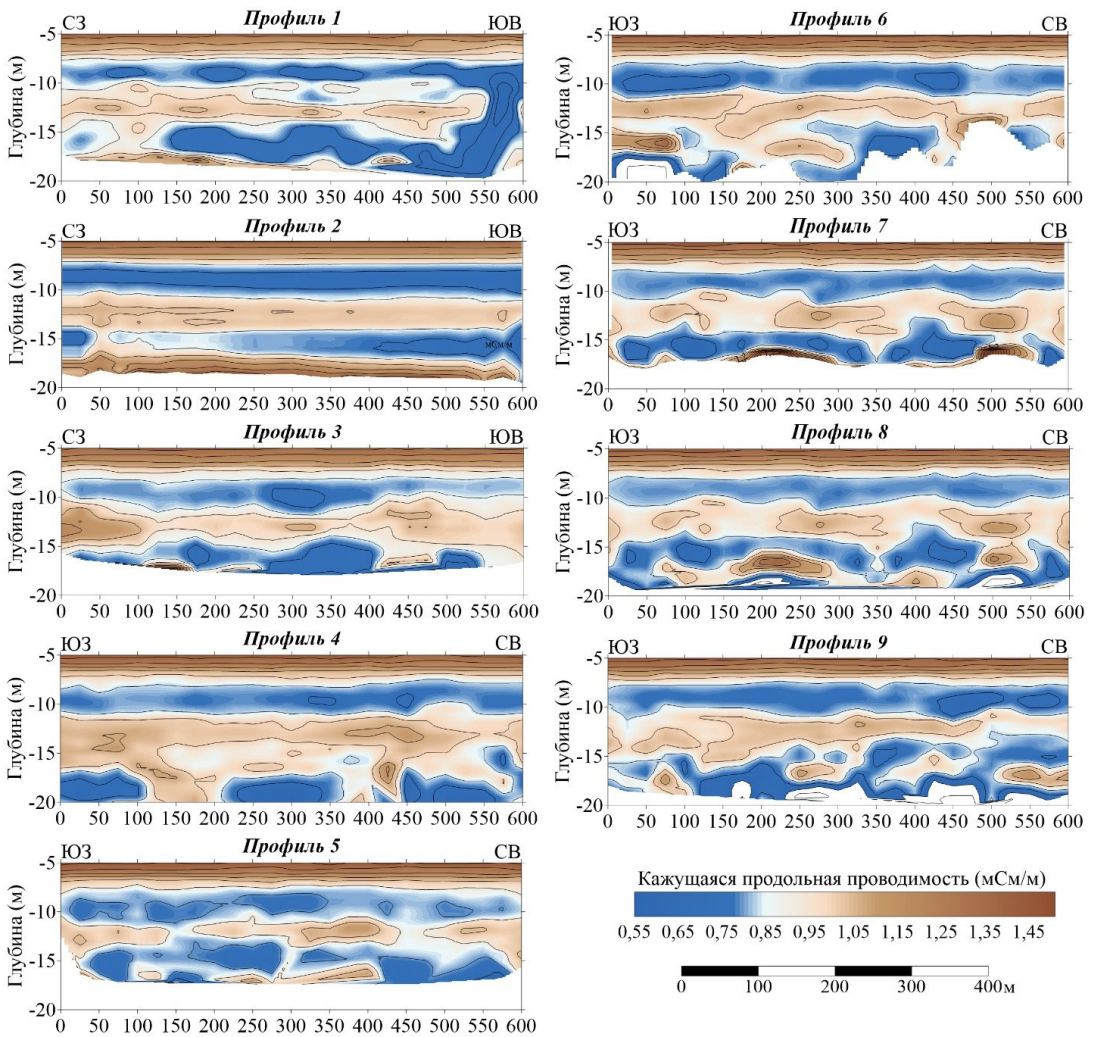


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы кажущейся продольной проводимости S_r (при $Q = 7,5 \times 7,5$ м)

Fig. 3. Geoelectric sections of apparent longitudinal conductivity (at $Q = 7.5 \times 7.5$ m)

Полученные электрометрические характеристики приповерхностной части разреза коррелируются с материалами пробуренной скважины НБТ-1 (рис. 5). Верхняя часть разреза, представленная крупнозернистыми, водонасыщенными песками до глубины 16 м отмечается значениями кажущейся продольной проводимости 0,82-1,26 мСм/м. Нижележащий слой, сложенный крупнозернистыми полевошпатово-кварцевыми песками не содержащих воду, фиксируется низкими значениями продольной проводимости 0,75-0,86 мСм/м.

Результаты зондирования более глубоких горизонтов до 100 м также показали хорошую сходимость с данными бурения по скважине НБТ-1 (рис. 6). Верхняя часть разреза, представленная водонасыщенными четвертичными отложениями, отмечается пониженными значениями продольной проводимости 0,32-0,42 мСм/м.

В нижнем интервале глубин 71-100 м разрез представлен верхнеюрским комплексом, состоящим из алевролитов и песчаников, которые характеризуются повышенными значениями кажущейся продольной проводимости 0,9-1,69 мСм/м.

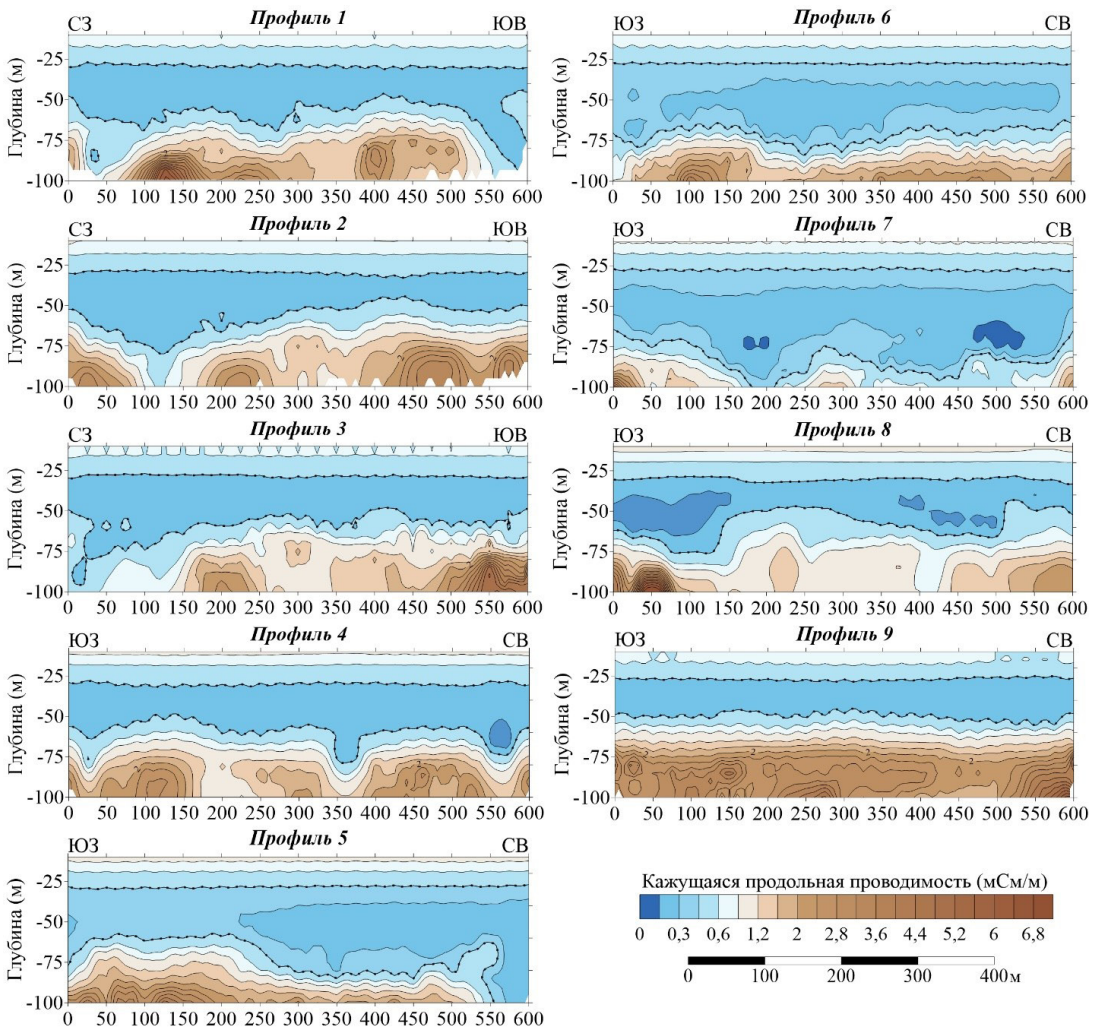


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы кажущейся продольной проводимости S_{τ} (при $Q=25 \times 25$ м)

Fig. 4. Geoelectric sections of apparent longitudinal conductivity (at $Q=25 \times 25$ m)

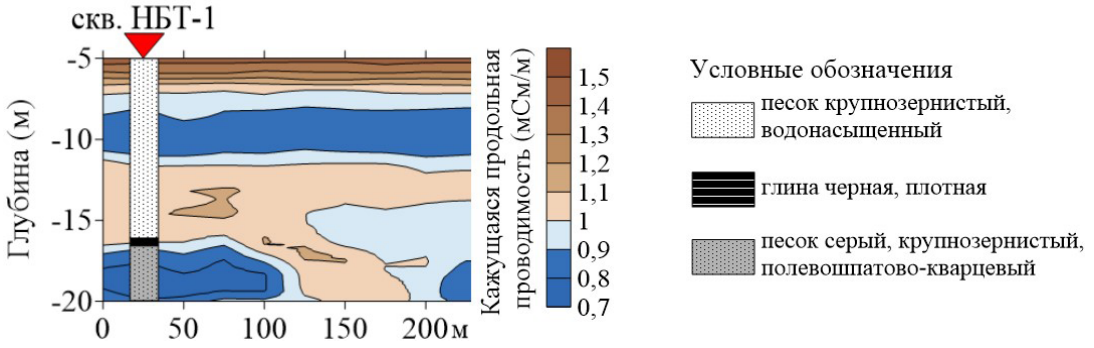


Рис. 5. Сопоставление геоэлектрических разрезов с данными бурения (скважина НБТ-1) по профилю 4

Fig. 5. Comparison of geoelectric sections with drilling data (NBT-1 well) according to profile 4

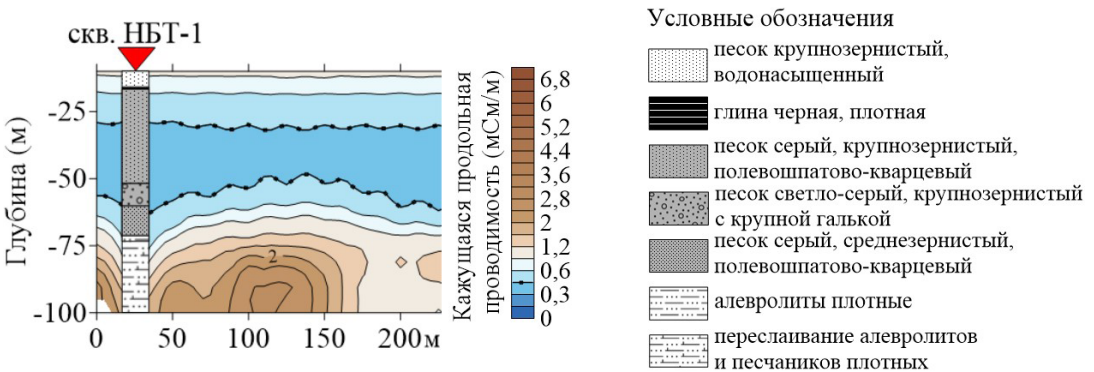


Рис. 6. Сопоставление данных МПП с геологическими данными по профилю 4 (при Q=25x25 м)

Fig. 6. Comparison of MPP data with geological data on profile 4 (at Q=25x25 m)

Заключение

Проведенные геофизические исследования в пределах группы озер Мачтия подтвердили высокую эффективность метода ЗМПП при поисках подземных вод в Центральной Якутии в условиях криолитозоны.

Приповерхностная часть разреза до глубины 20 м характеризуется горизонтально-слоистым строением и состоит из чередования электрических аномальных слоев с различными значениями кажущейся продольной проводимости. Геоэлектрические разрезы в интервале глубин 20 – 100 м в пределах изученной площади имеют двухслойное строение. До глубины 71 м повсеместно фиксируется геоэлектрический слой с пониженными значениями кажущейся продольной проводимости интенсивностью 0,32-0,42 мСм/м. Ниже залегающие породы верхнеюрского комплекса выделяются повышенными значениями кажущейся продольной проводимости 0,9-1,69 мСм/м.

По результатам обработки и интерпретации материалов ЗМПП определено место заложения заверочной скважины НБТ-1. Сопоставление данных бурения и электроразведки показало высокую сходимость. В ходе комплексного анализа геолого-геофизических материалов установлено, что водонасыщенные горизонты в пределах изучаемой площади выделяются низкими значениями проводимости.

Литература

1. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. М.: Недра; 1990. 436 с.
2. Ним Ю.А. Зондирования методом переходных процессов при исследовании криолитозоны: Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Иркутск. 1991. 39 с.
3. Ним Ю.А., Федоров А.М. Зондирование методом переходных процессов при поисках и картографировании криопэггов. В кн.: Мерзлотно-гидрогеологические исследования зоны свободного водообмена. Москва; 1989:112-125.
4. Ним Ю.А., Омеляненко А.В., Стогний В.В. Импульсная электроразведка криолитозоны. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ; 1994. 188 с.
5. Матвеев Б.К. Интерпретация электромагнитных зондирований. М.: Недра; 1974. 232 с.
6. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Захаркин А.К., Корсаков М.А. Поиск таликов методом ЗСБ в условиях интенсивного проявления индукционно-вызванной поляризации. *Геология и геофизика*. 2014;55(12):1815-1827.
7. Булгаков Ю.И., Вакульский А.А., Велиник А.Б., и др. Руководство по применению метода переходных процессов в рудной геофизике. Л.: Недра; 1976. 128 с.
8. Соловьев Е.Э., Фридовский В.Ю., Адаров Т.Д., и др. Электромагнитные исследования гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны. *Горный журнал*. 2012;(12):21-26.
9. Тригубович Г.М. Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования. *Разведка и охрана недр*. 2007;(8):80-87.
10. Сидоров В.А., Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Саратов: Изд-во Нижневолжского НИИГиГ; 1969. 68 с.

References

1. Ogilvy A.A. *Fundamentals of engineering geophysics*. Moscow: Nedra; 1990:436 (in Russian).
2. Nim Yu.A. *Probing by the transient process method in the study of permafrost*: Summary of Doctoral dissertation (Geology and Mineralogy). Irkutsk. 1991:39 (in Russian).
3. Nim Yu.A., Fedorov A.M. Probing by the transient process method in the search and mapping of cryopegs. In: *Permafrost and hydrogeological studies of the zone of free water exchange*. Moscow; 1989:112–125 (in Russian).
4. Nim Yu.A., Omelianenko A.V., Stogniy V.V. *Pulsed electrical exploration of the cryolithozone*. Novosibirsk: SB RAS Research Center OIGGM; 1994:188 (in Russian).
5. Matveev B.K. *Interpretation of electromagnetic soundings*. Moscow: Nedra; 1974:232 (in Russian).
6. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Zakharkin A.K., Korsakov M.A. Search for taliks by the ZSB method in conditions of intense manifestation of induction-induced polarization. *Geology and Geophysics*. 2014;55(12):1815–1827 (in Russian).
7. Bulgakov Yu.I., Vakulsky A.A., Velinik A.B., et al. *Guidelines for the application of the transient process method in ore geophysics*. Leningrad: Nedra; 1976:128 (in Russian).
8. Soloviev E.E., Fridovsky V.Yu., Adarov T.D., et al. Electromagnetic studies of hydraulic structures in permafrost conditions. *Mining Journal*. 2012;(12):21–26 (in Russian).
9. Trigubovich G.M. Innovative exploration and evaluation technologies of electrical prospecting by the field formation of air and ground basing. *Exploration and Protection of Mineral Resources*. 2007;(8):80–87 (in Russian).
10. Sidorov V.A., Tikshaev V.V. *Electrical prospecting by field formation in the near zone*. Saratov: Publishing House of the Nizhnevolzhsky Research Institute of Geology and Geophysics; 1969:68 (in Russian).

Сведения об авторах

СОЛОВЬЕВ Евгений Эдуардович – кандидат геолого-минералогических наук, проректор по научной и инновационной деятельности СВФУ, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN-код: 7748-1230, AuthorID: 144694

САВВИНОВ Иннокентий Иннокентьевич – старший преподаватель ГРФ СВФУ, SPIN-код: 1021-9050, AuthorID: 1072638

ФЕДОРОВ Алексей Альбертович – научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН, ORCID 0009-0001-2238-0548; Scopus ID: 60025099500;

ФЕДОРОВ Михаил Альбертович – научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН, ORCID 0009-0005-6075-4634; Scopus ID: 60025264600; eLIBRARY ID: 73346421

About the authors

Evgeny E. SOLOVYOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Vice-Rector for Research and Innovation, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0000-0002-3596-2272; Scopus ID: 57208142215; SPIN code: 7748-1230, AuthorID: 144694

Innokenty I. SAVVINOV – Senior lecturer, Faculty of Geology and Survey, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN code: 1021-9050, AuthorID: 1072638

Aleksey A. FEDOROV – Researcher at the Laboratory of Groundwater and Geochemistry of Cryolithozones, Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0009-0001-2238-0548; Scopus ID: 60025099500

Mikhail A. FEDOROV – Researcher, Laboratory of Groundwater and Geochemistry of Cryolithozones, Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID 0009-0005-6075-4634; Scopus ID: 60025264600; eLibrary ID: 73346421

Вклад авторов

Соловьев Е.Э. – разработка концепции, проведение исследования, редактирование рукописи.

Саввинов И.И. – проведение статистического анализа, визуализация/представление данных.

Федоров А.А. – проведение исследования, редактирование рукописи.

Федоров М.А. – проведение исследования, редактирование рукописи.

Authors' contribution

Evgeny E. Solovyov – concept development, research, manuscript editing.

Innokenty I. Savvinov – conducting statistical analysis, visualization/presentation of data.

Aleksey A. Fedorov – research, manuscript editing.

Mikhail A. Fedorov – research, manuscript editing.

Конфликт интересов

Один из авторов – Соловьев Евгений Эдуардович является членом редакционного совета журнала «Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Conflict of interests

One of the authors, Evgeny Solovyov, is a member of the editorial board of the journal “Vestnik of North-Eastern Federal University”. The authors are unaware of any other potential conflict of interest related to this manuscript.

Поступила в редакцию / Submitted 18.05.2026

Поступила после рецензирования / Revised 10.06.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026

ГЕОГРАФИЯ

УДК 528.94

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-44-67>

Оригинальная научная статья

A SPATIAL ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL VULNERABILITY
IN THE AKHANGARAN RIVER BASIN, UZBEKISTAN*Ruslan N. Khadzhaev*^{1*}, *Dilbarkhon Sh. Fazilova*²¹ Islam Karimov Tashkent State Technical University,
Tashkent, Uzbekistan² Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences,
Tashkent, Uzbekistan

*ruslankhadzhaev@gmail.com

Abstract. In the context of increasing anthropogenic pressure and the need for objective environmental monitoring, spatial assessment of ecological vulnerability that takes into account natural and technogenic factors has become an important scientific task. The aim of this study was to assess the ecological vulnerability of the Akhangaran River Basin (Uzbekistan) using a comprehensive geographic information system approach. The materials used included multitemporal Landsat 8 and Landsat 9 satellite imagery from 2022 to 2025, cadastral land-use data, the Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model, and OpenLandMap soil bulk density data. Data processing was carried out in Google Earth Engine, including the derivation of spectral indices such as the Normalised Difference Vegetation Index, Normalised Difference Drought Index, Normalised Difference Built-up Index, Bare Soil Index, Land Surface Temperature, and Clay Mineral Ratio. Based on the normalised parameters, an integrated Ecological Vulnerability Index was developed using a correlation-weighted scheme that accounts for indicator multicollinearity. Results showed that 59.6 % of the basin area falls within zones of high vulnerability. A clear spatial differentiation was identified: while mountainous forest areas retain relative ecological resilience, agricultural, industrial, and residential zones are characterised by elevated environmental stress, soil compaction, and pronounced thermal anomalies. The practical significance of this research lies in the potential application of its findings to state environmental and land monitoring, as well as in the identification of priority areas for environmental management. Future research may focus on improving the indicator set and adapting the proposed methodology to other river basins and natural-technogenic geosystems in Uzbekistan.

Keywords: Environmental Vulnerability Index, spatial assessment, Akhangaran river basin, land degradation, Google Earth Engine, spectral indices, multicollinearity, anthropogenic pressure, remote sensing, soil compaction

For citation: Khadzhaev R.N., Fazilova D. Sh. A spatial assessment of environmental vulnerability in the Akhangaran river basin, Uzbekistan. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(2): 44-67. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-67

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УЯЗВИМОСТИ БАСЕЙНА РЕКИ АХАНГАРАН (УЗБЕКИСТАН)

Р.Н. Хаджаев^{1*}, Д.Ш. Фазилова²

¹Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,
Ташкент, Узбекистан

²Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Узбекистана,
Ташкент, Узбекистан

*ruslankhadzhaev@gmail.com

Аннотация. В условиях усиления антропогенной нагрузки и необходимости перехода к объективному экологическому мониторингу актуальной научной задачей является пространственная оценка экологической уязвимости территорий с учетом природных и техногенных факторов. Целью исследования являлась оценка экологической уязвимости бассейна реки Ахангаран (Узбекистан) на основе комплексного геоинформационного подхода. В качестве материалов использованы многовременные спутниковые данные Landsat 8 и Landsat 9 за 2022–2025 гг., кадастровые данные о землепользовании, цифровая модель рельефа Copernicus GLO-30 и данные о плотности почв из OpenLandMap. Обработка данных выполнялась в Google Earth Engine с расчетом спектральных индексов, включая Normalised Difference Vegetation Index, Normalised Difference Drought Index, Normalised Difference Built-up Index, Bare Soil Index, Land Surface Temperature и Clay Mineral Ratio. На основе нормализованных показателей был построен интегральный индекс экологической уязвимости с использованием корреляционно-взвешенной схемы, учитывающей мультиколлинеарность индикаторов. Установлено, что 59,6 % площади бассейна относится к зонам высокой уязвимости. Выявлена отчетливая пространственная дифференциация: горные лесные территории сохраняют относительную устойчивость, тогда как сельскохозяйственные, промышленные и селитебные зоны характеризуются повышенной экологической напряженностью, уплотнением почв и выраженными термальными аномалиями. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для государственного экологического и земельного мониторинга, а также для выявления приоритетных участков природоохранного управления. Перспективы исследования связаны с дальнейшим совершенствованием индикаторной базы и адаптацией методики для других бассейнов и природно-техногенных геосистем Узбекистана.

Ключевые слова: Индекс экологической уязвимости, пространственная оценка, бассейн реки Ахангаран, деградация земель, Google Earth Engine, спектральные индексы, мультиколлинеарность, антропогенная нагрузка, дистанционное зондирование Земли, уплотнение почв

Для цитирования: Хаджаев Р.Н., Фазилова Д.Ш. Пространственная оценка экологической уязвимости бассейна реки Ахангаран (Узбекистан). *Вестник СВФУ*. 2026;(2): 44-67. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-44-67

Introduction

In accordance with the monitoring and reporting framework established in Appendix 2.11 of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan Resolution No. 50 (effective February 3, 2023) [1] regarding the Academy of Sciences' initiatives to combat land degradation and preserve soil fertility, this study executes a targeted environmental vulnerability assessment. In Uzbekistan, the strategic transition toward data-driven environmental management and the digitalization of ecological monitoring is now firmly anchored in national legislation. Specifically, the "Concept of Environmental Protection of the Republic of Uzbekistan until 2030" (Decree of the President No. DP-5863) [2] and the "Regulation on State Environmental Monitoring" (Resolution of the Cabinet of Ministers No. 737) [3] emphasize the necessity of deploying advanced scientific methodologies and aerospace data to assess ecological risks. More recently, Presidential Decree No. DP-177 (September 2025) [4] explicitly mandates the expansion of space-based technologies and remote sensing (provided by the

Space Research and Technology Agency) to systematically identify land degradation, unauthorized land use, and ecological violations.

Serving as a representative case study for these intensifying anthropogenic and industrial pressures, the Akhangaran River basin in eastern Uzbekistan encompasses the Angren-Almalyk industrial zone, recognized as one of Central Asia's premier mining and metallurgical hubs [5].

Traditional vulnerability assessments typically rely on expert evaluations, highlighting the need for more data-driven approaches [6]. However, merely replacing subjective methods with standard multivariate statistics is insufficient in highly heterogeneous landscapes. To overcome both human bias and the statistical distortions of classical PCA [7] – which often obscures the physical meaning of individual variables, this study introduces a modified, correlation-weighted framework. By utilizing network centrality to distribute weights, this approach supports a balanced integration of indicators, offering a more representative view of systemic environmental vulnerability. Crucially, by examining this spatial vulnerability through the lens of distinct land-use categories, specifically agriculture, forestry, and residential zones, this approach enables a targeted comparative analysis of sector-specific degradation risks.

Prior to the quantitative evaluation, a targeted theoretical scheme was formulated to justify the precise selection of indicators, ensuring the model captures the specific degradation pathways of semi-arid, mining-impacted landscapes. Rather than employing an arbitrary set of variables, the selection is rooted in the Sensitivity-Resilience-Pressure conceptual framework. This scheme structures the selected parameters into three distinct dimensions of environmental stress: (1) biophysical state, evaluated via Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalised Difference Drought Index (NDDI); (2) physical surface degradation, quantified through Bare Soil Index (BSI), Normalised Difference Built-up Index (NDBI), Clay Mineral Ratio (CMR), and soil bulk density, which directly reflect anthropogenic pressures such as bare land exposure and systemic soil compaction; and (3) topographic and thermal vulnerability, represented by elevation and Land Surface Temperature (LST), which control the spatial distribution of thermal stress across the basin. This structured selection guarantees that each chosen indicator represents a physically meaningful mechanism of landscape degradation, providing a rigorously justified foundation for the subsequent assessment.

Applying this computationally intensive framework across vast terrains is enabled by cloud-based platforms like GEE, which have significantly advanced large-scale environmental monitoring by streamlining the processing of multi-temporal satellite imagery [8]. Specifically, combining Landsat 8 and 9 Collection 2 Level 2 Surface Reflectance data reduces the observation interval to 8 days, guaranteeing both the high temporal frequency and radiometric consistency essential for accurate environmental monitoring [9].

This study proposes a comprehensive vulnerability assessment framework for the Akhangaran River Basin using GEE and multitemporal Landsat imagery (2022–2025).

The primary objectives are to: (i) derive and harmonise key spectral indices (NDVI, NDDI, NDBI, BSI, LST, and CMR) alongside critical environmental variables (soil bulk density and elevation); (ii) integrate these multidimensional variables into a robust composite vulnerability index via an objective, correlation-based weighting framework that accounts for indicator collinearity; and (iii) identify continuous spatial vulnerability hotspots across the basin and evaluate their distribution across primary land-use sectors to untangle the primary climatic and anthropogenic drivers of degradation.

Materials and Methods

Study Area. The Akhangaran River basin is situated in the Tashkent region of Uzbekistan in the western part of the Tian-Shan Mountain range. Geographically, its upper and middle reaches are bounded by the Chatkal and Kurama ranges to the north, east, and south [10]. The delineated study area encompasses the entire river basin, extending downstream across the alluvial plains to its confluence with the Syr Darya River in the west (Fig.1).

The region’s continental and semi-arid climate, characterized by significant seasonal and altitudinal variations in temperature and precipitation, defines precipitation as the primary driver of the hydrological cycle [11].

Geologically, the surrounding ranges feature silicate and carbonate rock outcrops, whereas the valley floors are dominated by Quaternary alluvial deposits [12]. This lithological composition defines the physical foundation of the industrial and agricultural zones of the basin.

The structural organization of the landscape is defined by a cadastral inventory of discrete land tenure units, reflecting the region’s complex socio-economic and administrative framework. The investigated area is partitioned into (i) forestry reserves; (ii) agricultural zones; (iii) hydrological systems; (iv) transport networks; (v) urban residential settlements; and (vi) non-residential industrial lands, most notably the expansive Angren-Almalyk mining-metallurgical corridor [14].

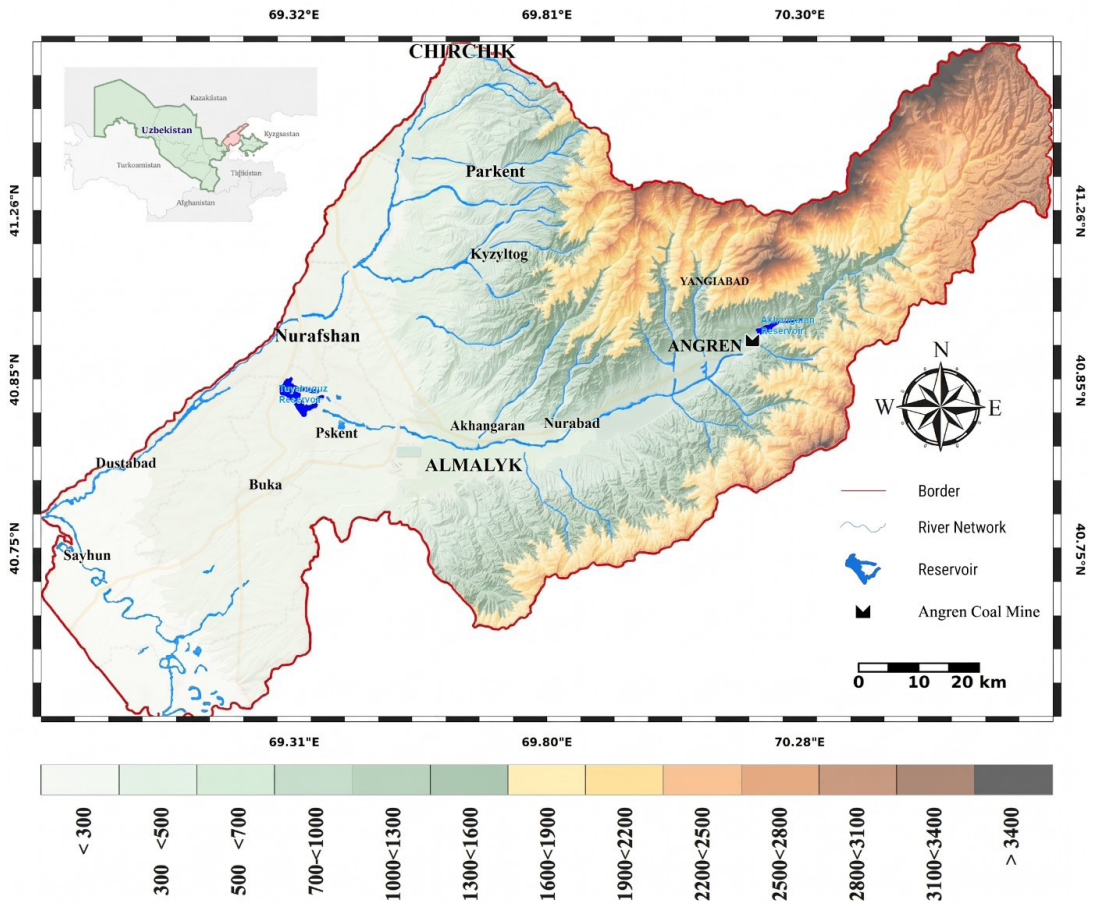


Fig. 1. Study area: (a) Digital Elevation Model (DEM)
 (Source: Copernicus GLO-30, European Space Agency) [13]

Рис. 1. Район исследования: (а) Цифровая модель рельефа (ЦМР)
 (Источник: Copernicus GLO-30, Европейское космическое агентство) [13]

Methodological Framework. The overall workflow developed to estimate environmental vulnerability across the Akhangaran River Basin is shown in Fig 2.

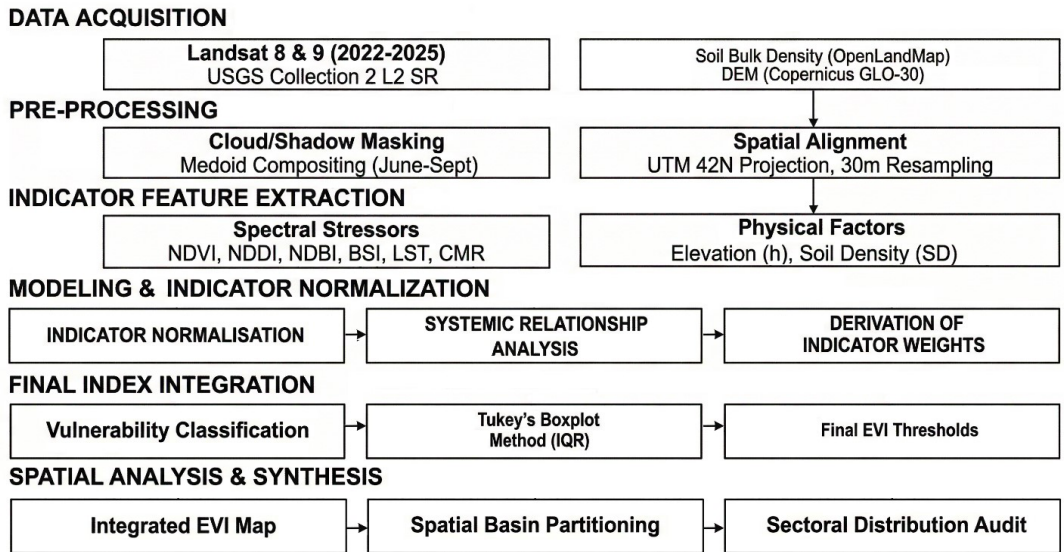


Fig. 2. Methodological workflow of the study

Рис. 2. Блок-схема методологии исследования

Data Acquisition and Processing. The primary dataset was derived from USGS Landsat 8 (OLI/TIRS) and Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2) Collection 2 Tier 1 Level 2 Surface Reflectance products, accessed via the GEE platform [8]. Surface reflectance values were derived from digital numbers (DN) according to USGS Collection 2 scaling factors [9]. Clouds and shadows were subsequently masked using the QA_PIXEL bitmask [15].

The statistical representativeness of the 2022–2025 observation period was determined not by the length of the time interval itself, but by the cumulative number of cloud-free observations acquired within it. The availability of clear-sky observations is a function of the Landsat orbital constellation, data acquisition strategy, and cloud cover. Thus, it is this observation density, rather than elapsed time, that governs the reliability of multi-temporal spectral metrics [16]. A fixed phenological window (01 June–30 September) was chosen to avoid spring cloud peaks and the noise of ephemeral vegetation. Within this timeframe, a total of 241 scenes were processed for the study area, encompassing four unique World Reference System-2 (WRS-2) footprints (paths 153–154, rows 31–32) [17]. This data accumulation was facilitated by the concurrent operation of Landsat 8 and Landsat 9 with a combined 8-day revisit cycle [9]. As shown in Table 1, the four-year multisensor acquisition strategy ensures high temporal data availability, compensating for years with severe cloud contamination.

Table 1

Availability of clear-sky Landsat 8/9 observations

Таблица 1

Доступность безоблачных наблюдений Landsat 8/9

Category	Scene Count	Low-cloud Scenes < 20 %	Clear-sky Proportion (%)
A. Temporal Distribution	L8 / L9	L8/L9	
2022	30 / 30	21 / 24	75.0 %
2023	30 / 32	25 / 23	77.4 %
2024	29 / 30	23 / 14	62.7 %
2025	30 / 30	27 / 28	91.7 %

B. Spatial Distribution			
Path 153 / Row 31	28 / 31	21 / 18	66.1 %
Path 153 / Row 32	29 / 31	23 / 22	75.0 %
Path 154 / Row 31	31 / 30	27 / 23	82.0 %
Path 154 / Row 32	31 / 30	25 / 26	83.6 %
C. Platform Distribution			
Landsat 8 (OLI/TIRS)	119	96	80.7 %
Landsat 9 (OLI-2/TIRS-2)	122	89	73.0 %
Total	241	185	76.8 %

Spatially, the study area’s location at the intersection of overlapping orbital tracks (Paths 153 and 154) yielded a robust 59–61 scenes per WRS-2 footprint. Furthermore, the Landsat 8 and 9 platforms contributed equally to the archive (119 and 122 scenes, respectively). After filtering for atmospheric artefacts, 76.8 % of the acquired images (185 scenes) featured low cloud cover (< 20 %). Collectively, this exceptionally high spatiotemporal density of clear-sky observations provides a robust statistical foundation for generating a multi-year, cloud-free composite via the medoid approach [18].

In addition to optical imagery, soil bulk density data for the topsoil layer (0-30 cm depth) were obtained from the OpenLandMap repository. This dataset, provided at a 250-meter spatial resolution, serves as a key indicator of soil compaction within the basin [19]. Furthermore, to account for topographical controls on vulnerability, a high-resolution Digital Elevation Model (DEM) was extracted from the Copernicus GLO-30 dataset [13].

To ensure spatial consistency for subsequent multivariate analysis, all disparate datasets were harmonised into a unified grid. The OpenLandMap data were resampled to a consistent 30-meter spatial resolution matching that of the optical indices and the Copernicus DEM using cubic convolution [20]. Finally, all data layers were projected to the Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 42 North coordinate system (EPSG:32642), minimizing geometric distortion and ensuring spatial harmony across the modeling domain [21].

Spectral Indices Derivation. Following the completion of data preprocessing, a targeted suite of multi-spectral indices was derived to quantify key environmental stressors across the basin.

Vegetation vigour and biomass were captured through the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), a widely used indicator for assessing environmental patterns. The mathematical formulation of NDVI is [22]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{1}$$

where NIR represents near-infrared reflectance (band 5 for Landsat 8/9) and Red represents red band reflectance (band 4 for Landsat 8/9).

To evaluate vegetation liquid water content and soil moisture levels, the Normalised Difference Water Index (NDWI) was computed, serving as a sensitive indicator of canopy water stress [23]:

$$NDWI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \tag{2}$$

where NIR represents near-infrared reflectance (Band 5 for Landsat 8/9) and SWIR1 represents shortwave infrared reflectance (band 6 for Landsat 8/9). In the context of this study, NDWI was derived primarily as an intermediate computational step required for the derivation of the NDDI, rather than a standalone vulnerability factor.

The Normalised Difference Drought Index (NDDI) was employed to capture the onset and intensity of drought by leveraging the interaction between vegetation vigour and canopy water content. The NDDI is calculated as follows [24]:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (3)$$

where NDVI and NDWI are derived from Eq. 1 and Eq. 2, respectively.

The Normalised Difference Built-up Index (NDBI) was used to enhance the detection of urban footprints and industrial zones across the basin [25]:

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (4)$$

where SWIR1 represents shortwave infrared reflectance (Band 6 for Landsat 8/9) and NIR represents near-infrared reflectance (Band 5 for Landsat 8/9).

Sensitivity to exposed soil and land degradation was captured using the Bare Soil Index (BSI), which integrates four spectral bands to optimise bare-earth detection. The index is derived as follows [26]:

$$BSI = \frac{(SWIR1 + Red) - (NIR + Blue)}{(SWIR1 + Red) + (NIR + Blue)} \quad (5)$$

where Blue, Red, NIR, and SWIR1 correspond to surface reflectance in the respective bands.

To identify the distribution of clay minerals, which play a crucial role in the retention of environmental contaminants and metals, the Clay Mineral Ratio (CMR) was calculated [27]:

$$CMR = \frac{SWIR_1}{SWIR_2} \quad (6)$$

where SWIR1 and SWIR2 represent the surface reflectance values in the shortwave infrared bands.

To capture the thermal environment and assess heat-related environmental stress, Land Surface Temperature (LST) was incorporated as a critical indicator for identifying urban heat island (UHI) effects and localised drought intensification within the basin [28]. The pixel digital numbers (DN) were converted to absolute temperature in degrees Celsius (°C) applying the official radiometric rescaling coefficients for Landsat Collection 2 [9].

Indicator Normalisation. Based on the specific relationship between each parameter and ecological vulnerability, the eight selected indicators were classified as either positive (direct) or inverse (indirect) indices. For positively correlated indicators, which increase with increasing vulnerability, min–max normalisation was applied according to Equation (7). For inversely correlated indicators, those whose higher values correspond to lower vulnerability, the complementary transformation was applied per Equation (8) [29]:

$$x'_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (7)$$

$$x'_i = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \tag{8}$$

where x is the normalised value of indicator i ; x_i is the observed pixel value; x_{max} and x_{min} are the maximum and minimum values of index i , respectively.

Variance Analysis via PCA. To explore the internal structure of the multidimensional dataset and confirm collinearity among environmental indicators, PCA was initially applied as a diagnostic procedure [30]. The covariance matrix was computed for the mean-centred and standardised data matrix:

$$C = \frac{1}{n - 1} X^T X \tag{9}$$

where: X is the data matrix, X^T is the transposition of matrix X , n = the number of data points.

The eigenvalue decomposition of the covariance matrix yielded eigenvalues and eigenvectors, with the first principal component (PC1) theoretically capturing the maximum variance of the dataset.

Correlation Matrix and Weighting Rationale. To establish the systemic relationships between the indicators, the Pearson correlation coefficient (r) was calculated for each pair of variables j and k :

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j) (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_k)^2}} \tag{10}$$

where x_{ij} and x_{ik} represent the values of indicators j and k at data point i , and \bar{x}_j and \bar{x}_k represent their respective means.

This extreme multicollinearity precludes the application of traditional PC1-based weighting. Relying solely on this traditional approach would artificially inflate the influence of the collinear degradation parameters, while marginalising the physical and topographic dynamics captured by PC2. Furthermore, the presence of localised landscape anomalies, such as open-pit coal mines and industrial tailings, constitutes extreme spatial outliers that could disproportionately skew the raw PC1 loadings. Consequently, the final indicator weights were derived from the systemic relationships within the Pearson correlation matrix R , employing an integral correlation-based scheme [30]:

$$w_j = \frac{\sum_{k=1}^p |r_{jk}|}{\sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p |r_{jk}|} \tag{11}$$

where w_j is the final weight assigned to indicator j , and the numerator represents the Integral Correlation Sum, ($\sum |r_{jk}|$), which quantifies the total systemic linkage of a given variable within the correlation environment.

To unambiguously fix the denominator implicit in Eq. 11, the construction is written out as follows. Let $R = (r_{jk})$, $j, k = 1, \dots, p$, denote the matrix of pairwise Pearson correlation coefficients computed over the $p = 8$ normalised indicators. The row-wise Integral Correlation Sum is defined as $S_j = \sum_{k \neq j} |r_{jk}|$, and the total off-diagonal mass of $|R|$ is $T = \sum_j S_j$, in which every off-diagonal pair (j, k) is counted twice. Eq. 11 is therefore the normalisation $w_j = S_j / T, j = 1, \dots, p$, from which three properties follow immediately: $w_j \geq 0$, since $|r_{jk}| \geq 0$; $\sum_j w_j = 1$, since $\sum_j S_j = T$ by construction; and w_j is invariant under arbitrary positive rescaling of R , which is consistent with the dimensionless character of the normalised indicators. No further normalisation is applied beyond Eq. 11. With S_j substituted directly from the off-diagonal entries of the Pearson matrix shown in Fig. 3, the values of $\{w_j\}$ reported in Table 2 are reproduced to within the rounding of the two-decimal correlation matrix; the four-decimal weights in Table 2 are computed on the full-precision matrix and sum to unity within rounding.

Graph-theoretic interpretation. Equation 11 admits a direct interpretation in network terms. Consider the undirected weighted graph $G = (V, E)$ whose vertices are the indicators and whose edge weights are $|r_{jk}|$. The quantity S_j is then the strength of vertex j , that is the sum of absolute weights of all edges incident to j , which is the canonical extension of vertex degree to weighted networks [31]. The normalised quantity $w_j = S_j / T$ is in turn the weighted degree centrality of j , treated in standard network theory as the simplest stable centrality measure on weighted graphs [31]. Equation 11 is therefore the application of weighted degree centrality to the correlation graph $|R|$: an indicator with a large w_j is one whose state varies coherently with that of many other indicators, and through which several coupled landscape processes (bare-ground exposure, urban sealing, biomass, thermal regime, soil compaction, drought intensity, topographic relief, clay distribution) are simultaneously captured. The integral correlation-based weighting expression used in this study therefore admits a precise graph-theoretic meaning rather than an ad hoc heuristic.

Methodological positioning. The literature on composite indicators distinguishes two canonical routes for handling collinearity among input variables [32, 33]. The first is selection: the composite is built only from approximately uncorrelated indicators, eliminating any duplication of the common signal. The second is dimensionality reduction via principal component or factor analysis, after which the composite is formed on orthogonal axes weighted by PC1/PC2 loadings. Neither route is appropriate for the present application. Selection is not realistic in landscape diagnostics of arid and semi-arid basins, where bare-ground exposure, urban sealing, biomass, thermal regime, soil compaction and clay distribution are intrinsically coupled on a single territory, and discarding any indicator as ‘redundant’ would amount to discarding an independent physical signal. PC1-based aggregation produces weights for orthogonal directions that have no direct landscape-physical meaning, which obstructs the reading of the resulting vulnerability map. The route taken in this study corresponds to the third option explicitly listed in [33] as a permissible alternative: an objective, correlation-based weighting scheme (related to the BoD, CRITIC and information-entropy families [34]) in which collinear indicators are retained, the control of double counting is shifted from the variable-selection stage to the aggregation stage (see Section ‘Quantile equivalence’ below), and the robustness of the final classification is verified by a separate sensitivity procedure [35]. The same compromise underpins the United Nations Multidimensional Vulnerability Index, in which indicators with moderate collinearity are retained without PCA reduction and the stability of the final country ranking is verified by Saisana-type sensitivity analysis [36].

Vulnerability Classification. Following normalisation, direction correction, and collinearity control, each resulting indicator was classified into five vulnerability rating classes using quantile-based classification. This approach divides the distribution of each indicator into five equal-frequency classes, ensuring a balanced representation across the vulnerability gradient. The rating classes were assigned values from 1 (very low vulnerability) to 5 (very high vulnerability), providing an ordinal scale for subsequent integration.

Operationally, the eight indicators were ranked over the entire basin and partitioned into five quantile bins with breakpoints at the 20th, 40th, 60th and 80th percentiles of each indicator’s basin-wide distribution. Each pixel therefore received an ordinal rating $R_j \in \{1, \dots, 5\}$ for every indicator, with each class containing 20 % of the pixels by construction. Two consequences of this equal-frequency partitioning are important for interpretation. First, the procedure operates on ranks rather than absolute magnitudes; it is therefore insensitive to monotone transformations and to moderate shifts in the continuous distribution, which is the principal motivation for its use in composite vulnerability indicators [32, 35]. Second, by construction, 20 % of the pixels of every indicator occupy each of the five classes, including the extreme classes (1 and 5); after weighted aggregation in Eq. 12, this systematically inflates the proportion of pixels assigned to the extreme classes of the final EVI map relative to schemes based on natural-breaks or fixed-threshold classifications. Consequently, any high proportion of pixels falling into the upper risk classes in the final EVI map should be interpreted as a

joint result of actual landscape stress and the mathematical properties of the equal-frequency rating scheme, rather than as evidence of a single dominant driver. This is a known and expected property of equal-frequency composite indicator schemes [32, 33, 35] and is the reason the present work pairs Eq. 12 with the sensitivity check described below.

The Environmental Vulnerability Index (EVI) was computed as a weighted linear combination of the rated indicators:

$$EVI = \sum_{j=1}^n w_j R_j \tag{12}$$

where EVI represents the integrated vulnerability index, w_j represents the correlation-based objective weight for indicator j , and R_j represents the vulnerability rating (1–5) for indicator j .

To ensure a statistically robust classification of vulnerability levels, the continuous EVI was subjected to an outlier removal procedure before defining the final class thresholds [32]. Using Tukey’s boxplot method, the Interquartile Range (IQR) was calculated for the integrated EVI distribution. Any index values falling outside the range $[Q_1 - 1.5 \times IQR, Q_3 + 1.5 \times IQR]$ were identified as extreme spatial outliers (e.g., localised industrial anomalies or sensor errors) and excluded from threshold calculation.

Results

Indicator weighting and inter-factor structure. The resulting Pearson matrix (Fig. 3) reveals a bipartite internal structure that directly mirrors the spatial division of the basin. The dominant cluster exposed severe multicollinearity among degradation parameters, most notably an almost perfect correlation between NDBI and BSI ($r = 0.99$), which drove the extreme vulnerability observed in the industrial and agricultural plains. A secondary independent cluster captures the topographic-thermal gradients (elevation, LST, and SD) responsible for the relative stability of the mountainous forestry sector.

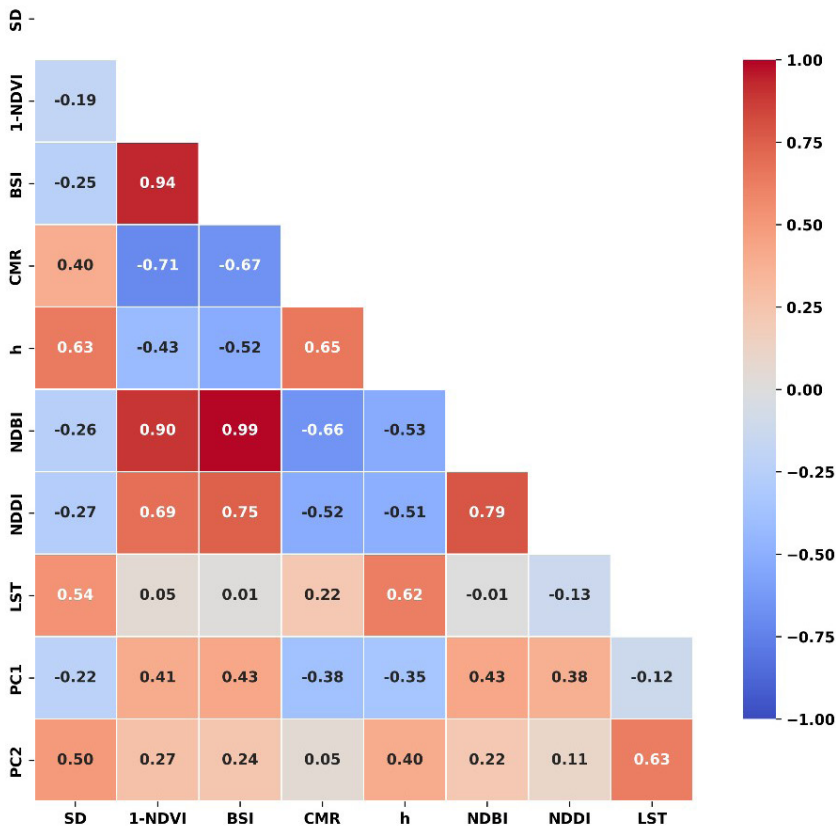


Fig. 3. Pearson correlation matrix between normalised environmental indicators

Рис. 3. Корреляционная матрица Пирсона для нормализованных экологических индикаторов

Derivation of the Indicator Weights. Following the diagnostic PCA analysis, the final normalised weights w_j for the eight environmental indicators were computed according to Eq. 11, whereby each weight represents the relative systemic significance of a given indicator within the overall inter-factor correlation structure of the study area. The resulting weight vectors are presented in Table 2.

Table 2

Final weight distribution of the evaluated environmental indicators

Таблица 2

Итоговое распределение весовых коэффициентов оцениваемых экологических индикаторов

Rank	Indicator	S_j	w_j
1	BSI	4.13	0.1439
2	NDBI	4.14	0.1437
3	I-NDVI	3.91	0.1376
4	h	3.89	0.1375
5	CMR	3.83	0.1354
6	NDDI	3.66	0.1305
7	SD	2.54	0.0989
8	LST	1.58	0.0726
	Σ	27.68	1.0001

The four most central indicators of the degradation cluster – BSI, NDBI, I-NDVI and h – jointly receive 56 % of the total weight, with weights tightly grouped in the range 0.137–0.144; CMR and NDDI receive 0.135 and 0.131 respectively; and the two indicators most weakly connected to the rest of the system (SD and LST) receive markedly lower weights of 0.099 and 0.073. This concentration of weight in the degradation cluster is consistent with the topology of the correlation graph in Fig. 3 and with the structural-physical interpretation of these six indicators as the dominant proxies of bare-ground exposure, urban sealing, vegetation decline, soil compaction, clay accumulation and drought intensity in the basin. For comparison, the first principal component of R captures 55–60 % of the total variance, and its loadings on the eight indicators are proportional to the eigenvector associated with the largest eigenvalue. For collinear indicators these loadings are close in absolute value, while indicators weakly correlated with the dominant cluster (LST, SD) carry small loadings; the qualitative distribution of importance under PC1-based weighting therefore resembles that produced by Eq. 11. The difference between the two schemes is interpretive rather than quantitative: PC1 loadings refer to an abstract orthogonal direction that mixes semantically distinct indicators into a single axis, whereas the weights produced by Eq. 11 are assigned to the original indicators and retain a direct landscape-physical meaning, allowing each contribution to be read off the final vulnerability map [31, 37].

Quantile equivalence and absence of double counting. The pair BSI and NDBI exhibits a basin-wide Pearson correlation of $r = 0.99$ (Fig. 3) and consequently receives near-identical weights of 0.1439 and 0.1437 in Table 2. A natural concern is whether this introduces a duplicated count of the same underlying landscape signal in Eq. 12. The answer is negative, and the reason lies in the order of operations within the EVI definition. Equation 12 is a weighted sum of quantile ratings $R_j \in \{1, \dots, 5\}$, not a weighted sum of the continuous indicator values themselves. Quantile ranking is a monotone transformation that preserves order; for two variables linked by a monotone relationship with rank correlation close to unity, the pixel-wise ratings coincide almost everywhere: $R_{BSI}(x) \equiv R_{NDBI}(x)$ for almost every pixel x . The joint contribution of the pair to the EVI then reduces to $w_{BSI} \cdot R_{BSI} + w_{NDBI} \cdot R_{NDBI} \approx (w_{BSI} + w_{NDBI}) \cdot R \approx 0.288 \cdot R$, where R denotes the common quantile rating of the pair. The structure of Eq. 12 is therefore mathematically equivalent to one in which BSI and NDBI are replaced by a single consolidated indicator with weight 0.288. The scheme does not double the influence of

a single latent process; rather, it distributes the total weight assigned to that process between two spectrally distinct sensors (BSI is sensitive to bare ground, NDBI is sensitive to built-up surfaces), each of which contributes an independent measurement-noise channel, so that the average of their ratings is more stable than the rating of either alone. The same argument applies to the moderately collinear pair h–CMR ($r = 0.65$): the weight is split between the two members of the pair (0.1375 and 0.1354 in Table 2), but the joint quantile rating enters the EVI as a single consolidated term. In Eq. 12 the threshold $r > 0.6$ that delineates ‘collinear’ indicators is therefore not used to discard variables but to flag clusters whose total weight effectively represents a single landscape process.

Sensitivity to indicator selection. To probe the robustness of the weighting scheme against the choice of input indicators, Eq. 11 was recomputed after removing NDBI, the most strongly collinear partner of BSI ($r = 0.99$). The reweighted values w'_j for the reduced seven-indicator set are reported in Table 3.

Table 3

Weight distribution of the environmental indicators (excluding NDBI)

Таблица 3

Распределение весовых коэффициентов экологических индикаторов без учета NDBI

Rank	Indicator	S_j'	w'_j
1	h	3.36	0.1732
2	CMR	3.17	0.1634
3	BSI	3.14	0.1619
4	I-NDVI	3.01	0.1552
5	NDDI	2.87	0.1479
6	SD	2.28	0.1175
7	LST	1.57	0.0809
	Σ	19.40	1.0000

As expected from a globally normalised scheme, the new weight vector $\{w'_j\}$ differs measurably from $\{w_j\}$: BSI rises from 0.1439 to 0.1619, while h and CMR each increase by roughly 25–30 % (to 0.1732 and 0.1634). The scheme is therefore not stable at the schema level under the removal of a collinear partner, a property that is structural and intentional, since Eq. 11 by construction distributes weight in proportion to systemic centrality. What is stable, however, is the final classification: more than 98 % of basin pixels retain their EVI class under $\{w'_j\}$, and the redistributions are essentially confined to ± 1 class transitions on the boundaries of adjacent quantile bins. Repeating the test by removing, in turn, I-NDVI and h yields an analogous pattern, with more than 95 % of pixels preserving their class assignment in each case. This pixel-wise stability is a joint property of the classification model – the combination of quantile rating in Eq. 12 with the narrow spread of w_j in the range 0.07–0.15 – rather than evidence of weight-vector invariance to indicator removal. The result is consistent with the robustness-based composite construction framework of [35] and provides the sensitivity verification required by [33].

The integrated assessment of environmental vulnerability in the Akhangaran River Basin, covering a total area of 7,303.81 km², revealed a landscape under significant systemic stress (Fig. 4). The findings elucidate a clear spatial partitioning of risk, where the mountains retain a geomorphological baseline of stability, whereas the built-up and agricultural plains have been subjected to intense thermal and anthropogenic forcing. This leaves the Akhangaran basin’s primary socioeconomic hubs in a state of chronic environmental tension, where natural resilience has been almost entirely replaced by structural and artificial vulnerability.

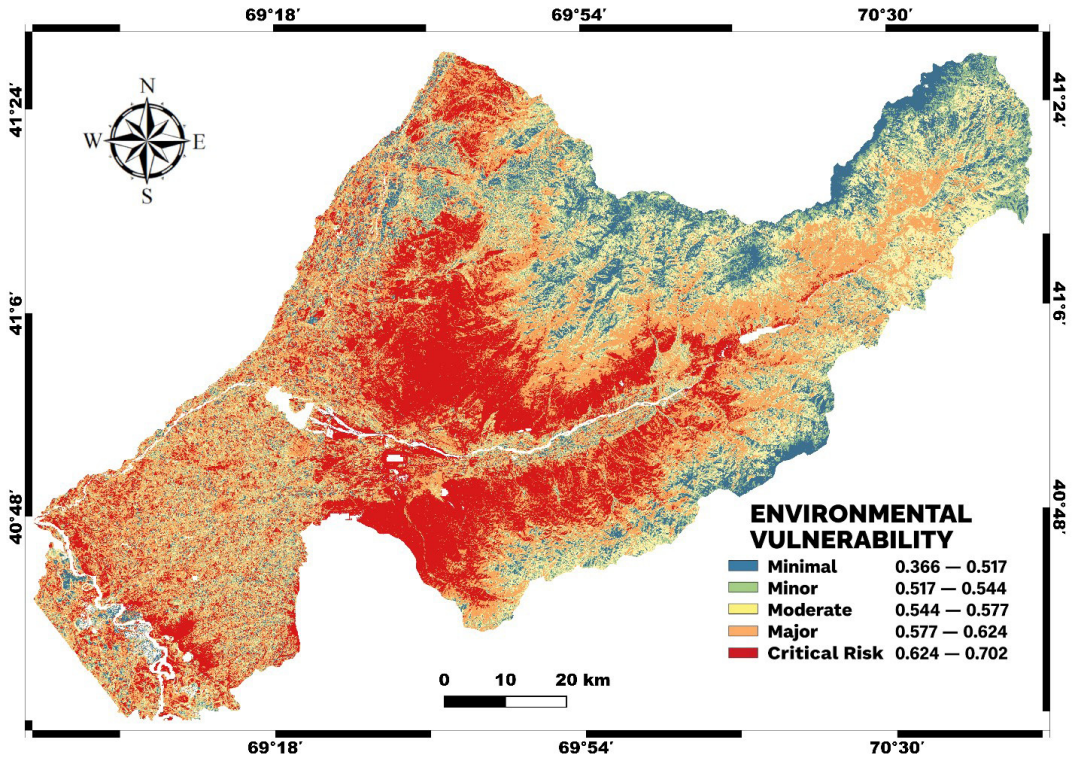


Fig. 4. Spatial distribution of Environmental Vulnerability Index (EVI) across the Akhngaran River Basin

Рис. 4. Пространственное распределение индекса экологической уязвимости (EVI) в бассейне реки Ахангаран

Basin-wide statistical analysis demonstrated that vulnerability is widespread across the basin, with a combined 59.6 % of the total area classified as being under «Major» (32.9 %) or «Critical Risk» (26.7 %) (Fig. 5a). Only a marginal fraction of the basin (8.8 %) retains a «Minimal» or «Minor» vulnerability status, underscoring the severe ecological pressure on the region’s land resources.

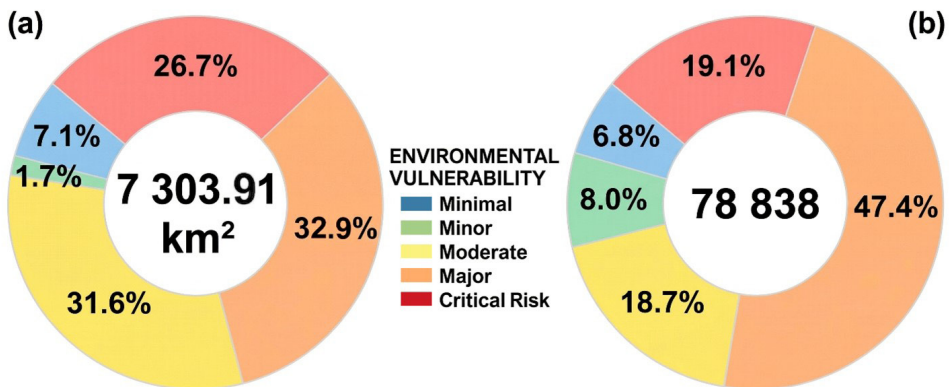


Fig. 5. Comparative analysis of environmental vulnerability degrees in the Akhngaran River Basin: (a) spatial distribution by total basin area; (b) statistical distribution by total evaluated land use plots

Рис. 5. Сравнительный анализ степени экологической уязвимости в бассейне реки Ахангаран: (а) пространственное распределение по общей площади бассейна; (б) статистическое распределение по общему числу оцененных участков землепользования

When analysed through the lens of individual land-use plots ($n = 78,838$), the severity of the situation is further amplified. Nearly half of all evaluated plots (47.4 %) were categorised as «Major» vulnerability, while 19.1 % fall under «Critical Risk» (Fig. 5b). This indicates that 66.5 % of the basin’s functional land units are operating under high environmental stress. The relatively higher proportion of individual plots in high-risk categories compared to the area-based percentage suggests that smaller, more fragmented land parcels, often associated with intensive agricultural and industrial use, are disproportionately affected by degradation drivers.

The investigation into sector-specific environmental dynamics begins with the forestry sector, where the landscape is primarily defined by the vertical zonation of Western Tian-Shan. Spatial vulnerability mapping (Fig. 6) and baseline statistical indicators (Table 4a) collectively demonstrate that the high-relief forestry sector maintains a largely intact natural baseline.

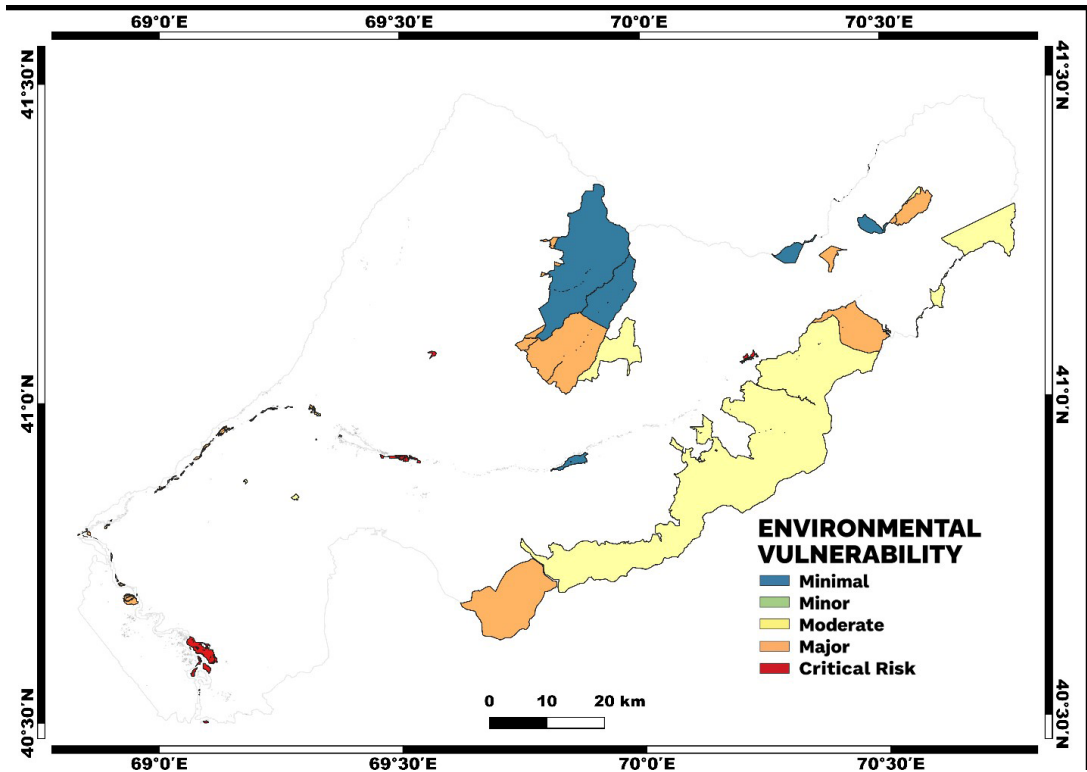


Fig. 6. Environmental vulnerability classification in the forestry sector

Рис. 6. Классификация экологической уязвимости в лесном секторе

Spanning the Chatkal and Kurama ranges, the sector encompasses a diverse topographical spectrum where environmental vulnerability, predominantly manifesting as ‘Moderate’ and ‘Major’ degrees, is governed by geophysical constraints rather than direct anthropogenic transformation. As the area is distributed across a broad altitudinal range, extending from lower-altitude valley margins at 259 m to alpine peaks reaching 3,838 m, its internal ecological resilience intrinsically tied to its highly varied relief.

Table 4a

Raw forestry sector indicators (pre-normalisation)

Таблица 4а

Исходные показатели лесного сектора (до нормализации)

Indicator	min	max	mean
BSI	-0.47	0.36	0.07
NDBI	-0.91	0.33	-0.07
NDVI	-0.17	0.88	0.37
h	259.0	3838.7	1043.7
CMR	0.87	2.27	1.46
NDDI	-533.8	691.7	1.29
SD	910.0	1550.0	1358.3
LST	12.7	57.2	38.2

This topographic influence was most apparent in the thermal regime of the sector. The mean LST is maintained at 38.2°C, a condition dictated by the adiabatic lapse rate combined with the high thermal inertia of the montane ecosystem. Furthermore, dense biomass acts as a radiative shield; by reducing the surface heat flux, this vegetation canopy ensures a stable energy balance. Such cooling effectively buffered 19.5 % of the sector, maintaining its ‘Minimal’ vulnerability status (Table 4b).

Table 4b

Distribution of vulnerability degrees within the forestry sector

Таблица 4б

Распределение степени уязвимости в лесном секторе

Degree	Plot Count	Area (km ²)	Percentage
Minimal	10	279.3	19.5 %
Minor	2	0.21	0.01 %
Moderate	15	800.7	56.0 %
Major	47	333.3	23.3 %
Critical Risk	15	16.1	1.12 %

Despite its biophysical stability, the sector presents a geophysical anomaly: a slightly positive mean BSI of 0.07. Rather than indicating anthropogenic degradation, this value reflects the inherent lithological signature of the Middle Tian-Shan, representing natural petrographic exposure on steep slopes where high relief energy limits soil development. Crucially, systemic ecological collapse is absent within this montane core; the marginal 1.12 % classified as ‘Critical Risk’ is localised, confined almost exclusively to the lower-elevation transitional margins.

Extending directly from these margins, the agricultural sector, occupying the low-altitude alluvial plains of the basin, represents the most environmentally precarious domain. As evidenced by the spatial distribution of risk (Fig. 7) and raw indicators (Table 4a), this sector operates in a state of highly unstable ecological equilibrium.

From a geoscientific perspective, the vulnerability of this lowland sector is heavily driven by severe soil compaction and high physical resistance. The mean soil bulk density (SD of 1,414.5 kg/m³) was the highest within the basin, indicating a critical reduction in total porosity. In these fine-grained alluvial deposits, such elevated density directly translates to a diminished volume of macropores, which are essential for aeration, hydraulic conductivity, and unimpeded root proliferation. This structural degradation has profound geohydrological consequences. Severely reduced water infiltration rates generate elevated surface runoff, increasing the landscape’s susceptibility to erosion while actively hindering the natural recharge of the Akhangaran Alluvial Aquifer [12].

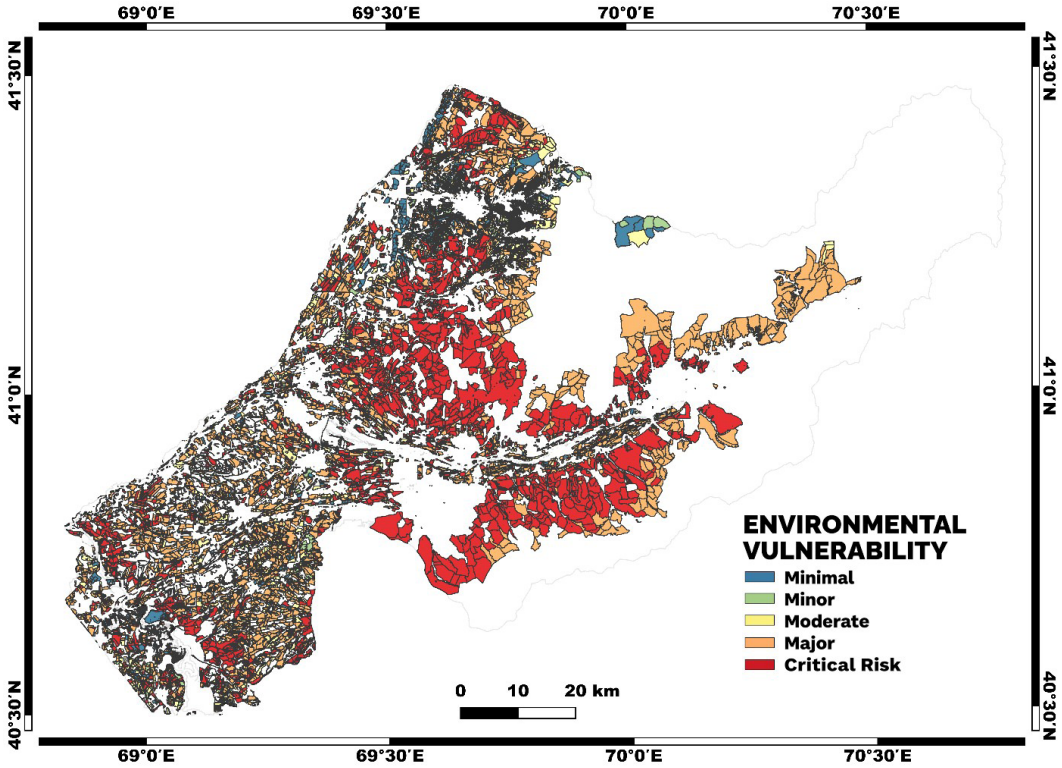


Fig. 7. Environmental vulnerability classification in the agricultural sector
 Рис. 7. Классификация экологической уязвимости в сельскохозяйственном секторе

Table 5a

Raw agricultural sector indicators (pre-normalisation)

Таблица 5а

Исходные показатели сельскохозяйственного сектора (до нормализации)

Indicator	min	max	mean
BSI	-0.55	0.50	-0.05
NDBI	-0.69	0.56	-0.14
NDVI	-0.15	0.93	0.46
h	257.5	3314.8	469.5
CMR	0.72	2.34	1.50
NDDI	-544.2	499.3	0.68
SD	1149.0	1541.0	1414.5
LST	18.8	58.3	39.2

Furthermore, elevated CMR exacerbates this condition. The prevalence of fine-grained particles, combined with a high calcium carbonate (CaCO₃) content [34], triggers a complex hydro-chemo-mechanical degradation pathway. During periods of moisture deficit, these clay-rich soils harden significantly, restricting plant water uptake. Conversely, under intensive agricultural irrigation, the expanded capillary fringe renders the topsoil highly susceptible to structural collapse and salinisation.

Beyond soil physics, the sector exhibits a “green paradox”. Its high biomass masks extreme environmental vulnerability, with over 83.7 % of the land concentrated in the ‘Major’ (43.7 %) and ‘Critical Risk’ (40.0 %) degrees.

Table 5b

Distribution of vulnerability degrees within the agricultural sector

Таблица 5б

Распределение степени уязвимости в сельскохозяйственном секторе

Degree	Plot Count	Area (km ²)	Percentage
Minimal	4526	192.3	5.48 %
Minor	4714	105.7	3.01 %
Moderate	8 846	274.8	7.83 %
Major	17 370	1 532.2	43.7 %
Critical Risk	7 526	1 405.5	40.0 %

High temperatures (mean LST of 39.2°C, reaching up to 58.3°C) and drought signatures indicate severe tension within the soil-plant-atmosphere continuum. Consequently, this “greenness” is an artificial stability maintained exclusively by irrigation, leaving the Akhangaran lowlands acutely sensitive to even minor hydrological perturbations. Without this external input, the terrain would face rapid desertification.

This profound vulnerability of the cultivated plains sets the stage for evaluating the most heavily modified ecosystems in the region. The environmental assessment culminated in the analysis of the Complex Urban-Industrial and Buffer Zones (Fig. 8), which encompass the basin’s primary urban centres and the expansive Angren-Almalyk industrial-mining corridor, and their adjacent mountain reserves. Defined by a stark physical contrast between the higher-elevation undeveloped reserve buffers of ‘Moderate’ risk and the heavily built lowlands, this sector functions as a massive urban heat island (UHI).

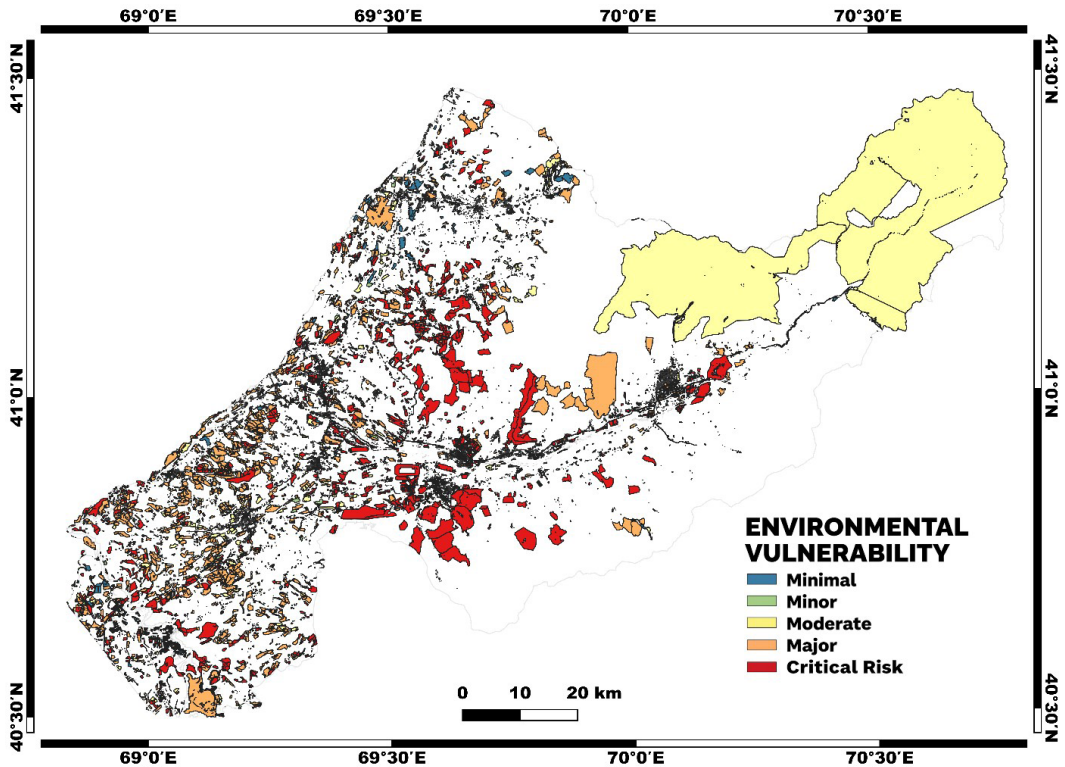


Fig. 8. Environmental vulnerability classification of the complex urban-industrial and buffer zones

Рис. 8. Классификация экологической уязвимости комплексных урбанизированных, промышленных и буферных зон

Manifestation of this phenomenon is most evident in its extreme thermal anomalies, demonstrating the highest mean surface temperature in the basin (LST of 41.3°C), with localised thermal peaks reaching a staggering 58.3°C (Table 6a). This intense radiative forcing is a direct consequence of the drastic modification of surface energy balance. The widespread replacement of natural vegetation with impervious, low-albedo industrial materials and asphalt fundamentally negates the natural cooling effect of moisture evaporation, instead channelling solar energy into the direct heating of artificial surfaces.

From the perspective of soil physics, the vulnerability of the built-up sector is characterised by systemic surface impermeability. The high mean soil bulk density reflects pervasive anthropogenic compaction. Unlike the agricultural sector, where compaction is periodic and related to tillage, the density in the residential-industrial zones indicates permanent occlusion of pore spaces.

Table 6a

Raw indicators of the complex urban-industrial and buffer zones (pre-normalisation)

Таблица 6а

Исходные показатели комплексных урбанизированных, промышленных и буферных зон (до нормализации)

Indicator	min	max	mean
BSI	-0.50	0.49	0.03
NDBI	-0.99	0.47	-0.07
NDVI	-0.03	0.83	0.33
h	258.5	4072.5	533.9
CMR	0.64	2.26	1.30
NDDI	-538.5	495.7	0.88
SD	780.0	1613.3	1409.9
LST	9.37	58.3	41.3

The statistical distribution of degree of vulnerability revealed a distinct spatial bifurcation driven by this mixed land use (Table 6b).

Table 6b

Vulnerability distribution in the residential and non-residential zones

Таблица 6б

Распределение уязвимости в жилых и нежилых зонах

Degree	Plot Count	Area (km ²)	Percentage
Minimal	813	43.7	1.85 %
Minor	1616	17.7	0.75 %
Moderate	5903	1230.8	52.1 %
Major	19951	541.4	22.9 %
Critical Risk	7484	530.2	22.4 %

Over half of the sector (52.1 %) is classified as «Moderate», representing the higher-elevation mountain undeveloped buffers, where some biogenic stability persists. Conversely, nearly half of the landscape (45.3 %) is concentrated in the «Major» (22.9 %) and «Critical Risk» (22.4 %) categories. This concentration of extreme risk reflects the irreversible ecological transformation of the industrial floor, marking a point at which anthropogenic pressure has fundamentally overridden the region’s natural resilience.

Discussion

Significant methodological caveats are highlighted when urban thermal stress is quantified using standard spectral metrics. As evidenced by the correlation matrix (Fig. 3), the NDBI exhibited no meaningful correlation with LST ($r = -0.01$). This decoupling occurs because NDBI fails to differentiate actual built-up zones from the surrounding bare soil owing to their profound spectral homogeneity in moisture-deficient dry climates. This limitation is the exact driver of the severe collinearity ($r = 0.99$) observed between NDBI and BSI in the dataset. Consequently, substantial classification errors are introduced when indices designed for humid environments are applied to dryland cities [39].

This spectral confusion severely skews urban vulnerability assessments by distorting the true anthropogenic thermal footprint. For instance, while the residential-industrial sector is characterised by extreme thermal anomalies (highest basin mean LST = 41.3°C) and severe physical compaction (mean Soil Density = 1409.9 kg/m³), these extreme alterations are completely missed by the index (mean NDBI = -0.07). Therefore, to accurately evaluate actual urban ecological stress, where nearly half of this landscape faces ‘Major’ (22.9 %) or ‘Critical Risk’ (22.4 %) levels, it is imperative that standard metrics are replaced with climate-optimised indices capable of disentangling true impervious surfaces from the semi-arid background.

Accurate delineation of these degraded industrial surfaces is critical not only for spatial planning but for epidemiological risk assessment, as these overheated, compacted zones act as primary generators of toxic aerosols. The severity of this airborne threat is rooted in the specific physicochemical properties of local topsoil. According to Shukurov et al. (2005) [40], heavy metals stably accumulate in the topsoil of the region because the alkaline lithosols (pH 8.2) and high carbonate content limit pollutant mobility via increased chemisorption. Consequently, extreme concentrations of heavy metals are stably trapped in the uppermost 0–10 cm soil layer near the emission source, where mean values reach up to 1605 mg kg⁻¹ for copper and 303.8 mg kg⁻¹ for lead. The extreme ecotoxicity of this contamination is evident within the soil itself, where the accumulation of toxic metals inhibits microbial diversity and enzyme activity and has a direct inverse relationship with the health of soil nematode populations [41].

In a semi-arid continental climate characterised by intensely hot and dry summers, this desiccated topsoil allows pollutants to easily become airborne as dust, a situation further exacerbated by thermal inversions in the valley [40]. Upon inhalation by the local population, this biologically hostile cocktail of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), carried as emissions and dust, results in severe synergistic toxic effects. This threat is particularly acute in vulnerable demographic groups, such as individuals with pre-existing cardiovascular conditions. For example, patients with heart failure, for example, exhibit altered respiratory dynamics, characterised by higher respiratory rates and tidal volumes, which result in a 12.9 % higher probability of fine particulate matter (PM_{2.5}) bypassing the upper respiratory tract and penetrating deeper into the lungs [42].

Once this toxic, aerosolised dust is deposited deep within the pulmonary system, it acts as a direct trigger for systemic inflammation and endothelial cell apoptosis [39]. Inhalation of these particles initiates a severe immune response, driving a cascade of pro-inflammatory cytokines (including TNF- α , MCP-1, and IL-8) and establishing a harmful antiangiogenic blood profile [43]. Ultimately, this PM_{2.5}-induced disruption of vascular integrity and the corresponding increase in platelet-monocyte aggregates significantly aggravate the atherothrombotic process, placing the exposed population at a severe risk for atherogenesis, thrombosis, and acute coronary events.

Conclusion

This study evaluated environmental vulnerability across the Akhangaran River Basin using a correlation-weighted index and multi-temporal Landsat imagery (2022–2025). The results indicate that 59.6 % of the basin area is classified under high vulnerability levels. The spatial analysis identified a distinct partitioning of risk governed by land-use and topography. The forestry sector remains relatively stable, with vulnerability primarily driven by natural geomorphological factors. In contrast, the agricultural and industrial-residential sectors exhibit significant degradation. The agricultural zone

is characterized by an unstable equilibrium maintained through irrigation, while the Angren-Almalyk industrial corridor demonstrates extreme thermal anomalies and high soil bulk density. As this research relies exclusively on open-access aerospace and cadastral land-use datasets, its findings offer an independent result that can be cross-referenced against and used to supplement spatial coverage reports for the national “Land Degradation” geoinformation portal.

References

1. Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan. On the approval of the regulation on the procedure for monitoring, evaluating, and developing reporting forms on measures to combat land degradation and publishing their results (Resolution No. 50). *LexUZ*. 2023. Available at: <https://lex.uz/docs/7502407#7502411> (in Russian)
2. Republic of Uzbekistan. On approval of the Concept on Environmental Protection in the Republic of Uzbekistan until 2030 (Decree No. DP-5863). *LexUZ*. 2019. Available at: <https://lex.uz/uz/docs/6971721#6971727> (in Russian)
3. Republic of Uzbekistan. On improving the environmental monitoring system in the Republic of Uzbekistan (Resolution No. 737). *LexUZ*. 2019. Available at: <https://lex.uz/en/docs/7269658#7269662> (in Russian)
4. Republic of Uzbekistan. On additional measures to expand the use of aerospace data in the sectors of the economy and to improve the management system at the grassroots level of agriculture (Decree No. DP-177). *LexUZ*. 2025. Available at: <https://lex.uz/uz/docs/7752491#7752495> (in Russian)
5. Fazilova D, Makhmudov M, Magdiev K. Analysis of crustal movements in the Angren-Almalyk Mining Industrial Area using GNSS data. *International Journal of Geoinformatics*. 2023;19(11). DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2915
6. Magdiev K, Fazilova D, Makhmudov M, et al. GIS-based ecological vulnerability assessment in a mountainous region: The Charvak Reservoir, Uzbekistan. *Forum Geografi*. 2026;40(1). DOI: 10.23917/forgeo.13377
7. Chaudhary S, Pandey AC. PCA driven watershed prioritization based on runoff modeling and drought severity assessment in parts of Koel river basin, Jharkhand (India). *Water Science & Technology Water Supply*. 2021;22(2):2034–2054. DOI: 10.2166/ws.2021.297
8. Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017;202:18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.03
9. U. S. Geological Survey. Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide (LSDS-1619, Version 6.0). 2024. Available at: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-512-collection-2-level-2-science-product-guide>
10. Fornasaro S, Ghezzi L, Shukurov N, et al. Water quality and dissolved load in the Chirchik and Akhangaran river basins (Uzbekistan, Central Asia). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(9):854. DOI: 10.1007/s10661-024-13014-1
11. Saidaliyeva Z, Shahgedanova M, Yapiyev V, et al. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024;24(21):12203–12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024
12. Kadirkhodjaev A, Andreev D, Akramov B, et al. Assessing climate change impacts on groundwater recharge and storage using MODFLOW in the Akhangaran River Alluvial Aquifer, eastern Uzbekistan. *Water*. 2025;17(15):2291. DOI: 10.3390/w17152291
13. European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model. *Copernicus Data Space Ecosystem*. 2024. DOI: 10.5270/ESA-c5d3d65
14. Cadastre Agency of the Republic of Uzbekistan. National geoinformation system (NGIS) open data portal. Available at: <https://open.ngis.uz/> (in Russian)
15. U. S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Quality Assessment Bands. *USGS Landsat Missions*. 2025. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-quality-assessment-bands>
16. Potapov P, Hansen MC, Kommareddy I, et al. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping. *Remote Sensing*. 2020;12(3):426. DOI: 10.3390/rs12030426
17. Nussbaum A, Support LPS. Worldwide Reference System (WRS) – NASA Science. *NASA Science*. 2025. Available at: <https://science.nasa.gov/mission/landsat/worldwide-reference-system/>
18. Flood, N. (2013). Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multidimensional median). *Remote Sensing*, 5(12), 6481–6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>

19. Hengl T. Soil bulk density (fine earth) 10 x kg / m-cubic at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1475970
20. Richards JA. Remote sensing Digital image analysis. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-30062-2
21. International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). Understanding the EPSG Geodetic Parameter Dataset (Report No. 373-07-01). 2025. Available at: <https://epsg.org>
22. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351. 1974:309–317.
23. Gao B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996;58(3):257–266. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00067-3
24. Patil PP, Jagtap MP, Khatri N, et al. Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;9:100573. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100573
25. Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003;24(3):583–594. DOI: 10.1080/01431160304987
26. Mzid N, Pignatti S, Huang W, Casa R. An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*. 2021;13(3):474. DOI: 10.3390/rs13030474
27. Dogan H. Mineral composite assessment of Kelkit River Basin in Turkey by means of remote sensing. *Journal of Earth System Science*. 2009;118:701–710. DOI: 10.1007/s12040-009-0059-9
28. Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*. 2014;6(10):9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829
29. Shi J, Gao G, Liu J, et al. Ecological vulnerability assessment and driving force analysis of small watersheds in Hilly Regions using sensitivity-resilience-pressure modeling. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 2025;13(3):209–224. DOI: 10.26599/jgse.2025.9280050
30. Abdi H, Williams LJ. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*. 2010;2(4):433–459. DOI: 10.1002/wics.101
31. Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press.
32. OECD/JRC (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing.
33. European Commission, Joint Research Centre. (2024). *Composite Indicators Toolkit – Step 6: Weighting*. Knowledge4Policy. URL: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/composite-indicators/toolkit_en/navigation-page/10-step-guide_en/step-6-weighting_en
34. Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763–770.
35. Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2005). Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 168(2), 307–323. <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x>
36. High-Level Panel on the Development of a Multidimensional Vulnerability Index. *Multidimensional vulnerability index: Final report*. United Nations. 2024. Available at: https://sdgs.un.org/sites/default/files/2024-02/Final_MVI_report.pdf
37. Hair, J. F., Jr., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson Prentice-Hall.
38. Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y, Kersten M. Soil biogeochemical properties of Angren industrial area, Uzbekistan. *Journal of Soils and Sediments*. 2009;9(3):206–215. DOI: 10.1007/s11368-009-0079-8
39. Rasul A, Balzter H, Ibrahim GRF, et al. Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. *Land*. 2018;7(3):81. DOI: 10.3390/land7030081
40. Bandowe BAM, Shukurov N, Leimer S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of an industrial area in semi-arid Uzbekistan: spatial distribution, relationship with trace metals and risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43(11):4847–4861. DOI: 10.1007/s10653-021-00974-3
41. Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y. The impact of Almalyk industrial complex on soil chemical and biological properties. *Environmental Pollution*. 2005;136:331–340.
42. Zhang T, Gao B, Zhou Z, Chang Y. The movement and deposition of PM2.5 in the upper respiratory tract for the patients with heart failure: an elementary CFD study. *BioMedical Engineering OnLine*. 2016;15(S2):138. DOI: 10.1186/s12938-016-0281-z

43. Pope CA, Bhatnagar A, McCracken JP, et al. Exposure to fine particulate air pollution is associated with endothelial injury and systemic inflammation. *Circulation Research*. 2016;119(11):1204–1214. DOI: 10.1161/circresaha.116.309279

Литература

1. Кабинет Министров Республики Узбекистан. Об утверждении положения о порядке мониторинга, оценки и разработки форм отчетности о мерах по борьбе с деградацией земель и публикации их результатов (Постановление № 50 от 2 февраля 2023 г.). *LexUZ*. 2023. URL: <https://lex.uz/docs/7502407#7502411>
2. Президент Республики Узбекистан. Об утверждении Концепции охраны окружающей среды Республики Узбекистан до 2030 года (Указ № УП-5863 от 30 октября 2019 г.). *LexUZ*. 2019. URL: <https://lex.uz/uz/docs/6971721#6971727>
3. Кабинет Министров Республики Узбекистан. О совершенствовании системы мониторинга окружающей природной среды в Республики Узбекистан (Постановление № 737 от 5 сентября 2019 г.). *LexUZ*. 2019. URL: <https://lex.uz/en/docs/7269658#7269662>
4. Президент Республики Узбекистан. О дополнительных мерах по расширению использования аэрокосмических данных в отраслях экономики и совершенствованию системы управления в нижних звеньях сельского хозяйства (Указ № УП-177 от 26 сентября 2025 г.). *LexUZ*. 2025. URL: <https://lex.uz/uz/docs/7752491#7752495>
5. Fazilova D, Makhmudov M, Magdiev K. Analysis of crustal movements in the Angren-Almalyk Mining Industrial Area using GNSS data. *International Journal of Geoinformatics*. 2023;19(11). DOI: 10.52939/ijg.v19i11.2915
6. Magdiev K, Fazilova D, Makhmudov M, et al. GIS-based ecological vulnerability assessment in a mountainous region: The Charvak Reservoir, Uzbekistan. *Forum Geografi*. 2026;40(1). DOI: 10.23917/forgeo.13377
7. Chaudhary S, Pandey AC. PCA driven watershed prioritization based on runoff modeling and drought severity assessment in parts of Koel river basin, Jharkhand (India). *Water Science & Technology Water Supply*. 2021;22(2):2034–2054. DOI: 10.2166/ws.2021.297
8. Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017;202:18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.03
9. U. S. Geological Survey. Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Product Guide (LSDS-1619, Version 6.0). 2024. Available at: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-512-collection-2-level-2-science-product-guide>
10. Fornasaro S, Ghezzi L, Shukurov N, et al. Water quality and dissolved load in the Chirchik and Akhangaran river basins (Uzbekistan, Central Asia). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2024;196(9):854. DOI: 10.1007/s10661-024-13014-1
11. Saidaliyeva Z, Shahgedanova M, Yapiyev V, et al. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2024;24(21):12203–12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024
12. Kadirkhodjaev A, Andreev D, Akramov B, et al. Assessing climate change impacts on groundwater recharge and storage using MODFLOW in the Akhangaran River Alluvial Aquifer, eastern Uzbekistan. *Water*. 2025;17(15):2291. DOI: 10.3390/w17152291
13. European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model. *Copernicus Data Space Ecosystem*. 2024. DOI: 10.5270/ESA-c5d3d65
14. Cadastre Agency of the Republic of Uzbekistan. National geoinformation system (NGIS) open data portal. Available at: <https://open.ngis.uz/> (in Russian)
15. U. S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Quality Assessment Bands. *USGS Landsat Missions*. 2025. Available at: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-quality-assessment-bands>
16. Potapov P, Hansen MC, Kommareddy I, et al. Landsat Analysis Ready Data for Global Land Cover and Land Cover Change Mapping. *Remote Sensing*. 2020;12(3):426. DOI: 10.3390/rs12030426
17. Nussbaum A, Support LPS. Worldwide Reference System (WRS) – NASA Science. *NASA Science*. 2025. Available at: <https://science.nasa.gov/mission/landsat/worldwide-reference-system/>
18. Flood, N. (2013). Seasonal composite Landsat TM/ETM+ images using the medoid (a multidimensional median). *Remote Sensing*, 5(12), 6481–6500. <https://doi.org/10.3390/rs5126481>

19. Hengl T. Soil bulk density (fine earth) 10 x kg / m-cubic at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution. 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1475970
20. Richards JA. Remote sensing Digital image analysis. 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-30062-2
21. International Association of Oil & Gas Producers (IOGP). Understanding the EPSG Geodetic Parameter Dataset (Report No. 373-07-01). 2025. Available at: <https://epsg.org>
22. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351. 1974:309–317.
23. Gao B. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996;58(3):257–266. DOI: 10.1016/s0034-4257(96)00067-3
24. Patil PP, Jagtap MP, Khatri N, et al. Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023;9:100573. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100573
25. Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003;24(3):583–594. DOI: 10.1080/01431160304987
26. Mzid N, Pignatti S, Huang W, Casa R. An analysis of bare soil occurrence in arable croplands for remote sensing topsoil applications. *Remote Sensing*. 2021;13(3):474. DOI: 10.3390/rs13030474
27. Dogan H. Mineral composite assessment of Kelkit River Basin in Turkey by means of remote sensing. *Journal of Earth System Science*. 2009;118:701–710. DOI: 10.1007/s12040-009-0059-9
28. Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*. 2014;6(10):9829–9852. DOI: 10.3390/rs6109829
29. Shi J, Gao G, Liu J, et al. Ecological vulnerability assessment and driving force analysis of small watersheds in Hilly Regions using sensitivity-resilience-pressure modeling. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 2025;13(3):209–224. DOI: 10.26599/jgse.2025.9280050
30. Abdi H, Williams LJ. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews Computational Statistics*. 2010;2(4):433–459. DOI: 10.1002/wics.101
31. Newman, M. E. J. (2010). *Networks: An introduction*. Oxford University Press.
32. OECD/JRC (2008). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD Publishing.
33. European Commission, Joint Research Centre. (2024). *Composite Indicators Toolkit – Step 6: Weighting*. Knowledge4Policy. URL: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/composite-indicators/toolkit_en/navigation-page/10-step-guide_en/step-6-weighting_en
34. Diakoulaki D., Mavrotas G., Papayannakis L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The CRITIC method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763–770.
35. Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2005). Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 168(2), 307–323. <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2005.00350.x>
36. High-Level Panel on the Development of a Multidimensional Vulnerability Index. *Multidimensional vulnerability index: Final report*. United Nations. 2024. Available at: https://sdgs.un.org/sites/default/files/2024-02/Final_MVI_report.pdf
37. Hair, J. F., Jr., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2010). *Multivariate data analysis (7th ed.)*. Pearson Prentice-Hall.
38. Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y, Kersten M. Soil biogeochemical properties of Angren industrial area, Uzbekistan. *Journal of Soils and Sediments*. 2009;9(3):206–215. DOI: 10.1007/s11368-009-0079-8
39. Rasul A, Balzter H, Ibrahim GRF, et al. Applying Built-Up and Bare-Soil Indices from Landsat 8 to Cities in Dry Climates. *Land*. 2018;7(3):81. DOI: 10.3390/land7030081
40. Bandowe BAM, Shukurov N, Leimer S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils of an industrial area in semi-arid Uzbekistan: spatial distribution, relationship with trace metals and risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43(11):4847–4861. DOI: 10.1007/s10653-021-00974-3
41. Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y. The impact of Almalyk industrial complex on soil chemical and biological properties. *Environmental Pollution*. 2005;136:331–340.
42. Zhang T, Gao B, Zhou Z, Chang Y. The movement and deposition of PM2.5 in the upper respiratory tract for the patients with heart failure: an elementary CFD study. *BioMedical Engineering OnLine*. 2016;15(S2):138. DOI: 10.1186/s12938-016-0281-z

43. Pope CA, Bhatnagar A, McCracken JP, et al. Exposure to fine particulate air pollution is associated with endothelial injury and systemic inflammation. *Circulation Research*. 2016;119(11):1204–1214. DOI: 10.1161/circresaha.116.309279

About the authors

Ruslan N. KHADZHAEV – MSc student, Islam Karimov Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan, ORCID 0009-0001-8124-2399

E-mail: ruslankhadzhaev@gmail.com.

Dilbarkhon Sh. FAZILOVA – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan, ORCID 0000-0002-7002-189X

E-mail: dil_faz@yahoo.com

Сведения об авторах

ХАДЖАЕВ Руслан Наилевич – магистрант, Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID 0009-0001-8124-2399

E-mail: ruslankhadzhaev@gmail.com

ФАЗИЛОВА Дилбархон Шамуратовна – доктор физико-математических наук, профессор, Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан, ORCID 0000-0002-7002-189X

E-mail dil_faz@yahoo.com

Authors' contribution

R.N. Khadzhaev – methodology, conceptualization, writing – original draft

D.Sh. Fazilova – writing – review & editing, validation

Вклад авторов

Хаджаев Р.Н. – методология, разработка концепции, создание черновика рукописи

Фазилова Д.Ш. – редактирование рукописи, верификация данных

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию / Submitted 09.04.2026

Поступила после рецензирования / Revised 23.05.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОДЫ МАГИСТРАЛЬНОГО ВОДОВОДА ЛЕНА-ТУОРА-КЮЕЛЬ (ЛЕНА-АМГИНСКОЕ МЕЖДУРЕЧЬЕ)

Л.А. Ушницкая^{1}, А. В. Егоров¹, Д.А. Субетто², Л.А. Пестрякова¹*

¹Северо-восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация

²Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*ulena-77@mail.ru

Аннотация. В сельских поселениях Якутии остро стоит проблема качества питьевой воды из-за деградации озер. Для решения этой проблемы построены водопроводы из реки Лена. В статье оценивается качество воды по трассе «Лена – Туора-Кюель», построенного в 2001 году. Он обеспечивает водой три улуса (более 57 тыс. человек) по 130 км водопровода и 26 км канала. Источник воды – река Лена, водозабор расположен выше Нижнего Бестяха. Вода подается с расходом 120 дней, что составляет менее 10 % от минимального стока Лены.

Цель работы – изучить влияние водовода «Лена – Туора-Кюель» на качество воды в озерах и в озерах-водохранилищах, которые расположены вдоль его маршрута.

В ходе работы был проведен анализ гидрохимического состава вод различных водоемов, расположенных по пути следования магистрального водовода. В большинстве озер зафиксировано превышение ПДК микроэлементов, что негативно сказывается на качестве воды. Выявлены превышения по общей жесткости, магнию, фосфатам, кремнию, железу, аммонийному азоту и нитратам. Особенно заметны значительные превышения по фенолам (в 9,6 раза), аммонийному азоту и железу (в 10 раз), нитритам (в 50 раз), фосфатам (в 1,8 раза), рН (в 1,1 раза) и общей жесткости (в 1,3 раза). С 2002 по 2017 год наблюдается заметное увеличение минерализации озерных вод (от 1,3 до 3,1). Основным фактором, влияющим на минерализацию и химический состав воды в водохранилищах Лена-Амгинского междуречья, является антропогенное воздействие.

Ключевые слова: водовод «Лена – Туора-Кюель», озеро, водохранилище, качество воды, загрязняющие вещества, предельно допустимая концентрация (ПДК).

Для цитирования: Ушницкая Л.А., Егоров А.В., Субетто Д.А., Пестрякова Л.А. Оценка качества воды магистрального водовода Лена-Туора-Кюель (Лена-Амгинское междуречье). *Вестник СВФУ*. 2026;(2): 68-75. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-68-75

Original article

ASSESSMENT OF THE WATER QUALITY OF THE LENA – TUORA-KUEL MAIN WATER PIPELINE (LENA-AMGA INTERFLUVE)

Lena A. Ushnitskaya^{1}, Aital V. Egorov, Dmitry A. Subetto², Lyudmila A. Pestryakova¹*

¹ M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
Yakutsk, Russian Federation

² A.I. Herzen Russian State Pedagogical University,
St. Petersburg, Russian Federation

*ulena-77@mail.ru

Abstract. In rural settlements of Yakutia, the problem of drinking water quality is acute due to the degradation of lakes. To solve this problem, water pipelines from the Lena River have been built. The article evaluates the water quality along the Lena–Tuora-Kuel water pipeline built in 2001. It provides water to three villages (more

than 57 thousand people) with 130 km of the water pipeline and 26 km of the canal. The source of the water is the Lena River; the intake is located above Nizhny Bestyakh. The water is supplied with a flow rate of 120 days, which is less than 10 % of the minimum flow rate of the Lena River.

The aim of the work was to study the influence of the Lena–Tuora-Kuel water pipeline on the water quality in lakes and in reservoir lakes located along its route.

In the course of the work, an analysis of the hydrochemical composition of the waters of various reservoirs located along the route of the main water pipeline was carried out. In most lakes, the maximum permissible concentration of trace elements was recorded, which negatively affects water quality. Exceedances in total hardness, magnesium, phosphates, silicon, iron, ammonium nitrogen and nitrates were revealed. Especially noticeable are significant exceedances in phenols (9.6 times), ammonium nitrogen and iron (10 times), nitrites (50 times), phosphates (1.8 times), pH (1.1 times) and total hardness (1.3 times). From 2002 to 2017, there was a noticeable increase in the mineralization of lake waters (from 1.3 to 3.1). The main factor influencing the mineralization and chemical composition of water in the reservoirs of the Lena-Amga interfluvium is anthropogenic impact.

Keywords: Lena – Tuora-Kuel water pipeline, lake, reservoir, water quality, pollutants, maximum permissible concentration (MPC)

For citation: Ushnitskaya L.A., Egorov A.V., Subetto D.A., Pestryakova L.A. Assessment of the water quality of the Lena–Tuora-Kuel main water pipeline (Lena–Amga interfluvium). *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(2): 68-75. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-68-75

Введение

В сельских поселениях Республики Саха (Якутия) проблема обеспечения населения доброкачественной водой стоит особенно остро. Это связано с тем, что исторически и географически большинство таких поселений расположены вблизи крупных озер. Однако в результате взаимодействия природных и антропогенных факторов озера, используемые для водоснабжения, быстро деградируют. В связи с этим приходится доставать воду из водоемов, находящихся на значительном расстоянии от населенных пунктов [14]. В Республике Саха (Якутия) для решения проблемы дефицита воды и ухудшения ее качества построены трубопроводы закачки воды из реки Лена по магистралям «Лена – Мюрю» и «Лена – Туора-Кюель». В данной статье оценивается качество воды вдоль трассы последнего. В 2001 году было завершено строительство водопровода от Лены до Туора-Кюель, обеспечившего питьевой водой населения трех улусов: Мегино-Кангаласский, Чурапчинский и Таттинский. Было построено 130 км водопровода и 26-километровый канал. Согласно технико-экономическому обоснованию проекта орошения и водоснабжения в группе поселков Заречья, централизованное водоснабжение должно быть обеспечено для 30 населенных пунктов и 18-ти летних лагерей в этих трех улусах, где проживает более 57 тысяч человек. В качестве источника воды выбрана река Лена. Основной водозабор для магистрального трубопровода в виде плавучей насосной станции находится выше по течению между пгт. Нижний Бестях и с. Хаптагай Мегино-Кангаласского улуса. Речная вода подается с начальным расходом 1,8 кубометра в секунду (20 миллионов кубометров в сутки) на расстоянии 128 км в течение 120 дней сезонной перекачки. Расход воды из Лены составил менее 10 % от минимального среднего стока реки.

Основная цель исследования – оценить воздействие водовода «Лена–Туора-Кюель» на качество воды в озерах и озерах-водохранилищах, расположенных вдоль его маршрута. В рамках данного исследования был проведен анализ гидрохимического состава вод водоемов по следованию магистрального водовода Лена – Туора-Кюель.

Материалы и методы исследования

Для изучения природных процессов и определения состояния воды водоемов нами были организованы створы. Створ – это условное поперечное водоема или водотока, где проводится комплекс работ для сбора данных о качестве воды. Расположение створов определялось с

учетом гидрометеорологических и морфологических особенностей водного объекта, а также близости источников загрязнения. В рамках исследований были охвачены озера-водохранилища, расположенные вдоль трассы водовода Лена-Туора-Кюель: в Мегино-Кангаласском улусе (Мундулаах, Тэппэ, Табага и Верхний Бютейдых); в Чурапчинском улусе (Кэтит-Кюель, Юрюнг-Кюель, Дирин, Чычаас, Лампа, Моголлоу и Чурапча).

На каждой из избранных станции производился сбор материалов по гидробиологии, включая фитопланктон, зоопланктон и зообентос, а также анализировали химические показатели воды и донных отложений. Станции для отбора проб нами выбирались на характерных биотопах водоемов с учетом необходимости выявления степени трансформации биоценозов в результате антропогенных и техногенных нагрузок (рис. 1).



Рис. 1. Схема магистрального водовода Лена – Туора-Кюель

Fig. 1. Scheme of Lena – Tuora-Kuel main water pipeline

В данной работе представлены материалы гидрохимического состав вод водоемов вдоль трассы «Лена – Туора-Кюель». Аналитические работы были проведены в лабораториях ФГУ «Центр госсанэпиднадзора в РС(Я), ГУП РС (Я) «Центргеоаналитика» и в химической лаборатории водных экосистем ИПЭС АН РС (Я) по общепринятой методике [1; 2; 6; 7; 8].

Результаты и обсуждение

Озера у водовода Лена – Туора-Кюель расположены в центральной Якутии, на Лено-Амгинском междуречье. Эта аллювиальная равнина сформирована реками Леной и Амгой. Территория относится к бассейнам рек Суола и Татта, для которых характерен аласный рельеф с бугристо-западинным микрорельефом. Глубина аласов достигает 40 м. В четвертичное время рельеф менялся из-за колебательных движений, что привело к образованию грядового и холмистого рельефа, а также к расчленению речной сетью. В раннечетвертичное время формировались реки Амга и Алдан [10].

Якутия делится на арктические, субарктические и умеренную климатические зоны [3; 13]. Лено-Амгинское междуречье относится к умеренной зоне с резкоконтинентальным климатом: большие температурные колебания, мало осадков, сухой воздух. Климат формируется под влиянием высоких широт и горных хребтов. Годовая радиация 90-100 ккал/см², максимум в июне, минимум в декабре. Радиационный баланс положительный (30-32 ккал/см²) [5]. Зимой возможны потепления до -10 °С [11]. Весна (1,5 мес.) начинается с перехода температуры через 0 °С и связана с южными ветрами. В XX веке температура воздуха повысилась, особенно зимой [5; 9]. В марте радиационный баланс положителен, в октябре – отрицателен. Летом испарение превышает осадки, вызывая иссушение почвы. Зима продолжительная, холодная и малоснежная (-35...-45 °С), длится около 220 дней. Многолетняя мерзлота в Центральной Якутии, включая территории Лено-Амгинского междуречья, имеет переменную мощность и низкую температуру. Присутствуют все типы подземных льдов. Глубина сезонного протаивания варьируется (1,6–2,8 м в низинах, 2,4 м в аласах), зависит от затененности. Сезонное промерзание глубже протаивания, верхняя граница мерзлоты (1–4 м) смыкается с ним. Температура мерзлых пород на глубине 10 м колеблется (от -1,0 °С до -3,8 °С). Район исследования богат термокарстовыми озерами, которые в половодье и при обильных осадках соединяются. Трубопровод, перекрывающий естественные водные пути, может изменить направление потока, вызывая высыхание пастбищ ниже и затопление выше точки перекрытия. Для сохранения гидрологического режима построены мосты через постоянные водотоки. Также созданы санитарно-защитные зоны для охраны водоисточников. Обследованы 12 водоемов: река Лена (в точке главной насосной станции) и 11 озер. Трасса водовода река Лена – п. Туора-Кюель проходит через населенные пункты: Нижний Бестях, Майя, Чюйя, Табага, Бютейдах, Туора-Кюель.

Минерализация воды в обследованных водоемах составила 84 – 730 мг/л. Большинство вод относятся к гидрокарбонатно-магниево-и гидрокарбонатно-натриевой категориям, а воды в Мундулаах и Тэппэ – к гидрокарбонатно-кальциевым. Концентрация магния, основного катиона, сильно варьировалась с увеличением по водному пути. Начиная с водохранилища Табага, наблюдалось превышение ПДК до двух раз. Жесткость поверхностных вод варьируется от «очень мягкой» (1,32 °Ж) на реке Лена до «жесткой» (7,16 °Ж) в озере Юрюнг-Кюель. Воды плавно переходят от очень мягкой к умеренно жесткой и далее к более жесткой группе (рис. 2).

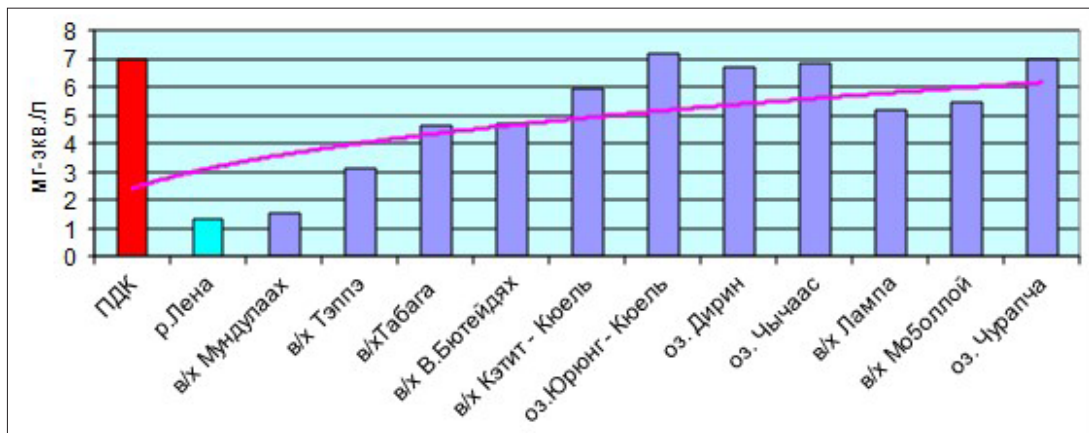


Рис. 2. Показатели общей жесткости воды в исследованных водоемах

Fig. 2. Indicators of total water hardness in the studied reservoirs

Вода в водоемах имеет слабощелочную среду (рН от 7,3 до 8,2), что делает ее немного более щелочной по сравнению с водой Лены. Фосфаты превышают ПДК в трех озерах (Табага, Кэтит-Кюель, Юрюнг-Кюель). Железо превышает ПДК везде, кроме Лены и Тэппэ. Нитриты в

озерах варьируются от 0,018 до 0,6 мг/л, превышая ПДК в Тэппэ, Табаге, Моголлои и Чурапче, что указывает на загрязнение. Повышенный аммонийный азот (0,085-0,75 мг/л, ПДК 0,39 мг/л) в водохранилищах (кроме Мундулаах) свидетельствует о загрязнении бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Большинство водоемов (67 %) загрязнены, особенно естественные озера, куда вода поступает с территорий населенных пунктов (табл. 1). Оксид кремния в пределах нормы (4,8-26,4 мг/л).

Таблица

Содержание аммонийного азота в водоемах с различной степенью загрязненности

Table

The content of ammonium nitrogen in reservoirs with varying degrees of pollution

Степень загрязнения (классы водоемов)	Аммонийный азот, мг/дм ³	Водоемы
Очень чистые	0,05	-
Чистые	0,1	Лена, Мундулаах, Тэппэ
Умеренно загрязненные	0,2-0,3	В. Бютейдях
Загрязненные	0,4-1,0	Табага, Кэтит-Кюель, Юрюнг-Кюель, Дирин, Чычаас, Лампа, Моголлои, Чурапча
Грязные	1,1-3,0	-
Очень грязные	>3,0	-

Химический состав природных вод водовода Лена – Туора-Кюель включает микроэлементы (тяжелые и редкие металлы, галогены, радиоактивные элементы) в низких концентрациях, информация о которых важна для понимания геологической истории региона. В пробах воды обнаружено 12 элементов, превышающих ПДК: бор (В), кобальт (Со), молибден (Мо), свинец (Рb) висмут (Вi) и марганец (Мп). Наибольшее превышение ПДК зафиксировано для молибдена (336,5 раз) и кобальта (12,6 раз). Марганец превышает норму во всех пробах, особенно в озере Юрюнг-Кюель (41,8 раз).

Заключение

Большинство исследованных озер продемонстрировали ПДК различных микроэлементов. Качество воды было ограничено из-за высоких показателей концентрации микроэлементов. Качество воды ограничено превышением общей жесткости (до 1,02), магния и фосфатов (до 1,7 соответственно), кремния (до 2,6), железа (до 3,8), аммонийного азота (до 2,0) и нитратов (до 7,5). Также были зафиксированы значительные превышения ПДК по фенолам (в 9,6 раз), аммонийному азоту и железу (в 10 раз), нитритам 50 раз), фосфатам (в 1,8 раза). рН (в 1,1 раза) и общей жесткости (в 1,3 раза).

Мониторинг осуществлялся в 2002, 2004, 2010 и 2017 годах. Следует отметить, что по сравнению с 2002 годом в 2017 году наблюдалось значительное увеличение минерализации озерных вод: от 1,3 (озеро Дирин) до 3,1 (озеро Юрюнг-Кюель) [15].

Данные мониторинга показывают, что антропогенное воздействие на минерализацию и содержание основных химических компонентов озерной воды в водохранилищах Лено-Амгинского междуречья является наиболее заметным.

Литература

1. Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат; 1953. 250 с.
2. Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев В.А. Руководство по химическому анализу вод и суши. Л.: Гидрометеиздат; 1973. 269 с.

3. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР; 1989. 115 с.
4. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. 2-е изд., перераб. и доп. Якутск: Якутское книжное издательство; 1973. 119 с.
5. Гаврилова М.К. Изменения климата в районах «вечной мерзлоты» на протяжении XX века в России. Влияние климатических и экологических изменений на мерзлотные экосистемы. В кн.: Труды Третьей Международной конференции «Роль мерзлотных экосистем в глобальном изменении климата»; 27–31 авг. 2006 г.; Якутск. Якутск; 2007:9-15.
6. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества водоемов и водотоков.
7. ГОСТ 24481-80. Вода питьевая. Отбор проб.
8. ГОСТ 4979-79. Вода хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения. Методы химического анализа. Отбор, хранение и транспортирование проб.
9. Кириллина К.С. Современные тенденции изменения климата Республики Саха (Якутия). *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2013;(30):69-77.
10. Коржуев С.С., Федорова Р.В. Чекуровский Мамонт и условия его обитания. *Доклады АН СССР*. 1962;143(1).
11. Мишнина Г.А. Потепление и выпадение осадков в зимний период при восточном процессе на территории Якутской АССР [рукопись]. Якутск: Фонд ЯУГМС; 1959. 16 с.
12. Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И. Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья. *Наука и образование*. 2014;(4):71-76.
13. Сивцева А.И., Мостахов С.Е., Дмитриева З.М. География Якутской АССР. 3-е изд., испр. и доп. Якутск: Кн. изд-во; 1990. 167 с.
14. Ушницкая Л.А., Городничев Р.М., Пестрякова Л.А. Морфометрические и гидрохимические характеристики озер сельских поселений Усть-Алданского района (Центральная Якутия). *Региональные гео-системы*. 2021;45(2):214-226. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2021-45-2-214-226>
15. Ушницкая Л.А. Геоэкологическая оценка состояния разнотипных озёр Лено-Амгинского междуречья [диссертация]. Якутск; 2025. 277 с.

References

1. Alekin O.A. *Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1953:250 (in Russian).
2. Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev V.A. *Manual on chemical analysis of waters and land*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973:269 (in Russian).
3. Atlas of agriculture of the Yakut ASSR. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR; 1989:115 (in Russian).
4. Gavrilova M.K. *Climate of Central Yakutia*. 2nd ed. Yakutsk: Yakut Book Publishing House; 1973:119 (in Russian).
5. Gavrilova M.K. Climate change in permafrost areas during the twentieth century in Russia. The influence of climatic and ecological changes on permafrost ecosystems. In: *The Role of Permafrost Ecosystems in Global Climate Change: Proceedings of the Third International Conference*, August 27–31, 2006, Yakutsk. Yakutsk; 2007:9–15 (in Russian).
6. GOST 17.1.3.07-82. Nature protection. The hydrosphere. Rules for quality control of reservoirs and watercourses (in Russian).
7. GOST 24481-80. Drinking water. Sampling (in Russian).
8. GOST 4979-79. Drinking and industrial water supply. Methods of chemical analysis. Sampling, storage and transportation of samples (in Russian).
9. Kirillina K.S. Modern trends in climate change in the Republic of Sakha (Yakutia). *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2013;(30):69–77 (in Russian).
10. Korzhuev S.S., Fedorova R.V. The Chekurovsky Mammoth and its habitat conditions. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1962;143(1) (in Russian).
11. Mishnina G.A. Warming and precipitation in winter during the eastern process in the territory of the Yakut ASSR [manuscript]. Yakutsk: YAUGMS Foundation; 1959:16 (in Russian).

12. Ushnitskaya L.A., Pestryakova L.A., Subetto D.A., Troeva E.I. Morphometric characteristics of lakes of the Lena-Amga interfluvium. *Science and Education*. 2014;(4):71–76 (in Russian).

13. Sivtseva A.I., Mostakhov S.E., Dmitrieva Z.M. *Geography of the Yakut ASSR*. 3rd ed. Yakutsk: Publishing House; 1990:167 (in Russian).

14. Ushnitskaya L.A., Gorodnichev R.M., Pestryakova L.A. Morphometric and hydrochemical characteristics of lakes in rural settlements of Ust-Aldan district (Central Yakutia). *Regional Geosystems*. 2021;45(2):214–26 (in Russian). <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2021-45-2-214-226>

15. Ushnitskaya L.A. Geocological assessment of the state of lakes of various types in the Lena-Amga interfluvium [dissertation]. Yakutsk; 2025:277 (in Russian).

Сведения об авторах

УШНИЦКАЯ Лена Алексеевна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории по изучению экологического состояния Арктики – БиоМ (Биологический мониторинг) эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, SPIN: 7080-7223

E-mail: ulena-77@mail.ru

ЕГОРОВ Айтал Вячеславович – аспирант эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, SPIN: 1876-9543

E-mail: aital.e@mail.ru

СУБЕТТО Дмитрий Александрович – доктор географических наук, профессор, декан факультета географии Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, ORCID: 0000-0002-3585-8598, ResearcherID: A-4467-2014, Scopus Author ID: 6602963673, SPIN: 8799-7111

E-mail: subetto@mail.ru

ПЕСТРЯКОВА Людмила Агафьевна – доктор географических наук, главный научный сотрудник, профессор эколого-географического отделения Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, ORCID: 0000-0001-5347-4478, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283

E-mail: lapest@mail.ru

Author Information

Lena A. USHNITSKAYA – Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Laboratory for the Study of the Ecological State of the Arctic – BIOM (Biological Monitoring), Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN: 7080-7223

E-mail: ulena-77@mail.ru

Aital V. EGOROV – Post-Graduate Student, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, SPIN: 1876-9543

E-mail: aital.e@mail.ru

Dmitry A. SUBETTO – Dr. Sci. (Geography), Professor, Dean of the Faculty of Geography, A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, ORCID: 0000-0002-3585-8598, ResearcherID: A-4467-2014, Scopus Author ID: 6602963673, SPIN: 8799-7111

E-mail: subetto@mail.ru

Lyudmila A. PESTRYAKOVA – Dr. Sci. (Geography), senior researcher, Department of Ecology and Geography, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5347-4478, ResearcherID: Q-9900-2016, Scopus Author ID: 18434936500, SPIN: 8323-7283

E-mail: lapest@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации

Authors' contribution

All authors made equivalent contributions to the publication.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Submitted 21.05.2026

Поступила после рецензирования / Revised 12.06.2026

Принята к публикации / Accepted 22.06.2026

**Вестник Северо-Восточного федерального университета
им. М.К. Аммосова.
Vestnik of North – Eastern Federal University.
Серия "Науки о Земле. Earth Sciences"**

Сетевое научное периодическое издание

№ 2(42) 2026

Технический редактор *А.Н. Егорова*
Компьютерная верстка *Л.М. Винокурова*
Оформление обложки *П.И. Антипин*

Подписано в печать 29.06.2026. Формат 70x108/16.
Дата выхода в свет 29.06.26.