

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 29, № 1 (январь – март), 2026 г.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ



EARTH SCIENCES

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 29, N 1 (January – March), 2026

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 29, № 1 (январь – март), 2026 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 29, N 1 (January – March), 2026**

**Мурманск
2026**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 29, № 1 (январь – март), 2026 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель
ФГАОУ ВО "Мурманский арктический
университет"

Главный редактор
Кайченев А. В., д-р техн. наук, доцент
(Мурманск, Россия)

**Редакционная коллегия
по направлению "Науки о Земле"**

Заместитель главного редактора
Козлов Н. Е., д-р геол.-минерал. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

Члены редакционной коллегии:
Войтеховский Ю. Л., д-р геол.-минерал. наук,
профессор (Апатиты, Россия)
Вревский А. Б., д-р геол.-минерал. наук
(Санкт-Петербург, Россия)
Жиров В. К., д-р биол. наук, профессор
(Апатиты, Россия)
Каулина Т. В., д-р геол.-минерал. наук
(Апатиты, Россия)
Козырев А. А., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)
Макаров Д. В., д-р техн. наук, доцент
(Апатиты, Россия)
Маслобоев В. А., д-р техн. наук
(Апатиты, Россия)
Никифоров С. Л., д-р геогр. наук
(Москва, Россия)
Николаев А. И., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)
Скублов С. Г., д-р геол.-минерал. наук, доцент
(Санкт-Петербург, Россия)
Смирнов М. Ю., канд. физ.-мат. наук,
адъюнкт-профессор (Лулёо, Швеция)
Сорохтин Н. О., д-р геол.-минерал. наук
(Москва, Россия)
Терехова В. А., д-р биол. наук, доцент
(Москва, Россия)
Терещенко С. В., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)
Янг Д., д-р (Пекин, Китай)

Адрес редакции
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.
Тел.: (8152) 40-33-56.
E-mail: redvst@mauniver.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 29, N 1 (January – March), 2026
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder
FSAEI HE "Murmansk
Arctic University"

Editor-in-Chief
Kaichenov A. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Murmansk, Russia)

**The Editorial Board
(Earth Sciences)**

Deputy Editor
Kozlov N. E., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Professor (Apatity, Russia)

The Editorial Board Members:
Voytekhovskiy Yu. L., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Professor (Apatity, Russia)
Vrevskiy A. B., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Saint Petersburg, Russia)
Zhiron V. K., Dr Sci. (Biology), Professor
(Apatity, Russia)
Kaulina T. V., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Apatity, Russia)
Kozyrev A. A., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Apatity, Russia)
Makarov D. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Apatity, Russia)
Masloboev V. A., Dr Sci. (Engineering)
(Apatity, Russia)
Nikiforov S. L., Dr Sci. (Geography)
(Moscow, Russia)
Nikolaev A. I., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Apatity, Russia)
Skublov S. G., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Ass. Professor (Saint Petersburg, Russia)
Smirnov M. Yu., Cand. Sci. (Phys.&Math.),
Adjunct Professor (Luleå, Sweden)
Sorokhtin N. O., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Moscow, Russia)
Terekhova V. A., Dr Sci. (Biology),
Ass. Professor (Moscow, Russia)
Tereshchenko S. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Apatity, Russia)
Yang J., Dr (Peking, China)

The Editorial Office address
Sportivnaya St., 13, 183010, Murmansk, RUSSIA.
Phone: (8152) 40-33-56.
E-mail: redvst@ mauniver.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

ISSN 1560-9278 (Print) © ФГАОУ ВО "Мурманский арктический университет", 2026
ISSN 1997-4736 (Online) © FSAEI HE "Murmansk Arctic University", 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Геология

- Ильченко В. Л., Каулина Т. В., Нерович Л. И.** Петрофизические свойства пород и кольцевая морфология вероятной импактной структуры Ярва-Варака (Мончегорский рудный район Кольского региона)..... 5
- Калинин А. А., Хачатрян М. Г., Савченко Е. Э.** Минералы редкоземельных элементов и иттрия в измененных гранит-порфирах и вмещающих глиноземистых сланцах на медно-молибденовом рудопроявлении Пеллапахк (пояс Колмозеро-Воронья)..... 16
- Козлов Н. Е., Мудрук С. В., Сорохтин Н. О.** Новые подходы к литолого-стратиграфическому изучению и картированию раннедокембрийских комплексов (на примере палеопротерозойских и архейских структур Кейв, Кольский полуостров)..... 29

Геоэкология

- Амосов П. В., Бакланов А. А.** Оценка накопления пыли от техногенного объекта хранения хвостов обогащения на территории города..... 41
- Белов М. А.** Оценка содержания селена в почвах и растениях на примере степной и лесостепной зон Челябинской области..... 54
- Тигеев А. А.** Исследование загрязнения взвешенными частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} приземного слоя атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сургут с использованием спектральных индексов..... 64
- Чуйкина Д. И., Король И. С., Мухортина Н. А.** Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района)..... 75

Горное дело

- Антипин Ю. Г., Никитин И. В., Соломенн Ю. М.** Техничко-экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом..... 90
- Любин А. Н.** Повышение безопасности труда процессов очистных работ при разработке пологих маломощных рудных месторождений..... 101

Океанология

- Путанс В. А., Никифоров С. Л., Сорохтин Н. О., Ананьев Р. А., Сухих Е. А., Козлов Н. Е.** Особенности строения верхней осадочной толщи и рельефа дна Баренцева моря в прибрежной акватории полуострова Рыбачий..... 111
- Ульрих Е. В.** Обзор инвазивных гидробионтов бассейна восточного побережья Балтийского моря..... 125

Физика атмосферы

- Янчуковский В. Л., Хисамов Р. З., Калюжная М. А., Кузьменко В. С.** Повышение достоверности результата ПЛС-анализа при оценке температурного эффекта мюонов в атмосфере..... 134

C O N T E N T S

Geology

- Ilichenko V. L., Kaulina T. V., Nerovich L. I.** Petrophysical properties of rocks and ring morphology of the probable impact Yarva-Varaka structure (Monchegorsk ore area of the Kola Region)..... 5
- Kalinin A. A., Khachatryan M. G., Savchenko Ye. E.** Rare earth elements and yttrium minerals in altered granite-porphphy and hosting high-alumina schists in the Pellapahk Cu-Mo occurrence (Kolmozero-Voronya Belt)..... 16
- Kozlov N. E., Mudruk S. V., Sorokhtin N. O.** New approaches to lithological and stratigraphic research and mapping of the early Precambrian complexes (using an example of the Paleoproterozoic and Archean structures of Keivy, Kola Peninsula)..... 29

Geoecology

- Amosov P. V., Baklanov A. A.** Assessment of dust accumulation from a man-made enrichment tailings storage facility in the city..... 41
- Belov M. A.** Assessment of selenium content in soils and plants using the example of steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region..... 54
- Tigeev A. A.** Study of the ground-level by PM_{2.5} and PM₁₀ suspended particles atmospheric air pollution and snow cover in Surgut using spectral indices..... 64
- Chuikina D. I., Korol I. S., Mukhortina N. A.** Chemical composition of surface water under anthropogenic load (on the example of small reservoirs in the Tomsk region)..... 75

Mining

- Antipin Yu. G., Nikitin I. V., Solomein Yu. M.** Feasibility study of mining Bazhenov chrysotile asbestos deposit by combined method..... 90
- Lyubin A. N.** Increase of labor safety processes of underground mining during development of flat thin ore deposits..... 101

Oceanology

- Putans V. A., Nikiforov S. L., Sorokhtin N. O., Ananiev R. A., Sukhikh E. A., Kozlov N. E.** Structural features of the upper sedimentary sequence and seafloor topography in the coastal waters of the Rybachy Peninsula, Barents Sea..... 111
- Ulrikh E. V.** Review of invasive aquatic organisms in the Baltic Sea basin..... 125

Atmospheric physics

- Yanchukovsky V. L., Khisamov R. Z., Kalyuzhnaya M. A., Kuz'menko V. S.** Increasing the reliability of the results of PLS analysis in assessing the temperature effect of muons in the atmosphere..... 134

Петрофизические свойства пород и кольцевая морфология вероятной импактной структуры Ярва-Варака (Мончегорский рудный район Кольского региона)

В. Л. Ильченко*, Т. В. Каулина, Л. И. Нерович

*Геологический институт КНЦ РАН г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
27.01.2026;

получена
после доработки
13.02.2026;

принята
к публикации
16.02.2026

Ключевые слова:

ударный метаморфизм,
петрофизика,
упругая анизотропия,
астроблемы,
Мончегорский район

Изучена морфология и физические свойства (плотность, скорости продольных волн, упругая анизотропия) образцов горных пород, отобранных с поверхности на участке Ярва-Варака в границах предполагаемой астроблемы. Анализ морфологии позволяет определить структуру Ярва-Варака как многокольцевую структуру эллипсовидной формы с максимальным диаметром около 10 км. Кольцевая топография, хотя и не отражает первичную морфологию кратера, связана с избирательной эрозией, обусловленной концентрическим наклоном пластов пород в результате метеоритного удара. Наибольшие вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов отмечаются между 2 и 3 кольцом структуры. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью продольных волн и анизотропией. Установлены заметные площадные вариации петрофизических свойств гранитоидов и гнейсов, представляющих собой породы мишени. Наиболее информативным оказался показатель упругой анизотропии. Внутри кольцевой структуры гранитоиды и гнейсы обладают повышенной анизотропией, тогда как за пределами кольца они часто имеют низкую и среднюю степень анизотропии. Изучение петрофизических свойств астроблемы Ярва-Варака (возраст 2,5 млрд лет) дает полезную информацию, которую в дальнейшем можно будет использовать в процессе исследования древних метеоритных кратеров.

Для цитирования

Ильченко В. Л. и др. Петрофизические свойства пород и кольцевая морфология вероятной импактной структуры Ярва-Варака (Мончегорский рудный район Кольского региона). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-5-15>.

Petrophysical properties of rocks and ring morphology of the probable impact Jarva-Varaka structure (Monchegorsk ore area of the Kola Region)

Vadim L. Ilchenko*, Tatiana V. Kaulina, Lyudmila I. Nerovich

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Article info

Received
27.01.2026;

received
in revised form
13.02.2026;

accepted
16.02.2026

Key words:

shock metamorphism,
petrophysics,
elastic anisotropy,
astroblesmes,
Monchegorsk area

Abstract

The morphology and physical properties (density, longitudinal wave velocities, and elastic anisotropy) of rock samples collected from the surface of the Järva-Varaka site within the boundaries of the proposed astrobleme have been studied. Morphological analysis allows us to define the Järva-Varaka structure as a multi-ring elliptical structure with a maximum diameter of approximately 10 km. The ring topography, although not reflecting the primary crater morphology, is associated with selective erosion caused by the concentric tilting of rock strata as a result of the meteorite impact. The largest variations in the physical properties of gneisses and granitoids are observed between the 2nd and 3rd rings of the structure. In most cases, a direct correlation is observed between density, longitudinal wave velocity, and anisotropy. Significant areal variations in the petrophysical properties of granitoids and gneisses, which represent the target rocks, have been established. Elastic anisotropy proved to be the most informative parameter. Within the ring structure, granitoids and gneisses exhibit increased anisotropy, while outside the ring, they often exhibit low to moderate anisotropy. Studying the petrophysical properties of the 2.5 Ga Jarva-Varaka astrobleme provides useful information that can be used in future searches and studies of ancient meteorite craters.

For citation

Ilchenko, V. L. et al. 2026. Petrophysical properties of rocks and ring morphology of the probable impact Jarva-Varaka structure (Monchegorsk ore area of the Kola Region). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 5–15. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-5-15>.

Введение

Метеоритные бомбардировки в ранней истории Земли без сомнения вносили существенный вклад в формирование земной коры (*Macañtuc и др., 1980; Melosh, 1989*). К настоящему времени на Земле достоверно установлено 194 астроблемы (в том числе 21 на территории России)¹. Только пять из них палеопротерозойского возраста: Вредефорт (2023 ± 4 млн лет – *Gibson et al., 1997*) в Южной Африке; Садбери (1850 ± 3 млн лет – *Davis, 2008*) в Канаде; Яррабубба (2229 ± 5 млн лет – *McDonald et al., 2003; Erickson et al., 2020*) в Австралии; Дхала ($2,44\text{--}2,24$ млрд лет – *Li et al., 2018*) в Индии и Суавьярви ($\sim 2,4$ млрд лет – *Mashchak et al., 2012*) в Карелии. Кроме того, существуют предположения об импактном происхождении ряда кольцевых структур раннего докембрия, например Маниитсок в западной Гренландии (*Garde et al., 2012*), а также находки импактных сферул в верхнеархейских комплексах Южной Африки и Австралии (*Byerly et al., 2002; Lowe et al., 2014*).

По статистическим расчетам, учитывающим размеры кратеров и скорость эрозии, на Земле осталось еще не менее 90 неоткрытых кратеров, размером от 1 до 6 км и более 250 кратеров размером до 1 км (*Hergarten et al., 2015*). К сожалению, все это относится к кратерам не древнее палеозойского возраста. Обнаружение и подтверждение ранних земных импактных структур является серьезной проблемой, поскольку их следы могут быть стерты в результате последующих процессов метаморфизма, тектоники и эрозии (*French et al., 2010; Hergarten et al., 2015; Kenkmann, 2021*).

Метеоритные кратеры обычно связаны с различными геофизическими аномалиями (*French et al., 2010; Glikson et al., 2013*), при этом природа аномалий не всегда очевидна. Часть аномалий обусловлена структурными или тектоническими преобразованиями пород, часть связана с постударными гидротермальными процессами (*Pesonen, 2011; Mayr et al., 2008*). Гравитационные и магнитные аномалии также могут зависеть от петрографического состава пород. Изучение петрофизических свойств пород (плотности, пористости, упругой анизотропии и т. п.) на известных астроблемах дает важную информацию для интерпретации геофизических аномалий в целом (*Mayr et al., 2008* и ссылки там), а также может быть использовано при поиске и исследовании древних метеоритных кратеров (*French et al., 2010*).

Структура Ярва-Варака расположена на севере Мончегорского рудного района Кольского региона. Под структурой мы понимаем одноименный расслоенный массив и породы обрамления (рис. 1). Массив Ярва-Варака сложен гранофировыми гиперстеновыми диоритами, кварцевыми диоритами и гранофировыми норитами (*Nerovich et al., 2023*). Вмещающими породами являются гнейсы кольского метаморфического комплекса с многочисленными пластовыми телами гранитоидов (рис. 1). Внедрение интрузии Ярва-Варака происходило синхронно с завершением становления Мончеплутона. Считалось, что состав ее пород, судя по значительному обогащению кремнеземом, может быть обусловлен процессами контаминации основных расплавов вмещающими гнейсами (*Смолякин и др., 2004*). Однако небольшие размеры массива ($1,7 \times 2,2 \times 2$ км) вызывали сомнение в его способности расплавить достаточный объем вмещающих пород для образования 20 % гранофира (*Нерович и др., 2015; Nerovich et al., 2023*). Более того, геолого-геохимическое изучение пород массива показало его сходство с породами магматического комплекса импактной структуры Садбери (*Grieve, 1994; Naldrett, 2004*), и начиная с 2015 г. для массива Ярва-Варака предполагается импактное происхождение (*Нерович и др., 2015; Nerovich et al., 2023*). Проведенное термодинамическое моделирование процессов кристаллизации подтвердило, что без участия метеоритного удара, создавшего коровый расплав, в массиве Ярва-Варака могло образоваться только 3 % гранофира, а не наблюдаемые 20 % (*Каулина и др., 2025*).

За время изучения структуры Ярва-Варака в гранитоидах обрамления были обнаружены следующие признаки ударного метаморфизма: псевдотахилитовая брекчия, полосы смятия в биотите и клиноцизите, планарные структуры в кварце, диаплектовые стекла циркона, плагиоклаза и силлиманита, микроструктурные деформации в монаците (*Kaulina et al., 2021; Nerovich et al., 2023; Kaulina et al., 2023*).

Возраст пород массива составляет 2496 ± 9 млрд лет (U-Pb ID-TIMS по циркону и бадделейту из кварцевых диоритов – *Смолякин и др., 2004*) и 2498 ± 6 млн лет (U-Pb SHRIMP-II по тем же минералам из пижонит-авгитовых диоритов – *Kaulina et al., 2021*). Возраст ударного метаморфизма, определенного по необластам (перекристаллизованным доменам) в деформированных кристаллах монацита составляет $2,55\text{--}2,52$ млрд лет, что подтверждает наше предположение, что массив Ярва-Варака образовался одновременно с метеоритным ударом (*Kaulina et al., 2023*). Возраст вмещающих глиноземистых гнейсов – $2,83$ млрд лет (*Смолякин и др., 2004*), субпластовых тел биотитовых гранитов – $2,7$ млрд лет (*Kaulina et al., 2023*).

Согласно (*Объяснительная записка..., 2007*) массив Ярва-Варака находится внутри кольцевого разлома; выделяются и более мелкие кольцевые структуры, хорошо различимые на аэрофотоснимках (рис. 1).

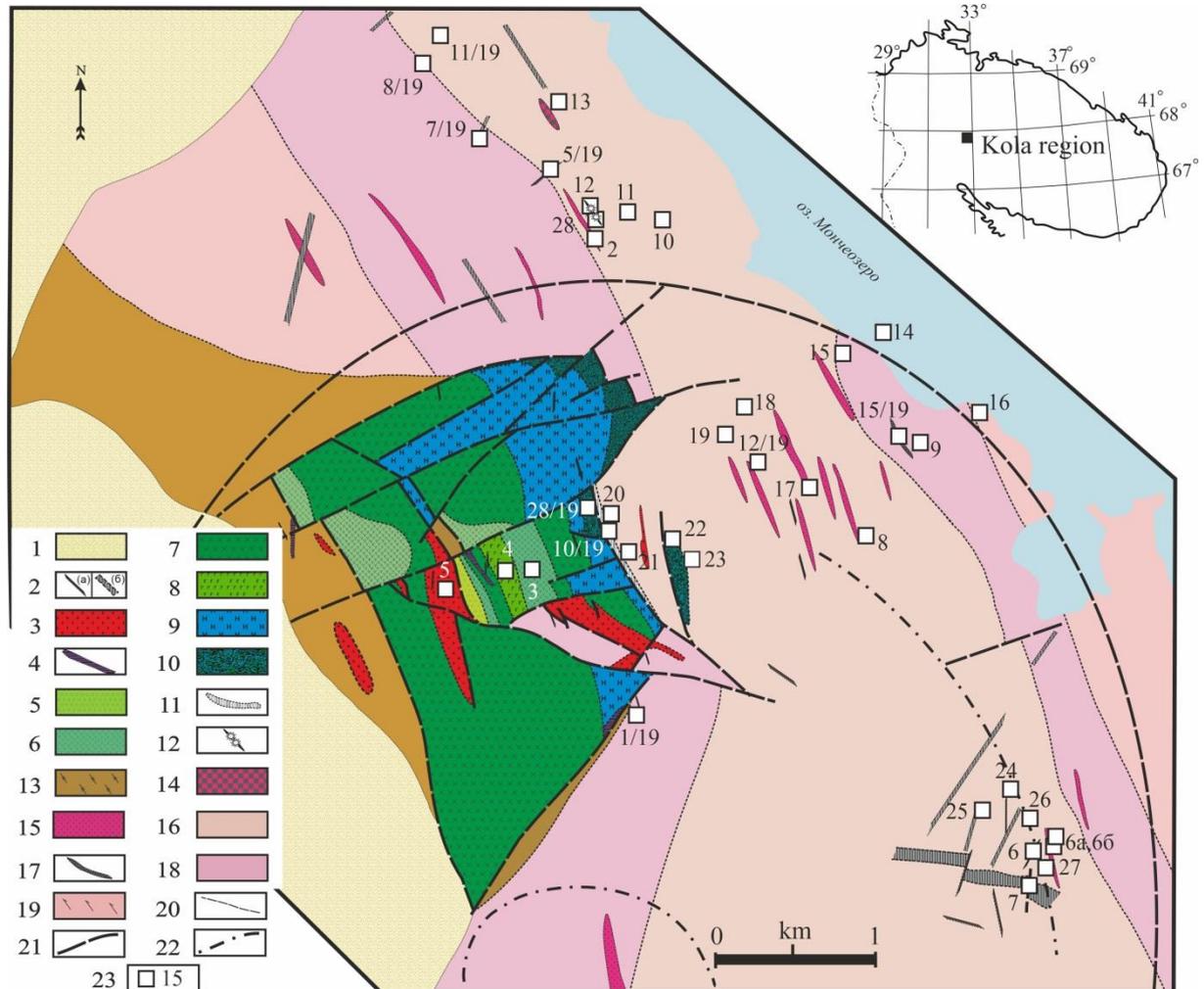
Данная работа посвящена изучению петрофизических свойств пород структуры Ярва-Варака, отобранных на разном расстоянии от предполагаемого центра кольцевой структуры (рис. 2), поскольку

¹ Earth Impact Database. 2024. URL: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>.

признаки ударного воздействия могут отражаться в пространственных вариациях плотности и упругой анизотропии пород (Pesonen, 2011; Mayr et al., 2008).

Материалы и методы

В процессе полевых работ на структуре Ярва-Варака было установлено, что выходы коренных пород, благоприятные для регулярного (прямыми профилями с равным шагом) отбора образцов, встречаются здесь довольно редко. Поэтому образцы отбирались везде, где для этого были условия (рис. 1, 2).



1 – четвертичные отложения; 2–11 – Палеопротерозой: 2 – дайки долеритов; 3 – микроклиновые граниты, неравномерно гнейсовидные и катаклазированные; 4–10 – породы массива Ярва-Варака: 4 – дайки пироксен-плагиоклазовых порфиритов; 5 – гранофировые гранодиориты; 6 – гранофировые кварцевые диориты; 7 – гранофировые гиперстеновые диориты; 8 – гранофировые пижонит-авгитовые диориты; 9 – гранофировые нориты; 10 – диориты зоны контакта; 11 – зона брекчирования гранито-гнейсового состава; 12 – псевдотахилитовая брекчия; 13–19 – Архей: 13 – эпидот-биотитовые, биотит-амфиболовые диорито-гнейсы; 14 – пегматоидные лейкоплагиограниты; 15 – биотитовые граниты субпластовых тел, неравномерно гнейсовидные; 16–19 – архейские образования кольского метаморфического комплекса: 16 – силлиманит-биотитовые, силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы с кианитом и ставролитом; 17 – амфибол-магнетитовые кварциты; 18 – биотитовые, гранат-биотитовые с силлиманитом и без, амфибол-биотитовые, эпидот-биотитовые гнейсы, амфиболиты и амфибол-магнетитовые кварциты; 19 – биотитовые гнейсы с подчиненными амфибол-биотитовыми гнейсами с редкими телами амфиболитов; 20 – границы распространения пород; 21 – разрывные нарушения; 22 – кольцевые структуры по аэрофотоснимкам; 23 – точки отбора образцов.

Рис. 1. Геологическая карта-схема участка Ярва-Варака (Nerovich et al., 2023 с упрощениями) с точками отбора образцов
 Fig. 1. Geological map-scheme of the Järva-Varaka structure (Nerovich et al., 2023 with simplifications) with sampling points

Было отобрано 38 образцов из пород массива Ярва-Варака и вмещающих гранитоидов, для которых определены плотность, скорости распространения продольных волн и индекс упругой анизотропии (рис. 1, 2, таблица). Методика петрофизических измерений подробно описана в работе (Ильченко и др., 2022). Петрография пород изучена в шлифах и аншлифах.

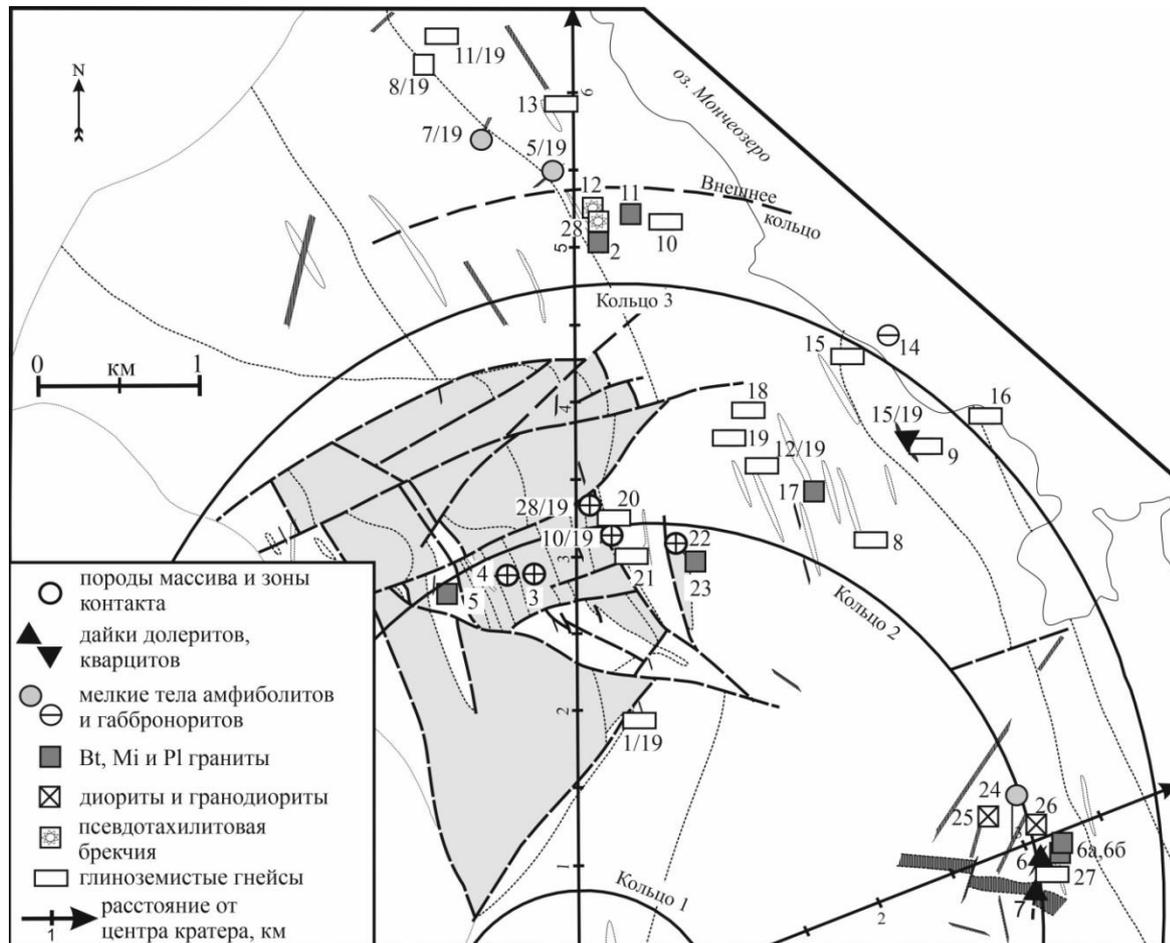


Рис. 2. Схема кольцевой структуры Ярва-Варака с точками отбора образцов из разных типов пород на разном расстоянии от предполагаемого центра структуры
 Fig. 2. The scheme of the Jarva-Varaka ring structure with sampling points for different rock types at different distances from the presumed crater centre

Таблица. Физические свойства образцов пород структуры Ярва-Варака
 Table. Physical properties of rock samples from the Jarva-Varaka structure

Номер образца	Горная порода	Плотность ρ , г/см ³	Скорость продольных волн в трех направлениях (км/с): V_1, V_2, V_3	Средняя скорость $V_{ср}$, км/с	Показатель A , %
Породы массива и зоны контакта					
3	Диорит	2,87	3,84; 4,01; 3,96	3,94	3,13
4	Гранодиорит	2,76	4,00; 3,85; 3,88	3,91	2,87
10/19	Милонит с линзами силлиманит-сланцев	2,91	4,47; 4,63; 4,69	4,60	3,50
22	Гибридная порода	2,93	3,58; 3,82; 3,62	3,67	4,96
28/19	Гибридная порода	2,77	4,66; 4,57; 4,65	4,63	1,51
Дайки долеритов, кварцитов, мелкие тела амфиболитов и габброноритов					
6	Габбро-долерит мелкозернистый (дайка)	3,09	3,55; 4,07; 3,82	3,81	9,65
7	Долерит средне-мелкозернистый (дайка)	3,11	3,90; 4,22; 3,96	4,03	5,97
5/19	Эпидотовый амфиболит средне-мелкозернистый (дайка)	3,03	4,84; 4,84; 4,64	4,77	3,43

7/19	Эпидотовый/эпидотсодержащий амфиболит мелкозернистый (дайка)	2,98	4,20; 4,05; 4,05	4,10	2,99
14	Габбронорит средне-крупнозернистый	2,94	4,68; 4,36; 4,82	4,62	7,22
15/19	Амфибол-магнетитовый кварцит (дайка)	2,99	4,69; 4,46; 4,88	4,68	6,35
24	Амфиболит, среднезернистый	2,85	3,61; 3,50; 3,50	3,54	2,54
Псевдотахилитовая брекчия					
12	Псевдотахилитовая брекчия	2,87	3,80; 3,56; 3,63	3,66	4,77
28	Псевдотахилитовая брекчия	2,70	3,38; 3,34; 3,51	3,41	3,69
Субпластовые тела гранитоидов					
2	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелкозернистый	2,77	3,98; 3,75; 4,05	3,93	5,65
5	Микроклиновый гранит	2,65	3,80; 3,88; 3,96	3,88	2,92
6а	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелкозернистый	2,77	4,09; 3,79; 3,49	3,79	11,2
6б	Биотитовый аляскит пегматоидный	2,62	3,65; 3,65; 3,40	3,57	5,72
8/19	Лейкократовый гранит	2,67	4,67; 4,79; 4,51	4,66	4,26
11	Лейкоплагиогранит пегматоидный	2,66	4,02; 3,65; 3,53	3,73	9,68
17	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), мелко-среднезернистый	2,73	4,02; 3,88; 4,15	4,02	4,75
23	Биотитовый гранит (участками гнейсовидный), средне-мелкозернистый	2,69	4,18; 4,44; 3,78	4,13	11,4
25	Диорит биотит-амфиболовый (местами гнейсовидный), мелко-среднезернистый	2,83	4,07; 3,87; 4,20	4,05	5,81
26	Гранодиорит мусковит-биотитовый (местами гнейсовидный), с/з	2,78	3,72; 4,24; 4,02	3,93	9,80
Гнейсы					
1/19	Биотитовый гнейс мезократовый мелкозернистый	2,70	4,20; 3,88; 3,65	3,91	9,99
8	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,71	3,66; 3,76; 3,63	3,68	2,62
9	Эпидот-биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,72	3,66; 3,51; 3,45	3,54	4,32
10	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,62	3,28; 3,32; 3,57	3,39	6,56
11/19	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,68	4,30; 4,68; 4,48	4,49	5,99
12/19	Силлиманит-биотитовый гнейс средне-мелкозернистый	2,69	4,04; 4,47; 3,98	4,16	9,09
13	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,75	3,90; 3,90; 4,01	3,94	2,28
15	Биотитовый гнейс, средне-мелкозернистый	2,74	4,30; 3,86; 3,71	3,96	11,0
16	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,70	4,62; 3,78; 3,34	3,91	23,52
18	Биотитовый гнейс, мелко-среднезернистый	2,87	3,91; 4,00; 4,12	4,01	3,72
19	Биотитовый гнейс мигматизированный, мелкозернистый	2,71	4,63; 4,27; 4,00	4,30	10,4
20	Биотитовый гнейс мигматизированный, м-с/з из зоны брекчирования	2,77	4,24; 3,76; 3,70	3,90	10,7
21	Биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,68	4,40; 4,29; 4,18	4,29	3,63
27	Гранат-биотитовый гнейс, мелкозернистый	2,66	3,84; 4,06; 3,83	3,91	4,70

Результаты и обсуждение

По кольцевому разлому и двум внутренним кольцам, построенным по аэрофотоснимкам (рис. 1), можно реконструировать кольцевую структуру эллипсоидной формы с максимальным диаметром кольца около 7,8 км (рис. 2 – кольцо 3), центр структуры расположен чуть ниже южного края схемы. Расположение точек отбора проб показывает, что среднее внутреннее кольцо (кольцо 2) представляет собой поднятие и является, вероятно, результатом избирательной эрозии. Для древних кратеров кольцевая топография не всегда совпадает с первозданной морфологией кратера, но тем не менее избирательная эрозия связана именно с концентрическим наклоном пластов пород в результате метеоритного удара (*Kenkmann, 2021*). Импактные породы, заполняющие кратер, должны были быть удалены эрозией за период существования кратера (*Kenkmann, 2021*), поэтому и признаки шокового метаморфизма в структуре Ярва-Варака обнаружены, в основном, в минералах (*Kaulina et al., 2021; 2023; Nerovich et al., 2023*). Учитывая, что псевдотахилитовая брекчия и микроструктуры деформации в монаците обнаружены на расстоянии 5,5 км от центра кольцевой

структуры (рис. 2 – образцы 2, 12, 28), скорее всего, реальный ее диаметр составляет около 10 км (внешнее кольцо на рис. 2).

Результаты измерения физических свойств пород представлены в таблице и на рис. 3.

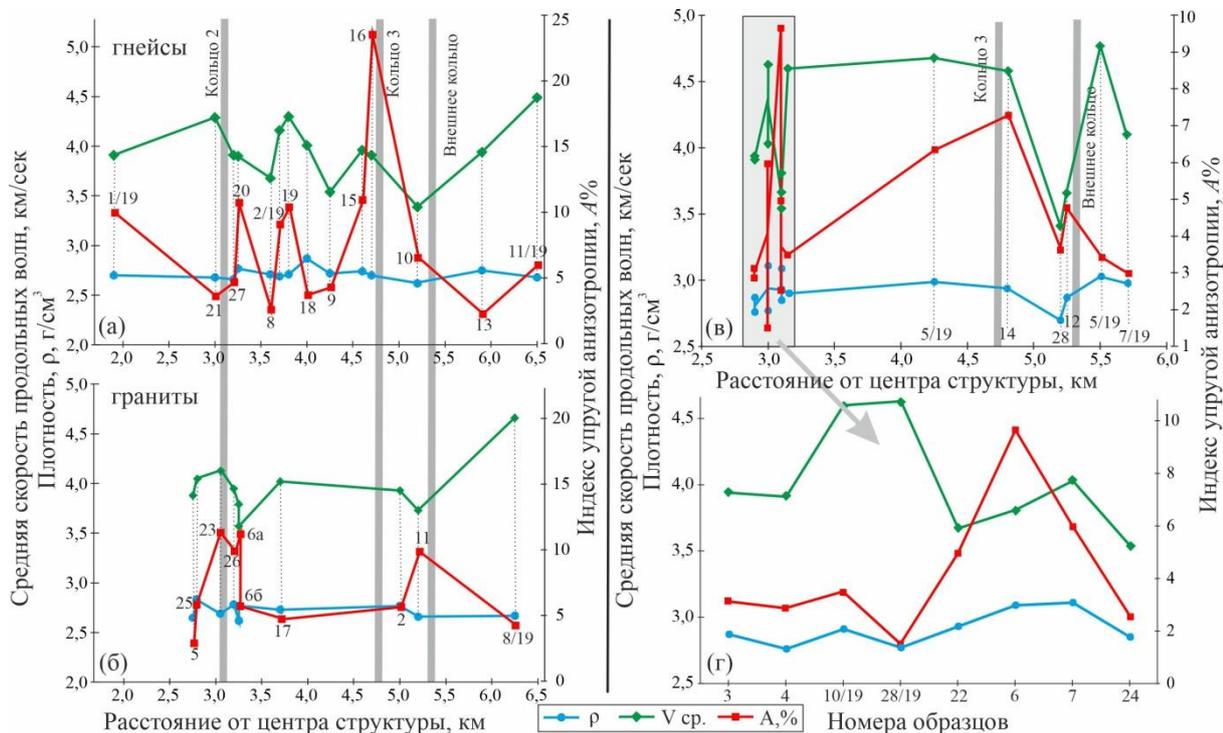


Рис. 3. Физические свойства пород структуры Ярва-Варака, отобранных на разном расстоянии от предполагаемого центра структуры: *a* – гнейсы; *б* – граниты; *в, г* – породы основного состава

Fig. 3. Physical properties of the Jarva-Varaka structure rocks sampled at different distances from the supposed center of the structure: *a* – gneisses; *б* – granites; *в, г* – basic rocks

Основной интерес представляют физические свойства вмещающих гнейсов и гранитоидов, поскольку именно они являлись породами мишени, которые подверглись ударному метаморфизму. Вариации их физических свойств могут в той или иной степени отражать наложенный шоковый метаморфизм, хотя и имевший место 2500 млн лет назад. Изучение физических свойств пород из 17 импактных структур (*Pesonen, 2011*) показали четкие тенденции изменения плотности пород и скорости упругих волн: 1) плотность увеличивается от зювитов к брекчиям, псевдотахилитам, трещиноватым породам мишени (гнейсам) и далее к нетрещиноватым породам мишени; 2) скорость ультразвуковых волн в основном определяется пористостью пород с отрицательной корреляцией. При этом плотность пород по-разному коррелирует с пористостью, т. е. и со скоростью упругих волн. Существенный вклад вносит структура и текстура пород, трещиноватость, минеральный состав и распределение зерен по размерам (*Mayr et al., 2008* и ссылки там).

Плотность гнейсов варьирует от 2,62 до 2,87 г/см³ (табл.). Наибольшие вариации плотности отмечаются между кольцами 2 и 3 (рис. 3, *a*). Здесь же наблюдаются наибольшие вариации в скорости продольных волн и упругой анизотропии. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью продольных волн и анизотропией. За пределами внешнего кольца параметры меняются произвольно. Перед кольцом 2 скорость продольных волн и анизотропия находятся в противофазе и не зависят от плотности пород. Наибольшие значения упругой анизотропии 10,7; 10,4 и 23,5 % получены для образцов 20, 19 и 16, соответственно, представленных мигматизированными разновидностями гнейсов. Мигматизация обычно понижает анизотропию пород в связи с залечиванием трещин (*Ильченко и др., 2022*). В данном случае мигматизация, которая произошла 2,7 млрд лет назад, т. е. до метеоритного удара, вероятно, сыграла обратную роль, приведя к неоднородности образцов с их дроблением и повышением анизотропии под влиянием ударного метаморфизма.

Плотность гранитоидов варьирует от 2,62 до 2,83 г/см³, наиболее высокую плотность имеют гранодиоритовые разновидности (табл.). Упругая анизотропия пород ниже, чем у гнейсов, и не выходит за пределы 10 %. Повышения анизотропии встречаются в образцах около колец 2 и 3. Скорость продольных волн практически у всех образцов меняется пропорционально плотности. Упругая анизотропия обратно пропорциональна скорости в пределах всей структуры (рис. 3, *б*).

Породы массива, вероятно, образовались вместе с метеоритным ударом, который создал необходимый объем разогретого/расплавленного корового материала. Внедрение основного расплава, ассимилировавшего расплавленные вмещающие гранитоиды (породы мишени) создало гранофировые породы массива Ярва-Варака. Дайки долеритов и мелкие интрузии основных пород образовались позднее этого события. В эту же группу мы отнесли пробы псевдотахилитов как образовавшихся при плавлении пород мишени. Плотность этой группы пород выше, чем у гнейсов и гранитоидов, и составляет 2,76–3,11 г/см³ (табл.). Практически во всех образцах скорость упругих волн коррелирует с плотностью пород и упругой анизотропией (рис 3, в, з). В целом, кроме двух образцов, анизотропия пород низкая – до 6 %.

По площади структуры плотность гнейсов и гранитоидов меняется произвольно, независимо от нахождения пород в пределах или за пределами колец (рис. 4, а). Характерного увеличения плотности по мере удаления от центра кратера, как это описано для других импактных структур (Mayr et al., 2008; Pesonen, 2011), где плотность пород мишени возрастает к периферии с менее сильным шоквым метаморфизмом, в нашем случае не наблюдается. Вероятно, это связано как с разнообразием состава гнейсов и гранитоидов, так и с древним возрастом импактной структуры, где следы ударного метаморфизма слабо сохранились.

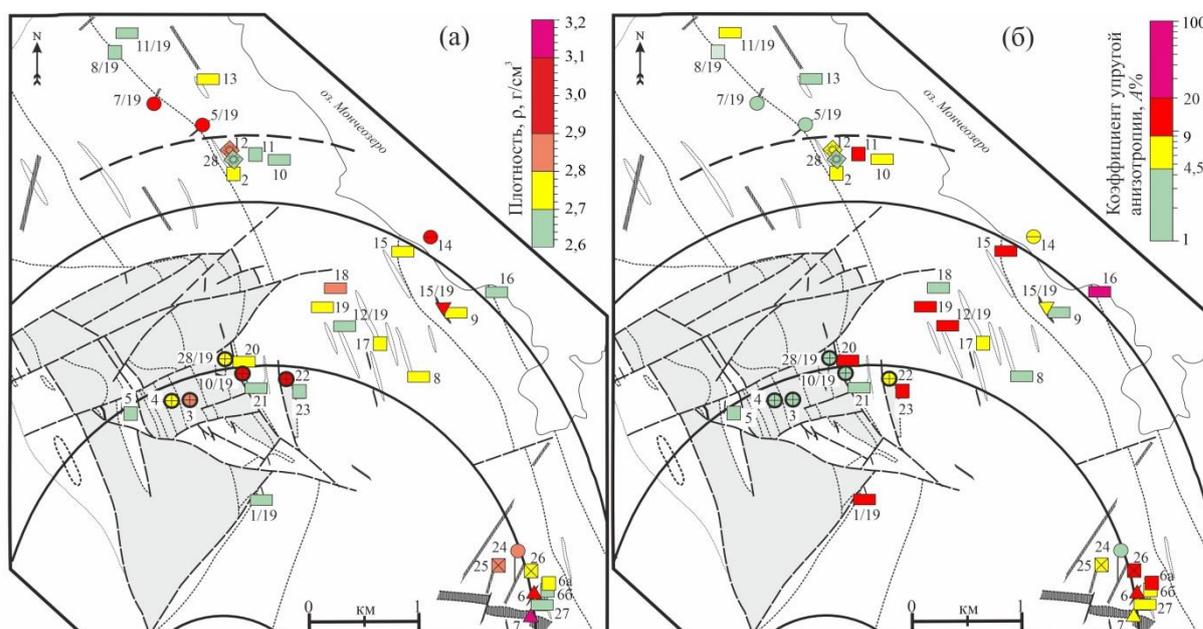


Рис. 4. Вариации физических свойств пород структуры Ярва-Варака по площади:
а – плотность пород; б – индекс упругой анизотропии

Fig. 4. Aerial variations in the physical properties of the Jarva-Varaka structure rocks:
а – rock density; б – elastic anisotropy index

Величина упругой анизотропии более информативна. В целом в пределах кольцевой структуры (рис. 4, б) гнейсы и гранитоиды обрамления сильноанизотропны ($A = 9–24\%$) в отличие от пород массива ($<4,5\%$), которые не были подвержены ударному метаморфизму. Тем не менее несколько образцов гнейсов слабоанизотропны (8, 9, 18, 21), что может быть связано с их мелкозернистой структурой и большей гомогенностью. За пределами кольца (северный край карты) породы демонстрируют низкую и среднюю степень анизотропии ($<9\%$ – рис. 4, б).

В целом же, петрофизические исследования структуры Ярва-Варака осложняются плохой обнаженностью района и неоднородностью гнейсов и гранитоидов, которые подвергались ударному метаморфизму, что затрудняет сравнение свойств пород по площади. Рассмотренные данные по гнейсам и гранитам позволяют сказать, что физические свойства гнейсов в большей степени отражают морфологию структуры Ярва-Варака.

Заключение

Структура Ярва-Варака представляет собой многокольцевую импактную структуру размером около 10 км. Современная кольцевая морфология, вероятнее всего, является результатом избирательной эрозии в результате изменения физических свойств пород при импактном метаморфизме. Современное положение колец не совпадает с первичными границами кратера, но повторяет первичную конфигурацию и является отражением именно метеоритного удара. Сравнение данных по гнейсам и гранитам позволяют сказать, что физические свойства гнейсов в большей степени отражают морфологию структуры Ярва-Варака.

Вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов, являющихся породами мишени, могут в той или иной степени отражать наложенный шоковый метаморфизм, хотя и имевший место 2500 млн лет назад. Наибольшие вариации физических свойств гнейсов и гранитоидов отмечаются между 2-м и 3-м кольцами структуры. В большинстве случаев отмечается прямая корреляция между плотностью, скоростью и анизотропией.

Наибольшие значения упругой анизотропии 11–23 % получены для мигматизированных разновидностей гнейсов. Мигматизация обычно понижает анизотропию пород в связи с залечиванием трещин. В данном случае мигматизация, вероятно, привела к неоднородности образцов и повышению анизотропии в результате ударного метаморфизма.

В целом, в пределах кольцевой структуры гнейсы и гранитоиды в большинстве своем демонстрируют высокую степень анизотропии (в отличие от пород массива и базитовых даек, которые не были подвержены ударному метаморфизму). За пределами внешнего кольца породы слабоанизотропны.

Изучение петрофизических свойств астроблемы Ярва-Варака, возраст которой 2,5 млрд лет, дает полезную информацию, которую в дальнейшем можно будет использовать в процессе исследования древних метеоритных кратеров.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН FMEZ-2024-0006 "Геология, геохимия и тектоника докембрийских комплексов Кольского региона как основа металлогенического прогноза северо-запада арктической зоны Российской Федерации".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н., Каулина Т. В., Лялина Л. И. [и др.]. Лицевское рудопоявление урана (Арктическая зона Фенноскандинавского щита): новые результаты петрофизических и геохимических исследований // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 393–404. DOI: <https://doi.org/10.31897/rmi.2022.44>. EDN: GXUGYU.
- Каулина Т. В., Анисимов Р. Л., Кунаккузин Е. Л., Балтыбаев Ш. К. [и др.]. Механизм образования гранофировых пород массива Ярва-Варака (Мончегорский рудный район, Кольский полуостров): Sm-Nd и Rb-Sr системы и термодинамическое моделирование // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. № 22. С. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.045>. EDN: QJWPLP.
- Масайтис В. Л., Данилин А. Н., Машак М. С., Райхлин А. И. [и др.]. Геология астроблем. Л. : Недра, 1980. 231 с.
- Нерович Л. И., Баянова Т. Б., Кунаккузин Е. Л., Базай А. В. [и др.]. Новые результаты геолого-петрографического и геохимического изучения расслоенного массива Ярва-Варака, Мончегорский рудный район // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2015. № 12. С. 141–146. EDN: WWMPBH.
- Объяснительная записка к Геологической карте Мурманской области. Масштаб 1:200000. Лист Q-36-III, IV / ред. Ремизова А. М. Апатиты, 2007. 121 с.
- Смолякин В. Ф., Федотов Ж. А., Нерадовский Ю. Н., Баянова Т. Б. [и др.]. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. 177 с.
- Byerly G. R., Lowe D. R., Wooden J. L., Xie X. An Archaean impact layer from the Pilbara and Kaapvaal cratons // *Science*. 2002. Vol. 297. P. 1325–1327. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1073934>.
- Davis D. W. Sub-million-year age resolution of Precambrian igneous events by thermal extraction–thermal ionization mass spectrometer Pb dating of zircon: Application to crystallization of the Sudbury impact melt sheet // *Geology*. 2008. Vol. 36, Iss. 5. P. 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1130/g24502a.1>.
- Erickson T. M., Kirkland C. L., Timms N. E., Cavosie A. J. [et al.]. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognized meteorite impact structure // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. Article number: 300. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>.
- French B. M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 98, Iss. 1–2. P. 123–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>.
- Garde A. A., McDonald I., Dyck B., Keulen N. Searching for giant, ancient impact structures on Earth: The Mesoarchaean Maniitsoq structure, West Greenland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2012. Vol. 337–338. P. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.026>.

- Gibson R. L., Armstrong R. A., Reimold W. U. The age and thermal evolution of the Vredefort impact structure: A single-grain U-Pb zircon study // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61, Iss. 7. P. 1531–1540. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00013-6).
- Glikson A. Y., Uysal I. T., FitzGerald J. D., Saygin E. Geophysical anomalies and quartz microstructures, Eastern Warburton Basin, North-east South Australia: Tectonic or impact shock metamorphic origin? // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 589. P. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.036>.
- Grieve R. A. F. An impact model for the Sudbury structure // *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium: Ontario Geological Survey Special Volume*. 1994. Vol. 5. P. 119–32.
- Hergarten S., Kenkmann T. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 425. P. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.009>.
- Kaulina T. V., Shilovskikh V. V., Nerovich L. I., Savchenko E. E. [et al.]. Microstructural deformation and the age of monazite-(Ce) from diatellite granite in the Jarva-Varaka structure (Kola Region, Russia) // *Minerals*. 2023. Vol. 13, Iss. 10. Article number: 1325. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101325>.
- Kaulina T. V., Nerovich L. I., Ilchenko V. L., Lialina L. M. [et al.]. Astroblems in the Early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic Shield) // *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth / eds.: A. K. Shandilya, V. K. Singh, S. C. Bhatt, C. S. Dubey*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore, 2021. P. 25–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
- Kenkmann T. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more // *Meteoritics & Planetary Science*. 2021. Vol. 56, N 5. P. 1024–1070. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.13657>.
- Li S.-S., Keerthy S., Santosh M., Singh S. P. [et al.]. Anatomy of impactites and shocked zircon grains from Dhala reveals Paleoproterozoic meteorite impact in the Archean basement rocks of Central India // *Gondwana Research*. 2018. Vol. 54. P. 81–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.006>.
- Lowe D. R., Byerly G. R., Kyte F. T. Recently discovered 3.42–3.23 Ga impact layers, Barberton Belt, South Africa: 3.8 Ga detrital zircons, Archean impact history, and tectonic implications // *Geology*. 2014. Vol. 42, Iss. 9. P. 747–750. DOI: <https://doi.org/10.1130/G35743.1>.
- Mashchak M. S., Naumov M. V. The Suavjärvi impact structure, NW Russia // *Meteoritics & Planetary Science*. 2012. Vol. 47, Iss. 10. P. 1644–1658. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x>.
- Mayr S. I., Wittmann A., Burkhardt H., Popov Y. [et al.]. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure) // *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113, Iss. B7. Article number: B07201. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007jb005420>.
- McDonald F. A., Burring J. A., Cina C. E. Yarrabubba – A large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia // *Earth and Planetary Science Letters*. 2003. Vol. 213, Iss. 3–4. P. 235–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00322-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00322-4).
- Melosh H. J. *Impact cratering: A geological process*. New York: Oxford University Press, 1989. 245 p.
- Naldrett A. J. *Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry, and exploration*. Springer, 2004. 727 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1>.
- Nerovich L. I., Kaulina T. V., Bayanova T. B., Ilchenko V. L. [et al.]. Granophyre norites and diorites of the Jarva-Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): Geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin // *Geochemistry International*. 2023. Vol. 61, N 6. P. 572–592. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
- Pesonen L. J. Petrophysical properties of impact rocks – The key to understanding geophysical anomalies of meteorite impact structures // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2011*, abstract id. P34A-06.

References

- Ilchenko, V. L., Afanasieva, E. N., Kaulina, T. V., Lyalina, L. M. et al. 2022. Litsa uranium ore occurrence (Arctic zone of the Fennoscandian Shield): New results of petrophysical and geochemical studies. *Journal of Mining Institute*, 255, pp. 393–404. DOI: <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.44>. EDN: GXUGYU. (In Russ.)
- Kaulina, T. V., Anisimov, R. L., Kunakkuzin, E. L., Baltybaev, Sh. K. et al. 2025. Mechanism of granophyre rocks formation of the Järva-Varaka massif (Monchegorsk ore region, Kola Peninsula): Sm-Nd and Rb-Sr systems and thermodynamic modeling. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 22, pp. 331–339. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.045>. EDN: QJWPLP. (In Russ.)
- Masaitis, V. L., Danilin, A. N., Maschak, M. S., Raikhlin, A. I. et al. 1980. *Geology of astroblemes*. Leningrad. (In Russ.)
- Nerovich, L. I., Bayanova, T. B., Kunakkuzin, E. L., Bazai, A. V. et al. 2015. New results of geological-petrographic and geochemical study of the layered Yarva-Varaka massif, Monchegorsk ore region. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 12, pp. 141–146. EDN: WWMPBH. (In Russ.)
- Explanatory note to the Geological map of the Murmansk region. 2007. Scale 1:200000. Sheet Q-36-III, IV / ed. Remizova A. M. Apatity. (In Russ.)

- Smolkin, V. F., Fedotov, Zh. A., Neradovsky, Yu. N., Bayanova, T. B. et al. 2004. Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: Petrology, mineralization, isotopy, deep structure. Apatity. (In Russ.)
- Byerly, G. R., Lowe, D. R., Wooden, J. L., Xie, X. 2002. An Archaean impact layer from the Pilbara and Kaapvaal cratons. *Science*, 297, pp. 1325–1327. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1073934>.
- Davis, D. W. 2008. Sub-million-year age resolution of Precambrian igneous events by thermal extraction–thermal ionization mass spectrometer Pb dating of zircon: Application to crystallization of the Sudbury impact melt sheet. *Geology*, 36(5), pp. 383–386. DOI: <https://doi.org/10.1130/g24502a.1>.
- Erickson, T. M., Kirkland, C. L., Timms, N. E., Cavosie, A. J. et al. 2010. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognized meteorite impact structure. *Nature Communications*, 11. Article number: 300. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>.
- French, B. M., Koeberl, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, 98(1–2), pp. 123–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>.
- Garde, A. A., McDonald, I., Dyck, B., Keulen, N. 2012. Searching for giant, ancient impact structures on Earth: The Mesoarchaean Maniitsoq structure, West Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 337–338, pp. 197–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.026>.
- Gibson, R. L., Armstrong, R. A., Reimold, W. U. 1997. The age and thermal evolution of the Vredefort impact structure: A single-grain U-Pb zircon study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(7), pp. 1531–1540. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00013-6](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00013-6).
- Glikson, A. Y., Uysal, I. T., FitzGerald, J. D., Saygin, E. 2013. Geophysical anomalies and quartz microstructures, Eastern Warburton Basin, North-east South Australia: Tectonic or impact shock metamorphic origin? *Tectonophysics*, 589, pp. 57–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.036>.
- Grieve, R. A. F. 1994. An impact model for the Sudbury structure. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk Symposium: Ontario Geological Survey Special Volume*, 5, pp. 119–32.
- Hergarten, S., Kenkmann, T. 2015. The number of impact craters on Earth: Any room for further discoveries? *Earth and Planetary Science Letters*, 425, pp. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.009>.
- Kaulina, T. V., Shilovskikh, V. V., Nerovich, L. I., Savchenko, E. E. et al. 2023. Microstructural deformation and the age of monazite-(Ce) from diatexite granite in the Jarva-Varaka structure (Kola Region, Russia). *Minerals*, 13(10). Article number: 1325. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13101325>.
- Kaulina, T. V., Nerovich, L. I., Ilchenko, V. L., Lialina, L. M. et al. 2021. Astroblems in the Early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic Shield). In *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth*. Eds.: A. K. Shandilya, V. K. Singh, S. C. Bhatt, C. S. Dubey. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore, pp. 25–37. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3.
- Kenkmann, T. 2021. The terrestrial impact crater record: A statistical analysis of morphologies, structures, ages, lithologies, and more. *Meteoritics & Planetary Science*, 56(5), pp. 1024–1070. DOI: <https://doi.org/10.1111/maps.13657>.
- Li, S.-S., Keerthy, S., Santosh, M., Singh, S. P. et al. 2018. Anatomy of impactites and shocked zircon grains from Dhala reveals Paleoproterozoic meteorite impact in the Archean basement rocks of Central India. *Gondwana Research*, 54, pp. 81–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.10.006>.
- Lowe, D. R., Byerly, G. R., Kyte, F. T. 2014. Recently discovered 3.42–3.23 Ga impact layers, Barberton Belt, South Africa: 3.8 Ga detrital zircons, Archean impact history, and tectonic implications. *Geology*, 42(9), pp. 747–750. DOI: <https://doi.org/10.1130/G35743.1>.
- Mashchak, M. S., Naumov, M. V. 2012. The Suavjärvi impact structure, NW Russia. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(10), pp. 1644–1658. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2012.01428.x>.
- Mayr, S. I., Wittmann, A., Burkhardt, H., Popov, Y. et al. 2008. Integrated interpretation of physical properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Chicxulub impact structure). *Journal of Geophysical Research*, 113(B7). Article number: B07201. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007jb005420>.
- McDonald, F. A., Bunring, J. A., Cina, C. E. 2003. Yarrabubba – A large, deeply eroded impact structure in the Yilgarn Craton, Western Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3–4), pp. 235–247. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(03\)00322-4](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(03)00322-4).
- Melosh, H. J. 1989. Impact cratering: A geological process. New York, Oxford University Press.
- Naldrett, A. J. 2004. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry, and exploration. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-08444-1>.
- Nerovich, L. I., Kaulina, T. V., Bayanova, T. B., Ilchenko, V. L. et al. 2023. Granophyre norites and diorites of the Jarva-Varaka massif (Monchegorsk ore area, Kola Region, Russia): Geology, petrography, geochemistry, geochronology and origin. *Geochemistry International*, 61(6), pp. 572–592. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
- Pesonen, L. J. 2011. Petrophysical properties of impact rocks – The key to understanding geophysical anomalies of meteorite impact structures. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011, abstract id. P34A-06.

Сведения об авторах

Ильченко Вадим Леонидович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Vadim L. Ilchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher;
e-mail: v.ilchenko@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2086-4722>

Каулина Татьяна Владимировна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: t.kaulina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Tatiana V. Kaulina – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geology & Miner.), Chief Researcher;
e-mail: t.kaulina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6530-2187>

Нерович Людмила Ивановна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: l.nerovich@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6821-1941>

Lyudmila I. Nerovich – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher;
e-mail: l.nerovich@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6821-1941>

УДК 549.752.14+549.618.6+549.744 (470.21)

Минералы редкоземельных элементов и иттрия в измененных гранит-порфирах и вмещающих глиноземистых сланцах на медно-молибденовом рудопоявлении Пеллапахк (пояс Колмозеро-Воронья)

А. А. Калинин*, М. Г. Хачатрян, Е. Э. Савченко

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;

e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 16.01.2026;

получена после доработки 17.02.2026;

принята к публикации 18.02.2026

Ключевые слова:

пояс Колмозеро-Воронья, рудопоявление Пеллапахк, монацит, ксенотим, алланит

Изучены минералы редкоземельных элементов, установленные в метаморфических породах северо-западной части зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья на участке медно-молибден-порфирового рудопоявления Пеллапахк – фосфаты монацит-(Ce) и ксенотим-(Y), фторкарбонаты синхизит-(Ce) и паризит-(Ce), силикаты – алланит-(Ce). В глиноземистых сланцах поросозерской серии монацит и ксенотим образуют равномерную вкрапленность мелких изометричных зерен среди породообразующих силикатов и в кварце. В измененных гранит-порфирах с Cu-Mo минерализацией минералы редкоземельных элементов встречаются преимущественно в виде зональных образований: монацит и ксенотим слагают их центральную часть и последовательно обрастают апатитом-F, фторкарбонатами REE, алланитом и эпидотом. Микровключения монацита и ксенотима были отмечены в метакристаллах пирита. Для монацита и ксенотима из глиноземистых сланцев поросозерской серии предполагается метаморфический генезис – формирование за счет перераспределения редкоземельных элементов из изоморфных примесей в силикатах в собственные фазы. Монациты и ксенотимы из измененных гранит-порфиров, скорее всего, магматического происхождения, но позже были частично или полностью замещены карбонатами и силикатами REE в ходе гидротермальных процессов при развитии Cu-Mo и полиметаллической минерализации. Для монацитов характерны две схемы гетеровалентного изоморфизма – чералитовая и хаттонитовая. В монацитах из глиноземистых сланцев преобладает комбинация чералитового замещения с хаттонитовым ($3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$), а в монацитах из измененных гранит-порфиров – хаттонитовое (Th, Si). В монацитах метаморфического генезиса из глиноземистых сланцев сумма редких земель, в целом, ниже, а содержание тория выше, чем в гидротермально измененных монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам.

Для цитирования

Калинин А. А. и др. Минералы редкоземельных элементов и иттрия в измененных гранит-порфирах и вмещающих глиноземистых сланцах на медно-молибденовом рудопоявлении Пеллапахк (пояс Колмозеро-Воронья). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-16-28>.

Rare earth elements and yttrium minerals in altered granite-porphyry and hosting high-alumina schists in the Pellapahk Cu-Mo occurrence (Kolmozero-Voronya Belt)

Arkadiy A. Kalinin*, Mariam G. Khachatryan, Yevgeny E. Savchenko

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;

e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received 16.01.2026;

received in revised form 17.02.2026;

accepted 18.02.2026

Key words:

Kolmozero-Voronya Belt, Pellapahk occurrence, monazite, xenotime, allanite

Abstract

Rare Earth Elements (REE) and yttrium phosphates monazite-(Ce) and xenotime-(Y), fluorine carbonates synchysite-(Ce) and parisite-(Ce), silicate allanite-(Ce) have been studied in the metamorphic rocks in the area of the Pellapahk Cu-Mo porphyry occurrence in the north-western part of the Kolmozero-Voronya greenstone belt. Monazite-(Ce) and xenotime-(Y) form regular dissemination of fine grains in interstitions in rock-forming silicates and quartz in high-alumina gneisses and schists of the Porosozero series. In the altered granite-porphyry with Cu-Mo mineralization, REE minerals form zonal grains with monazite or xenotime in the core, surrounded by apatite-(F), then by fluorine carbonates synchysite-(Ce) and parisite-(Ce), and by silicates allanite-(Ce) and epidote in the outer parts. Besides, monazite-(Ce) and xenotime-(Y) have been found in inclusions in pyrite metacrystals. In the high-alumina schists, monazite and xenotime are of metamorphic genesis, they are formed due to re-distribution of REE and Y from isomorphic impurities in silicates to proper minerals. In the altered granite-porphyry, monazite and xenotime are supposed to be of magmatic genesis, but altered later during hydrothermal processes and partly or fully substituted by apatite, REE carbonates and silicates. Two schemes of heterovalent isomorphic substitutions are defined in monazites. Combination of "cheralite" and "huttonite" types of substitution ($3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$) prevails in monazites from the high-alumina schists, and "huttonite" type ($\text{REE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{2+} + \text{Si}^{2+}$) is more typical for monazites in altered granite-porphyry. Monazites of metamorphic genesis in high-alumina schists differ from primary magmatic in lower content of total REE and higher thorium impurity.

For citation

Kalinin, A. A. et al. 2026. Rare earth elements and yttrium minerals in altered granite-porphyry and hosting high-alumina schists in the Pellapahk Cu-Mo occurrence (Kolmozero-Voronya Belt). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 16–28. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-16-28>.

Введение

Акцессорные минералы в магматических и метаморфических породах и в гидротермальных образованиях в настоящее время рассматриваются как важные компоненты петрологического анализа и все чаще используются при построении петрологических и геохимических моделей геологических процессов (Larson et al., 2022; Volante et al., 2024; Schultz, 2021 и др.). Особое внимание при этом уделяется минералам, содержащим редкоземельные элементы либо как минералообразующие элементы, либо в виде примесей – таким, как циркон, монацит, ксенотим, апатит.

Монациты (LREE)PO₄ представляют собой моноклинный ортофосфат легких редкоземельных элементов. Ксенотимы (Y,HREE)PO₄ – ортофосфаты тяжелых редкоземельных элементов, имеют тетрагональную сингонию и являются структурным аналогом циркона, гафнона, торита и коффинита. Монациты и ксенотимы – наиболее часто используемые минералы-геохронометры при химическом датировании, поскольку содержание в них нерадиогенного Pb минимально по сравнению с радиогенным, а потери U, Th и Pb после кристаллизации минералов малы. Различаются монациты и ксенотимы магматического, метаморфического и гидротермального генезиса, и минералы могут быть использованы для датирования соответствующих процессов минералообразования (Вотьяков и др., 2011а, б и ссылки там).

В измененных гранит-порфирах Cu-Mo рудопроявления Пеллапахк и во вмещающих глиноземистых сланцах-метапелитах установлена акцессорная минерализация, представленная фосфатами (монацит-Се, ксенотим-Y, апатит-F), фтор-карбонатами (синхизит-Се, паризит-Се) и силикатом (алланит-Се)¹ редких земель. Настоящая статья посвящена описанию и интерпретации взаимоотношений акцессорных REE-минералов с другими минералами метаморфических комплексов зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья и изучению типохимических особенностей монацитов различного генезиса.

Геологическое строение северо-западной части пояса Колмозеро-Воронья

Метаморфизованные вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья представлены метавулканитами коматиит-толеитовой и базальт-андезит-дацитовый серий, а также метаосадочными породами – метапелитами и метапесчаниками (Гавриленко и др., 2002). Согласно принятой стратиграфической схеме (Государственная..., 2008), они отнесены к колмозерской и к поросозерской сериям. Колмозерская серия включает лязозерскую толщу метаосадочных пород (биотитовых гнейсов), полмостундровскую свиту метавулканических пород основного состава коматиит-толеитовой серии и вороньетундровскую свиту метавулканических пород средне-кислого состава. Поросозерская серия сложена метаосадочными толщами биотитовых плагиогнейсов с гранатом, ставролитом, кианитом или андалузитом. Для поросозерской серии установлены следующие значения возраста слагающих ее пород: конгломераты из района оз. Лица – 2845 ± 28 млн лет, кварциты из того же района – 2839 ± 11 млн лет (Кудряшов и др., 2023).

На участке г. Пеллапахк породы поросозерской серии представлены порфиробластическими биотит-андалузитовыми, ставролит-биотит-андалузитовыми, биотит-кордиеритовыми плагиосланцами. Основная мелкозернистая ткань этих пород сложена плагиоклазом, кварцем, биотитом и мусковитом, а минералы глинозема (андалузит, ставролит, кордиерит, редко гранат) образуют порфиробласты размером до 1 см. Первичный состав глиноземистых сланцев реконструируется как гидрослюдистые глины – метапелиты (Белолитецкий и др., 1980).

Гранит-порфиры г. Пеллапахк интродуцируют основные и средние метавулканиды колмозерской серии, а также высокоглиноземистые сланцы поросозерской серии, что подтверждается секущим характером контактов гранит-порфиров и наличием ксенолитов сланцев поросозерской серии в южной части интрузии (Калинин и др., 2012). Возраст интрузии гранит-порфиров, определенный классическим U-Pb методом по циркону, составил 2828 ± 8 млн лет, СКВО = 0,86 (Калинин и др., 2010). Таким образом, внедрение кварцевых порфиров связано с завершающей стадией формирования комплекса вулканогенно-осадочных пород пояса до регионального метаморфизма амфиболитовой фации.

Метасоматически измененные породы развиваются в виде полосы мощностью около 700 м вдоль границы кварцевых порфиров и высокоглиноземистых сланцев поросозерской серии. Отмечается следующая зональность измененных пород: (0) – слабоизмененные гранит-порфиры, (1) – микроклин-кварцевые и кварц-микроклиновые породы, (2) – кварц-мусковитовые и мусковит-кварцевые сланцы, (3) – кианит (андалузит)-мусковит-кварцевые сланцы, (4) – жедрит-кордиеритовые породы по сланцам поросозерской серии, (5) – слабоизмененные андалузит-биотитовые плагиосланцы поросозерской серии (Калинин, 2021). В измененных гранит-порфирах г. Пеллапахк установлена Cu-Mo минерализация, которая отнесена к метаморфизованному порфиоровому типу (Калинин, 2021; Kalinin et al., 2021). Продуктивная минерализация связана с минерализованным штокверком кварцевых и кальцит-эпидот-кварцевых прожилков, охватывающим измененные породы зон (1–3) (Калинин и др., 2012).

¹ Поскольку в породах установлено только по одной разновидности каждого из указанных минералов, то ниже они именуется просто монацит, ксенотим, апатит, алланит, синхизит и паризит.

Методика исследований

Исследования проведены на основе материала из коллекции авторов, собранного в ходе полевых работ в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья в 2023 г., а также из керна скважин, пробуренных компанией Блэк Фокс в 2005–2008 гг. В коллекцию входили протолочные пробы горных пород, образцы и сколки на шлифы, прозрачно-полированные шлифы и аншлифы из материала коренных пород. Кроме того, из шлиховых концентратов протолочных проб были изготовлены искусственные аншлифы.

Исследования фазовой и внутрифазовой неоднородности минеральных индивидов, изучение химического состава минералов осуществлялось методами оптической и электронной микроскопии. Минералогические и петрографические исследования выполнялись с помощью оптического микроскопа Axioplan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете.

Химический анализ (или оценка состава при малых размерах зерен) минералов выполнялся при помощи энергодисперсионного рентгеновского спектрометра UltimMax-100 (Oxford Instruments), установленного на сканирующем электронном микроскопе LEO-1450 (Carl Zeiss) в программе AZtec в Лаборатории физических исследований пород руд и минералов в Геологическом институте КНИЦ РАН (аналитик Е. Э. Савченко). Параметры работы прибора: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного зонда 2 нА, время накопления спектров 50–100 с. Часть микронзондовых анализов выполнена в СПбГУ в ресурсном центре "Геомодель" на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с аналитической приставкой для энергодисперсионного анализа – спектрометром Oxford Instruments X-Max 20 (аналитик Н. С. Власенко). Параметры работы прибора приведены на официальном сайте ресурсного центра "Геомодель" (<https://researchpark.spbu.ru/index.php/equipment-geomodel-rus/>).

Результаты исследований

В глиноземистых сланцах и гнейсах поросозерской серии апатит-*F* встречается очень редко, значительно чаще отмечаются монацит-*Се* и ксенотим-*У*. При этом в одних образцах отмечен исключительно монацит, в других – только ксенотим, в третьих установлены оба минерала. Монацит и ксенотим образуют редкую вкрапленность изометричных зерен размером чаще менее 10 мкм, максимально до 50 мкм (рис. 1). Обычно выделения фосфатов редкоземельных элементов располагаются в интерстициях между зернами кварца и силикатных минералов (биотит, хлорит, кордиерит, плагиоклаз, андалузит, ставролит), реже во включениях в названных минералах.

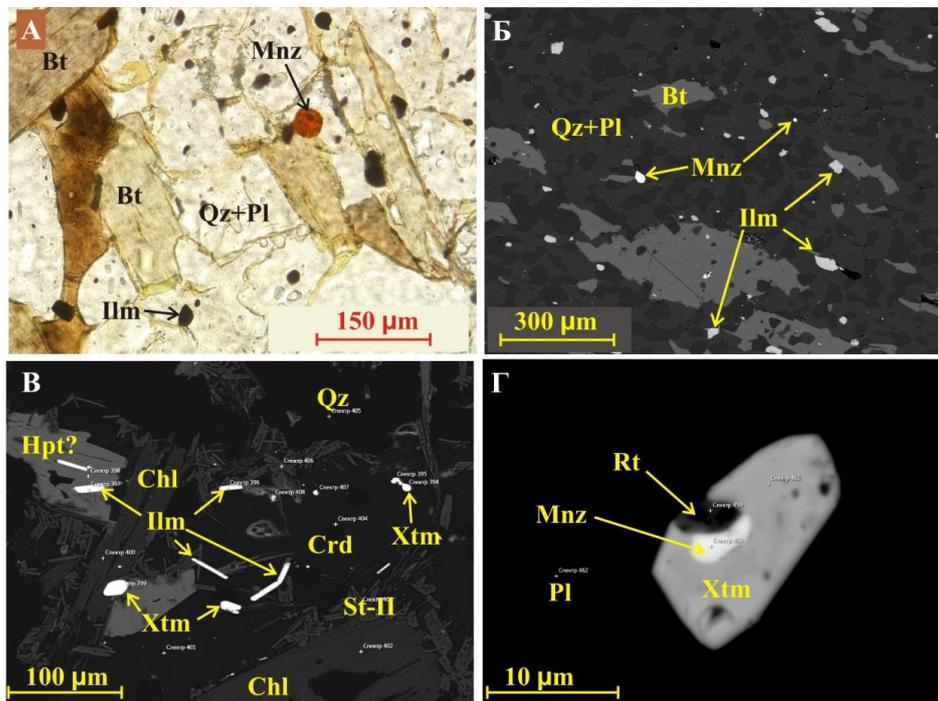


Рис. 1. Монацит и ксенотим в глиноземистых сланцах поросозерской серии: *a* – фото аншлифа, без анализатора; *б–г* – изображения в обратно-рассеянных электронах. Bt – биотит, Chl – хлорит, Crd – кордиерит, Hpt – гиперстен, Ilm – ильменит, Mnz – монацит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Rt – рутил, St-II – ставролит II генерации, замещающий кордиерит, Xtm – ксенотим

Fig. 1. Monazite and xenotime in the high-alumina schists of the Porosozero series: *a* – thin section photo, plane polarized light; *б–г* – BSE images. Bt – biotite, Chl – chlorite, Crd – cordierite, Hpt – hypersthene, Ilm – ilmenite, Mnz – monazite, Pl – plagioclase, Qz – quartz, Rt – rutile, St-II – staurolite of the II generation, substituting cordierite, Xtm – xenotime

Зональность в зернах изученных фосфатов не отмечалась, что, возможно, связано с малыми размерами зерен. В единичных случаях, когда монацит и ксенотим встречаются в сростаниях друг с другом (а также с рутилом и цирконом), видно, что монацит формировался после циркона и рутила, а затем обрастал ксенотимом (рис. 1, з). Замещение монацита и ксенотима другими минералами не отмечено.

В измененных гранит-порфирах (кианит-мусковитовых сланцах, в штокверке минерализованных прожилков) часто встречается апатит (типичный аксессуарный минерал), несколько реже отмечается монацит, еще реже – ксенотим (рис. 2). Содержание монацита и ксенотима повышено на участках развития сульфидной минерализации.

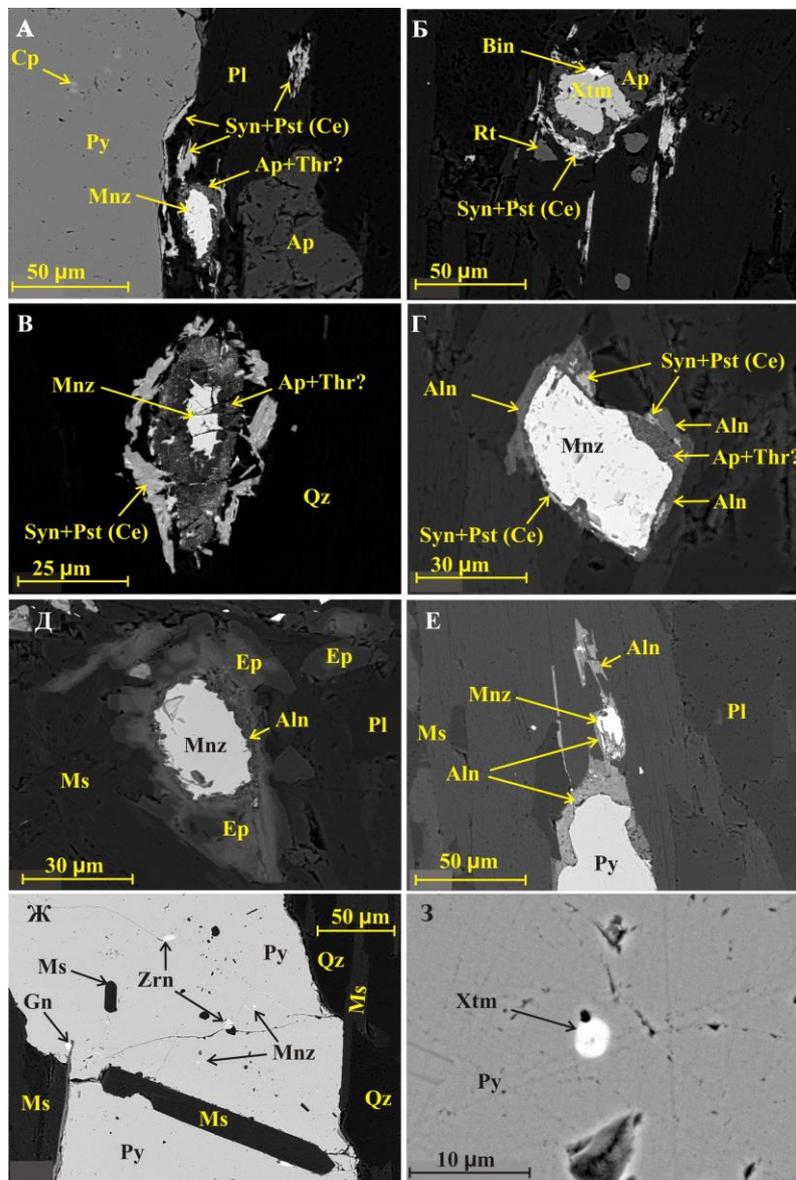


Рис. 2. Монацит и ксенотим в измененных гранит-порфирах: *a–d* – зональные зерна, где монацит и ксенотим замещаются апатитом, фтор-карбонатами редких земель, алланитом и эпидотом; *e* – кайма алланита по монациту и пириту; *ж–з* – включения монацита и ксенотима в пирите.

Aln – алланит, Ap – апатит, Bin – висмутин, Cp – халькопирит, Ep – эпидот, Gn – галенит, Mnz – монацит, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Pst – паризит, Py – пирит, Qz – кварц, Rt – рутил, Syn – синхизит, Thr – торит (хаттонит?), Xtm – ксенотим, Zrn – циркон.

Изображения в обратно-рассеянных электронах

Fig. 2. Monazite and xenotime in altered granite-porphyrus: *a–d* – zonal grains, partly substituted by apatite, synchysite and parisite, allanite and epidote; *e* – monazite and pyrite with a rim of allanite; *ж–з* – monazite and xenotime inclusions in pyrite. Aln – allanite, Ap – apatite, Bin – bismuthinite, Cp – chalcopyrite, Ep – epidote, Gn – galena, Mnz – monazite, Ms – muscovite, Pl – plagioclase, Pst – parisite, Py – pyrite, Qz – quartz, Rt – rutile, Syn – synchysite, Thr – thorite (huttonite?), Xtm – xenotime, Zrn – zircon. BSE images

Значительно реже в метасоматитах по гранит-порфирам отмечен монацит в виде изометричных зерен размером менее 50 мкм в кварц-силикатной матрице в зонах интенсивной вкрапленной сульфидной минерализации. Этот монацит весьма сходен по морфологии с монацитом из глиноземистых сланцев поросозерской серии.

Третья морфологическая разновидность монацита и ксенотима – включения округлой формы размером менее 10 мкм в пирите (рис. 3, ж–з), в других сульфидах включения монацита и ксенотима не отмечены. Кроме монацита и ксенотима в пирите нередко встречаются микровключения циркона, халькопирита, сфалерита, галенита, недиагностированных соединений висмута с медью и серебром.

Анализ химического состава показывает устойчивость соотношения редкоземельных элементов в ранних и поздних минеральных фазах (табл. 1–3). На графиках нормированных спектров распределения редкоземельных элементов (рис. 3) можно отметить некоторое выполаживание спектров легких REE в поздних фазах (карбонаты и силикаты REE) относительно раннего монацита.

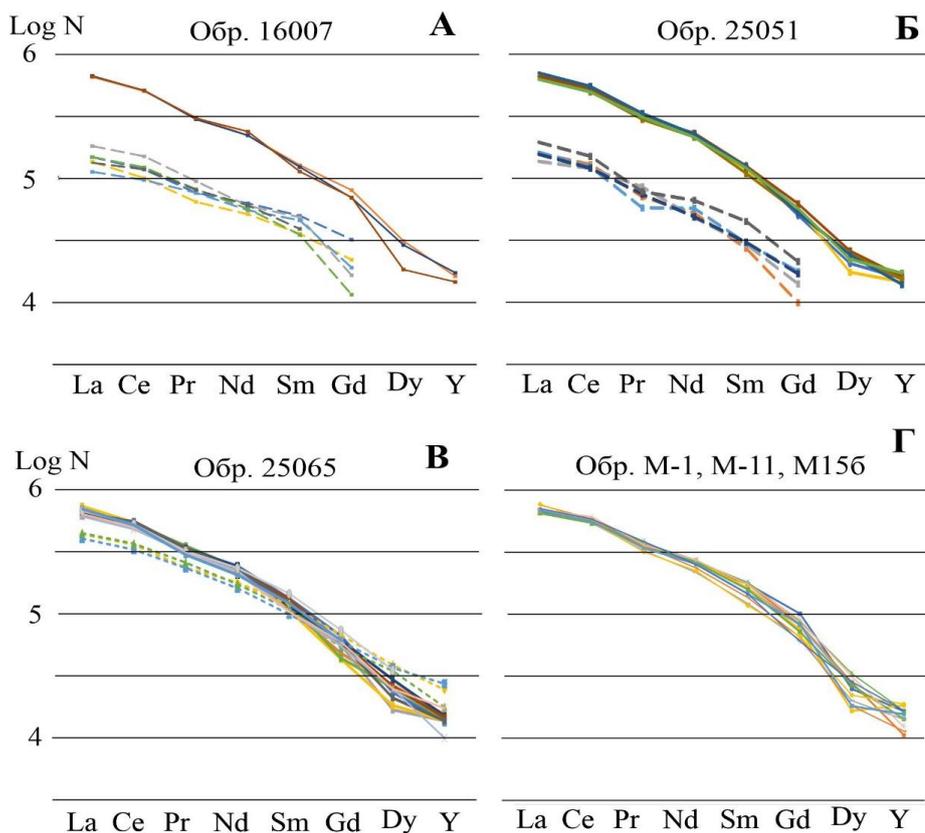


Рис. 3. Нормированные по хондритам (Тейлор и др., 1988) спектры легких редкоземельных элементов и иттрия в монаците (сплошная линия), в алланите (длинный пунктир), во фтор-карбонатах редких земель (короткий пунктир), построенные по результатам микрозондового анализа: а–в – спектры для минералов из измененных гранит-порфириров; г – для минералов из глиноземистых сланцев
 Fig. 3. Chondrite-normalized REE and Y spectra of monazite (solid line), allanite (long dotted line), and REE fluorine carbonates (short dotted line) from granite porphyry (a–в) and high-alumina schist (г)

Сравнение химического состава монацитов из пород разного генезиса показывает, что сумма LREE в монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам выше, чем в монацитах из глиноземистых сланцев (рис. 4), следовательно, монациты глиноземистых сланцев богаче элементами-примесями, замещающими LREE. Основной элемент, входящий в решетку монацита в виде примеси, – это торий. Как видно на рис. 5, б, содержание тория в монацитах глиноземистых сланцев, в целом, выше, чем в монацитах из гранит-порфириров и метасоматитов по ним.

Таблица 2. Химический состав алланита, синхизита и паризита из измененных гранит-порфиров, мас. %
Table 2. Microprobe data for allanite, synhisite, and parisite from altered granite-porphyr, wt. %

№ пробы	16017				25051				C25	25065			25065	
	Алланит								Синхизит			Паризит		
CO ₂	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	27,59	24,59	24,59	20,08	20,08	
F	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	4,60	4,39	4,37	4,85	6,86	
MgO	0,79	0,51	0,62	н.п.о.	н.п.о.	0,54	0,81	1,16	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
Al ₂ O ₃	17,55	18,28	20,07	19,67	22,40	21,77	22,63	21,93	0,25	0,17	0,26	0,22	0,49	
SiO ₂	34,39	35,69	35,66	35,88	34,92	36,89	35,45	34,05	0,60	0,33	0,70	0,32	0,76	
P ₂ O ₅	0,60	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,10	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
SO ₃	0,36	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,17	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,14	0,15	н.п.о.	н.п.о.	0,68	
Cl	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,06	н.п.о.	н.п.о.	
K ₂ O	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,20	0,09	н.п.о.	
CaO	9,96	10,23	12,69	12,20	13,65	11,94	12,87	12,64	17,22	16,32	15,70	6,84	6,52	
TiO ₂	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,28	0,15	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
MnO	1,62	1,81	1,72	0,32	1,82	2,10	2,47	2,29	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
FeO	5,51	5,44	5,65	5,76	7,40	5,53	5,45	7,38	0,20	0,71	0,41	н.п.о.	0,25	
ZnO	0,64	0,78	0,48	0,32	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
Y ₂ O ₃	0,16	0,31	0,79	0,26	0,36	н.п.о.	0,24	0,45	0,55	3,83	2,77	1,56	2,71	
La ₂ O ₃	4,32	3,22	2,68	3,17	3,68	3,17	3,75	4,42	15,58	10,38	10,58	14,43	15,08	
Ce ₂ O ₃	9,23	6,17	5,95	7,25	7,70	7,16	7,38	8,80	20,90	22,09	22,52	29,42	30,47	
Pr ₂ O ₃	0,88	0,60	0,71	0,75	0,64	0,77	0,52	0,69	2,19	2,18	2,40	2,87	2,87	
Nd ₂ O ₃	2,75	2,35	2,53	2,78	2,32	2,14	2,54	2,88	8,70	8,17	7,90	10,18	9,61	
Sm ₂ O ₃	0,72	0,53	0,68	0,58	0,39	0,42	0,43	0,63	1,24	1,76	1,60	1,54	1,53	
Gd ₂ O ₃	0,33	0,44	0,38	н.п.о.	0,19	0,27	0,34	0,40	0,60	1,34	1,06	1,09	1,18	
Dy ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,95	0,85	0,61	0,61	
PbO	4,74	6,34	3,22	3,65	н.п.о.	1,11	0,43	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	
ThO ₂	0,87	0,38	0,44	0,67	н.п.о.	0,44	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,41	0,46	н.п.о.	
Сумма	95,56	93,08	94,27	93,26	95,64	94,44	95,71	97,87	100,36	97,34	96,36	94,57	99,69	
Коэффициенты кристаллохимической формулы минерала (рассчитаны на 12,5 атомов кислорода для алланита, на 7 атомов кислорода и фтора для синхизита и на 11 атомов кислорода и фтора для паризита)														
C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,92	1,82	1,83	2,67	2,45	
F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	0,76	0,76	1,51	1,95	
Mg	0,11	0,07	0,09	0,00	0,00	0,07	0,11	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Al	1,97	2,07	2,18	2,16	2,36	2,30	2,38	2,32	0,01	0,01	0,01	0,03	0,06	
Si	3,28	3,42	3,29	3,34	3,13	3,31	3,16	3,06	0,03	0,02	0,04	0,03	0,06	
P	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
S	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,03	
Cl	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
Ca	1,02	1,05	1,25	1,22	1,31	1,15	1,23	1,22	0,94	0,95	0,92	0,72	0,63	
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mn	0,04	0,05	0,04	0,01	0,04	0,05	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Fe	0,44	0,44	0,44	0,45	0,55	0,41	0,41	0,55	0,01	0,04	0,02	0,00	0,03	
Zn	0,05	0,06	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Y	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,01	0,11	0,08	0,09	0,13	
La	0,15	0,11	0,09	0,11	0,12	0,10	0,12	0,15	0,29	0,21	0,21	0,53	0,50	
Ce	0,32	0,22	0,20	0,25	0,25	0,24	0,24	0,29	0,39	0,44	0,45	1,04	1,01	
Pr	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,05	0,09	0,09	
Nd	0,09	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07	0,08	0,09	0,16	0,16	0,15	0,35	0,31	
Sm	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	0,06	0,03	
Gd	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	
Dy	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	
Pb	0,12	0,16	0,08	0,09	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Th	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Примечание: н.п.о. – содержание элемента ниже предела его обнаружения.

Появление тория в монацитах связано с двумя главными типами изоморфного замещения в монацитах – "чералитовым" $2\text{LREE}^{3+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Th}^{4+}$ и "хаттонитовым" $\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ (Вотьяков и др., 2011 а, б). Чералит $\text{CaTh}(\text{PO}_4)_2$ и хаттонит $\text{Th}(\text{SiO}_4)$ – изоструктурные с монацитом минералы, образующие с ним непрерывные изоморфные ряды (Вотьяков и др., 2011 а, б). Оба типа замещения гетеровалентные, позволяющие входить в решетку минерала двухвалентным (Ca^{2+} , а также Ba^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+}) и четырехвалентным (Th^{4+} , U^{4+} , Si^{4+}) ионам. Как показывает рис. 5, а, в изученных монацитах из глиноземистых сланцев преобладающим типом является комбинация чералитового и хаттонитового замещения по схеме $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$, а в монацитах из измененных гранит-порфиров преобладает хаттонитовое замещение, также отмечается хаттонитовое в комбинации с чералитовым.

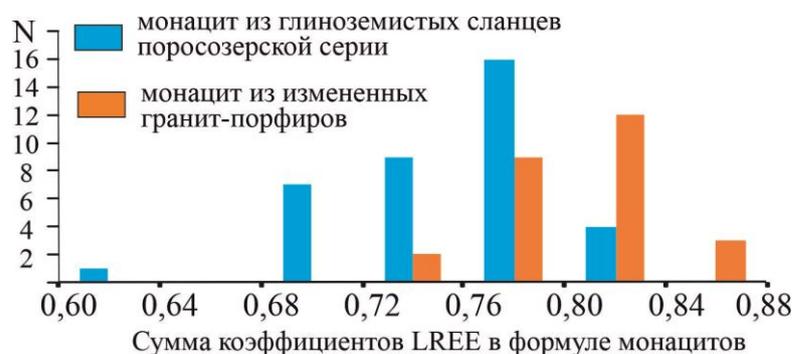


Рис. 4. Гистограмма распределения содержания суммы легких редкоземельных элементов (La-Nd) в монацитах
 Fig. 4. Histogram for ΣLREE (La-Nd) in monazites

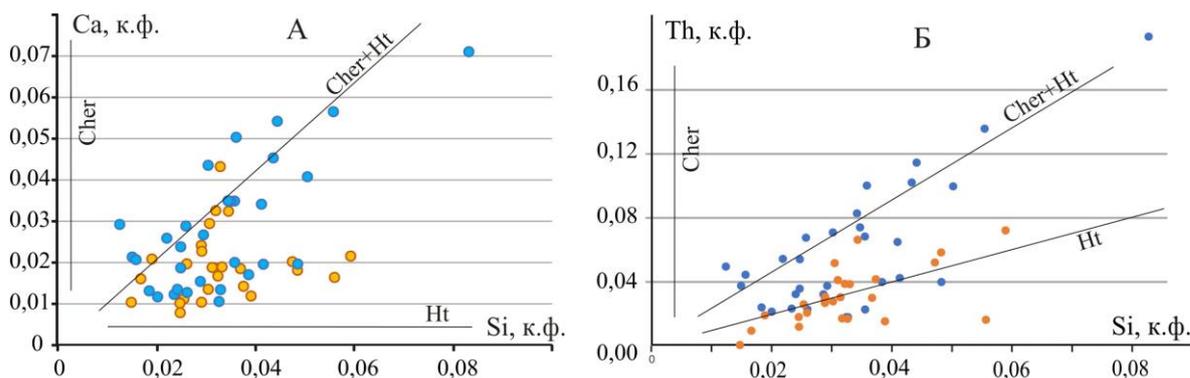


Рис. 5. Диаграммы Ca-Si (а) и Th-Si (б) для монацитов из глиноземистых сланцев (голубые точки) и измененных гранит-порфиров (оранжевые). Ht – хаттонитовый, Cher – чералитовый пути замещения
 Fig. 5. Diagrams Th-Si (а) and Ca-Si (б) for monazites from high-alumina schists (blue dots) and altered granite porphyry (orange). Ht – huttonite, Cher – cheralite types of isomorphous substitution

В ряде публикаций (Wu et al., 2019; Schandl et al., 2004; Taylor et al., 2015 и др.) указывается, что магматический, гидротермальный и метаморфический монациты различаются по содержанию и соотношению примесей. В частности, монациты гидротермального происхождения бедны торием по сравнению с монацитами метаморфического и магматического генезиса. В статье (Wu et al., 2019) предложена дискриминационная диаграмма, позволяющая их отличить (рис. 6, а). Нанесенные на предложенный график составы изученных нами монацитов в абсолютном большинстве попали в область метаморфических и магматических, и только несколько монацитов из метасоматитов по гранит-порфирам – в поле гидротермальных (рис. 6, а).

В той же статье (Wu et al., 2019) предлагается диаграмма для разделения метаморфических и магматических монацитов (рис. 6, б). Все нанесенные точки составов изученных монацитов из измененных гранит-порфиров размещаются в поле магматических монацитов. Монациты из глиноземистых сланцев, в основном, попадают в область метаморфических, но около 30 % точек оказались при этом в поле монацитов магматического генезиса.

Составы фтор-карбонатов REE, приведенные в табл. 2, показывают некоторое отклонение от стехиометрических синхизита и паризита. Это можно объяснить сложностью анализа близких по составу фаз, находящихся в тонком сростании. В целом, для наложенных минералов редкоземельных элементов – фтор-карбонатов и минералов группы эпидота – характерны те же элементы-примеси, что и для монацитов.

Обращает на себя внимание высокое содержание свинца (до 6,3 мас.%), марганца (до 2,5 %) и цинка (до 0,8 %) в алланитах из карбонат-кварцевых прожилков с галенит-сфалеритовой минерализацией (табл. 2).

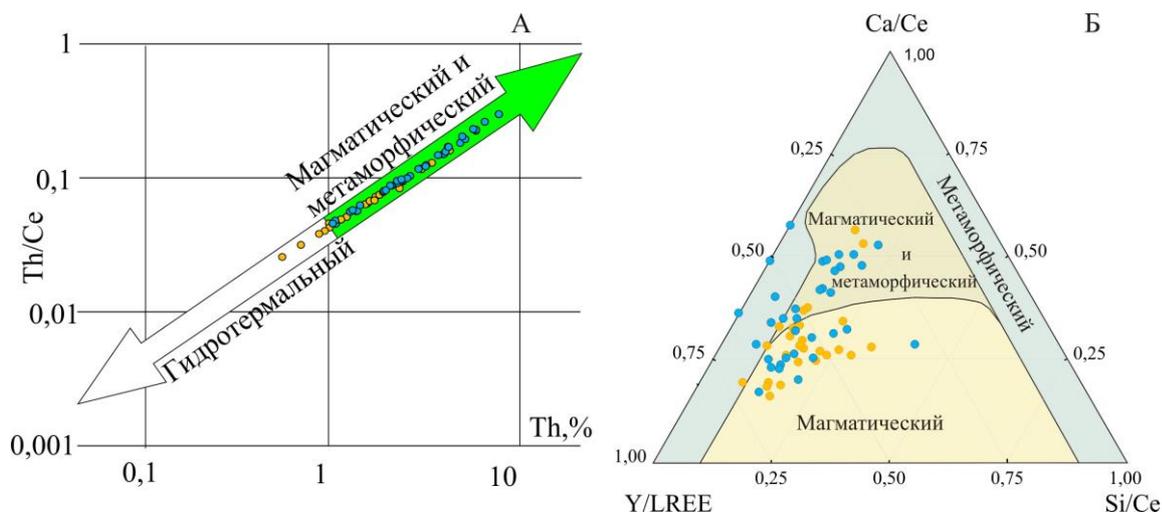


Рис. 6. Диаграммы Th/Ce – Th (а) и Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce (б) для монацитов из глиноземистых сланцев (голубые точки) и измененных гранит-порфиоров (оранжевые) (отношения рассчитаны для мас.% содержания элементов). Стрелки на диаграмме и поля монацитов различного генезиса показаны согласно (Wu et al., 2019)

Fig. 6. Diagrams Th/Ce – Th (a) and Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce (b) for monazites from high-alumina schists (blue) and altered granite porphyry (orange) (calculated for elements content in wt.%). Arrows in (a) and fields of monazites of different origin are exported from (Wu et al., 2019)

В составе ксенотимов (табл. 3) иттриевый минал составляет от 70 до 80 %. От 17 до 29 % позиции иттрия занимают тяжелые редкоземельные элементы, их содержание в изученных зернах ксенотима относительно стабильно, за исключением гадолиния, содержание которого варьирует от 1,8 до 7,1 мас.%. Незначительную долю позиции иттрия (1–3 %) занимают железо и стронций. Примесь кальция не установлена. Фосфор может замещаться кремнием: примесь SiO₂ составляет от 0,17 до 1,8 мас.%.

Таблица 3. Химический состав ксенотима по данным микрозондового анализа, масс.%
Table 3. Microprobe data for xenotime, wt.%

Элемент	Глиноземистые сланцы поросозерской серии				Гранит-порфиры		Коэффициенты кристаллохимической формулы ксенотима (рассчитаны на 4 атома кислорода)							
	M1	M15b	M15b	M15b	25051	25065	Элемент	M1	M15b	M15b	M15b	25051	25065	
SiO ₂	0,17	0,45	0,34	0,59	1,80	0,63	Si	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	
P ₂ O ₅	33,82	34,18	34,71	34,52	36,87	34,35	P	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99	
K ₂ O	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,20	н.п.о.	н.п.о.	K	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	
FeO	0,53	0,48	0,33	0,93	н.п.о.	н.п.о.	Fe	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	
SrO	н.п.о.	0,53	0,38	0,23	н.п.о.	0,85	Sr	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	
Y ₂ O ₃	37,30	41,91	43,89	41,32	43,85	44,73	Y	0,69	0,76	0,78	0,74	0,69	0,76	
Nd ₂ O ₃	н.п.о.	0,13	н.п.о.	0,26	н.п.о.	н.п.о.	Nd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sm ₂ O ₃	1,33	0,37	0,33	0,56	н.п.о.	0,40	Sm	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	
Eu ₂ O ₃	1,02	н.п.о.	н.п.о.	0,27	н.п.о.	н.п.о.	Eu	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	
Gd ₂ O ₃	7,11	2,31	2,20	2,59	7,04	1,84	Gd	0,08	0,03	0,02	0,03	0,08	0,03	
Tb ₂ O ₃	1,12	0,73	0,77	0,59	н.п.о.	0,31	Tb	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
Dy ₂ O ₃	7,57	6,13	5,77	6,00	5,84	5,65	Dy	0,09	0,07	0,06	0,07	0,09	0,07	
Ho ₂ O ₃	1,15	1,39	1,25	1,18	н.п.о.	1,31	Ho	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	
Er ₂ O ₃	3,57	4,01	4,34	4,04	3,23	3,73	Er	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	
Tm ₂ O ₃	н.п.о.	0,52	0,63	0,63	н.п.о.	н.п.о.	Tm	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	
Yb ₂ O ₃	2,44	3,73	3,50	3,89	1,37	3,74	Yb	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	
Lu ₂ O ₃	н.п.о.	0,26	0,11	0,31	н.п.о.	н.п.о.	Lu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
PbO	н.п.о.	0,20	0,13	0,21	н.п.о.	н.п.о.	PbO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ThO ₂	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,56	Th	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
UO ₃	н.п.о.	0,67	0,49	0,41	н.п.о.	н.п.о.	U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Сумма	97,14	98,00	99,17	98,74	100,00	98,10								

Обсуждение результатов

В глиноземистых сланцах и гнейсах поросозерской серии монациты и ксенотимы образуют равномерную вкрапленность изометричных зерен, располагающихся в интерстициях и во включениях в породообразующих минералах метаморфических пород (рис. 2). По морфологическим особенностям и минеральным ассоциациям их можно рассматривать как фосфаты метаморфического генезиса. Их формирование связано с перераспределением редкоземельных элементов, находящихся в силикатах Ca, Fe, Mg, Al в виде изоморфных примесей в собственные минеральные фазы при метаморфизме.

Монациты и ксенотимы в метаморфизованных измененных породах гранит-порфировой интрузии могут быть как магматического, так и гидротермального и/или метаморфического генезиса. Наиболее вероятным представляется их магматическое происхождение и последующее гидротермальное изменение. Измененные монациты встречаются преимущественно на участках развития сульфидной минерализации в кианит-мусковитовых сланцах и в экзоконтактовой зоне минерализованных эпидот-кальцит-кварцевых прожилков. Замещение монацита и ксенотима другими минералами редких земель и соединениями кальция проходило в ходе гидротермальных процессов в определенной последовательности, отраженной на рис. 2. Сначала фосфаты редкоземельных элементов замещаются апатитом-F, т. е. редкоземельные элементы фосфатов замещаются кальцием под воздействием фторсодержащих растворов. Поскольку структура апатита имеет меньшую емкость к тории по сравнению с монацитом и ксенотимом, избыток тория "сбрасывается" в виде вкрапленности торита (или хаттонита) в апатите. Вынесенные при развитии апатита редкоземельные элементы отлагались во внешней зоне зерен в виде фтор-карбонатов REE синхизита и паризита. Наиболее поздними из минералов редких земель являются силикаты алланит, затем эпидот. Таким образом, в ходе изменения монацитов и ксенотимов в группе катионов отмечается смена редкоземельных элементов кальцием, а в анионной группе фосфаты REE сменяются карбонатами, затем силикатами. Весьма высокое содержание примесей свинца и цинка в алланитах из прожилков с галенит-сфалеритовой минерализацией позволяет предположить, что развитие алланита по монациту происходило под воздействием растворов, формировавших указанную минерализацию в прожилках.

Отмеченное выполаживание спектра редкоземельных элементов в поздних минералах (алланите, синхизите, паризите) (рис. 3) говорит о большей подвижности элементов левой части спектра (La, Ce, Nd) по сравнению с гадолинием, диспрозием, иттрием при гидротермальных процессах.

Монацит и ксенотим, отмеченные в виде включений в пиритах, предположительно, были "захвачены" пиритом при росте метакристаллов. Если это так, то монацит и ксенотим во включениях, скорее всего, являются минералами магматического генезиса.

Сопоставление химического состава монацитов различного генезиса показало следующее. На диаграмме Y/LREE – Ca/Ce – Ca/Ce все монациты из метасоматитов по гранит-порфирам попали в поле монацитов магматических пород (рис. 6, б), что соответствует их предположительному первично магматическому происхождению. Но около 30 % точек составов "метаморфических" монацитов из глиноземистых гнейсов выходят за пределы поля монацитов метаморфического генезиса и попадают в поле "магматических" монацитов. Скорее всего, предлагаемая диаграмма не может дать однозначный ответ о генетическом типе монацитов.

"Метаморфические" монациты из глиноземистых сланцев отличаются несколько пониженным уровнем содержания суммы редкоземельных элементов и, соответственно, повышенным уровнем содержания примесей, в первую очередь тория, по сравнению с гидротермально измененными монацитами из метасоматитов по гранит-порфирам. В целом, такое различие в уровне содержания тория является характерным для монацитов разного генезиса.

Заключение

Фосфаты редкоземельных элементов монацит и ксенотим – распространенные акцессорные минералы в породах зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

В глиноземистых сланцах поросозерской серии монацит и ксенотим образуют равномерную вкрапленность изометричных зерен среди породообразующих силикатов. В измененных гранит-порфирах с Cu-Mo минерализацией монацит и ксенотим встречаются преимущественно в виде зональных зерен и слагают их центральную часть, затем последовательно обрастают апатитом, карбонатами REE, алланитом и эпидотом. Кроме того, микровключения монацита и ксенотима были отмечены в метакристаллах пирита.

Для монацита и ксенотима из глиноземистых сланцев поросозерской серии предполагается метаморфический генезис, монациты и ксенотимы из измененных гранит-порфиров, скорее всего, магматического происхождения, но позже были изменены гидротермальными процессами при развитии Cu-Mo и полиметаллической минерализации.

В изученных монацитах из глиноземистых сланцев преобладающим типом замещения является комбинация чералитовой и хаттонитовой схем: $3\text{LREE}^{3+} + \text{P}^{5+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+}$. В монацитах из измененных гранит-порфиров преобладает хаттонитовое замещение, наряду с ним отмечается комбинация хаттонитовой и чералитовой схем. В монацитах метаморфического генезиса из глиноземистых сланцев сумма редких земель, в целом, ниже, а содержание тория выше, чем в гидротермально измененных монацитах из метасоматитов по гранит-порфирам.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2024-0004.

Авторы выражают благодарность канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотруднику ГИ КНЦ РАН Н. М. Кудряшову и канд. геол.-минерал. наук, доценту кафедры геохимии СПбГУ Е. В. Баданиной за поддержку при проведении исследований, инженеру ресурсного центра "Геомодель" СПбГУ Н. С. Власенко за выполнение микронзондового анализа минералов, инженерам ГИ КНЦ РАН Т. С. Зыковой и Е. В. Галеевой за подготовку шлиховых концентратов проб и искусственных аншлифов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Белолипецкий А. П., Гаскельберг В. Г., Гаскельберг Л. А., Антонюк Е. С. [и др.]. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л. : Наука, 1980. 240 с.
- Вотьяков С. Л., Хиллер В. В., Щапова Ю. В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микронзондового датирования. Екатеринбург : Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2011а. 336 с.
- Вотьяков С. Л., Хиллер В. В., Щапова Ю. В., Поротников А. В. Моделирование временной эволюции U-Th-Pb системы как основа для химического микронзондового датирования минералов-концентратов урана и тория // Доклады АН. 2011б. Т. 237, № 4. С. 526–529.
- Гавриленко Б. В., Никитин И. В., Зозуля Д. Р., Кудряшов Н. М. [и др.]. Геология, тектоника, возраст и металлогения архейской шовной зоны Колмозеро-Воронья, Кольский регион // Вестник МГТУ. 2002. Т. 5, № 1. С. 43–60.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-37, 38. м. Святой Нос, м. Канин Нос. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 251 с.
- Калинин А. А. Зональность измененных минерализованных пород на медно-молибденовом порфировом рудопроявлении Пеллапахк // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2021. Т. 18. С. 188–192. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.034>.
- Калинин А. А., Кудряшов Н. М., Галкин Н. Н. Рудопроявления золота, меди и молибдена в зеленокаменном поясе Колмозеро-Воронья (Кольский полуостров): геологические особенности и возраст // Золото Кольского полуострова и сопредельных территорий. Апатиты : К&М, 2010. С. 51–59.
- Калинин А. А., Галкин Н. Н. Докембрийское медно-молибден-порфировое месторождение Пеллапахк (зеленокаменный пояс Колмозеро-Воронья) // Вестник Кольского НЦ РАН. 2012. № 1. С. 80–92.
- Кудряшов Н. М., Калинин А. А., Удоратина О. В. Последовательность формирования супракрустальных и интрузивных комплексов мезоархейского зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья (Кольский регион) // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения. Материалы VIII Российской конференции по проблемам геологии докембрия (Санкт-Петербург, 25–29 сентября 2023 г.). СПб. : Свое издательство, 2023. С. 83–85.
- Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М. : Мир, 1988. 384 с.
- Kalinin A. A., Kudryashov N. M. Porphyry-related metamorphosed Au-Ag and Cu-Mo deposits in the Precambrian of the Fennoscandian Shield // Minerals. 2021. Vol. 11, Iss. 2. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020139>. EDN: DHUROB.
- Larson K. P., Shrestha S., Cottle J. M., Guilmette C. [et al.]. Re-evaluating monazite as a record of metamorphic reactions // Geoscience Frontiers. 2022. Vol. 13(2). Article number: 101340.
- Schandl E. S., Gorton M. P. A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits // Economic Geology. 2004. Vol. 99, Iss. 5. P. 1027–1035. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>.
- Schulz B. Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology // Frontiers Earth Science. 2021. Vol. 9. Article number: 668566. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>.

- Taylor R. D., Goldfarb R. J., Monecke T., Fletcher I. R. [et al.]. Application of U-Th-Pb phosphate geochronology to young orogenic gold deposits: New age constraints on the formation of the Grass Valley Gold District, Sierra Nevada Foothills Province, California // *Economic Geology*. 2015. Vol. 110. P. 1313–1337.
- Volante S., Blereau E., Guitreau M., Tedeschi M. [et al.]. Current applications using key mineral phases in igneous and metamorphic geology: Perspectives for the future. *Geological Society Special Publications*. 2024. Vol. 537, Iss. 1. P. 57–121. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP537-2022-254>. EDN: AOGUDU.
- Wu L.-G., Li X.-H., Ling X.-X., Yang Y.-H. [et al.]. Further characterization of the RW-1 monazite: New working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis // *Minerals*. 2019. Vol. 9. Article number: 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9100583>.

References

- Belolipetsky, A. P., Gaskel'berg, V. G., Gaskel'berg, L. A., Antonyuk, Ye. S. et al. 1980. Geology and geochemistry of the Early Precambrian metamorphic complexes of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Votyakov, S. L., Khiller, V. V., Schapova, Yu. V. 2011a. Crystallochemistry and physics of the radiation-thermal effects in a series of U-Th-bearing minerals as a basement for their chemical microprobe dating. Yekaterinburg. (In Russ.)
- Votyakov, S. L., Khiller, V. V., Schapova, Yu. V., Porotnikov, A. V. 2011b. Modelling of temporal evolution of the U-Th-Pb system as a basement for chemical microprobe dating of minerals-concentrators of uranium and thorium. *Doklady AN*, 237(4), pp. 526–529. (In Russ.)
- Gavrilenko, B. V., Nikitin, I. V., Zozulya, D. R., Kudryashov, N. M. et al. 2002. Geology, tectonics, age, and metallogeny of the Archean suture zone Kolmozero-Voron'ya. *Vestnik MGTU*, 5(1), pp. 43–60. (In Russ.)
- State geological map of Russian Federation. 2008. Scale 1:1000000 (the third generation) Series Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. Sheet R-37, 38 – cape Svyatoy Nos, cape Kanin Nos. Explanatory note. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Kalinin, A. A. 2021. Zonation of altered mineralized rocks in the Pellapahk Copper-Molybdenum porphyry occurrence. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the Geological Institute*, 18, pp. 188–192. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.034>. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Kudryashov, N. M., Galkin, N. N. 2010. Occurrences of gold, copper, and molybdenum mineralization in the Kolmozero-Voron'ya greenstone belt (Kola Peninsula): Geological characteristics and age. In coll. articles *Gold in the Kola Peninsula and adjacent territories*, Apatity, K&M, pp. 51–59. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Galkin, N. N. 2012. The Precambrian Copper-Molybdenum porphyry deposit Pellapahk (Kolmozero-Voron'ya greenstone belt). *Vestnik KNTs RAN*, 1, pp. 80–92. (In Russ.)
- Kudryashov, N. M., Kalinin, A. A., Udoratina O. V. 2023. Succession of formation of supracrustal and intrusive complexes in the Mesoarchean greenstone belt Kolmozero-Voronya (Kola region). *Proceedings of the VIII Russian conference on the problems of the Precambrian geology Stratigraphy of the Precambrian: problems and the ways to solutions*. Saint Petersburg, 25–29 September, 2023, pp. 83–85. (In Russ.)
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. 1988. The continental crust: Its composition and evolution. Moscow. (In Russ.)
- Kalinin, A. A., Kudryashov, N. M. 2021. Porphyry-related metamorphosed Au-Ag and Cu-Mo deposits in the Precambrian of the Fennoscandian Shield. *Minerals*, 11(2), pp. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020139>. EDN: DHUROB.
- Larson, K. P., Shrestha, S., Cottle, J. M., Guilmette, C. et al. 2022. Re-evaluating monazite as a record of metamorphic reactions. *Geoscience Frontiers*, 13(2). Article number: 101340.
- Schandl, E. S., Gorton, M. P. 2004. A textural and geochemical guide to the identification of hydrothermal monazite: Criteria for selection of samples for dating epigenetic hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 99(5), pp. 1027–1035. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1027>.
- Schulz, B. 2021. Monazite microstructures and their interpretation in petrochronology. *Frontiers Earth Science*, 9. Article number: 668566. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2021.668566>.
- Taylor, R. D., Goldfarb, R. J., Monecke, T., Fletcher, I. R. et al. 2015. Application of U-Th-Pb phosphate geochronology to young orogenic gold deposits: New age constraints on the formation of the Grass Valley Gold District, Sierra Nevada Foothills Province, California. *Economic Geology*, 110, pp. 1313–1337.
- Volante, S., Blereau, E., Guitreau, M., Tedeschi, M. et al. 2024. Current applications using key mineral phases in igneous and metamorphic geology: Perspectives for the future. *Geological Society Special Publications*, 537(1), pp. 57–121. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP537-2022-254>. EDN: AOGUDU.
- Wu, L.-G., Li, X.-H., Ling, X.-X., Yang, Y.-H. et al. 2019. Further characterization of the RW-1 monazite: New working reference material for oxygen and neodymium isotopic microanalysis. *Minerals*, 9. Article number: 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9100583>.

Сведения об авторах

Аркадий Авенирович Калинин – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Arkadiy A. Kalinin – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher;
e-mail: a.kalinin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Мариам Гарушевна Хачатрян – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
КНЦ РАН, магистрант;
e-mail: mariamkhachatryan51@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-732X>

Mariam G. Khachatryan – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
KSC RAS, Master's Student;
e-mail: mariamkhachatryan51@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1308-732X>

Евгений Элланович Савченко – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Геологический институт КНЦ РАН, ст. науч. сотрудник;
e-mail: ye.savchenko@geoksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

Yevgeny E. Savchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Senior Researcher;
e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

Новые подходы к литолого-стратиграфическому изучению и картированию раннедокембрийских комплексов (на примере палеопротерозойских и архейских структур Кейв, Кольский полуостров)

Н. Е. Козлов*, С. В. Мудрук, Н. О. Сорохтин

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: n.kozlov@ksc.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
15.01.2026;

получена
после доработки
09.02.2026;

принята
к публикации
10.02.2026

Ключевые слова:
докембрий,
Арктическая зона,
Фенноскандинавский
щит,
Кейвский домен,
геодинамика,
супракрустальные
породы

В работе использован метод сравнительного анализа геологических объектов. В его основе лежит оценка близости статистически значимых петрогеохимических характеристик. Ключевое преимущество данного подхода – возможность количественно определять меру сходства для неоднородных выборок, что выгодно отличает его от многих классических геохимических методов. Успешное применение методики для сравнения геологических объектов позволило адаптировать ее для решения литолого-стратиграфических задач в сложно построенных раннедокембрийских комплексах, где традиционные методы часто оказываются недостаточно эффективными. В настоящей работе апробация метода проведена на супракрустальных образованиях Кейвского домена. На первом этапе он был использован для корреляции палеопротерозойских толщ. Результаты подтвердили существующие стратиграфические схемы: породы серповидного комплекса (песцовокейвская свита, район хр. Серповидного) продемонстрировали наибольшее сходство с образованиями умбинской (пояс Имандра-Варзуга) и куэцярвинской (Печенгская структура) свит. На следующем этапе метод был применен к более древним комплексам, корреляция которых ранее вызывала затруднения. Исследования позволили установить, что отложения верхов лебяжинской свиты и червуртских подсвит формировались на всей территории Кейвской структуры преимущественно за счет перемыва и переотложения подстилающих пород. Анализ также выявил различия в геологической истории двух основных структур региона – Больших и Малых Кейв. Формирование толщ в них происходило в разных обстановках. В Больших Кейвах стабильные условия седиментации сохранялись вплоть до накопления выхчуртской свиты. Активная тектоническая перестройка началась позже – в период формирования песчовотундровских комплексов, когда в осадочный бассейн начал поступать обломочный материал с обрамления, в первую очередь с Мурманского домена. В Малых Кейвах эта активизация произошла раньше, что зафиксировано в составе пород снежноборской свиты. Предложенная на основе петрогеохимического сопоставления реконструкция геологической истории Кейвского домена предлагает разрешение ранее существовавших противоречий при корреляции супракрустальных комплексов Больших и Малых Кейв.

Для цитирования

Козлов Н. Е. и др. Новые подходы к литолого-стратиграфическому изучению и картированию раннедокембрийских комплексов (на примере палеопротерозойских и архейских структур Кейв, Кольский полуостров). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-29-40>.

New approaches to lithological and stratigraphic research and mapping of the early Precambrian complexes (using an example of the Paleoproterozoic and Archean structures of Keivy, Kola Peninsula)

Nikolay E. Kozlov*, Sergey V. Mudruk, Nikolay O. Sorokhtin

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: n.kozlov@ksc.ru

Article info

Received
15.01.2026;

received
in revised form
09.02.2026;

accepted
10.02.2026

Key words:

Precambrian,
Arctic zone,
Fennoscandian Shield,
Keivy domain,
geodynamics,
supracrustal rocks

Abstract

Previously, the team of authors proposed a new method for the comparative analysis of geological objects. Its foundation is an assessment of the proximity of statistically significant petrogeochemical characteristics. The key advantage of this approach is the ability to quantitatively determine the degree of similarity for heterogeneous samples, which favorably distinguishes it from many classical geochemical methods. The successful application of the technique for comparing geological objects has allowed its adaptation for solving lithological-stratigraphic tasks in complexly structured Early Precambrian complexes, where traditional methods often prove insufficiently effective. In the present work, the method has been tested on supracrustal formations of the Keivy Domain. At the first stage, it was used for the correlation of Paleoproterozoic strata. The results confirmed existing stratigraphic schemes: Serpovidny complex Formation (Pestsovokeivskaya Formation, Serpovidny Ridge area) demonstrates the greatest similarity with formations of the Umba (Imandra-Varzuga Belt) and Kuetsyarvi Formations (Pechenga Structure). At the next stage, the method was applied to older complexes, the correlation of which had previously been problematic. The research has established that the deposits of the upper part of the Lebyazhinskaya Formation and the Chervurta Subformations were formed throughout the entire Keivy structure primarily due to the reworking and redeposition of underlying rocks. The analysis has also revealed differences in the geological history of the two main regional structures – the Bolshie and Malye Keivy. The formation of strata within them occurred in different settings. In the Bolshie Keivy, stable sedimentation conditions persisted until the accumulation of the Vykhchurta Formation. Active tectonic reorganization began later, during the formation of the Peschtsovotundrovsky complexes, when clastic material from the surrounding areas, primarily from the Murmansk Domain, began to enter the sedimentary basin. In the Malye Keivy, this activation occurred earlier, as recorded in the composition of the rocks of the Snezhnoborskaya Formation. The reconstruction of the geological history of the Keivy Domain, proposed based on petrogeochemical correlation, offers a solution to previously existing contradictions in correlating the supracrustal complexes of the Bolshie and Malye Keivy.

For citation

Kozlov, N. E. et al. 2026. New approaches to lithological and stratigraphic research and mapping of the early Precambrian complexes (using an example of the Paleoproterozoic and Archean structures of Keivy, Kola Peninsula). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 29–40. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-29-40>.

Введение

При исследовании геологических структур для установления корреляционных связей между различными толщами или определения источников происхождения метасадочных отложений применяется сравнительный анализ породных комплексов изучаемых объектов. Основной метод исследования базируется на изучении петрографических особенностей горных пород и их минерального состава. Подобные методики показали высокую эффективность при работе с неизменными или слабоизменными фанерозойскими комплексами, в которых степень изменения пород не велика. Однако при исследовании глубоко метаморфизованных раннедокембрийских образований возникают существенные сложности в интерпретации полученных данных. Главная проблема заключается в трудностях восстановления изначальных характеристик метаморфических пород, формирование которых происходило в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма. Ключевой фактор сложности состоит в том, что при воздействии высоких температур и давления одни и те же породы могут приобретать различные характеристики, а первичные минералы трансформируются в новые минеральные соединения. Это значительно ограничивает возможности прямого геологического анализа и сравнительного изучения состава породных комплексов. Ситуация дополнительно осложняется недостаточной обнаженностью, часто отсутствием полных стратиграфических разрезов, первичной и вторичной латеральной изменчивостью состава отложений, что приводит к невозможности полного учета всех факторов варибельности и затрудняет проведение достоверных исследований раннедокембрийских геологических объектов.

Цель работы заключается в проверке возможностей метода сравнительного анализа геологических объектов для решения литолого-стратиграфических задач в сложно построенных раннедокембрийских комплексах.

Материалы и методы

В ходе наших предыдущих исследований была создана система специализированных методов для определения первичной природы пород древнейших комплексов и геодинамических условий их формирования, включая метод определения близости статистически значимых петрогеохимических характеристик, подробное описание которого представлено в монографии (*Сорохтин и др., 2024*) и целой серии более ранних публикаций авторов. Данный метод учитывает то, что химический состав толщ горных пород характеризуется неоднородностью выборок, что проявляется в полимодальном распределении составов пород и наличии их аномальных значений. Эффективность разработанной методики подтвердилась при анализе раннедокембрийских образований и их сопоставлении с фанерозойскими аналогами. Это позволило расширить область применения метода на литолого-стратиграфические исследования раннедокембрийских супракустальных комплексов. Ключевое преимущество методики заключается в способности выявлять наиболее схожие геологические объекты на основе данных о химическом составе всего породного комплекса. При этом используется подход *Э. П. Изоха (1978)*, согласно которому при достаточном объеме представительных выборок расчет среднего состава приближается к реальным соотношениям пород. Такой метод сравнения по сути аналогичен классической корреляции, однако информация о породном составе геологического объекта представляется не через описание первичных пород комплекса, а через данные о химическом составе, отражающем все многообразие пород. Принципиальная схема реализации метода вычисления сходства объекта для целей геологических корреляций показана на рис. 1.

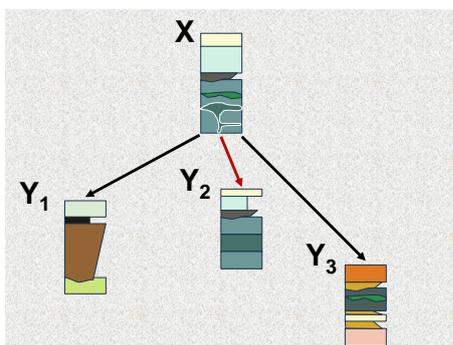


Рис. 1. Визуализация принципа определения стратиграфических аналогов методом сравнения геохимического сходства. На схеме иллюстрируется расчет коэффициентов близости (показаны стрелками) между целевым объектом (X) и потенциальными коррелятами (Y_1 , Y_2 , Y_3). Наибольшая степень сходства (красная стрелка), соответствующая минимальному значению коэффициента, указывает на наиболее вероятную корреляцию объекта X с объектом Y_2

Fig. 1. Visualization of methodology for correlating stratigraphic units via geochemical similarity analysis. The scheme demonstrates the determination of proximity coefficients (shown by arrows) for a target unit (X) against candidate units (Y_1 , Y_2 , Y_3). The red arrow signifies the smallest coefficient value, indicating the highest degree of similarity and thus the most reliable correlation between X and Y_2

Предложенный метод также эффективен для определения потенциальных источников поступления вещества, которое участвовало в образовании метаосадочных отложений. Если геологические данные показывают, что формирование исследуемой толщи метаосадочных пород могло происходить за счет обломочного материала, поступающего с прилегающих территорий, то применение разработанного подхода позволяет выявить те участки, чей химический состав наиболее соответствует составу изучаемой толщи. Это дает основание предполагать, что именно эти территории внесли наибольший вклад в формирование рассматриваемых отложений (рис. 2).

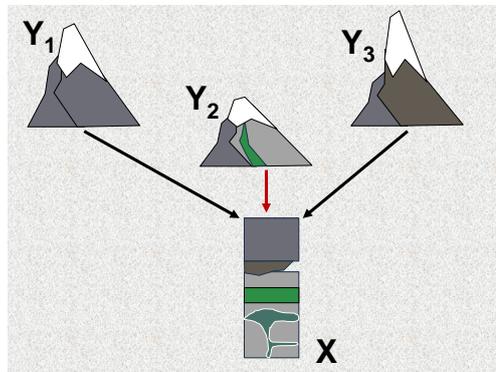


Рис. 2. Схематическая иллюстрация метода идентификации источников сноса. Метод основан на оценке геохимического сходства (коэффициентов близости, показанных стрелками) между исследуемым осадочным объектом (X) и потенциальными источниками обломочного материала (Y_1, Y_2, Y_3). Минимальное значение коэффициента (красная стрелка) соответствует максимальному сходству и указывает на то, что породы объекта Y_2 являлись основным источником вещества для формирования объекта X

Fig. 2. Schematic diagram of the provenance determination method. The approach evaluates geochemical affinity represented by proximity coefficients (arrows) between the target sedimentary unit (X) and potential source rocks (Y_1, Y_2, Y_3). The smallest coefficient (red arrow) denoting the highest similarity identifies unit Y_2 as the primary source of detritus for unit X

Важно отметить единую методологическую основу обоих применений: в каждом случае степень схожести объектов количественно оценивается с помощью коэффициента близости. Принцип интерпретации этого показателя остается неизменным: меньшие значения коэффициента указывают на более близкое расположение сравниваемых объектов в многомерном пространстве характеристик. Следовательно, минимально возможные значения коэффициента свидетельствуют о наивысшей степени сходства между анализируемыми образцами.

Результаты и обсуждение

Эффективность предложенного метода определения близости статистически значимых петрогеохимических характеристик подтверждается результатами его апробации на породах Кейвского домена (рис. 3). Выбор Кейвского домена обусловлен наличием нерешенной проблемы корреляции его основных разрезов – Больших и Малых Кейв (Бельков, 1963; Белолитецкий и др., 1980; Предовский и др., 1987; Радченко и др., 1994; Ремизова и др., 2007), а также неоднозначностью стратиграфического положения и корреляции трех верхних палеопротерозойских толщ с разрезами структур Имандра-Варзуга и Печенга. Детальное описание геологии Кейвского домена и обзор его стратиграфических схем приведены в предыдущих работах (Мудрук, 2022; Сорохтин и др., 2024).

Стратиграфический разрез Кейвского домена принят за опорный для Кольского региона. Он фиксирует этапы развития бассейна осадконакопления, разделенные перерывами, соответствующими палеогеографическим и палеотектоническим перестройкам (Мележик и др., 1982). Верхнюю часть разреза составляют три толщи, объединяемые в данной работе в серповидный комплекс (рис. 3, 4). В литературе они описываются как умбинская (Белолитецкий и др., 1980), песчовая (Радченко и др., 1994) или песчовокейвская свита (Ремизова и др., 2007).

Серповидный комплекс состоит из трех толщ: амфиболитово-сланцевой, metabазальтовой и карбонатно-сланцевой. На основании сходства этого вулканогенно-осадочного разреза с умбинской свитой Имандра-Варзугской структуры, а также наличия стратиграфического несогласия в основании, была предложена их корреляция (Белолитецкий и др., 1980). Важным корреляционным критерием является присутствие самородной меди в метавулканитах обоих разрезов – признак, также характерный для куэтсарвинской свиты Печенгской структуры (Загородный и др., 1980; Борисов, 1990; Чернявский и др., 2010; Melezhik et al., 1994; Melezhik et al., 2013). Петрохимически metabазальты комплекса, отличающиеся повышенными содержаниями TiO_2 , Fe_2O_3 и Na_2O , попадают в поле составов метавулканитов умбинской свиты (Белолитецкий и др., 1980).

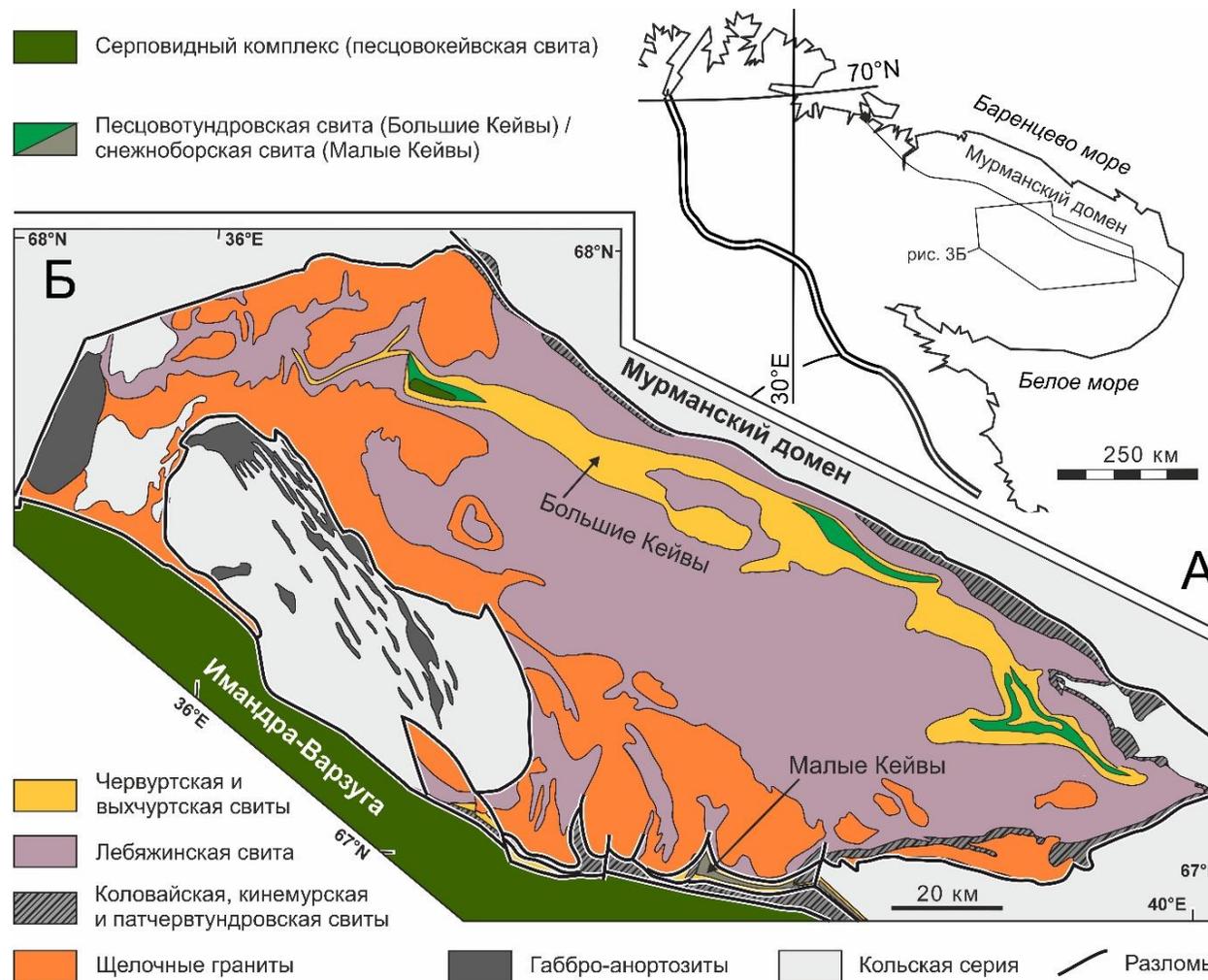


Рис. 3. Геологическая карта Кейвского домена по (Геологическая карта..., 1996) с упрощениями и дополнениями и положением разрезов Больших и Малых Кейв. Основные названия свит даны по (Радченко и др., 1994), в скобках даны альтернативные названия по (Ремизова и др., 2007) и (Белолипецкий и др., 1980)

Fig. 3. Geological map of the Keivy Domain based on (Geological map..., 1996), including the location of the sections of the Bolshie and Malye Keivy. Main names of formations are given after (Radchenko et al., 1994), alternative names are given after (Belolipetsky et al., 1984; Remizova et al., 2007) in brackets.

The Chervurta and Vyhchurta Formations cropping out in the northeastern part of the map correspond to the Bolshie Keivy area; these cropping out in the south-southeastern part correspond to the Malye Keivy area

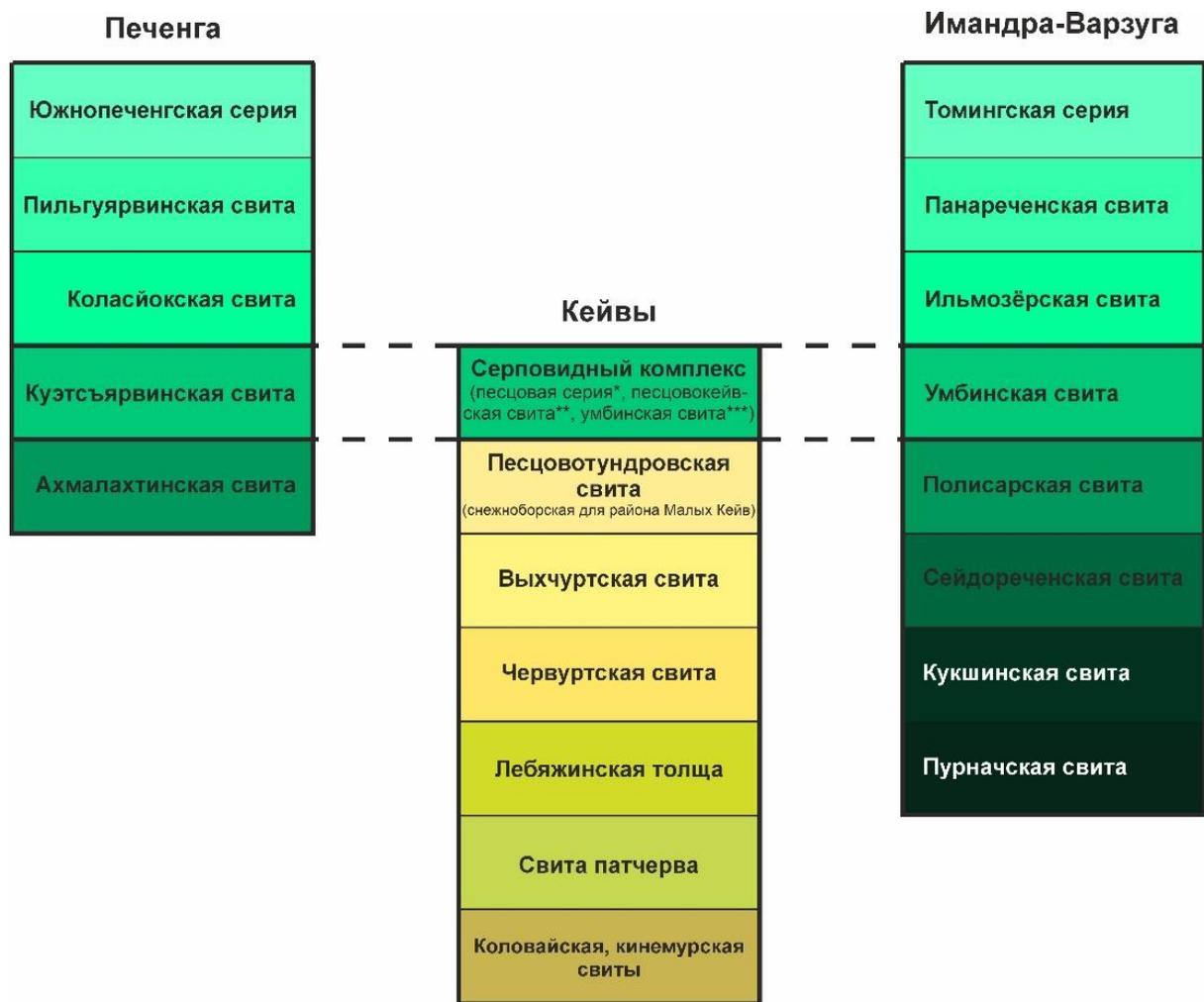


Рис. 4. Обобщенные стратиграфические разрезы стратифицированных комплексов Кейвской, Имандра-Варзугской и Печенгской структур по (Радченко и др., 1994 с изменениями); * – Радченко и др., 1994, ** – Ремизова и др., 2007, *** – Белолипецкий и др., 1980.

Пунктиром показаны корреляционные границы

Fig. 4. Generalized stratigraphic sections of the stratified complexes of the Keyvy, Imandra-Varzuga, and Pechenga structures (after Radchenko et al., 1994 with modifications); * – Radchenko et al., 1994; ** – Remizova et al., 2007; *** – Belolipetsky et al., 1980.

Correlation boundaries are shown by dashed lines

Однако несмотря на сходство, возраст умбинской свиты (~2,05 млрд лет; *Martin et al., 2013*) для серповидного комплекса остается предположительным. Ряд исследователей (*Загородный и др., 1983; Радченко и др., 1994*), признавая близкий возраст, подчеркивают стратиграфическую самостоятельность этих образований, выделяя их в песцовую серию. В работе *Ремизовой и др. (2007)* отмечается, что только две толщи комплекса уверенно коррелируются с умбинской свитой, тогда как терригенная толща может соответствовать нижнеильмозерской подсвите варзугской серии.

Для количественной проверки гипотез корреляции серповидного комплекса со структурами Имандра-Варзуга и Печенга был применен метод определения близости статистически значимых петрогеохимических характеристик. Результаты (табл. 1) демонстрируют, что породы серповидного комплекса проявляют наибольшее петрогеохимическое сходство с породами умбинской свиты (Имандра-Варзуга) и куэтсарвинской свиты (Печенга). Этот вывод подтверждает традиционные схемы корреляции и, следовательно, эффективность примененной методики. Таким образом, апробация метода на материале Кейвского домена подтверждает его эффективность для решения задач корреляции супракрустальных комплексов.

Таблица 1. Сравнение петрогеохимических характеристик пород серповидного комплекса (песцовокейвской свиты) с разрезами структур Печенга и Имандра-Варзуга
Table 1. Comparison of geochemical characteristics of rocks of the Serpovidny complex (*Pestsovaya Keiva Formation*) with sections of the Pechenga and Imandra-Varzuga structures

Имандра-Варзуга*							
Свиты, комплексы*	ИЛМ	УМБ	ПЛС	СДР	ККШ	ТМН	СЛН
ХРБ	9,56	7,23***	11,47	18,24	23,51	14,68	16,90
Печенга**							
	Свиты, комплексы**	ПЛГ	КЛС	КТС			
	ХРБ	15,05	10,63	8,57***			

Примечание. ХРБ – серповидный комплекс (*песцовокейвская свита*); * – свиты (серии) пояса Имандра-Варзуга; ИЛМ – ильмозерская свита; УМБ – умбинская свита; ПЛС – полисарская свита; СДР – сейдореченская свита; ККШ – кукшинская свита; ТМН – томингская серия; СЛН – солоноозерская свита; ** – свиты (серии) Печенгской структуры; ПЛГ – Пильгуярвинская; КЛС – Колосйокская; КТС – Куэтсарвинская; *** – жирным шрифтом выделены значения коэффициентов близости, характеризующие максимальное сходство сравниваемых объектов при выбранном уровне значимости 0,01.

С учетом этих результатов на следующем этапе исследований с помощью метода определения близости статистически значимых петрогеохимических характеристик были изучены более древние комплексы Кейвской структуры. Здесь наибольшее количество вопросов возникало у ранее изучавших ее исследователей при проведении корреляции толщ в самой верхней части кейвского разреза. Ряд авторов допускает распространение образований песцовотундровской свиты в пределах всей Кейвской структуры, другие же, формально относя эти комплексы к верхней части песцовотундровской свиты, называют ее серией, но выделяют в ее составе в пределах Малых Кейв малокейвские, или снежноборские образования, тем самым подчеркивая своеобразие строения этих комплексов.

Для разрешения спорных вопросов стратиграфической корреляции разрезов Больших и Малых Кейв, не решенных ранее традиционными методами, было предпринято исследование с привлечением расширенного геохимического анализа. Более подробно данные исследования изложены в работе (*Козлов и др., 2025*). Здесь же мы коснемся их лишь тезисно, для иллюстрации возможностей названной выше методики. Работа опиралась на массив из 1 260 силикатных анализов (400 по образцам пород Кейвского домена (включая 300 анализов метаосадочных пород), 860 проб из пород смежных доменов). Ключевым направлением стал поиск аналогов снежноборской свиты в стратотипическом разрезе Больших Кейв. Полученные данные не выявили однозначных коррелятов. Установлено неожиданное геохимическое сходство снежноборских образований с нижнечервуртскими комплексами, а также с породами нижневыхчуртской и верхнепесцовотундровской подсвит. Одновременно опровергнута гипотеза о генетическом единстве снежноборской и лебяжинской свит (*Пожиленко и др., 2002*), что обосновано выявленными между ними существенными геохимическими различиями.

Проведенное исследование не дало однозначного решения для корреляции снежноборской свиты (Малые Кейвы) с подсвитами разреза Больших Кейв. Это может объясняться двумя причинами: либо применяемая методика недостаточна для данной задачи, либо сопоставление некорректно в принципе из-за различающихся условий осадконакопления в этих структурах на поздних этапах.

В пользу второй гипотезы свидетельствует тот факт, что лишь лебяжинская свита имеет региональное распространение по всему Кейвскому домену (рис. 3), в то время как для пород червуртской, выхчуртской

и песчовотундровской свит непрерывность от Больших к Малым Кейвам не установлена. Это, как показано выше на примере снежноборской свиты, создает основу для разночтений. Например, существуют противоречия в литературе: в то время как одни исследователи (*Предовский и др., 1987*) коррелируют все червуртские образования Малых Кейв с верхнечервуртскими отложениями Больших, другие относят к этому аналогу именно снежноборские комплексы. Кроме того, в разрезе Малых Кейв не выделяются прямые аналоги выхчуртских и песчовотундровских свит, завершающих разрез Больших Кейв.

Для проверки первой гипотезы было проведено сопоставление лебяжинской и червуртской свит, слагающих нижние части разрезов обеих структур (*Козлов и др., 2025*). Учитывая региональный характер лебяжинских отложений, их корреляция представлялась наиболее вероятной. Результаты однозначно подтверждают правомерность такой корреляции, ранее предложенной рядом авторов (*Бельков, 1963; Белолитецкий и др., 1980 и др.*). Этот результат, во-первых, свидетельствует о достаточной разрешающей способности примененного метода определения близости статистически значимых петрогеохимических характеристик для задач подобного типа, а во-вторых, опровергает сомнения в его применимости.

Таким образом, второе предположение о различной геодинамической обстановке на заключительных этапах формирования Кейвской структуры получает дополнительные подтверждения. Вероятно, своеобразие состава снежноборской свиты, а также отсутствие в Малых Кейвах аналогов выхчуртских и песчовотундровских комплексов, связаны именно с этими региональными различиями, что делает поиск прямых стратиграфических аналогов снежноборских отложений в разрезе Больших Кейв малоперспективным.

Необходимость подтверждения правомерности такого предположения определило постановку еще одной проблемы – была поставлена задача определить потенциальные источники сноса для метаосадочных комплексов Кейвской структуры в пространстве и во времени. С этой целью состав метаморфитов Кейв сравнивался как с подстилающими их образованиями, так и с породами окружающих тектонических блоков (доменов).

Согласно существующим представлениям, формирование червуртской и выхчуртской свит происходило в эпоху интенсивного химического выветривания с образованием кор выветривания (*Мирская, 1982; Предовский и др., 1987*) и мощных глинистых толщ (*Сорохтин и др., 2024*). Это указывает на значительную тектоническую стабилизацию региона и позволяет предположить, что источником вещества для этих свит служили в основном породы Кейвского домена. Хотя эти выводы распространялись на всю структуру, ранее они базировались преимущественно на материале по Большим Кейвам.

Наше исследование для Больших Кейв подтвердило эту модель. Данные (табл. 2) свидетельствуют, что метаосадочные породы верхнелебяжинской подсвиты, а также червуртской и выхчуртской свит действительно формировались преимущественно за счет перемиыва подстилающих толщ. Установлена четкая геохимическая преемственность: нижнечервуртские отложения наиболее близки к породам верхов лебяжинской свиты, а верхнечервуртские – к низам червуртской свиты. Аналогичная, хотя и менее выраженная тенденция наблюдается для выхчуртской свиты: ее нижняя подсвита сходна с червуртскими образованиями, а верхняя – с ее собственными низами.

Таблица 2. Сравнение вещества различных свит Больших Кейв с веществом потенциальных источников их терригенного материала
Table 2. Comparison of the matter of different formations in the Bolshie Keivy with the matter of potential sources for their terrigenous material

Свиты, комплексы*	ЛБЖН	ЛБЖВ	ЧРВН	ЧРВВ	ВХЧН	ВХЧВ	МБ	КН	ТЕР	БЛМР
ЧРВН	10,37	9,42**					14,23	16,58	18,07	23,96
ЧРВВ	21,48	20,59	8,48				19,15	17,91	18,40	20,32
ВХЧН	24,70	21,15	17,19	21,40			28,59	35,46	37,11	42,45
ВХЧВ	16,53	16,84	18,35	8,98	8,01		16,02	15,37	15,02	17,28
ПСЦ	19,97	19,12	18,06	17,45	16,48	15,03	10,19	18,06	20,48	16,47

Примечание. * – по горизонтали и вертикали – Большие Кейвы. Сокращения для свит и комплексов: ЛБЖН, ЛБЖВ – лебяжинская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ЧРВН, ЧРВВ – червуртская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ВХЧН, ВХЧВ – выхчуртская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ПСЦ – песчовотундровская свита; МБ – Мурманский домен; КН – Кольско-Норвежский домен; ТЕР – Терский домен; БЛМР – Беломорский подвижный пояс; ** – жирным шрифтом выделены значения коэффициентов близости, характеризующие максимальное сходство сравниваемых объектов при выбранном уровне значимости 0,01.

Небольшое отклонение от общей закономерности (нижневыхчуртская подсвита, демонстрируя близость к верхнечервуртским породам, максимально сходна все же с нижнечервуртскими) может быть связано с ограниченным объемом выборки проб из этой подсвиты.

Ситуация кардинально меняется для песчовотундровской свиты. В формировании ее разреза начинает существенно участвовать внешний источник – вещество соседних доменов, в первую очередь Мурманского блока. Это указывает на возобновление тектонической активности и изменение палеогеографической обстановки в данный период.

Таким образом, полученные данные подтверждают, что значительная часть разреза Больших Кейв (лебяжинская, червуртская и выхчуртская свиты) сформировалась за счет переотложения вещества самой структуры. Это согласуется с гипотезой о накоплении осадков в условиях длительной тектонической стабилизации, связанной с развитием и перемывом кор выветривания.

В разрезе Малых Кейв аналогичная модель источников сноса однозначно устанавливается для лебяжинской и червуртской свит (табл. 3). Вышележащая снежноборская свита, наиболее близкая по составу к верхам червуртской толщи, демонстрирует сходство с выхчуртской свитой Больших Кейв. Однако ее состав существенно обогащен веществом Мурманского домена, что сближает снежноборские комплексы уже с песчовотундровскими образованиями. Отмеченные расхождения в значениях геохимических коэффициентов объясняются сравнением с разными, латерально неоднородными выборками пород Больших и Малых Кейв.

Таблица 3. Сравнение вещества различных свит Малых Кейв с веществом потенциальных источников их терригенного материала
Table 3. Comparison of the matter of different formations in the Malye Keivy with the matter of potential sources for their terrigenous material

Свиты, комплексы*	ЛБЖН	ЛБЖВ	ЧРВН	ЧРВВ	СНБО	МБ	КН	ТЕР	БЛМР
ЧРВН	10,62	8,67**		9,45	12,38	12,24	14,58	16,39	19,01
ЧРВВ	11,95	10,15	9,34		11,76	16,01	15,43	17,88	18,92
СНБО	13,51	11,37	10,44	9,72		11,27	16,95	14,80	19,67

Примечание. * – по горизонтали и вертикали – Малые Кейвы. Сокращения см. в табл. 2. СНБО – снежноборская свита; ** – жирным шрифтом выделены значения коэффициентов близости, характеризующие максимальное сходство сравниваемых объектов при выбранном уровне значимости 0,01.

Обобщая представленные результаты, можно заключить, что ранние этапы осадконакопления (формирование лебяжинской и червуртской свит) в обеих структурах проходили в сходных условиях стабильной платформы за счет внутрибассейновых источников. На поздних этапах пути их развития дивергировали. В Больших Кейвах режим стабилизации сохранялся дольше, вплоть до накопления выхчуртской свиты, после чего тектоническая активизация привела к активному поступлению материала с обрамления (преимущественно Мурманский домен), что зафиксировано в составе песчовотундровской свиты. В Малых Кейвах влияние внешнего источника проявилось раньше и сильнее, что и обусловило своеобразие снежноборской свиты.

Исследование выявило, что тектоническая активизация в Малых Кейвах началась несколько раньше, чем в Больших Кейвах, что непосредственно отразилось в составе снежноборской свиты. Интенсивность этой постчервуртской активизации в Малых Кейвах превышала таковую во время формирования выхчуртской свиты Больших Кейв, но была ниже, чем в период накопления песчовотундровских комплексов. Таким образом, снежноборская свита представляет собой самостоятельную толщу, сформировавшуюся в иных палеогеографических условиях, нежели одновозрастные отложения верхней части разреза Больших Кейв. Полученные геохимические данные не подтверждают ранее предлагавшиеся корреляции этой свиты с какими-либо образованиями Больших Кейв.

Указанные различия в режиме осадконакопления могут быть объяснены латеральной неоднородностью Кейвского палеобассейна. Согласно литературным данным (*Предовский и др., 1978*), Малые Кейвы располагались в его более краевой части. Длительный период тектонической стабильности в этой области создал предпосылки для того, чтобы активизация здесь началась раньше, чем в центральных районах бассейна, т. е. Больших Кейвах.

Настоящая модель согласуется с концепцией формирования Кейвской структуры как срединного массива (*Сорохтин и др., 2024*). Для таких структур характерна замкнутость циклов денудации и седиментации: продолжительная стабилизация, ведущая к развитию мощных кор химического выветривания, сменяется активизацией, разрушением этих кор и переотложением материала с образованием мощного осадочного чехла. Именно такой геодинамический сценарий, по нашему мнению, явился ключевым фактором формирования уникальных по масштабу месторождений алюминиевого сырья в Кейвах. Предложенная реконструкция геологической истории Кейвской структуры непротиворечиво объясняет имеющиеся фактические данные и разрешает существовавшие противоречия в корреляции супракрустальных комплексов ее Большой и Малой частей.

Выводы

Методика сравнительного геохимического анализа супракрустальных комплексов продемонстрировала свою эффективность при литолого-стратиграфических исследованиях раннедокембрийских образований Кейвской структуры. Ее применение позволило решить ряд вопросов строения и корреляции разрезов, оставшихся неясными при использовании традиционных геологических методов.

Показано, что породы серповидного комплекса (песчовокейвская свита) демонстрируют максимальное петрогеохимическое сходство с отложениями умбинской (Имандра-Варзуга) и куэтсарвинской (Печенга) свит. Это согласуется с установленными корреляционными схемами для палеопротерозоя Кольского региона и подтверждает эффективность использованной методики.

Сравнительный геохимический анализ супракрустальных комплексов позволил установить различную геодинамическую эволюцию главных осадочных структур Кейвского домена – Больших и Малых Кейв. На завершающих этапах этой эволюции накопление толщ в структурах происходило в различных палеотектонических обстановках. В пределах Больших Кейв режим относительно спокойной седиментации преобладал до времени формирования выхчуртской свиты. Интенсивная тектоническая перестройка здесь инициировалась позднее, в эпоху образования песчовотундровских комплексов, о чем свидетельствует появление в разрезе грубообломочного материала, снесенного с обрамляющих поднятий, преимущественно с Мурманского домена. В Малых Кейвах аналогичная фаза тектонической активизации проявилась на более раннем этапе, что нашло отражение в вещественном составе пород снежноборской свиты.

Данную методику целесообразно рекомендовать для применения в ситуациях, когда классические подходы к стратиграфическому расчленению и корреляции оказываются недостаточными. При этом необходимо подчеркнуть, что предлагаемый метод является дополнительным инструментом и должен использоваться исключительно в комплексе с данными первичных геологических наблюдений для уточнения наиболее проблемных вопросов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР ФИЦ КНЦ РАН FMEZ-2024-0006 "Геология, геохимия и тектоника докембрийских комплексов Кольского региона как основа металлогенического прогноза северо-запада Арктической зоны Российской Федерации".

Авторы выражают глубокую благодарность Т. С. Марчук за профессиональную и качественную обработку геохимического материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Белолипецкий А. П., Гаскельберг В. Г., Гаскельберг Л. А., Антонюк Е. С. [и др.]. Геология и геохимия метаморфических комплексов раннего докембрия Кольского полуострова. Л. : Наука, 1980. 240 с.
- Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв: геологическое строение, кристаллические сланцы и кианитовые руды. М.-Л. : АН СССР, 1963. 321 с.
- Борисов А. Е. Вулканизм и самородное медное оруденение в раннем протерозое Кольского п-ова. Апатиты : КНЦ АН СССР, 1990. 68 с.
- Геологическая карта Кольского региона (северо-восточная часть Балтийского щита). Масштаб 1:500000 / ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты : ГИ КНЦ РАН, 1996.
- Загородный В. Г., Бекасова Н. Б., Пушкин Г. Ю., Радченко А. Т. Особенности среднепротерозойского вулканогенно-осадочного литогенеза на Кольском полуострове // Материалы по металлогении Кольского полуострова. Апатиты, 1980. С. 5–22.
- Загородный В. Г., Радченко А. Т. Тектоника раннего докембрия Кольского полуострова: Состояние изученности и проблемы. Л. : Наука : Ленингр. отд-ние, 1983. 94 с.
- Изох Э. П. Оценка рудоносности гранитоидных формаций в целях прогнозирования. М. : Недра, 1978. 137 с.
- Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Мудрук С. В. Использование методики сравнения состава супракрустальных толщ для стратиграфических корреляций раннедокембрийских комплексов (на примере Кейвского домена) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2025. № 22. С. 287–293. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.041>. EDN: IDKFNI.
- Мележик В. А., Предовский А. А. Геохимия раннепротерозойского литогенеза. Л. : Наука : Ленингр. отд-ние, 1982. 208 с.
- Мирская Д. Д. Предчуртские терригенные породы и уровни выветривания // Вулканизм и седиментогенез докембрия Кольского полуострова : сб. ст. / отв. ред. А. А. Предовский. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1982. С. 40–50.
- Мудрук С. В. Стратиграфия Кейвского террейна: обзор // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 253–259. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2022.19.046>. EDN: UWBGRF.

- Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. Апатиты : КНЦ РАН, 2002. 359 с.
- Предовский А. А., Мележик В. А., Болотов В. И., Федотов Ж. А. [и др.]. Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита. Л. : Наука, 1987. 185 с.
- Радченко А. Т., Балаганский В. В., Басалаев А. А., Беляев О. А. [и др.]. Объяснительная записка к Геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500000 / отв. ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты, 1994. 95 с.
- Ремизова А. М., Семушина Н. А., Плотникова И. А. Объяснительная записка к геологической карте Мурманской области. Масштаб 1:200000. Листы Q-37-I, II. Краснощелье // Отчет о составлении обновленной цифровой геологической карты Мурманской области масштаба 1:200000. Книга 18. Апатиты, 2007. 117 с.
- Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Глазнев В. Н., Кудряшов Н. М. Архей Балтийского щита. Апатиты : Изд-во Кольского научного центра, 2024. 715 с.
- Чернявский А. В., Волошин А. В., Борисова В. В., Борисов А. Е. [и др.]. Самородные Cu и Ag в эффузивах Имандра-Варзуги // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2010. № 7. С. 106–109. EDN: WWMALH.
- Martin A. P., Condon D. J., Prave A. R., Melezhik V. A. [et al.]. Dating the termination of the Palaeoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotopic event in the north Transfennoscandian Greenstone belt // *Precambrian Research*. 2013. Vol. 224. P. 160–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.010>.
- Melezhik V. A., Hanski E. J. The early Palaeoproterozoic of Fennoscandia: Geological and tectonic settings // *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 33–38. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29682-6_3.
- Melezhik V. A., Sturt B. A. General geology and evolutionary history of the early Proterozoic Polmak–Pasvik–Pechenga–Imandra/Varzuga–Ust'-Ponoy Greenstone Belt in the northeastern Baltic Shield // *Earth-Science Review*. 1994. Vol. 36, Iss. 3–4. P. 205–241. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90058-2).

References

- Belolipetsky, A. P., Gaskelberg, V. G., Gaskelberg, L. A., Antonyuk, E. S. et al. 1980. Geology and geochemistry of the early Precambrian metamorphic complexes of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Bel'kov, I. V. 1963. Kyanite Schists of the Keivy Formation. Moscow. (In Russ.)
- Borisov, A. E. 1990. Volcanism and native copper mineralization in the Early Proterozoic of the Kola Peninsula. Apatity. (In Russ.)
- Geological map of the Kola region (Northeastern Baltic Shield) on a Scale of 1:500000. 1996. Ed. by F. P. Mitrofanov. Geol. Inst. Kola Sci. Center, RAS, Apatity. (In Russ. and Engl.)
- Zagorodny, V. G., Bekasova, N. B., Pushkin, G. Yu., Radchenko, A. T. 1980. Features of Middle Proterozoic volcanogenic-sedimentary lithogenesis on the Kola Peninsula. Materials on the Metallogeny of the Kola Peninsula. Apatity. (In Russ.)
- Zagorodny, V. G., Radchenko, A. T. 1983. Early Precambrian Tectonics of the Kola Peninsula. Leningrad. (In Russ.)
- Izokh, E. P. 1978. Evaluation of ore content of granitoid formations for forecasting purposes. Moscow. (In Russ.)
- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Mudruk, S. V. 2025. Application of the supracrustal sequence composition comparison method for stratigraphic correlations of the Early Precambrian complexes (example of the Keivy Domain). *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 22, pp. 287–293. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2025.22.041>. EDN: IDKFNI. (In Russ.)
- Melezhik, V. A., Predovsky, A. A. 1982. Geochemistry of early Proterozoic Lithogenesis. Leningrad. (In Russ.)
- Mirskaya, D. D. 1982. Pre-Chervurta terrigenous rocks and weathering levels. In *Volcanism and Sedimentogenesis of the Precambrian of the Kola Peninsula*. Ed. A. A. Predovsky. Apatity, pp. 40–50. (In Russ.)
- Mudruk, S. V. 2022. Stratigraphy of the Keivy Terrane: A review. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 19, pp. 253–259. DOI: <https://doi.org/10.31241/fns.2022.19.046>. EDN: UWBGFR. (In Russ.)
- Pozhilenko, V. I., Gavrilenko, B. V., Zhiron, D. V., Zhabin, S. V. 2002. Geology of mineral areas of the Murmansk region. Apatity. (In Russ.)
- Predovsky, A. A., Melezhik, V. A., Bolotov, V. I., Fedotov, G. A. et al. 1987. Volcanism and sedimentation genesis in the Precambrian in the NE Baltic Shield. Leningrad. (In Russ.)
- Radchenko, A. T., Balagansky, V. V., Basalayev, A. A., Belyayev, O. A. et al. 1994. An explanatory note on geological map of the North-Eastern Baltic Shield of a scale of 1:500000. Ed. F. P. Mitrofanov. Apatity. (In Russ.)
- Remizova, A. M., Semushina, N. A., Plotnikova, I. A. 2007. An explanatory note on geological map of the Murmansk Region 1:200000. Paper Q-37-I, II. Report on the compilation of an updated digital geological map of the Murmansk region on a scale 1:200000. Book 18. Apatity. (In Russ.)
- Sorokhtin, N. O., Kozlov, N. E., Glaznev, V. N., Kudryashov, N. M. 2024. The Archean of the Baltic Shield. Apatity. (In Russ.)

- Chernyavsky, A. V., Voloshin, A. V., Borisova, V. V., Borisov, A. E. et al. 2010. Native Cu and Ag in effusive rocks of the Imandra-Varzuga zone. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*, 7, pp. 106–109. EDN: WWMALH. (In Russ.)
- Martin, A. P., Condon, D. J., Prave, A. R., Melezhik, V. A. et al. 2013. Dating the termination of the Palaeoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotopic event in the north Transfennoscandian Greenstone belt. *Precambrian Research*, 224, pp. 160–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.010>.
- Melezhik, V. A., Hanski, E. J. 2013. The early Palaeoproterozoic of Fennoscandia: Geological and tectonic settings. In *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Frontiers in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 33–38. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29682-6_3.
- Melezhik, V. A., Sturt, B. A. 1994. General geology and evolutionary history of the early Proterozoic Polmak–Pasvik–Pechenga–Imandra/Varzuga–Ust'-Ponoy Greenstone Belt in the northeastern Baltic Shield. *Earth-Science Review*, 36(3–4), pp. 205–241. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90058-2).

Сведения об авторах

Козлов Николай Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор; e-mail: n.kozlov@ksc.ru

Nikolay E. Kozlov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Professor; e-mail: n.kozlov@ksc.ru

Мудрук Сергей Владимирович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН;
– ул. Лесная, 29, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Филиал Мурманского арктического университета в г. Апатиты, канд. геол.-минерал. наук, доцент;
e-mail: s.mudruk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2051-8769>

Sergey V. Mudruk – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS;
– 29 Lesnaya Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Apatity Branch of Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor;
e-mail: s.mudruk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2051-8769>

Сорохтин Николай Олегович – Нахимовский пр., 36, г. Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: nsorokhtin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-3693>

Nikolay O. Sorokhtin – 36 Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997; Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Chief Researcher;
e-mail: nsorokhtin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-3693>

УДК 504.06

Оценка накопления пыли от техногенного объекта хранения хвостов обогащения на территории города

П. В. Амосов*, А. А. Бакланов

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Информация о статье

Реферат

Поступила
в редакцию
30.06.2025;

принята
к публикации
21.01.2026

Ключевые слова:

пыление
хвостов обогащения,
пыль на автодорогах
города

Результаты оценки осажденной на территории г. Апатиты пыли базируются на данных, полученных в ходе ранее выполненных численных экспериментов по прогнозу загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (с учетом скорости осаждения) от техногенного объекта хранения хвостов обогащения. Модели разработаны в программе COMSOL для района "хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты". В ходе исследования реализован алгоритм вычисления осажденной пыли на горизонтальную поверхность и представлено описание современных подходов к оценке вторичного взмывания пыли на автодорогах городов. Поинтервальные и суммарные массы пыли, накопленные в течение 1 ч на территории г. Апатиты, рассчитаны с учетом вариации площади пыления 2–10 га (при случайном выборе пылящих участков на поверхности хвостохранилища) и скорости ветра 5–23 м/с. Для аналитического описания осредненной суммарной массы пыли, накопленной за 1 ч в условиях обозначенных диапазонов параметров модели, справедлива степенная функция скорости ветра и линейная зависимость от площади пыления. Выполнена оценка поверхностной плотности пыли PM_{10} , накопленной на автодорогах города Апатиты за 1 ч при пылении на объекте хранения хвостов обогащения, в условиях вариации скорости ветра и площади пыления. Приведенные оценки почасового накопления пыли на дорогах г. Апатиты необходимы для экологического мониторинга, разработки мер по снижению воздействия пыли на здоровье населения.

Для цитирования

Амосов П. В. и др. Оценка накопления пыли от техногенного объекта хранения хвостов обогащения на территории города. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 41–53. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-41-53>.

Assessment of dust accumulation from a man-made enrichment tailings storage facility in the city

Pavel V. Amosov*, Alexander A. Baklanov

*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Article info

Abstract

Received
30.06.2025;

accepted
21.01.2026

Key words:

dusting
of enrichment tailings,
dust on city roads

The results of the assessment of dust deposited on the territory of Apatity are based on data obtained during previously performed numerical experiments to predict atmospheric pollution with fine dust (taking into account the deposition rate) from a man-made enrichment tailings storage facility. The models are developed in the COMSOL program for the ANOF-2 – Apatity tailings storage area. In the course of the study, an algorithm for calculating deposited dust on a horizontal surface has been implemented and a description of modern approaches to assessing secondary dust generation on urban highways has been presented. The interval and total dust masses accumulated during 1 hour on the territory of Apatity are calculated taking into account variations in the dusting area of 2–10 ha (with a random selection of dusty areas on the surface of the tailings dump) and wind speeds of 5–23 m/s. For an analytical description of the average total mass of dust accumulated in 1 hour under the conditions of the indicated ranges of model parameters, a power function of wind speed and a linear dependence on the dusting area are valid. The surface density of PM_{10} dust accumulated on the motor roads of the town of Apatity for 1 hour during dusting at the enrichment tailings storage facility has been estimated under conditions of variation in wind speed and dusting area. The above estimates of the hourly accumulation of dust on the roads of Apatity are necessary for environmental monitoring and the development of measures to reduce the impact of dust on public health.

For citation

Amosov, P. V. et al. 2026. Assessment of dust accumulation from a man-made enrichment tailings storage facility in the city. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 41–53. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-41-53>.

Введение

В процессе переноса пыли ветровым потоком с хвостохранилища АНОФ-2 мелкодисперсная пыль с различной скоростью осаждения попадает на территорию г. Апатиты. Пыль оказывается на крышах городских зданий (практически все крыши плоские), автомобильных дорогах, тротуарах, деревьях, газонах и пр. В солнечную погоду при ветровых порывах осаждаемая пыль, находящаяся в черте города, доставляет большие неудобства населению (в том числе и вторично загрязняя атмосферу) до той поры, пока городские коммунальные службы не выполнят уборку пыли на дорогах и тротуарах. Дороги и тротуары упомянуты здесь потому, что пыль на них является самой близкой к человеку и ее взметывание происходит не только под действием ветрового потока, но и при движении транспорта. Определенный вклад во вторичное загрязнение городской атмосферы вносит пыль, осаждаемая на крышах зданий: интенсивность пыления на высоте 15 м (высоте пятиэтажного дома) будет выше, чем у основания зданий.

Предыдущие исследования авторов, имеющие отношение к вопросам пыления на техногенном объекте хранения хвостов обогащения АНОФ-2 и переноса мелкодисперсной пыли вниз по ветровому потоку, касались исключительно загрязнения атмосферы. Наиболее полная информация по данной теме представлена в коллективной монографии (Амосов и др., 2023, гл. 3).

На базе ранее выполненных исследований (Амосов и др., 2023) и текущих изысканий можно приступить к оценке накопления пыли на горизонтальной поверхности – территории г. Апатиты – и проследить процессы пылевыведения при движении транспорта и загрязнения городской атмосферы.

Анализ случаев превышения ПДК пыли в воздухе г. Апатиты (Амосов и др., 2023, с. 26) с сопутствующими им метеорологическими условиями (скорость и направление ветра) далеко не всегда обнаруживает четкую корреляцию с поступлением пыли с хвостохранилища. Представляется, что в ряде случаев именно вторичное загрязнение атмосферы пылью, взметнувшейся при ветровых порывах и проезде автотранспорта с ранее загрязненных поверхностей, является определяющим фактором превышения ПДК пыли.

Таким образом, целью исследования является оценка: 1) скорости накопления поинтервальной и суммарной пыли с техногенного объекта хранения хвостов обогащения, которая в процессе осаждения накапливается на территории г. Апатиты; 2) эффекта наличия мелкодисперсной пыли на автомобильных дорогах города в плане объема предстоящей уборки для коммунальных служб, а также дополнительной величины удельного пылевыведения при движении автотранспорта.

Материалы и методы

Базовая информация по предыдущим исследованиям

В предыдущих исследованиях использовалась CFD-модель, созданная авторами в программе COMSOL¹; значения ее главных параметров:

1) геометрия модели 3-мерная (Амосов и др., 2023, с. 90, рис. 3.12):

– размеры области моделирования 15 000 × 7 000 × 500 м;

– учет объектов пыления (высота хвостохранилища над плоскостью основания модели 74 м, что соответствует проектной высоте хвостохранилища АНОФ-2 на уровне 200 м), территории г. Апатиты (площадь 9 км²), ближайших возвышенностей (включая предгорья Хибин), которые при доминировании северо-западного ветра вносят некоторые изменения в структуру скоростного поля;

2) математический аппарат модели (Амосов и др., 2023, с. 92):

– расчет аэродинамических параметров в приближении несжимаемой жидкости с привлечением (к-ε)-модели турбулентности (нейтральное состояние атмосферы); применение уравнения конвективно-турбулентного переноса примеси с учетом скорости осаждения;

– анализ 7 интервалов крупности хвостов обогащения с шагом 10 мкм со своими "весами" (Амосов и др., 2023, с. 111, табл. 3.9); учет размера частиц до 70 мкм является вполне приемлемым для моделирования, основанного на подходе Эйлера-Эйлера (Shao, 2008; Lo Giudice et al., 2019), который использован авторами;

3) остальные параметры моделирования:

– оценка интенсивности пыления для каждого дискретного участка пылящей поверхности (Амосов и др., 2023, с. 122, рис. 3.34) по зависимости, представленной в работе (Westphal et al., 1988);

– реализация авторского алгоритма случайного выбора дискретных участков на поверхности хвостохранилища при вариации площади пыления от 2 до 10 га с шагом 2 га.

Для каждого значения скорости ветра от 5 до 23 м/с с шагом 6 м/с проанализировано 50 сочетаний выбора участков пыления, что с учетом 7 интервалов размера пыли в целом составляет 1 400 ситуаций.

¹ COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения: 12.05.2022).

Алгоритм вычисления осажженной пыли на горизонтальной поверхности

Для вычисления массы песка, содержащего зерна крупностью r , на поверхности g . Апатиты использован описанный ниже подход.

Массовая скорость поступления песка (крупность зерен r), кг/с, на поверхность вычисляется через интеграл:

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} w_{rg} C_r(x, y) dx dy,$$

где x_1, x_2 – границы интегрирования вдоль оси X , м (12 000–15 000 м); y_1, y_2 – границы интегрирования вдоль оси Y , м (3 000–6 000 м); w_{rg} – скорость осаждения песка, содержащего зерна крупностью r , оцененная по Стоксу (Амосов и др., 2023), м/с; $C_r(x, y)$ – концентрация песка, содержащего зерна крупностью r , в атмосфере вблизи поверхности g . Апатиты, кг/м³.

Проверка размерности: (м/с)·(кг/м³)·м·м = кг/с.

Если вынести за знак интеграла скорость осаждения, то значение оставшегося интеграла в области указанных границ получаем через опцию программы COMSOL. Умножение на выбранное значение времени будет давать массу песка, относящегося к конкретному интервалу крупности, выпавшую за выбранный отрезок времени.

Предлагается использовать отрезок времени 1 ч (далее легко масштабировать) и, таким образом, получить почасовые массы пыли для конкретного интервала крупности, суммировав которые, можно определить общую почасовую массу пыли M_{1h} .

Подходы к оценке вторичного взметывания пыли на автодорогах

Специалисты в области экологии транспорта (Графкина и др., 2017; Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021) отмечают важность нормирования и контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации транспорта, что является основным фактором воздействия на окружающую среду и население. Масштаб такого воздействия локализован преимущественно в пределах городских и промышленных территорий. Например, в диссертации (Графкина, 2008) приводятся цифры воздействия выбросов в атмосферный воздух: выброс локализован в пределах городских и промышленных территорий, занимающих около 2 % площади России, но именно на этой территории проживает более 60 % населения. В публикации (Азаров, 2011) подчеркивается, что с ростом интенсивности автотранспортных потоков в городах наиболее загрязненные территории перемещаются из промышленных зон в места компактного проживания населения.

Авторы обзора (Piscitello et al., 2021) отмечают, что для регулирования выбросов из различных источников и установления пределов, которые должны соблюдаться при эксплуатации транспортных средств, международными органами установлены пороговые значения коэффициента выбросов². Европейский союз определил стандарты в отношении предельных выбросов выхлопных газов транспортных средств. Так, в 1992 г. введен стандарт ЕВРО-1 – 140 мг/(км·авто) для дизельных автомобилей³. Пороговое значение выбросов выхлопных газов как для дизельных, так и для бензиновых автомобилей постоянно снижается: ЕВРО-3 (2000 г.) – 50 мг/(км·авто); ЕВРО-5 (2009 г.) и подтверждено ЕВРО-6 (2014 г.) – 5 мг/(км·авто). Аналогичным образом, в США с 1991 г. устанавливаются национальные стандарты⁴. Строгие правила способствовали технологической модернизации систем контроля горения и очистки выхлопных газов, что привело к резкому снижению влияния выхлопных газов транспортных средств на уровень загрязнения.

Выбросы, не связанные с выхлопными газами транспортных средств, также представляют собой источник твердых частиц в городских условиях. Авторы работы (Piscitello et al., 2021) приводят графический материал (рис. 1), на основании которого можно утверждать, что доля выбросов твердых частиц (PM₁₀ и PM_{2,5}), не связанных с выхлопными газами, в общем объеме загрязнений от дорожного движения сопоставима или даже превышает вклад выбросов выхлопных газов.

Российские специалисты (Графкина и др., 2017) отмечают, что в ходе анализа загрязнения атмосферного воздуха автотранспортными средствами (АТС) учитываются только выбросы, выделяемые при сгорании

² См.: European Community. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe // Official Journal of the European Union. 2008. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj/eng>; Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : Global update 2005 : summary of risk assessment. World Health Organization, 2006 URL: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02> (дата обращения: 25.04.2025).

³ Williams M., Minjares R. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. 2016. URL: <https://bit.ly/3IZs05G> (дата обращения: 25.04.2025).

⁴ US EPA. All EPA Emission Standards – Light-Duty Vehicles and Trucks and Motorcycles. United States Environmental Protection Agency. 2020. URL: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and> (дата обращения: 25.04.2025).

топлива в силовых агрегатах (оксид углерода, оксиды азота (в пересчете на диоксид азота), углеводороды, сажа, диоксид серы, соединения свинца, формальдегид, бензпирен). Эксперты по экологической безопасности технических систем подчеркивают, что указанный подход к оценке воздействия АТС на окружающую среду не учитывает выбросы (пыление), возникающие при проезде АТС по дорожным покрытиям различных типов.

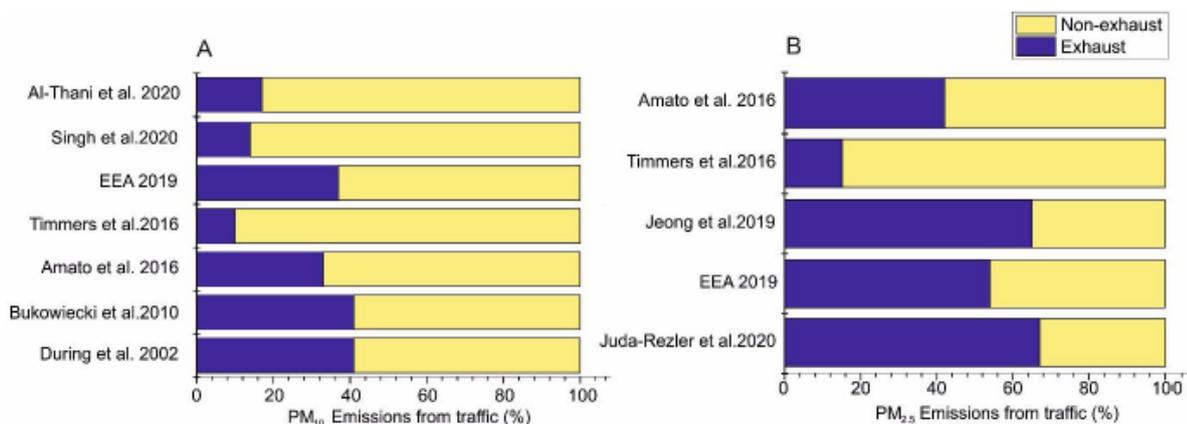


Рис. 1. Относительный вклад выбросов выхлопных газов и других веществ в общий объем выбросов PM_{10} в результате дорожного движения (Piscitello et al., 2021)

Fig. 1. Relative contribution of exhaust gas emissions and other substances to total PM_{10} emissions from road traffic (Piscitello et al., 2021)

В результате эксплуатации АТС в атмосферный воздух выбрасываются загрязняющие вещества: нефтепродукты; продукты износа шин, тормозных накладок и дорожного покрытия; сыпучие и пылящие грузы; антиобледенители дорожных покрытий. По данным, представленным в работе (Lozhkina et al., 2015), только в России ежегодно выбрасывается более 15 млн т указанных веществ.

Исследования по переносу пыли с объекта хранения хвостов обогащения вниз по ветровому потоку позволяют выйти на оценку дополнительного содержания мелкодисперсного песка на территории г. Апатиты, в том числе на автодорогах города после эпизодических пылевых бурь. В работе (Графкина и др., 2017) дается оценка дополнительного вклада в загрязнение атмосферы при пылении во время проезда АТС по дорожному покрытию, что обусловлено истиранием и отрывом и далее уносом твердых частиц, содержащихся на поверхности. Авторы указанной статьи подчеркивают, что источником выброса является установленный с применением единой государственной системы координат участок дороги, количественные и качественные показатели которого зависят от транспортной нагрузки и устанавливаются в зависимости от типа дорожного покрытия.

В публикации (Графкина и др., 2017) со ссылкой на рекомендации федерального закона "Об охране атмосферного воздуха"⁵ приведена формула по расчету максимального разового выброса, г/с:

$$m_i = K_\gamma K_W \frac{(q_{i1} n_{i1} N_1 + q_{i2} n_{i2} N_2 + \dots + q_{in} n_{in} N_n)}{3600 T_{\text{сут}}}, \quad (1)$$

где K_γ – коэффициент, учитывающий влажность дорожного покрытия; K_W – коэффициент, учитывающий максимальную скорость ветра в исследуемом районе; q_{ni} – удельное пылевыделение при проезде АТС различного вида по дорожному покрытию i -го типа, г/км; n_{ni} – количество проезжаемых километров автомобильным транспортом вида n по дорожному покрытию i -го типа, км; N_n – количество единиц АТС вида n ; $T_{\text{сут}}$ – количество часов эксплуатации АТС на рассматриваемом участке, ч/сут.

В формуле (1) содержится коэффициент удельного пылевыделения q_{ni} , который можно оценить по формуле, заимствованной из сборника коэффициентов выбросов (EF emission factor) загрязняющих веществ в атмосферу AP-42⁶, мг/(км·авто) (Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021):

$$EF = k (sL)^{0,91} W^{1,02}. \quad (2)$$

⁵ Об охране атмосферного воздуха (с изменениями на 13 июля 2015 г.) : федеральный закон № 96; принят Госдумой 02.04.1999 г. URL: <https://media.75.ru/gosins/documents/57247/ecd11100daf35582074f6dbf51a24100.pdf> (дата обращения: 25.04.2025).

⁶ US EPA. AP-42, Fifth Edition, Volume I. Chapter 13: Miscellaneous Sources. Section 13.2.2. Paved roads. United States Environmental Protection Agency. 2014. URL: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and> (дата обращения: 25.04.2025).

В формуле (2) для оценки количества взвешенной пыли, взмываемой транспортным средством, использованы параметры: sL – содержание наноса на дороге (дорожной пыли), $г/м^2$; W – средний вес транспортных средств, перемещающихся по дороге, т; k – коэффициент крупности частиц, который зависит от выбранного диапазона, $мг/(км·авто)$. Мелкая пыль наиболее опасна для здоровья человека, и именно для нее приводятся значения коэффициентов: для $PM_{2,5}$ $k = 150$ $мг/(км·авто)$; для PM_{10} $k = 620$ $мг/(км·авто)$. Это уравнение справедливо для содержания дорожной пыли sL (PM_{10}) в диапазоне $0,03–400$ $г/м^2$, массы транспортного средства W , составляющей $1,8–38$ т, и скорости транспортного средства до 88 км/ч. Вместе с тем авторы документов (*Beddows et al., 2021; Piscitello et al., 2021*) подчеркивают, что оценки взмывания нужно выполнять для пыли, размером частиц которой составляет не более 75 мкм, и одновременно отмечают, что в процессе движения автотранспорта происходит постепенное измельчение пыли, т. е. гранулометрический состав пыли имеет тенденцию меняться в сторону уменьшения размера частиц. Кроме того, в зависимости (2) предусмотрены понижающие коэффициенты, которые учитывают частоту выпадения осадков.

Содержание дорожной пыли sL является ключевым параметром. Неоднозначность результатов измерений содержания взвешенной дорожной пыли серьезным образом влияет на оценку коэффициентов выбросов, которые определяются с помощью прямых измерений (передвижная техника или отбор проб на обочинах дорог) или с помощью обратного моделирования (*Piscitello et al., 2021*).

В заключение обзора по этой проблеме отметим, что часто результаты экспериментов сильно варьируются, в том числе из-за включения в наборы данных различных видов АТС и типов дорог, но всегда подчеркивается ключевая роль содержания дорожной пыли.

Приведем модифицированные варианты формулы из сборника AP-42, указанные в работах:

1) (*Boulter et al., 2006*):

$$EF = c(sL)^{0,65} W^{1,5}, \quad (3)$$

где константа c установлена равной 260 $мг/м^2$ для $PM_{2,5}$ и 560 $мг/м^2$ для PM_{10} ;

2) (*Amato et al., 2011*), предложенный на основе измерений (рис. 2), выполненных:

– в Цюрихе (Швейцария):

$$EF = 41,281 (sL)^{0,7722}, \quad (4)$$

– Барселоне (Испания):

$$EF = 52,949 (sL)^{0,8192}, \quad (5)$$

где sL – содержание дорожной пыли размером менее 10 мкм (PM_{10}), $мкг/м^2$.

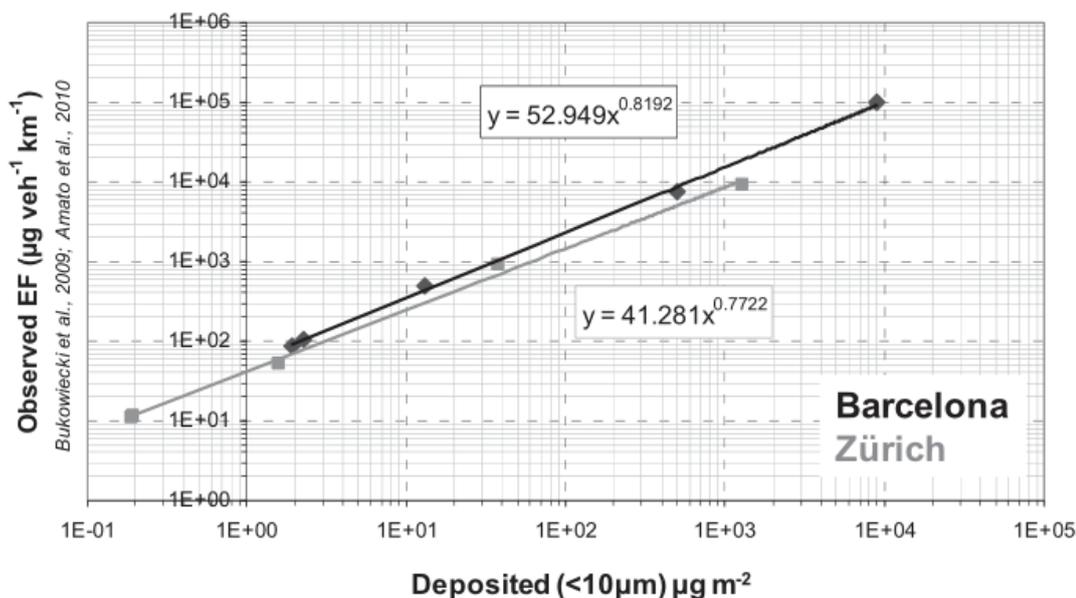


Рис. 2. Наблюдаемые коэффициенты выбросов в Барселоне и Цюрихе в зависимости от поверхностной плотности пыли (частицы размером менее 10 мкм) (*Amato et al., 2011*)

Fig. 2. Observed emission coefficients in Barcelona and Zurich as a function of the surface density of dust less than 10 microns in size (*Amato et al., 2011*)

Авторы публикации (*Beddows et al., 2021*) приводят данные о пылевой нагрузке на дорожное покрытие (табл. 1), которые получены в ходе европейских исследований.

Данные весьма разнообразны. Следует отметить тот факт, что значения в табл. 1 приведены для фракции размером PM_{10} , а дорожная пыль, способная к взметыванию, содержит частицы размером менее 75 мкм, и есть тенденция к измельчению крупных частиц. Существуют разрозненные данные по распределению частиц дорожной пыли: частицы размером PM_{10} составляют около 10–50 % от фракций менее 75 мкм (*Lanzerstorfer, 2018; Lanzerstorfer et al., 2019; Padone et al., 2017*). Авторы публикации (*Beddows et al., 2021*) делают попытку использовать данные по содержанию всей пыли: значение sL_{All} , равное 8 мг/м^2 , приблизительно соответствует концентрации пыли на поверхности PM_{10} , равной $1\text{--}4 \text{ мг/м}^2$, что соответствует многим значениям, указанным в табл. 1. Приведенная информация (на наш взгляд, без серьезного доказательства) позволяет сделать такой вывод: $sL_{All} / (sL_{PM_{10}}) \approx 8 \div 2$, т. е. в среднем можно взять такое отношение равным 5. Представляется, что данный подход требует более строгого обоснования, но имеет и свои преимущества, позволяющие сделать консервативные оценки.

Таблица 1. Данные о запыленности европейских дорог с твердым покрытием*, $\text{мг } PM_{10}/\text{м}^2$ (*Beddows et al., 2021*)

Table 1. Data on the dust content of European paved roads* [$\text{mg } PM_{10}/\text{m}^2$] (*Beddows et al., 2021*)

Город	Тип дороги	Пылевая нагрузка (средненная)	Литература
Цюрих	Различный	0,2–1,3	(Amato et al., 2011)
Барселона	Различный	3,7–23,1	
Жирона	Различный	1,3–7,1	
Барселона II	Кольцевая дорога	12,8–73,7	
Утрехт	Район проживания, менее 50 ч после дождя	2,0	(Amato et al., 2012)
Барселона	Средний трафик, более 50 ч после дождя	3,0	
Кордоба	Средний трафик, более 26 ч после дождя	2,4–20,1	(Amato et al., 2013)
Севилья	Трафик ниже среднего, более 100 ч после дождя	1,9–11,2	
Залив Алгесира	Трафик ниже среднего, более 46 ч после дождя	1,9–3,0	
Малага	Средний трафик, более 242 ч после дождя	4,3–5,9	
Гранада	Трафик ниже среднего, более 246 ч после дождя	5,9–18,1	(Pant et al., 2015)
Бирмингем	Средний трафик	9,3	

Примечание. *Исключаются образцы, собранные вблизи строительных площадок.

Таким образом, если первая цель исследований будет достигнута, то для достижения второй цели (цели исследования указаны во введении) необходимо разделить оцененную поинтервальную массу пыли, суммарную за определенный отрезок времени (наш интерес представляет PM_{10} , т. е. пыль интервала I), на площадь ее осаждения, отдельным образом выделив автодорожное покрытие.

Анализ результатов оценок осаждения пыли

Поинтервальные оценки

Расчетные значения поинтервальной массы пыли, накопленной в течение 1 ч при скорости ветра 5 м/с в процессе осаждения на участках размером 2 и 10 га, выбранных случайным образом и расположенных на территории г. Апатиты, представлены на рис. 3, а и б.

Отметим особенность представленных диаграмм. Максимальные скорости осаждения имеет пыль интервалов VI и VII, хотя доли этих интервалов в самом выбросе не являются максимальными. Сочетания участков пыления, которые расположены со стороны предгорий Хибин (участки 16–20) обеспечивают максимальные значения поинтервальной массы пыли за 1 ч.

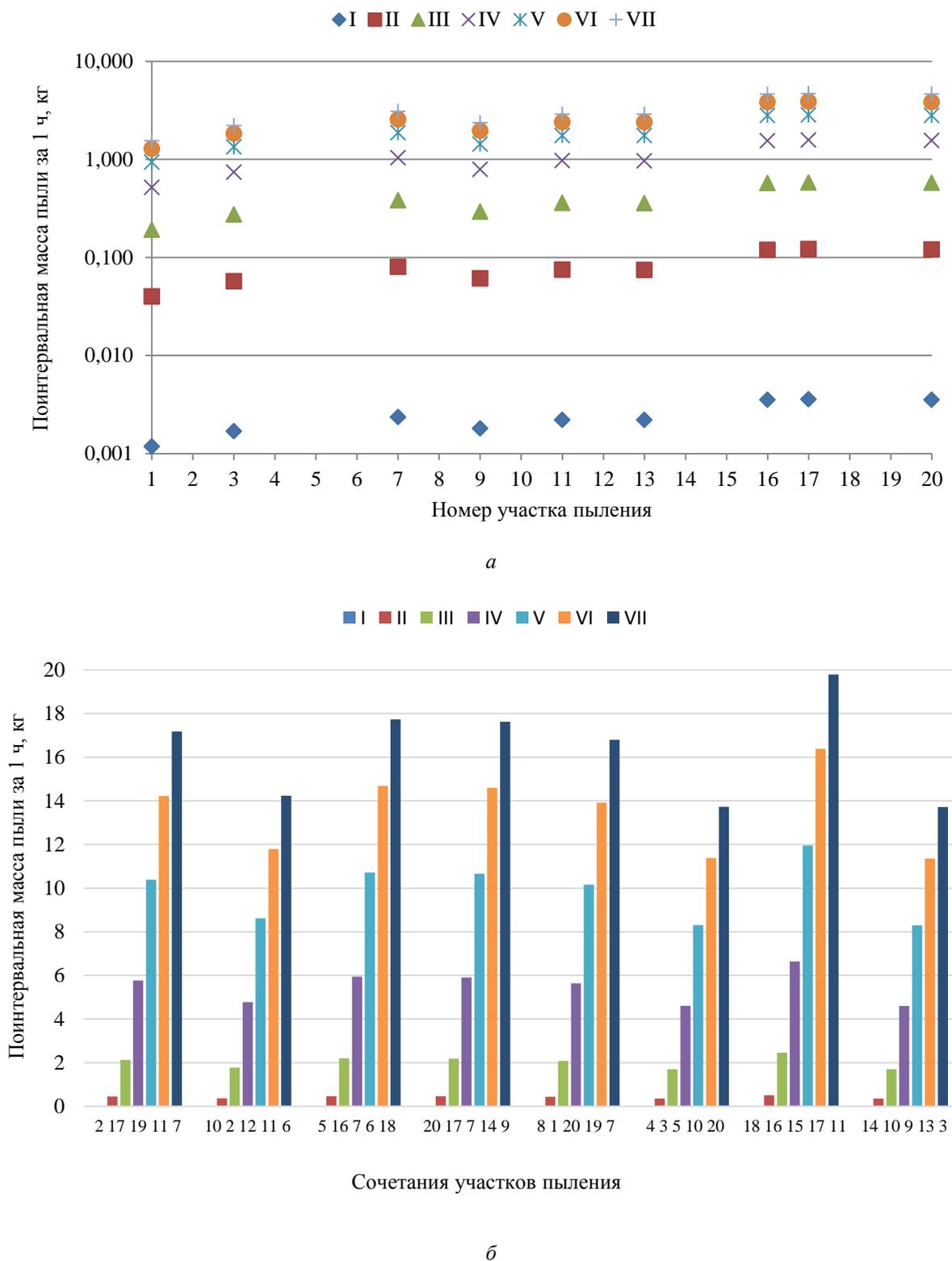


Рис. 3. Диаграммы поинтервальной массы пыли, накопленной в течение 1 ч на территории г. Апатиты при скорости ветра 5 м/с и случайном выборе участков для площади пыления: а – 2 га; б – 10 га
 Fig. 3. Diagrams of the interval mass of dust accumulated in 1 hour on the territory of Apatity at a wind speed of 5 m/s and a random selection of sites for the dusting area: а – 2 ha; б – 10 ha

Общая масса пыли M_{1h} за 1 ч осадения

Визуализация почасового суммарного накопления пыли на территории г. Апатиты для площади пыления 2 и 10 га (при случайном выборе участков пыления) и вариации скорости ветра от 5 до 23 м/с представлена на рис. 4, а и б. Увеличение скорости ветра приводит к росту количества пыли на территории г. Апатиты. Существуют варианты сочетаний участков пыления, которые обеспечивают существенный прирост пыли на поверхности г. Апатиты. В первую очередь, такое характерно для сочетаний, в которых присутствуют участки 16–20 со стороны предгорий Хибин. С другой стороны, минимальные значения почасового накопления пыли имеют место в сочетаниях с участками пыления 1–5.

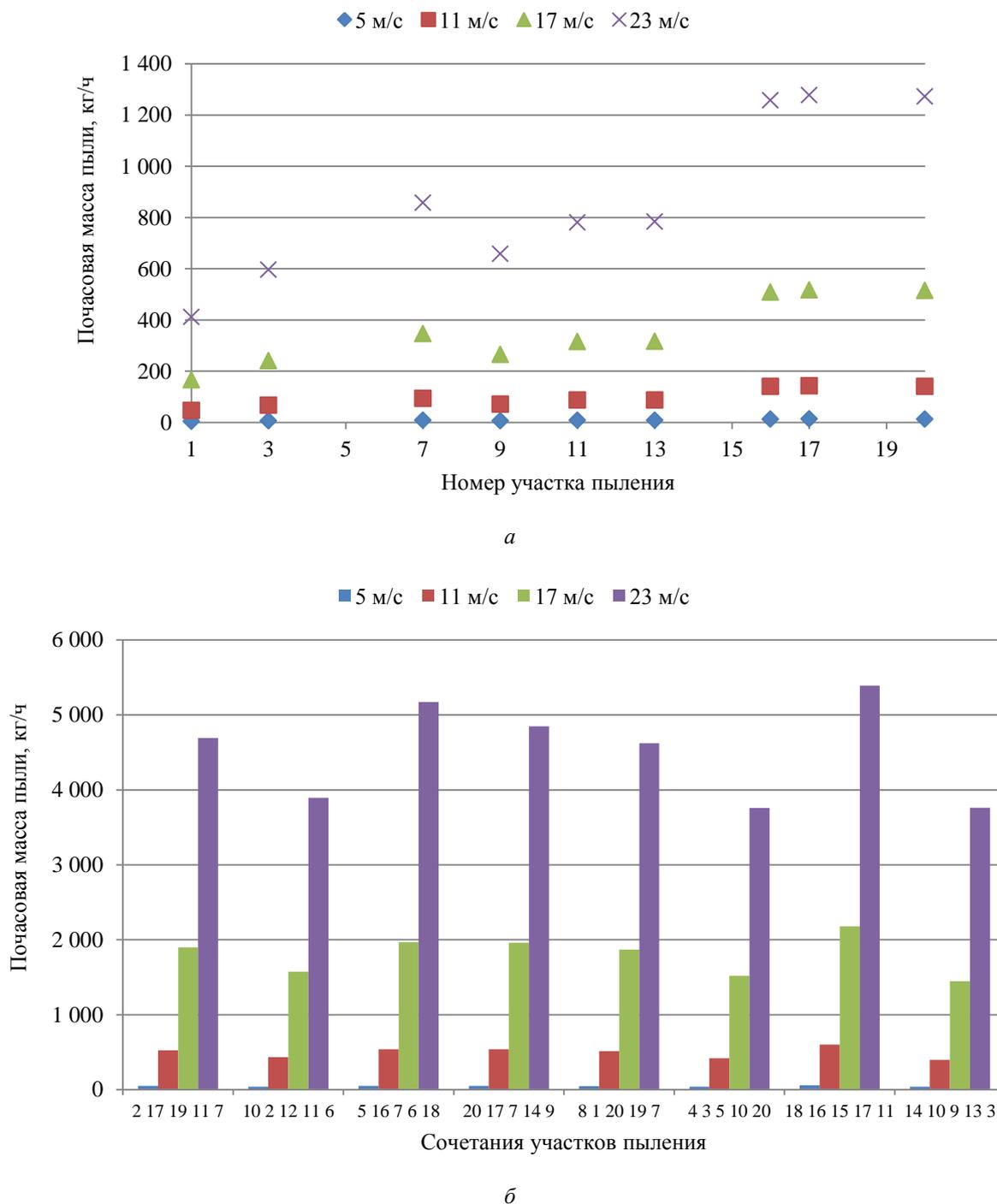


Рис. 4. Суммарное накопление пыли в течение 1 ч на территории г. Апатиты при скорости ветра 5–23 м/с и случайном выборе участков пыления: а – 2 га; б – 10 га
 Fig. 4. The total accumulation of dust in 1 hour on the territory of Apatity under conditions of a random selection of dusting sites and wind speed variations from 5 to 23 m/s for the dusting area: а – 2 ha; б – 10 ha

Анализ поинтервального массового содержания пыли на поверхности г. Апатиты показал, что зависимость данного содержания от изменения скорости ветра крайне слабая (табл. 2).

Таблица 2. Поинтервальное массовое содержание пыли на поверхности г. Апатиты при вариации скорости ветра (% с точностью до сотых долей)

Table 2. Interval mass content of dust on the surface of Apatity with wind speed variation (% accurate to hundredths)

Скорость ветра, м/с	Пыль интервала						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
5	0,03	0,89	4,25	11,49	20,72	28,37	34,26
11	0,03	0,91	4,32	11,64	20,85	28,34	33,91
17	0,03	0,91	4,35	11,68	20,89	28,33	33,81
23	0,03	0,92	4,36	11,70	20,91	28,32	33,76

С точностью до сотых долей процента можно констатировать тот факт, что увеличение скорости ветра приводит к небольшому снижению содержания пыли интервалов VI и VII, а также незначительному увеличению пыли интервалов II–V. Основной вклад (почти 82 %) вносит пыль интервалов V–VII (размером более 40 мкм). Доля мелкой пыли (интервалы I и II, не более 20 мкм) составляет менее 1 %.

Предпринята попытка оценить зависимость почасовой массы пыли на территории г. Апатиты от скорости ветра при вариации площади пыления. Такую оценку можно сделать для отдельных сочетаний участков пыления, что достаточно трудозатратно. Поэтому предложенный подход применен для осредненных значений массы пыли рассмотренных сочетаний участков пыления при фиксированной скорости ветра. На рис. 5 представлена визуализация осредненных значений почасовой массы пыли M_{1h} , кг/ч, в зависимости от скорости ветра при вариации площади пыления. Оказалось, что для аналитического описания представленных зависимостей отлично применима степенная функция скорости ветра:

$$M_{1h} = AV^B,$$

где V – скорость ветра, м/с; $A = 0,0390S - 0,0010$ – линейная функция площади пыления S , га; $B = 2,9703$ (модуль максимального отклонения от среднего не превышает 0,4 %).

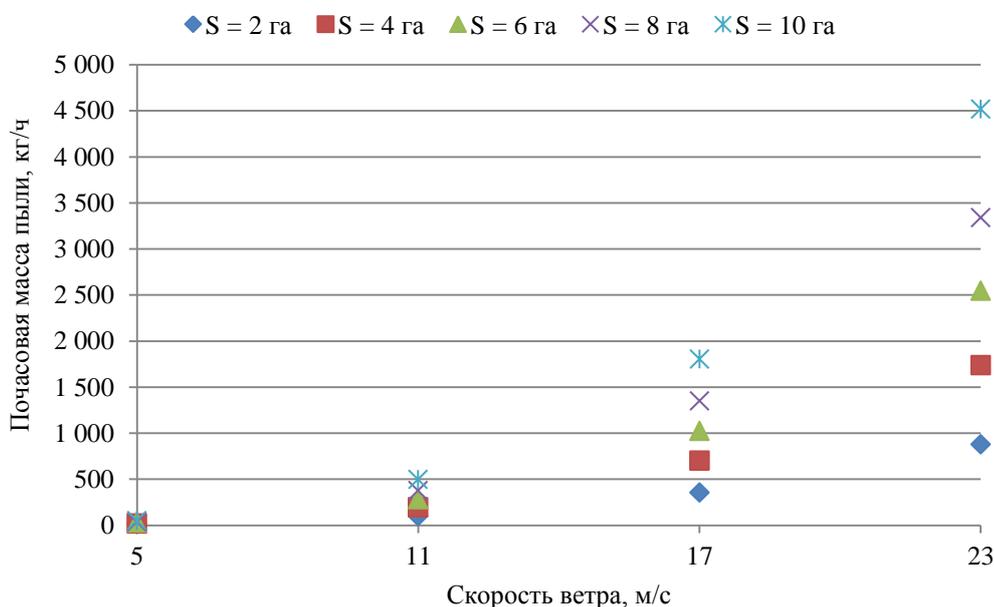


Рис. 5. Прогнозные значения осредненной почасовой массы пыли в зависимости от скорости ветра при вариации площади пыления
 Fig. 5. Forecast values of the hourly average dust mass with variation of the dusting area depending on wind speed

Таким образом, оценку почасового накопления пыли M_{1h} , кг/ч, на территории г. Апатиты в указанных выше диапазонах варьирования параметров площади пыления и скорости ветра можно выполнять по обобщенной зависимости

$$M_{1h} = (0,0390S - 0,0010) V^{2,9703}.$$

Выполненные оценки показывают прогнозные диапазоны изменения общей массы пыли, накопленной в процессе ее осаждения в течение 1 ч, при увеличении площади пыления от 2 до 10 га и скорости ветра:

5 м/с – 10–50 кг;

11 м/с – 100–500 кг;

17 м/с – 350–1 800 кг;

23 м/с – 900–4 500 кг.

Оценка содержания осаждаемой разнокалиберной пыли на автодорогах города

Данные документа "Об утверждении местных нормативов..."⁷ позволяют оценить площадь автомобильных дорог. В п. 5.1.7 указана плотность сети магистральных улиц, равная 2,2 км/км². С учетом площади города 9 км² получаем длину автодорожного покрытия, составляющую почти 20 км. Ширина дорожного полотна варьируется от 5 до 14 м (въезды во дворы, межквартальные проезды, боковые улицы, центральные улицы, проспекты). Для упрощения оценок целесообразно использовать ширину 10 м (0,01 км). Таким образом, площадь дорожного покрытия составит 0,2 км², т. е. доля площади дорог от площади города равна 0,02222.

Учитывая условие равномерного выпадения песка на территорию города⁸, в том числе и на дороги, вычленив из массы дорожного песка долю пыли интервала I (она очень слабо зависит от скорости ветра) и разделив полученную величину на площадь дорог, получим поверхностную плотность пыли (PM₁₀). Необходимо также килограммы перевести в микрограммы (9 порядков!). Масса пыли без пыли интервала I будет "заботой" коммунальной служб и негативом для жителей города.

Результаты оценок по указанным алгоритмам представлены в табл. 3 и 4. Напомним, что все полученные значения соответствуют всего лишь одночасовому времени процесса пыления хвостов обогащения; данный вид пыления рассматривается как дополнительный вклад в процесс естественного поступления пыли на территорию города.

Данные табл. 3 и 4 получены линейными преобразованиями расчетных значений накопленной почасовой массы пыли, значит, будут следовать ранее указанным функциональным зависимостям (линейной и степенной) со своими коэффициентами. Анализ данных табл. 3 позволяет отметить, что уровни поверхностного пылевого загрязнения городов Апатиты, Барселоны и Цюриха находятся практически в одном интервале (рис. 2), т. е. представленные в работе (Amato et al., 2011) зависимости коэффициентов выбросов могут быть использованы и для расчетов выбросов в г. Апатиты.

Таблица 3. Осредненная поверхностная плотность пыли интервала I (PM₁₀) на дорогах г. Апатиты с учетом вариации скорости ветра, массовой доли пыли интервала I и площади пыления
Table 3. Average surface dust density of the I interval (PM₁₀) on the roads of the town of Apatity with variations in wind speed, mass fraction of the I interval and dusting area, micrograms/m²

Скорость ветра, м/с	Доля пыли интервала I	Плотность пыли, мкг/м ² , с учетом площади пыления				
		2 га	4 га	6 га	8 га	10 га
5	0,0262	27,4	53,9	78,9	104,2	139,2
11	0,0267	290,7	573,8	836,0	1 106,9	1 473,0
17	0,0269	1 061,1	2 098,2	3 056,1	4 036,2	5 387,2
23	0,0270	2 632,5	5 205,9	7 638,6	10 012,5	13 551,9

Таблица 4. Осредненная масса пыли интервалов II–VII на дорогах г. Апатиты с учетом вариации скорости ветра и площади пыления
Table 4. The average mass of dust of II–VII intervals on the roads of the town of Apatity with variations in wind speed and dusting area, kg

Скорость ветра, м/с	Масса пыли, кг, с учетом площади пыления				
	2 га	4 га	6 га	8 га	10 га
5	0,20	0,40	0,59	0,77	1,03
11	2,12	4,18	6,10	8,07	10,74
17	7,68	15,18	22,11	29,20	38,98
23	18,97	37,52	55,05	72,16	97,67

⁷ Об утверждении местных нормативов градостроительного проектирования муниципального образования г. Апатиты с подведомственной территорией Мурманской области. Решение Совета депутатов г. Апатиты от 26.12.2017 г. № 579. URL: <https://apatity.gov-murman.ru/city/grad/579.pdf> (дата обращения: 31.05.2025).

⁸ На самом деле это не совсем так, и для поперечного к направлению ветра сечения в монографии (Амосов и др., 2023) продемонстрирован эффект выбора участков пыления на уровень загрязнения атмосферы вблизи поверхности.

Уборка пыли, мусора и благоустройство городских территорий – обязанность коммунальных служб. Необходимости решения проблемы пылевого загрязнения посвящены многие материалы сети Интернет: "Роликовый эффект: почему песок и пыль на дорогах провоцируют ДТП", "Пыль автодорог – опасное вещество для человека", "На каком этаже надо жить, чтобы меньше было дорожной пыли. Ученые рассказали и даже сделали замеры", "Борьба с пылью на дорогах"⁹ и др.

Заключение

Результаты оценки (поинтервальной и суммарной) осажденной на территории г. Апатиты пыли размером до 70 мкм базируются на данных, полученных в ходе ранее выполненных численных экспериментов по прогнозу загрязнения атмосферы мелкодисперсной пылью (с учетом скорости осаждения) от техногенного объекта хранения хвостов обогащения. Модели разработаны в программе COMSOL для района "хвостохранилище АНОФ-2 – г. Апатиты".

Поинтервальные и суммарные массы пыли, накопленные в течение 1 ч, на территории г. Апатиты рассчитаны с учетом вариации площади пыления 2–10 га (при случайном выборе пылящих участков на поверхности хвостохранилища) и скорости ветра 5–23 м/с. Для аналитического описания осредненной суммарной массы пыли, накопленной за 1 ч в условиях обозначенных диапазонов параметров модели, справедлива степенная функция скорости ветра и линейная зависимость от площади пыления.

В ходе исследования выполнена оценка поверхностной плотности пыли интервала I (PM_{10}), накопленной на автодорогах города Апатиты в течение 1 ч при пылении на объекте хранения хвостов обогащения, в условиях вариации скорости ветра и площади пыления. Уровень почасового дополнительного поверхностного пылевого загрязнения мелкой пылью сопоставим с уровнями пыли в городах Европы (Барселоне и Цюрихе).

Приведенные оценки почасового накопления пыли (размером до 70 мкм) при пылении хвостохранилища АНОФ-2 на дорогах г. Апатиты необходимы для экологического мониторинга, принятия решений коммунальными службами города по уборке пыли с целью снижения негативных последствий для здоровья населения.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках темы НИР № гос. рег. 1023032200038-4 "Трансформация природных и техногенных систем в условиях перехода к низкоуглеродному развитию экономики и изменяющегося климата Арктической зоны Российской Федерации (на примере Мурманской области)". Часть исследований (анализ суммарного накопления пыли) выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-30008.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Азаров В. Н., Калужина Е. А. Об организации мониторинга PM_{10} и $PM_{2,5}$ на примере г. Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2011. № 25(44). С. 398–401. EDN: PDXKNF.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Горячев А. А., Кони́на О. Т. [и др.]. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения : монография. Апатиты : Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 168 с. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.505.8>.
- Графкина М. В. Теория и методы оценки геоэкологической безопасности создаваемых природно-технических систем : дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.36. М., 2008. 338 с.
- Графкина М. В., Азаров А. В., Добринский Д. Р., Николенко Д. А. К вопросу контроля и нормирования выбросов мелкодисперсной пыли в атмосферный воздух при движении автомобильного транспорта // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4(103). С. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.4.373-380>. EDN: YNCVRH.
- Amato F., Pandolfi M., Alastuey A., Lozano A. [et al.]. Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading // Atmospheric Environment. 2013. Vol. 77. P. 711–717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020>.

⁹ См.: Роликовый эффект: почему песок и пыль на дорогах провоцируют ДТП. URL: <https://110km.ru/art/rolikovyy-effekt-pochemu-pesok-i-pyl-na-dorogah-provociruyut-dtp-138715.html> (дата обращения: 14.06.2025). ; Пыль автодорог – опасное вещество для человека. URL: <https://nia.eco/2022/04/11/34275/> (дата обращения: 14.06.2025). ; На каком этаже надо жить, чтобы меньше было дорожной пыли. Ученые рассказали и даже сделали замеры. URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/na-kakom-etazhe-nado-zhit-chtoby-menshe-bylo-dorozhnoy-pyli-uchenye-rasskazali-i-dazhe-sdelali-zamery.html> (дата обращения: 14.06.2025). ; Борьба с пылью на дорогах. URL: https://studopedia.su/10_77856_borba-s-pilyu-na-dorogah.html (дата обращения: 14.06.2025).

- Amato F., Pandolfi M., Moreno T., Furger M. [et al.]. Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities // *Atmospheric Environment*. 2011. № 45, Iss 37. P. 6777–6787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.003>.
- Amato F., Schaap M., Denier van der Gon H. A. C., Pandolfi M. [et al.]. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 62. P. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.042>.
- Beddows D. C. S., Harrison R. M. PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 244. Article number: 117886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>.
- Boulter P. G., Thorpe A. J., Harrison R. M., Allen A. G. Road vehicle non-exhaust particulate matter: Final report on emission modelling. TRL, 2006.
- Lanzerstorfer C. Heavy metals in the finest size fractions or road-deposited sediments // *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 239. P. 522–531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>.
- Lanzerstorfer C., Logiewa A. The upper size limit of the dust samples in road dust heavy metal studies: Benefits of a combined sieving and air classification sample preparation procedure // *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 245. P. 1079–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.131>.
- Lo Giudice A., Nuca R., Preziosi L., Coste N. Wind-blown particulate transport: A review of computational fluid dynamics models // *Mathematics in Engineering*. 2019. Vol. 1, Iss. 3. P. 508–547. DOI: <https://doi.org/10.3934/mine.2019.3.508>.
- Lozhkina O. V., Lozhkin V. N. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 36. P. 178–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.013>.
- Padoan E., Rome C., Ajmone-Marsan F. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601–602. P. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>.
- Pant P., Baker S. J., Shukla A., Maikawa C. [et al.]. The PM₁₀ fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential // *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 530–531. P. 445–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.084>.
- Piscitello A., Bianco C., Casasso A., Sethi R. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 766. Article number: 144440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>.
- Shao Y. *Physics and modelling of wind erosion*. Springer, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>.
- Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A case-study of mobilization and transport of Saharan dust // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1988. Vol. 45. P. 2145–2175.

References

- Azarov, V. N., Kalyuzhina, E. A. 2011. About the organization of monitoring of RM₁₀ and PM_{2.5} on the example of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, Ser.: Construction and Architecture*, 25(44), pp. 398–401. EDN: PDXKNF. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Goryachev, A. A., Konina, O. T. et al. 2023. Dusting of apatite-nepheline ores enrichment tailings: An environmental problem and pathways to solve it. Monograph. Apatity. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.505.8>. (In Russ.)
- Grafkina, M. V. 2008. Theory and methods of assessment of geocological safety of created natural and technical systems. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Grafkina, M. V., Azarov, A. V., Dobrinsky, D. R., Nikolenko, D. A. 2017. On the Issue of control and normalization of fine dust emissions into the atmospheric air during the road transport movement. *Vestnik MGSU*, 12(4(103)), pp. 373–380. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.4.373-380>. EDN: YNCVRH. (In Russ.)
- Amato, F., Pandolfi, M., Alastuey, A., Lozano, A. et al. 2013. Impact of traffic intensity and pavement aggregate size on road dust particles loading. *Atmospheric Environment*, 77, pp. 711–717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.020>.
- Amato, F., Pandolfi, M., Moreno, T., Furger, M. et al. 2011. Sources and variability of inhalable road dust particles in three European cities. *Atmospheric Environment*, 45(37), pp. 6777–6787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.06.003>.
- Amato, F., Schaap, M., Denier van der Gon, H. A. C., Pandolfi, M. et al. 2012. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads. *Atmospheric Environment*, 62, pp. 352–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.042>.
- Beddows, D. C. S., Harrison, R. M. 2021. PM₁₀ and PM_{2.5} emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 244. Article number: 117886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117886>.

- Boulter, P. G., Thorpe, A. J., Harrison, R. M., Allen, A. G. 2006. Road vehicle non-exhaust particulate matter: Final report on emission modelling. TRL.
- Lanzerstorfer, C. 2018. Heavy metals in the finest size fractions or road-deposited sediments. *Environmental Pollution*, 239, pp. 522–531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.063>.
- Lanzerstorfer, C., Logiewa, A. 2019. The upper size limit of the dust samples in road dust heavy metal studies: Benefits of a combined sieving and air classification sample preparation procedure. *Environmental Pollution*, 245, pp. 1079–1085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.131>.
- Lo Giudice, A., Nuca, R., Preziosi, L., Coste, N. 2019. Wind-blown particulate transport: A review of computational fluid dynamics models. *Mathematics in Engineering*, 1(3), pp. 508–547. DOI: <https://doi.org/10.3934/mine.2019.3.508>.
- Lozhkina, O. V., Lozhkin, V. N. 2015. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, pp. 178–189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.013>.
- Padoan, E., Rome, C., Ajmone-Marsan, F. 2017. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect. *Science of The Total Environment*, 601–602, pp. 89–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.180>.
- Pant, P., Baker, S. J., Shukla, A., Maikawa, C. et al. 2015. The PM₁₀ fraction of road dust in the UK and India: Characterization, source profiles and oxidative potential. *Science of The Total Environment*, 530–531, pp. 445–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.084>.
- Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., Sethi, R. 2021. Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures. *Science of The Total Environment*, 766. Article number: 144440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144440>.
- Shao, Y. 2008. Physics and modelling of wind erosion. Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8895-7>.
- Westphal, D. L., Toon, O. B., Carlson, T. N. 1988. A case-study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45, pp. 2145–2175.

Сведения об авторах

Амосов Павел Васильевич – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник;
Малоохтинский пр., 98, г. Санкт-Петербург, Россия, 195196;
Российский государственный гидрометеорологический университет, вед. науч. сотрудник;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Pavel V. Amosov – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher;
98 Malookhtinskiy Ave., Saint Petersburg, Russia, 195196;
Russian State Hydrometeorological University, Leading Researcher;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Бакланов Александр Анатольевич – Малоохтинский пр., 98, г. Санкт-Петербург, Россия, 195196;
Российский государственный гидрометеорологический университет,
д-р физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник;
Jagtvej 128, 2nd floor, tower A+F. DK-2200-Copenhagen, Дания;
Центр физики льда, климата и Земли, Институт Нильса Бора Копенгагенского университета;
e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Alexander A. Baklanov – Jagtvej 128, 2nd floor, tower A+F. DK-2200-Copenhagen, Denmark;
Physics of Ice, Climate and Earth, Niels Bohr Institute, Copenhagen University, Copenhagen,
Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor;
98 Malookhtinskiy Ave., Saint Petersburg, Russia, 195196;
Russian State Hydrometeorological University, Chief Scientist;
e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

УДК 631.416.9+574.2

Оценка содержания селена в почвах и растениях на примере степной и лесостепной зон Челябинской области

М. А. Белов

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Россия;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.12.2025;
получена
после доработки
19.01.2026;
принята
к публикации
22.01.2026

В исследовании проанализировано содержание селена в почвах и растениях шести муниципальных районов Челябинской области: Чесменского, Троицкого, Пластовского, Увельского, Еманжелинского и Еткульского. Пробы были отобраны в период созревания сельскохозяйственных культур (август – сентябрь 2023–2024 гг.) и включали злаковые и масличные культуры. Почвы представлены обыкновенными и выщелоченными черноземами. Результаты показали, что среднее содержание селена варьирует от 0,1204 мг/кг в Пластовском районе до 0,2679 мг/кг в Еманжелинском. В зоне оптимума находятся 42 % проб, в то время как в зонах маргинальной недостаточности и селенодефицита – 27 и 31 % проб соответственно. Выщелоченные черноземы имеют более высокое содержание селена (0,20 мг/кг) по сравнению с обыкновенными черноземами (0,13 мг/кг). Анализ корреляционных зависимостей выявил отрицательную связь между содержанием селена и уровнем pH почвы, особенно в Чесменском и Увельском районах. В других районах эта связь менее выражена, что указывает на влияние таких факторов, как состав почвы и антропогенное воздействие. Исследование показало, что пшеница более эффективно накапливает селен по сравнению с подсолнечником. Коэффициент биологического поглощения селена варьирует в зависимости от типа почвы и вида растения. Установлена зависимость содержания селена от содержания тяжелых металлов в почвах. Полученные данные подчеркивают необходимость дальнейших исследований для разработки дифференцированных стратегий улучшения селенового статуса сельскохозяйственных угодий и повышения урожайности культур.

Ключевые слова:

селен, почва,
растения,
селенодефицит,
чернозем,
Челябинская область

Для цитирования

Белов М. А. Оценка содержания селена в почвах и растениях на примере степной и лесостепной зон Челябинской области. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-54-63>.

Assessment of selenium content in soils and plants using the example of steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region

Maxim A. Belov

Tumen State University, Tumen, Russia;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Article info

Received
03.12.2025;
received
in revised form
19.01.2026;
accepted
22.01.2026

Abstract

The study analyzes the selenium content in the soils and plants of six municipal districts of the Chelyabinsk region: Chesmenskiy, Troitskiy, Plastovskiy, Uvelskiy, Yemanzhelinskiy and Etkulskiy. The samples were taken during the ripening period of agricultural crops (August – September 2023–2024) and included cereals, buckwheat and oilseeds. The soils are represented by ordinary and leached chernozems. The results have shown that the average selenium content varies from 0.1204 mg/kg in the Plastovsky district to 0.2679 mg/kg in the Yemanzhelinsky one. 42 % of samples are in the optimum zone, while 27 and 31 % of samples are in the zones of marginal insufficiency and selenium deficiency, respectively. Leached chernozems have higher selenium content (0.2009 mg/kg) compared to ordinary chernozems (0.1344 mg/kg). The analysis of correlations has revealed a negative relationship between the selenium content and the pH level of the soil, especially in the Chesmenskiy and Uvelskiy districts. In other areas, this relationship is less pronounced, indicating the influence of other factors such as soil composition and anthropogenic influences. The study has shown that wheat and buckwheat accumulate selenium more efficiently than sunflower. The coefficient of biological absorption of selenium varies depending on the type of soil and the type of plant. The dependence of selenium content on the content of heavy metals (lead, zinc) in soils has been established. The influence of heavy metals on the selenium content varies depending on the area, which is related to the peculiarities of soil conditions and anthropogenic load. The data obtained emphasize the need for further research to develop differentiated strategies for improving the selenium status of agricultural land and increasing crop yields.

Key words:

selenium, soil,
plants,
selenium deficiency,
chernozem,
Chelyabinsk region

For citation

Belov, M. A. 2026. Assessment of selenium content in soils and plants using the example of steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 54–63. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-54-63>.

Введение

Челябинская область отличается высоким уровнем промышленного и сельскохозяйственного производства. Промышленные объекты, такие как металлургические и химические предприятия, выбрасывают в окружающую среду загрязняющие вещества, включая соединения тяжелых металлов, что может оказывать негативное воздействие на здоровье населения. Одним из проявлений такого воздействия является развитие оксидативного стресса (Белов и др., 2024).

Оксидативный стресс представляет собой патологическое состояние, обусловленное нарушением баланса между образованием активных форм кислорода и антиоксидантной защитой организма. Накопление свободных радикалов и реактивных кислородосодержащих соединений приводит к повреждению клеточных структур, что может вызвать нарушение функций клеток и тканей. Для нейтрализации оксидативного стресса и минимизации его негативных последствий необходимо применение антиоксидантов – соединений, способных ингибировать процессы окисления. Среди них особое значение имеет селен, который входит в состав селеносодержащих ферментов, таких как глутатионпероксидаза (Белов и др., 2024).

Селен (Se) является важным микроэлементом, который играет ключевую роль в биохимических процессах растений, животных и человека. Он участвует не только в антиоксидантной защите организма, но и в регуляции иммунной системы и метаболизме гормонов щитовидной железы (Боев, 2013; Бубнова и др., 2023; Голубкина и др., 2017; Ермаков и др., 2010; Капитальчук и др., 2011). Дефицит селена может приводить к различным заболеваниям, включая сердечно-сосудистые патологии, онкологические заболевания и нарушения эндокринной системы. Переизбыток селена в организмах также представляет опасность. Избыток селена может вызывать повреждение печени и нарушение функции щитовидной железы, что приводит к гормональному дисбалансу. Развивается селеноз, который проявляется с выпадением волос, ломкостью ногтей и изменениями кожи (Козлова и др., 2018; Побилат и др., 2020; Серегина, 2018; Синдирева и др., 2021; Qu et al., 2023). Повышается риск возникновения диабета и аритмии, так как избыточное количество селена влияет на иммунную систему (Шеуджен и др., 2013; 2018; Шешницан и др., 2017; Saha et al., 2017).

Челябинская область является важным аграрным регионом России, где выращиваются различные сельскохозяйственные культуры, включая злаковые и масличные. Содержание селена в почвах и растениях напрямую влияет на качество и безопасность сельскохозяйственной продукции. Дефицит или профицит селена в почвах может приводить к снижению урожайности и ухудшению качества продукции, что негативно сказывается на экономике региона и здоровье населения (El-Ramady et al., 2015; Kushwaha et al., 2022; Lopes et al., 2017; Semenova et al., 2017).

В современных условиях наблюдается дефицит микроэлементов в объектах окружающей среды, что характерно и для Челябинской области. В настоящее время отсутствуют систематизированные данные о содержании селена в системе почва – растение на территории многих районов региона.

Целью исследования является оценка уровня содержания селена в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства в условиях степной и лесостепной зон Челябинской области.

Материалы и методы

Пробы отбирались в период созревания сельскохозяйственных культур (август – сентябрь) 2023–2024 гг. Образцы почв и растений отобраны в центральной части региона, а именно на территории Чесменского, Троицкого, Пластовского, Увельского, Еманжелинского и Еткульского районов. Всего с 48 площадок отобрано 50 проб почвы (13 – чернозема обыкновенного, 37 – чернозема выщелоченного) и 48 проб растений, из них 31 – злаковые культуры (пшеница яровая/*Triticum aestivum* L.) и 17 – масличные (подсолнечник обыкновенный/*Helianthus annuus* L.). Места отбора проб показаны на рис. 1.

Отбор проб растений был проведен в соответствии с ГОСТ Р 58588-2019 "Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа"¹. Почвы собирались с пахотного горизонта сельскохозяйственных угодий на глубине 0–20 см, следуя требованиям ГОСТ 17.4.3.01-83 "Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб"². Подготовка почвенных проб осуществлялась в соответствии с методическими указаниями РД 52.18.191-89 "Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом" (Москва, 1990). Пробоподготовка растений выполнялась по "Методическим указаниям по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства" (Москва, 1992) и методике

¹ ГОСТ Р 58588-2019. Отбор и подготовка растительных проб для изотопного анализа. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293726/4293726653.pdf?ysclid=mlaiiqakhh271147650>.

² ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/99d/4294849589.pdf?ysclid=mlaik3jqfd141966782>.

ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 "Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой" (Москва, 1998)³.

Исследования содержания тяжелых металлов и селена проводились методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой согласно ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Результаты были получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Рациональное природопользование и физико-химические исследования" Тюменского государственного университета.



Рис. 1. Картосхема отбора проб почвы и растений в пределах Челябинской области
Fig. 1. Cartography of soil and plant sampling in the Chelyabinsk region

Полученные данные обработаны с использованием стандартных статистических методов в программном пакете Microsoft Excel. Для глубокого анализа данных рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона, вариации и биологического поглощения. Коэффициент биологического поглощения вычисляется как отношение содержания элементов в растениях к содержанию их кислоторастворимых форм в почве, что позволяет оценить эффективность поглощения и удержания элементов растениями.

Результаты и обсуждение

Исследованные районы Челябинской области значительно различаются по степени воздействия человека на окружающую среду. Их можно расположить в порядке уменьшения антропогенной нагрузки.

Троицкий район является территорией с максимальной нагрузкой, где наибольший вклад вносят объекты теплоэнергетики и тяжелой промышленности. Пластовский район имеет специализацию на горнодобывающем и перерабатывающем комплексах. В Увельском районе ключевым фактором выступает добыча нерудных строительных материалов с сопутствующим пылевым загрязнением. Еманжелинский район имеет комплексную нагрузку, сочетающую наследие угледобычи (деградированные земли, породные отвалы) с воздействием действующих перерабатывающих и машиностроительных предприятий. В Еткульском районе антропогенное влияние обусловлено предприятиями по добыче и обработке природного камня (мрамор, гранит), а также агротехногенными факторами. Чесменский район отличается наименьшим уровнем прямой техногенной нагрузки. Основное воздействие связано с сельскохозяйственной деятельностью, в то

³ Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. РД 52.18.191-89. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/35b/4293849262.pdf?ysclid=mlai4g8dhw728836833>; Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (изд. 2-е, перераб. и допол.). URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/987/4293771886.pdf?ysclid=mlai8gl51u146721160>; Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/19e/4293777593.pdf?ysclid=mlaie2shuw507135199>.

время как промышленные объекты (добыча медной руды, огнеупорных глин) территориально удалены от населенных пунктов и агроценозов, что минимизирует их локальное влияние (Белов и др., 2024; Белов и др., 2025).

В рамках исследования получена информация о содержании селена в почвах шести муниципальных районов Челябинской области. Данные представлены на рис. 2.

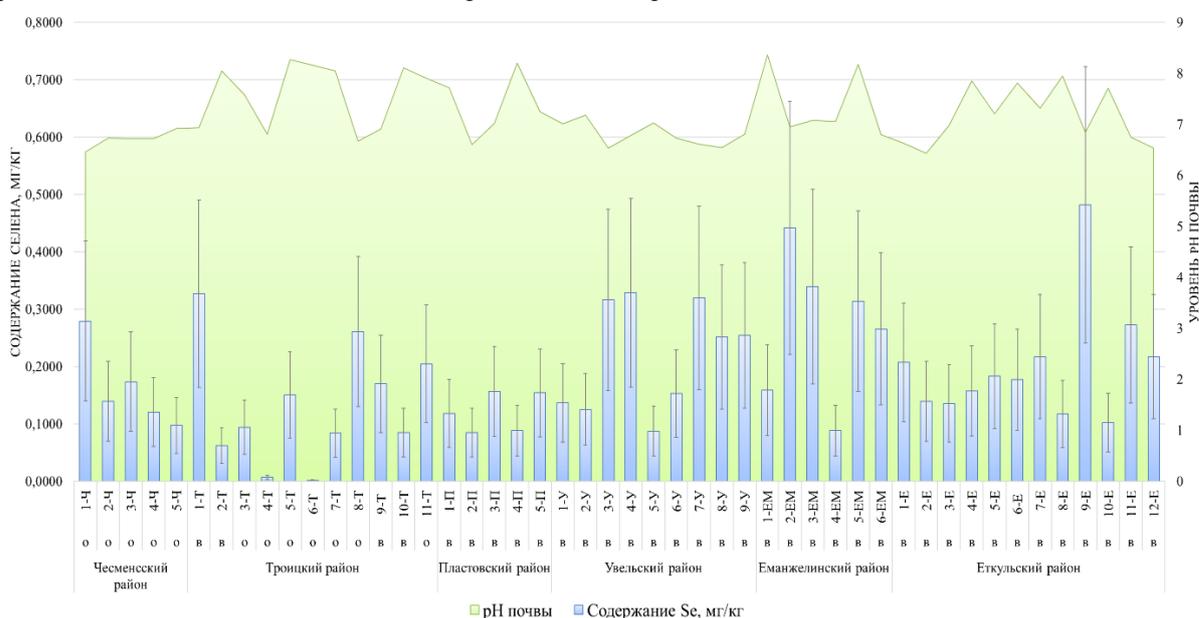


Рис. 2. Содержание кислоторастворимых форм селена в пробах почвы Челябинской области: о – чернозем обыкновенный; в – чернозем выщелоченный

Fig. 2. The content of acid-soluble forms of selenium in soil samples of the Chelyabinsk region: о – ordinary chernozem; в – leached chernozem

В соответствии с полученными данными содержание селена в пробах почвы Чесменского района варьирует от 0,0976 до 0,2794 мг/кг (среднее содержание 0,1620 мг/кг), в Троицком районе от 0,0014 до 0,3266 мг/кг (среднее содержание 0,1249 мг/кг), Пластовском районе от 0,0849 до 0,1563 мг/кг (среднее содержание 0,1204 мг/кг), Увельском районе от 0,0872 до 0,3289 мг/кг (среднее содержание 0,2135 мг/кг), Еманжелинском районе от 0,0884 до 0,4417 мг/кг (среднее содержание 0,2679 мг/кг) и Еткульском районе от 0,1022 до 0,4820 мг/кг (среднее содержание 0,1994 мг/кг).

Для оценки уровня содержания селена в почве приняты следующие значения: менее 0,125 мг/кг – область селенодефицита; 0,125–0,175 мг/кг – маргинальная недостаточность; 0,175–3 мг/кг – область оптимума; более 3 мг/кг – область селенопрофицита (Tan et al., 2002).

Согласно пороговым значениям в области оптимума находятся: одна проба Чесменского района (1), три пробы Троицкого района (1, 8 и 11), пять проб Увельского района (3, 4, 7–9), четыре пробы Еманжелинского района (2, 3, 5, 6) и семь проб Еткульского района (1, 5–7, 9, 11, 12). Таким образом, двадцать проб располагаются в зоне оптимума, что составляет 42 % от общего числа проб. Остальные пробы находятся в зоне маргинальной недостаточности (13 проб) и селенодефицита (15 проб), что составляет 27 и 31 % от общего числа проб соответственно.

Рассчитан коэффициент корреляции Пирсона между содержанием селена и уровнем pH почвы для всех районов, полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Пирсона между содержанием селена и уровнем pH в почвах Челябинской области

Table 1. Pearson correlation coefficient between selenium content and pH level in soils of the Chelyabinsk region

Природная зона	Район исследования	Количество проб почвы	Тип почвы	Значение коэффициента
Степная	Чесменский	5	Чернозем обыкновенный	$r = -0,935, p = 0,020-0,924$
	Троицкий	11		$r = -0,455, p = 0,159-0,380$
Лесостепная	Пластовский	5	Чернозем выщелоченный	$r = -0,199, p = 0,748-0,201$
	Увельский	9		$r = -0,774, p = 0,014-0,776$
	Еманжелинский	6		$r = -0,243, p = 0,643-0,245$
	Еткульский	12		$r = -0,391, p = 0,208-0,308$

Согласно полученным данным во всех образцах почвы наблюдается отрицательная корреляционная связь. Очень сильная отрицательная связь – в пробах Чесменского и Увельского районов. Это означает, что с увеличением рН почвы значительно снижается содержание селена. Такая зависимость может быть связана с тем, что в щелочных условиях селен становится более доступным для растений. В щелочных и хорошо аэрируемых почвах преобладают селенаты – легкорастворимые соединения, которые слабо фиксируются оксидами железа и достаточно подвижны, что делает их доступными (Шеуджен и др., 2018).

В пробах Троицкого и Еткульского районов наблюдается слабая отрицательная связь. В этих районах имеется небольшая обратная зависимость между уровнем рН и содержанием селена. Это может указывать на то, что кислотность почвы оказывает влияние на селен, но его роль не является доминирующей.

Очень слабая отрицательная связь наблюдается в пробах Пластовского и Еманжелинского районов. Это говорит о том, что линейная зависимость между уровнем рН и содержанием селена практически отсутствует. Это может означать, что другие факторы (например, тип почвы, ее агрохимические характеристики, гранулометрический состав или взаимодействие с другими элементами) играют более важную роль в распределении селена (Шеуджен и др., 2018; Синдирева и др., 2021).

Анализ коэффициентов корреляции показывает, что связь между уровнем рН почвы и содержанием селена варьирует в зависимости от района. Также стоит отметить, что во всех случаях связь отрицательная, т. е. чем выше уровень рН (щелочнее почва), тем меньше в ней селена. В Чесменском и Увельском районах наблюдается сильная отрицательная связь, что указывает на значительное влияние кислотности почвы на содержание селена. В остальных районах связь слабая или отсутствует.

Проведен анализ содержания селена в разных типах чернозема, данные представлены на рис. 3.

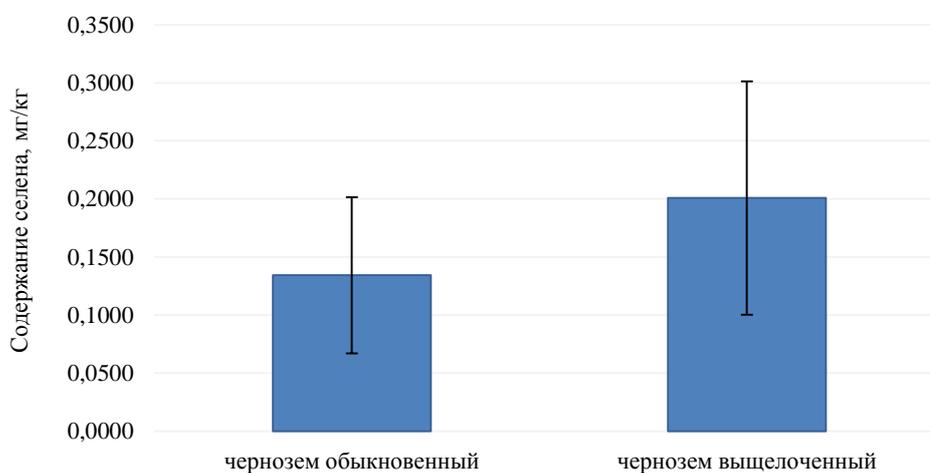


Рис. 3. Среднее содержание селена в обыкновенных и выщелоченных черноземах Челябинской области
 Fig. 3. The average selenium content in ordinary and leached chernozems of the Chelyabinsk region

Среднее содержание селена в черноземе обыкновенном составляет 0,1344 мг/кг. Черноземы обыкновенные характеризуются высоким содержанием гумуса, что способствует накоплению химических элементов, включая селен. Однако в данном случае содержание селена относительно ниже по сравнению с черноземом выщелоченным. Это может быть связано с тем, что в обыкновенных черноземах селен менее доступен для растений из-за связывания с органическим веществом или другими элементами (Побилат и др., 2020; Голубкина и др., 2017).

Среднее содержание селена в черноземе выщелоченном составляет 0,2009 мг/кг. Черноземы выщелоченные отличаются более интенсивным процессом выщелачивания, что приводит к уменьшению содержания карбонатов и изменению химического состава почвы. Однако содержание селена в таких почвах выше, чем в черноземах обыкновенных.

Рассчитан коэффициент вариации (CV), который отражает степень изменчивости содержания селена в разных типах почв. Это поможет понять, насколько стабильно или нестабильно распределение селена в почве. В данном случае CV показывает, что содержание селена в черноземах выщелоченных (CV = 52,03 %) более изменчиво, чем в черноземах обыкновенных (CV = 77,24 %). Это указывает на то, что в выщелоченных черноземах селен распределен менее стабильно, возможно, из-за влияния рН, состава почвы, климатических условий или антропогенных факторов. В обыкновенных черноземах селен имеет более стабильное распределение, хотя его содержание все равно подвержено изменчивости.

Рассчитан коэффициент биологического поглощения (КБП) селена для каждого района. КБП > 1 указывает на активное накопление селена растением, а КБП < 1 – на слабое накопление. Данные представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициент биологического поглощения селена
Table 2. Coefficient of biological absorption of selenium

Тип почвы	Вид растения	Значение коэффициента
Чернозем обыкновенный	Пшеница	1,5
	Подсолнечник	0,8
Чернозем выщелоченный	Пшеница	1,2
	Подсолнечник	1,0

КБП отражает способность растений накапливать определенные элементы из почвы. В данном случае анализируется накопление селена различными растениями на двух типах почв: черноземе обыкновенном и черноземе выщелоченном.

Согласно полученным данным установлено, что вид растения и тип почвы оказывают значительное влияние на коэффициент биологического накопления селена. Пшеница проявляет более высокую способность к накоплению селена. У подсолнечника поглощение может быть ниже, чем у злаков, из-за различий в метаболических потребностях и механизмах транслокации (*Побилат и др., 2020*).

Высокая эффективность пшеницы обусловлена ее способностью активно поглощать селен через сульфатные транспортеры из-за химического сходства с серой. Пшеница является ведущим зерновым источником Se, преобразуя его в наиболее доступную форму – селенометионин (*Семенова, 2025; Тутов и др., 2021*).

Еще одним фактором, влияющим на содержание селена, является наличие тяжелых металлов (*Боев, 2013; Голубкина и др., 2017; Ермаков и др., 2010; Синдирева и др., 2018*). Эти элементы могут влиять на содержание селена в растениях через конкурентное поглощение и транспорт, изменяя доступность селена в почве. Например, свинец часто снижает накопление селена, конкурируя за корневые каналы поглощения, тогда как цинк и медь в низких концентрациях могут способствовать его усвоению. Кроме того, тяжелые металлы вызывают окислительный стресс, увеличивая расход селена, который участвует в антиоксидантной защите растений. Содержание элементов представлено в табл. 3.

Таблица 3. Среднее содержание элементов во всех растениях агроценозов
Table 3. The average content of elements in all plants of agrocenoses

Природная зона	Район исследования	Вид растения	Среднее содержание элементов, мг/кг					
			Cu	Cr	Mn	Zn	Pb	Se
Степная	Чесменский	Пшеница	1,68	0,29	26,30	16,28	0,00	0,10
		Подсолнечник	11,38	0,00	9,76	27,56	0,00	0,07
	Троицкий	Пшеница	2,44	10,71	26,86	17,36	0,00	0,13
		Подсолнечник	9,44	6,66	9,67	15,98	0,00	0,19
Лесостепная	Пластовский	Пшеница	1,53	0,00	9,68	22,67	0,00	0,19
		Подсолнечник	7,95	0,00	8,98	23,56	0,00	0,17
	Увельский	Пшеница	2,67	7,74	25,52	16,86	0,00	0,17
		Подсолнечник	9,93	9,51	10,70	16,69	0,00	0,16
	Еманжелинский	Пшеница	2,04	0,00	16,02	17,12	0,85	0,20
		Подсолнечник	5,19	5,04	29,90	19,65	0,00	0,20
	Еткульский	Пшеница	3,11	13,41	37,39	14,94	0,00	0,19
		Подсолнечник	6,29	7,13	16,85	18,90	0,00	0,17

На основе полученных данных проведен корреляционный анализ между содержанием селена и тяжелых металлов в растениях. Выявленные взаимосвязи можно представить в следующем виде:

Чесменский район: Cu > Zn > Cr > Mn;

Троицкий район: Cu > Mn > Cr > Zn;

Пластовский район: Zn > Mn > Cr > Cu;

Увельский район: Zn > Mn > Cu > Cr;

Еманжелинский район: Cr > Zn > Cu > Mn;

Еткульский район: Zn > Mn > Cu > Cr.

Полученные данные свидетельствуют о том, что на содержание селена в растениях различных районов в основном оказывают влияние такие тяжелые металлы, как медь и цинк. Однако в зависимости от природно-антропогенных факторов районов их влияние может варьировать.

Цинк и медь являются важными микроэлементами, необходимыми для нормального роста растений. Однако их избыток в почве может снижать доступность селена. Данные элементы могут конкурировать с селеном за места связывания в почве и растительных тканях, образуя нерастворимые соединения, что уменьшает подвижность и биодоступность селена (*Голубкина и др., 2017*). Это приводит к снижению

накопления селена в растениях, особенно в условиях его дефицита. Кроме того, высокие концентрации цинка и меди могут подавлять микробиологическую активность почвы, что также снижает подвижность селена (Козлова и др., 2017; Козлова и др., 2018).

По полученным данным содержание селена в почвах исследуемых районов преимущественно зависит от цинка и меди, которые конкурируют с селеном за биодоступность, формируя нерастворимые соединения и снижая его усвоение растениями. Влияние других металлов (Cr, Mn) варьирует в зависимости от локальных природных условий, таких как кислотность почвы и др. Для оптимизации содержания селена в агроэкосистемах необходим учет региональной специфики взаимодействия металлов и разработка мер по снижению их токсичного воздействия.

Для сравнения содержания селена в черноземах выщелоченных взяты результаты исследования в почвах Тюменской области (Синдирева и др., 2021). Согласно этим исследованиям содержание селена в черноземах Челябинской области (0,2 мг/кг) больше в 2,5 раза, чем в черноземах Тюменской области (0,08 мг/кг).

По данным этих исследований (Боев, 2013) содержание селена в пшенице, выращенной в Тюменской области, показывает аналогичную ситуацию. Уровень селена в пшенице Тюменской области варьирует от 0,03 до 0,08 мг/кг, что значительно ниже, чем в пшенице Челябинской области. Такая разница может быть связана с тем, что в Тюменской области преобладают менее плодородные почвы с пониженным содержанием органических веществ и иным кислотно-щелочным балансом.

Для сравнения содержания селена в пшенице яровой взяты результаты исследования на территории центральной лесостепи Среднего Поволжья (Вихреева и др., 2011). На основании сравнения данных по содержанию селена в пшенице выявлена существенная количественная разница между Челябинской областью и Средним Поволжьем. В Челябинской области пшеница содержит 0,10–0,20 мг/кг, что в 3–10 раз выше, чем показатели по яровой пшенице в Пензенской области (0,019–0,047 мг/кг). Несмотря на различия в абсолютных значениях, оба региона имеют общую закономерность – накопление селена в зерновых культурах определяется местными почвенными условиями (Вихреева и др., 2011).

Заключение

В ходе проведенного исследования были получены данные о содержании селена в почвах и растениях шести муниципальных районов Челябинской области. Анализ показал, что содержание селена в почвах варьирует в зависимости от района и типа чернозема. Среднее содержание селена в выщелоченных черноземах (0,20 мг/кг) выше, чем в обыкновенных черноземах (0,13 мг/кг), что может быть связано с доступностью данного химического элемента.

Установлено, что 42 % проб почв находятся в зоне оптимума по содержанию селена, в то время как 27 и 31 % проб находятся в зонах маргинальной недостаточности и селенодефицита соответственно. Анализ корреляции показал, что содержание селена в почвах отрицательно коррелирует с уровнем pH, особенно в Чесменском и Увельском районах. Это свидетельствует о том, что в щелочных условиях селен становится более доступным для растений. В других районах связь между pH и содержанием селена была менее выражена. Исследование также выявило значительные различия в коэффициентах биологического поглощения селена различными растениями. Пшеница имеет более высокую способность к накоплению селена по сравнению с подсолнечником, что может быть использовано для разработки стратегий по улучшению селенового статуса сельскохозяйственных культур.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости дальнейших исследований для более детального понимания факторов, влияющих на содержание селена в почвах и растениях. Это позволит разработать эффективные меры по улучшению селенового статуса сельскохозяйственных угодий и повышению урожайности культур.

Благодарности

Автор выражает благодарность д-ру биол. наук, доценту, зав. кафедрой геоэкологии и природопользования Школы естественных наук Тюменского государственного университета А. В. Синдиревой за ценные советы и конструктивные комментарии по улучшению рукописи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Белов М. А., Беккер М. Р., Синдирева А. В., Шигабаева Г. Н. Оценка содержания тяжелых металлов в почвах и растениях степной и лесостепной зон Челябинской области // Региональные геосистемы. 2025. Т. 49, № 4. С. 651–668. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1. EDN: CJEZO.
- Белов М. А., Синдирева А. В. Оценка содержания селена в системе почва – растение в лесостепной и степной зоне Челябинской области // Социально-экологические технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 496–511. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511>. EDN: CGWPBO.

- Боев В. А. Селен в почвах и сельскохозяйственных культурах юга Тюменской области // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2013. № 12. С. 112–120. EDN: SEPBCD.
- Бубнова Н. В., Тимофеева Н. Ю., Кострова О. Ю., Стручко Г. Ю. [и др.]. Биологическая роль селена (обзор литературы) // Acta Medica Eurasica. 2023. № 2. С. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-114-123>. EDN: GPWVYW.
- Вихрева В. А., Лебедева Т. Б., Надежкина Е. В. Накопление селена лугово-степными и сельскохозяйственными растениями на черноземах выщелоченных лесостепи Среднего Поволжья // Агрохимия. 2011. № 7. С. 63–70. EDN: NXRYFR.
- Голубкина Н. А., Синдирева А. В., Зайцев В. Ф. Внутрирегиональная вариабельность селенового статуса населения // Юг России: экология, развитие. 2017. № 1. С. 107–127. EDN: YIELCF.
- Ермаков В. В., Воронцова О. В. Биогеохимия селена в почвах // Развитие идей континентальной биогеохимии и геохимической экологии (2006–2010 гг.). БИОГЕЛ : материалы VI–XII Биогеохимических чтений памяти В. В. Ковальского (1899–1984). М. : ГЕОХИ, 2010. С. 268–287.
- Капитальчук И. П., Голубкина Н. А., Капитальчук М. В. Селен и его антагонисты в биогеохимической цепи почва – растение в условиях Приднестровья // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2011. № 2. С. 137–141. EDN: NRBERH.
- Козлова Г. Г., Онина С. А., Минина Н. Н., Михайлова А. С. Определение содержания селена и тяжелых металлов в растительном сырье и прикорневой почве // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 22–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14022>. EDN: YNKQPI.
- Козлова Г. Г., Онина С. А., Якиева М. Н., Минина Н. Н. [и др.] Определение содержания селена и элементов-антагонистов в почве и в растительном сырье Бирского района республики Башкортостан // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 3. С. 150–157.
- Побилат А. Е., Волошин Е. И. Особенности содержания селена в системе почва – растение (обзор) // Вестник КрасГАУ. 2020. № 11(164). С. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>. EDN: XGTTJW.
- Семенова Н. А. Селен-биофортификация сельскохозяйственных культур // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2025. № 10–1(109). С. 355–363. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-10-1-355-363>. EDN: XZJBVW.
- Серегина И. И. Цинк, селен и регуляторы роста в агроценозе : монография. М. : Проспект, 2018. 219 с.
- Синдирева А. В., Котченко С. Г., Гурьев Н. Е. Геохимическая оценка содержания селена в основных типах почв Тюменской области // Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>. EDN: WVXXDU.
- Синдирева А. В., Майданюк Г. А. Экологическая оценка действия свинца в системе "почва – растение – животное" и разработка научно обоснованных приемов его детоксикации // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6(141). С. 244–249. EDN: VPEPDD.
- Титов А. Ф., Казнина Н. М., Карапетян Т. А., Доршакова Н. В. [и др.]. Роль селена в жизнедеятельности растений, животных и человека // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141, № 5. С. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0042132421050094>. EDN: BSMCAA.
- Шеуджен А. Х., Аканова Н. И., Хурум Х. Д., Бондарева Т. Н. [и др.]. Селен в черноземе выщелоченном // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 138. С. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-138-041>. EDN: XOQEQQ.
- Шеуджен А. Х., Лебедевский И. А., Бондарева Т. Н. Биогеохимия и агрохимия селена // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 92. С. 781–798. EDN: RNEHAX.
- Шешнищан С. С., Шешнищан Т. Л., Капитальчук И. П. Марганец, цинк, медь, молибден и селен в системе "почва – растение" в долине Нижнего Днестра: ретроспектива и перспективы исследований // Успехи современной науки. 2017. Т. 2, № 10. С. 176–180. EDN: ZELBMV.
- El-Ramady H., Abdalla N., Alshaal T., Domokos-Szabolcsy E. [et al.]. Selenium in soils under climate change, implication for human health // Environmental Chemistry Letters. 2014. Vol. 13. P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0480-4>.
- Kushwaha A., Goswami L., Lee J., Sonne K. [et al.]. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 52, Iss. 13. P. 2383–2420. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>.
- Lopes G., Ávila F. W., Guilherme L. R. G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health // Ciência e Agrotecnologia. 2017. Vol. 41, Iss. 6. P. 605–615. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>.
- Qu L., Xu J., Dai Zh., Elyamine A. M. [et al.]. Selenium in soil-plant system: Transport, detoxification and bioremediation // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 452. Article number: 131272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131272>.
- Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: A review // International Journal of Applied Agricultural Sciences. 2017. Vol. 3, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>.

Semenova G. A., Fomina I. R., Kosobryukhov A. A., Lyubimov V. Yu. [et al.]. Mesophyll cell ultrastructure of wheat leaves etiolated by lead and selenium // *Journal of Plant Physiology*. 2017. Vol. 219. P. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.008>.

Tan J., Zhu W., Wang W., Li R. [et al.]. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Science of the Total Environment*. 2002. Vol. 284, Iss. 1–3. P. 227–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00889-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00889-0).

References

- Belov, M. A., Becker, M. R., Sindireva, A. V., Shigabaeva, G. N. 2025. Assessment of the heavy metal content in soils and plants of the steppe and forest-steppe zones of the Chelyabinsk region. *Regional Geosystems*, 49(4), pp. 651–668. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-1. EDN: CJEZO. (In Russ.)
- Belov, M. A., Sindireva, A. V. 2024. Assessment of selenium content in the soil – plant system in the forest-steppe and steppe zone of the Chelyabinsk region. *Socialno-Ecologicheskie Technologii*, 14(4), pp. 496–511. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511>. EDN: CGWPBO. (In Russ.)
- Boev, V. A. 2013. Selenium in soils and agricultural crops of the south of the Tyumen region. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 12, pp. 112–120. EDN: SEPHCD. (In Russ.)
- Bubnova, N. V., Timofeeva, N. Yu., Kostrova, O. Yu., Struchko, G. Yu. et al. 2023. The biological role of selenium (literature review). *Acta Medica Eurasica*, 2, pp. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.47026/2413-4864-2023-2-114-123>. EDN: GPWVYW. (In Russ.)
- Vikhreva, V. A., Lebedeva, T. B., Nadezhkina, E. V. 2011. Accumulation of selenium by meadow-steppe and agricultural plants on leached chernozems of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Eurasian Soil Science*, 7, pp. 63–70. EDN: NXRYFR. (In Russ.)
- Golubkina, N. A., Sindireva, A. V., Zaitsev, V. F. 2017. Intraregional variability of the selenium status of the population. *South of Russia: Ecology, Development*, 1, pp. 107–127. EDN: YIELCF. (In Russ.)
- Ermakov, V. V., Vorontsova, O. V. 2010. Biogeochemistry of selenium in soils. Materials of the VI–XII biogeochemical readings in memory of V. V. Kovalsky *Evolution of ideas in continental biogeochemistry and geochemical ecology (2006–2010)*. Moscow, pp. 268–287. (In Russ.)
- Kapitalchuk, I. P., Golubkina, N. A., Kapitalchuk, M. V. 2011. Selenium and its antagonists in the soil-plant biogeochemical chain in Transnistria. *Bulletin of the MSRU. Series: Natural Sciences*, 2, pp. 137–141. EDN: NRBERH. (In Russ.)
- Kozlova, G. G., Onina, S. A., Minina, N. N., Mikhailova, A. S. 2018. Determination of the content of selenium and heavy metals in plant raw materials and root soil. *Regional Environmental Issues*, 4, pp. 22–24. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14022>. EDN: YNKQPJ. (In Russ.)
- Kozlova, G. G., Onina, S. A., Yakieva, M. N., Minina, N. N. et al. 2017. Determination of selenium and antagonist elements in soil and plant raw materials of the Birsky district of the Republic of Bashkortostan. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 3, pp. 150–157. (In Russ.)
- Pobilat, A. E., Voloshin, E. I. 2020. Features of selenium content in the soil-plant system (review). *Bulletin of KSAU*, 11(164), pp. 98–105. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-98-105>. EDN: XGTTJW. (In Russ.)
- Semenova, N. A. 2025. Selenium – biofortification of agricultural crops. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 10–1(109), pp. 355–363. DOI: <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-10-1-355-363>. EDN: XZJBVW. (In Russ.)
- Seregina, I. I. 2022. Zinc, selenium and growth regulators in agrocenosis. Monograph. Moscow. (In Russ.)
- Sindireva, A. V., Kotchenko, S. G., Guryev, N. E. 2021. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region. *Problemy Regionalnoi Ekologii*, 3, pp. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-32-38>. EDN: WVXXDU. (In Russ.)
- Sindireva, A. V., Maidanyuk, G. A. 2018. Ecological assessment of the effect of lead in the soil – plant – animal system and the development of scientifically based methods for its detoxification. *Bulletin of KSAU*, 6(141), pp. 244–249. EDN: VPEPDD. (In Russ.)
- Titov, A. F., Kaznina, N. M., Karapetyan, T. A., Dorshakova, N. V. et al. 2021. The role of selenium in the vital activity of plants, animals and humans. *Biology Bulletin Reviews*, 141(5), pp. 443–456. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0042132421050094>. EDN: BSMCAA. (In Russ.)
- Sheujen, A. H., Akanova, N. I., Khurum, H. D., Osipov, M. A. et al. 2018. Selenium in leached chernozem. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 138, pp. 160–170. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-138-041>. EDN: XOQEZX. (In Russ.)
- Sheujen, A. Kh., Lebedovskiy, I. A., Bondareva, T. N. 2013. Biogeochemistry and agrochemistry of selenium. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 92, pp. 781–798. EDN: RNEHAX. (In Russ.)
- Sheshnitsan, S. S., Sheshnitsan, T. L., Kapitalchuk, I. P. 2017. Manganese, zinc, copper, molybdenum and selenium in the soil – plant system in the Lower Dniester Valley: A retrospective and research prospects. *Uspekhi Sovremennoj Nauki*, 2(10), pp. 176–180. EDN: ZELBMV. (In Russ.)

- El-Ramady, H., Abdalla, N., Alshaal, T., Domokos-Szabolcsy, E. et al. 2014. Selenium in soils under climate change, implication for human health. *Environmental Chemistry Letters*, 13, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0480-4>.
- Kushwaha, A., Goswami, L., Lee, J., Sonne, K. et al. 2022. Selenium in soil-microbe-plant systems: Sources, distribution, toxicity, tolerance, and detoxification. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(13), pp. 2383–2420. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1883187>.
- Lopes, G., Ávila, F. W., Guilherme, L. R. G. 2017. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(6), pp. 605–615. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>.
- Qu, L., Xu, J., Dai, Zh., Elyamine, A. M. et al. 2023. Selenium in soil-plant system: Transport, detoxification and bioremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 452. Article number: 131272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131272>.
- Saha, U., Fayiga, A., Sonon, L. 2017. Selenium in the soil-plant environment: A review. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(1). DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ijaas.20170301.11>.
- Semenova, G. A., Fomina, I. R., Kosobryukhov, A. A., Lyubimov, V. Yu. et al. 2017. Mesophyll cell ultrastructure of wheat leaves etiolated by lead and selenium. *Journal of Plant Physiology*, 219, pp. 37–44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.09.008>.
- Tan, J., Zhu, W., Wang, W., Li, R. et al. 2002. Selenium in soil and endemic diseases in China. *Science of The Total Environment*, 284(1–3), pp. 227–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00889-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00889-0).

Сведения об авторе

Белов Максим Александрович – ул. Володарского, 6, г. Тюмень, Россия, 625003;
Тюменский государственный университет, аспирант;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

Maxim A. Belov – 6 Volodarskogo Str., Tumen, Russia, 625003;
Tyumen State University, PhD Student;
e-mail: m.blvv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4910-5671>

УДК 504.3.064.3

Исследование загрязнения взвешенными частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} приземного слоя атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сургут с использованием спектральных индексов

А. А. Тигеев

*Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра
Сибирского отделения РАН, г. Тюмень, Россия;
e-mail: ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
05.12.2025;

получена
после доработки
05.02.2026;

принята
к публикации
05.02.2026

Ключевые слова:

аэрозоли,
функциональные зоны,
пылевые частицы,
снежный покров,
снеговые индексы

Для цитирования

Пылевые частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} , поступающие в атмосферный воздух и проникающие в организм в процессе дыхания, представляют опасность для здоровья человека. Настоящая работа направлена на решение задачи определения количества мелкодисперсных частиц в приземном слое воздуха в разных функциональных зонах г. Сургут (Тюменская область) и оценку возможной взаимосвязи содержания $PM_{2,5}$ и PM_{10} со спектральными характеристиками снежного покрова. Автором выполнены измерения концентрации пылевых частиц в приземном слое атмосферного воздуха, определены спектральные характеристики снегового покрова с использованием спутниковых данных, рассчитаны индексы снега. На основании дифференциации по функциональным зонам города на основе снеговых индексов выявлено, что в общественно-деловой и промышленной зонах снег загрязнен в большей степени. Это объясняется высокой интенсивностью автотранспорта и влиянием промышленных предприятий. Именно в этих зонах определена наибольшая концентрация взвешенных частиц.

Тигеев А. А. Исследование загрязнения взвешенными частицами $PM_{2,5}$ и PM_{10} приземного слоя атмосферного воздуха и снежного покрова г. Сургут с использованием спектральных индексов. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 64–74. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-64-74>.

Study of the ground-level by $PM_{2,5}$ and PM_{10} suspended particles atmospheric air pollution and snow cover in Surgut using spectral indices

Alexander A. Tigeev

*Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Center
of the Siberian Branch of RAS, Tyumen, Russia;
e-mail: ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>*

Article info

Received
05.12.2025;

received
in revised form
05.02.2026;

accepted
05.02.2026

Key words:

aerosols,
functional zones,
dust particles,
snow cover,
snow indices

For citation

Abstract

$PM_{2,5}$ and PM_{10} dust particles, which enter the atmosphere and penetrate the body through inhalation, pose a health hazard. This study aims to determine the amount of fine particles in the ground-level air in different functional zones of Surgut (Tyumen region) and to assess the possible relationship between $PM_{2,5}$ and PM_{10} levels and the spectral characteristics of snow cover. The author has measured the concentration of dust particles in the ground-level air, determined the spectral characteristics of snow cover using satellite data, and calculated indices. Based on the snow indices used to differentiate the city's functional zones, it has been found that snow is more polluted in the public, business, and industrial zones. This is explained by the high traffic intensity and the influence of industrial enterprises. It is in these zones that the highest concentration of suspended particles is determined.

Tigeev, A. A. 2026. Study of the ground-level by $PM_{2,5}$ and PM_{10} suspended particles atmospheric air pollution and snow cover in Surgut using spectral indices. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 64–74. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-64-74>.

Введение

В Ханты-Мансийском автономном округе (Тюменская область) сезон с минусовыми температурами длится в среднем 7–8 месяцев. Это является причиной выбора снежного покрова и его сорбционных свойств в качестве объекта изучения. Снеговые кристаллы поглощают мелкие частицы (ядра кристаллизации) уже в процессе своего образования. При выпадении снега также происходит захват и осаждение аэрозольных элементов (Алексеев, 2013). В результате снеготалые воды содержат больше как растворенных, так и взвешенных веществ, чем дождевая вода. По показателям загрязнения снега можно определить количество загрязняющих веществ, поступающих в почвы и поверхностные воды во время снеготаяния (Экогеохимия, 1995). Поллютантов в пылевых выпадениях до 90 % и более концентрируется в твердой фазе, в то время как жидкая составляет не более 10 % (Касимов и др., 2012).

Актуальность мониторинга приземного слоя атмосферы городских территорий растет вместе с числом объектов промышленности, численностью населения и интенсивностью дорожного движения. Пылевые частицы адсорбируют из воздуха токсичные вещества, которые вместе с ними могут попадать в организм человека, вызывая ряд заболеваний или обостряя уже имеющиеся (Reche et al., 2012). Мелкодисперсные частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} (от 2,5 до 10 микрометров), поступающие в атмосферный воздух и попадающие затем в человеческий организм, являются особенно опасными для здоровья из-за своих физических свойств. Чем меньше размер, тем выше их возможности проникать в организм вместе с токсичными веществами, адсорбируемыми из воздуха, вызывая негативные последствия для здоровья людей. В настоящее время исследование распределения мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе активно проводится во всем мире (Janssen et al., 2013; Sicard et al., 2019), особенно в Азии, что обусловлено высокими темпами экономического развития этого региона мира (Maji et al., 2017; Karimian et al., 2016). В России данной проблеме также уделяется большое внимание. Исследуется концентрация $PM_{2,5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы урбанизированных территорий, их источники и влияние на здоровье человека (Тунакова и др., 2018; Боровлев, 2020; Pozhitkov et al., 2021; Май и др., 2024).

Сургут расположен в пределах Западно-Сибирской равнины, на правом берегу реки Обь. Площадь города – 353 км². Сроки установления снежного покрова для Западной Сибири в районе Сургута – 31.10–07.11. Даты схода снежного покрова в период 2000–2015 гг. – 30.04–07.05. По данным дистанционного зондирования Земли, наблюдается тенденция к снижению продолжительности залегания снежного покрова в районе исследования, которая обусловлена как значимым уменьшением зимних осадков, так и более ранним началом весны (Титкова и др., 2017). К основным источникам загрязнения атмосферы в Сургуте можно отнести ГРЭС-1 и ГРЭС-2, котельные, хранилища песка и гравия. Существенный вклад в отрицательное влияние на воздушную среду города вносят автотранспорт и добыча углеводородного сырья в Сургутском районе. Среди функциональных городских зон выделяют участки, относящиеся к производственной, энергетической, общественно-деловой и жилой зонам¹. Пылеаэрозоли, попадая на снежный покров, заметно трансформируют его спектральные параметры в сравнении с только выпавшим снегом. Это дает возможность комплексного использования спутниковых данных и полевых исследований.

Целью работы является определение пространственной локализации участков загрязнения различных функциональных зон г. Сургута минеральными пылевыми частицами.

Материалы и методы

Замеры разовых концентраций мелкодисперсной пыли проводились как в самом г. Сургут, так и на фоновой территории в третьей декаде марта. Чтобы минимизировать погрешность, замеры проводились три раза для каждой точки с определением среднего. Все точки сведены в единую таблицу, с указанием координат и приуроченности к различным функциональным зонам города (последнее послужило основанием выбора мест пробоотбора) (табл. 1). В Северном промышленном районе (один из пяти административных районов, выделенный на рис. 3 серым цветом) было произведено 6 замеров. Район включает в себя несколько предприятий (Мостоотряд-29, Сургутское производственное объединение пассажирского автотранспорта, склады хранения сыпучих материалов и ряд других). Все они являются источниками пылевых частиц. Концентрация взвешенных частиц определена для шести фоновых точек в различных ландшафтных условиях на расстоянии не менее 0,5 км от автотрассы. В городе проведены измерения для двадцати пяти точек (рис. 1) в разных функциональных зонах с использованием мобильного датчика взвешенных частиц AIR TESTER CW-NAT 200. Замер производился на высоте 165 см, что примерно соответствует расстоянию органов дыхания человека от поверхности.

¹ Территориальные зоны г. Сургут. Официальный портал Администрации города Сургута [Электронный ресурс]. URL: <https://dumasurgut.ru/getattachment/e780bb9e-e071-4f82-ba38-c82bd68f1746/18660.jpeg/> (дата обращения: 22.04.2025).

Использованный способ определения концентрации мелкодисперсных частиц регистрирует оптическое излучение. Взвешенные частицы в измерительной камере рассеивают оптический луч лазерного диода, который, в свою очередь, регистрируется фотоприемником. Массовая концентрация аэрозольных частиц в данном случае прямо пропорциональна значению излучения. Количественно и пространственно $PM_{2,5}$ и PM_{10} отражены на схемах, построенных с использованием оболочки MapInfo 15.0, где диапазон содержания частиц показан значками различного размера методом равного разброса значений.

Таблица 1. Сводная таблица по точкам отбора проб
Table 1. Summary table by sampling points

Номер точки	Координаты	Функциональная зона
Сф1	61,544222; 72,735333	Фон
Сф2	61,597516; 72,582393	Фон
Сф3	61,613457; 72,479826	Фон
Сф4	61,616889; 72,481407	Фон
Сф5	61,596775; 72,581806	Фон
Сф6	61,582111; 72,653139	Фон
1	61,285056; 73,381167	Промзона
2	61,287333; 73,3935	Промзона
3	61,276222; 73,404833	Промзона
4	61,27125; 73,425833	Промзона
5	61,281306; 73,435944	Промзона
6	61,273667; 73,385833	Промзона
7	61,25875; 73,367833	Жилая многоэтажная
8	61,275778; 73,482667	Зона энергетики
9	61,276333; 73,501917	Зона энергетики
10	61,279278; 73,521	Зона энергетики
11	61,237222; 73,483083	Жилая одноэтажная
12	61,236417; 73,474639	Жилая одноэтажная
13	61,240111; 73,473972	Жилая одноэтажная
14	61,238194; 73,457639	Жилая многоэтажная
15	61,236139; 73,441528	Жилая одноэтажная
16	61,240972; 73,407917	Общественно-деловая
17	61,241; 73,392389	Общественно-деловая
18	61,237333; 73,374778	Общественно-деловая
19	61,251056; 73,376444	Жилая многоэтажная
20	61,253472; 73,391667	Жилая многоэтажная
21	61,25; 73,418194	Жилая многоэтажная
22	61,261944; 73,413694	Жилая многоэтажная
23	61,265917; 73,376056	Жилая многоэтажная
24	61,338389; 73,410583	Зона транспорта
25	61,288972; 73,322556	Общественно-деловая

Чтобы наиболее полно оценить уровень концентрации в приземном слое атмосферы пылеаэрозолей и загрязнения ими снега, было принято во внимание свойство мелкодисперсных взвешенных частиц изменять альбедо. Индекс NDSI (Normalized Difference Snow Index) с показателем выше 0,4 регистрирует наличие снегового покрова (покрытие снегом более чем наполовину) (Hall et al., 1995). В качестве материала для оценки загрязнения снежного покрова использовался мультиспектральный спутниковый снимок Landsat 8 (сенсор OLI), сделанный в период полевого опробования (29 марта 2021 г.). Следует отметить, что использование космоснимков спутников Landsat (пространственное разрешение здесь составляет 30 м) видится весьма оправданным именно для урбанизированных территорий. Применяемые в большинстве исследований сканирующие спектрорадиометры среднего разрешения MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) не позволяют получать достаточно детальную информацию для мониторинга снежного покрова в горах.

Для определения уровня взаимосвязи спектральных характеристик снега с интенсивностью осадения на него аэрозолей, помимо часто применяемого в исследованиях подобного рода индекса NDSI, были получены значения нормированного индекса снега S3 и индекса загрязнения SCI. Снеговой индекс S3

был использован в дополнение к NDSI, исходя из того, что данный показатель учитывает характеристики как снега, так и растительности, позволяя определять заснеженные участки в совокупности с теми, что закрыты растительным покровом (Kour et al., 2016). Снег идентифицируется при значении показателя более 0,18. Наличие снега под растительностью отмечается при диапазоне значений 0,05 до 0,18, величины ниже 0,05 указывают на отсутствие снежного покрова (Shimamura et al., 2006).

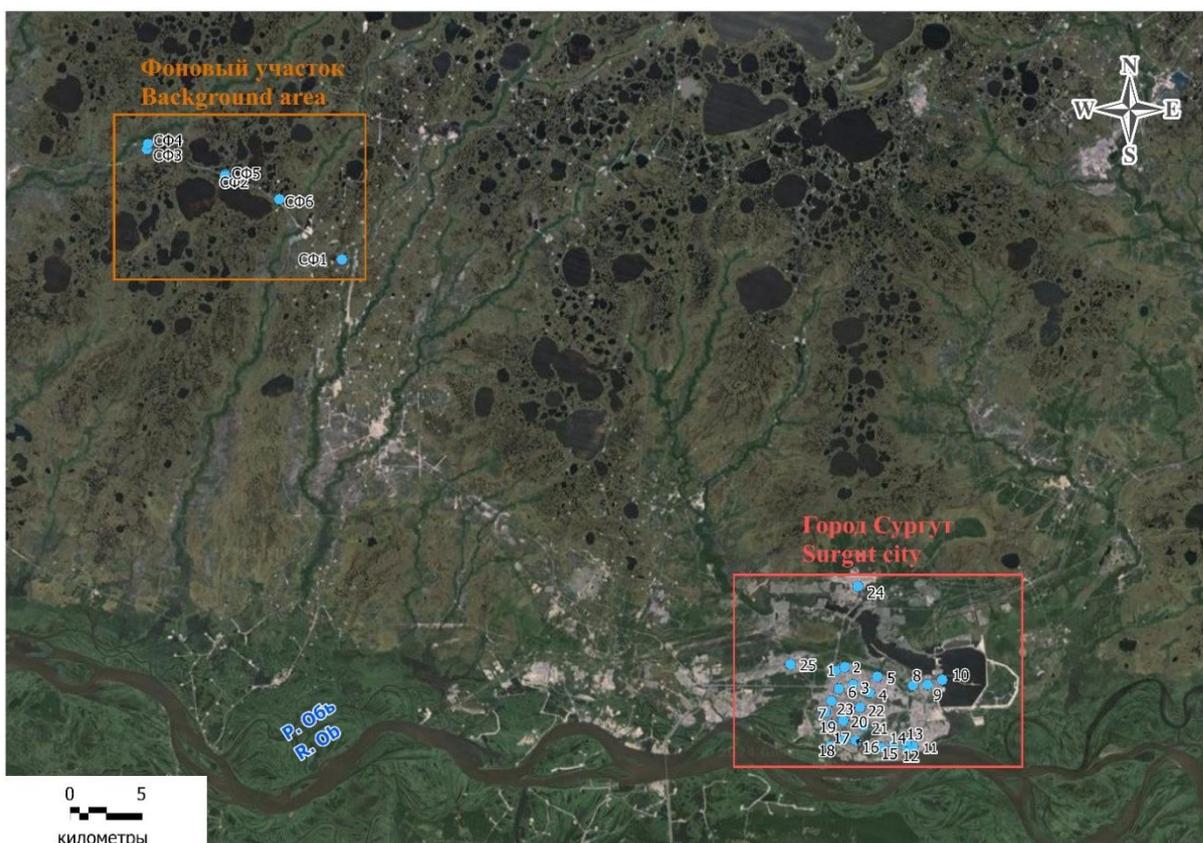


Рис. 1. Расположение исследуемых участков – г. Сургут и условно-фоновая территория
Fig. 1. Location of the plots to be studied – Surgut and conditional-background territory

Загрязнение снежного покрова твердыми частицами отражается в видимой области спектра, уменьшаясь с увеличением длины волны. В ближнем инфракрасном спектре роль загрязнения невелика. В соответствии с этим был использован индекс загрязнения снега SCI (Negi et al., 2009).

При определении значений снеговых индексов использовалась программная оболочка QGIS с применением расширения "калькулятор растров". С его помощью значения соответствующих спектральных каналов вводились в формулу. Соответствующие значения индексов получены для каждого пикселя, совпадающего на космическом снимке с точкой измерения (с известными координатами).

Результаты и обсуждение

На схемах распределения концентрации взвешенных частиц в приземных слоях атмосферы визуально отображен характер загрязнения. Диапазоны варьирования небольшие, среднее значение для $PM_{2,5}$ составляет $10,7 \text{ мкг/м}^3$ (разброс значений – $5,3\text{--}16,7 \text{ мкг/м}^3$); для PM_{10} – $15,3 \text{ мкг/м}^3$ ($8,3\text{--}23,3 \text{ мкг/м}^3$) (рис. 2), что невелико в сравнении с максимальными разовыми предельно допустимыми концентрациями, которые составляют 300 мкг/м^3 для PM_{10} и 160 мкг/м^3 для $PM_{2,5}$ (РД 52.04.830-2015, 2015²). Это позволяет сделать вывод об отсутствии интенсивной техногенной нагрузки с точки зрения концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц. Необходимо уточнить, что проведенные измерения – разовые, а обнаружение участков с высокими концентрациями минеральных пылевых частиц может послужить в качестве рекомендаций для их многолетнего мониторинга.

² РД 52.04.830-2015. Массовая концентрация взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом. СПб. ГГО им. А. И. Воейкова, 2015. 41 с.

Для взвешенных частиц разного диаметра пиковые значения определены в точках опробования № 3 и № 5 в промышленной зоне г. Сургут недалеко от транспортных развязок с высокой интенсивностью движения. Согласно проведенным исследованиям для этих же точек отмечена максимальная концентрация нерастворимых частиц и минерализация снеготалых вод. В этих точках проводился снегоотбор (Тигеев и др., 2022). Весь промышленный район окружен сетью нешироких дорог с малой пропускной способностью. Здесь сконцентрированы узкие улицы с большой транспортной нагрузкой и невысокой пропускной способностью. Для этого участка характерны ежедневные заторы и пробки в часы пик, поэтому экологическая нагрузка от автотранспорта ощущается наиболее остро.

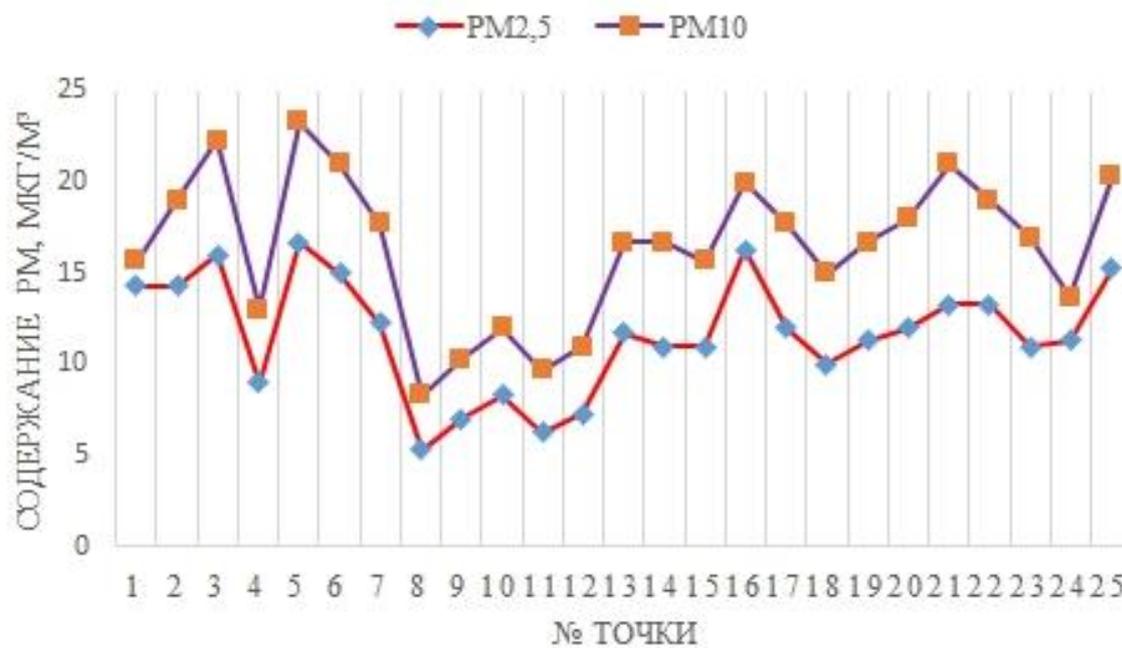


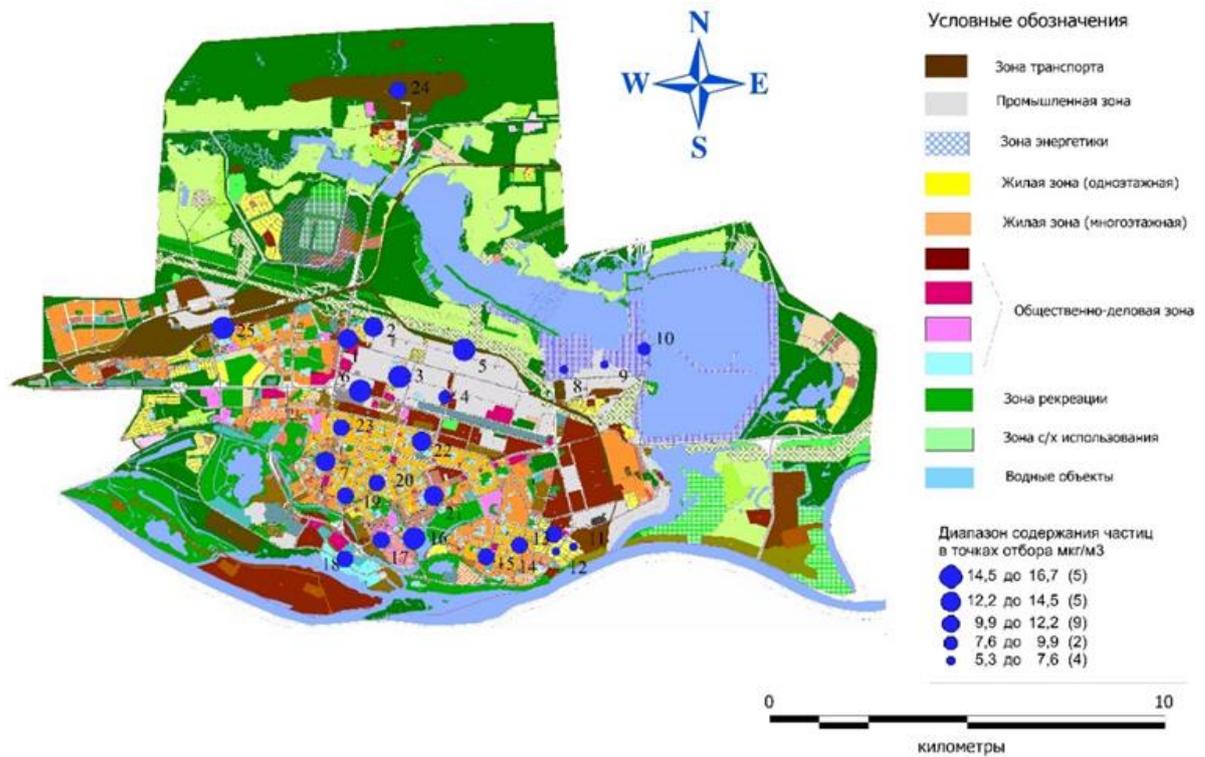
Рис. 2. Концентрация частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы г. Сургут

Fig. 2. Concentration of $PM_{2,5}$ and PM_{10} particle content in the lower layers of the atmosphere of the Surgut town

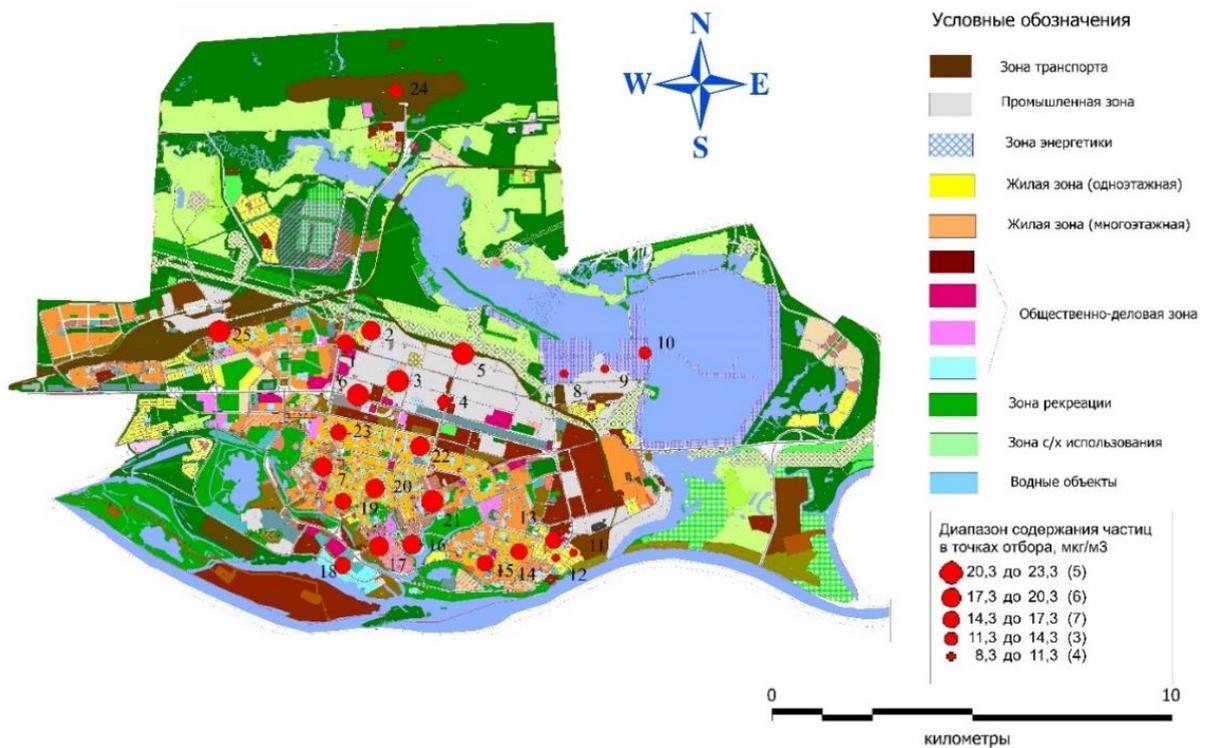
Наличие промышленных предприятий, наряду с автотранспортом, делает промышленную функциональную зону г. Сургута наиболее загрязненной $PM_{2,5}$ и PM_{10} (рис. 3). Именно техногенное давление определяет высокие средние значения пылевых частиц. Немногим уступают по данному показателю жилая многоэтажная и деловая зоны, для которых также существует проблема интенсивного дорожного движения. Сравнительно небольшие средние значения (зона энергетики, точки 8, 9, 10) в районе ГРЭС-2 (6,8 и 10,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для $PM_{2,5}$ и PM_{10} соответственно) обеспечиваются высотой труб (273 м), позволяющей избежать высокой степени загрязнения приземного слоя атмосферы близ источника выбросов. Невысокая концентрация PM для участка возле аэропорта г. Сургут и в жилой одноэтажной зоне объясняется невысокой интенсивностью движения автомобильного транспорта (табл. 2). Концентрация взвешенных частиц в городе превалирует над значениями концентрации на условно-фоновой территории ($PM_{2,5} = 5,2$; $PM_{10} = 7,9$).

Таблица 2. Средняя концентрация $PM_{2,5}$ и PM_{10} по зонам с разными режимами использования, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Table 2. Average concentration of $PM_{2,5}$ and PM_{10} in zones with different usage patterns, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Зоны отбора проб	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Энергетическая	6,8	10,2
Промышленная	14,2	19,1
Общественно-деловая	13,7	17,9
Транспорта (аэропорт)	10,0	15,0
Жилая одноэтажная	8,4	12,5
Жилая многоэтажная	11,9	17,7
Условно-фоновая	5,2	7,9



a



b

Рис. 3. Схема распределения концентрации мелкодисперсных пылевых частиц в приземных слоях атмосферы г. Сургут: *a* – $PM_{2,5}$; *b* – PM_{10}

Fig. 3. Distribution of particulate matter in the lower layers of the atmosphere of the Surgut town: *a* – $PM_{2,5}$; *b* – PM_{10}

Взвешенные твердые частицы различного происхождения с известной скоростью осаждаются на поверхности. Это позволило предположить связь спектральных данных снега для разных функциональных городских зон г. Сургут и условно-фоновой территории с концентрацией пылевых частиц в приземном слое атмосферы. Максимальный показатель снегового индекса NDSI характерен для наиболее чистого снега с минимальным количеством элементов, искажающих спектральные характеристики на снимке. Для фоновой территории все значения NDSI в точках отбора проб превышают показатель 0,40, определяющий снеговой покров. Среднее значения для условного фона – 0,55, для урбанизированной территории – 0,32. Это указывает на сравнительно небольшую дифференциацию данного параметра. Однако по данным (Сухинин и др., 2011), снег со значением NDSI, не превышающим 0,53, определяется как "грязный". Исходя из этого, снег в городе по показателю нормированного индекса можно отнести к загрязненному. Фоновый участок почти соответствует данному термину, а в некоторых точках и практически совпадает с городскими значениями (табл. 3). Невысокий снеговой индекс некоторых фоновых точек обусловлен влиянием растительного покрова.

Таблица 3. Значения снеговых индексов на территории г. Сургут
Table 3. Values of snow indices in the territory of the Surgut town

Показатель	Фоновая территория	Город
NDSI	<u>0,46–0,59</u> 0,55	<u>–0,21–0,50</u> 0,32
SCI	<u>0,04–0,08</u> 0,05	<u>–0,06–0,25</u> 0,03
S3	<u>0,20–0,30</u> 0,28	<u>–0,31–0,26</u> 0,14

Примечание. В числителе минимальные и максимальные значения снеговых индексов, в знаменателе – средние.

Нивелирующее влияние растительного покрова индекс S3 показал наиболее значительные различия между условно-фоновой и городской территориями. На условно-фоновом участке значения индекса S3 в два раза превышают городские. Такую же разницу показал индекс SCI. Для города, согласно U-критерию Манна – Уитни, значения S3 и SCI статистически значимо отличаются от фоновых ($p < 0,05$). Это может говорить о важной роли индекса загрязнения в оценке чистоты снежного покрова. Этого нельзя сказать о NDSI, у которого таких различий не наблюдается.

Была выявлена достоверная умеренная связь разовых концентраций PM_{2,5} и PM₁₀ с индексом S3 (табл. 4). При исследованиях концентрации взвешенных частиц в г. Нижневартовске (Ханты-Мансийский автономный округ) также было отмечено, что лучше всего индицирует пылевую нагрузку нормированный индекс снега S3 (Тигеев и др., 2022). Это происходит благодаря его свойству уменьшать ошибки, связанные с наличием растительного покрова. Снеговой индекс SCI имеет знак "минус" при загрязненном снежном покрове, знак "плюс" наблюдается у условно чистого снега. В результате исследования установлено, что снежный покров урбанизированной территории имеет заметные различия от фона: 0,03 и 0,05 соответственно.

Таблица 4. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между снеговыми индексами и концентрацией взвешенных частиц PM_{2,5} и PM₁₀
Table 4. Spermene grade correlation coefficients between snow indices and PM_{2,5} and PM₁₀ suspended particulate matter

Показатель	PM _{2,5}	PM ₁₀	NDSI	SCI	S3
PM _{2,5}	1				
PM ₁₀	0,96	1			
NDSI	–0,45	–0,44	1		
SCI	–0,25	–0,20	0,15	1	
S3	–0,38	–0,38	0,96	0,97	1

Примечание. Выделены значения с достоверной связью $p < 0,05$.

Была отмечена разница значений снеговых индексов по функциональным зонам города (рис. 4).

Величина индекса S3 уменьшается в ряду: фоновые участки – пригород с малоэтажной коттеджной застройкой, зона одноэтажной застройки – зона воздушного транспорта – общественно-деловая – зона энергетики – промышленная зона – зона многоэтажной застройки.

Сравнивая значения стандартизированного индекса различий снежного покрова наибольшие значения можно отметить для жилой одноэтажной застройки и района аэропорта. Минимум отмечается в общественно-деловой зоне. Индекс SCI (самый загрязненный снежный покров) характерен для общественно-деловой (–0,01) и промышленной зон (0,02). Именно там была выявлена максимальная концентрация $PM_{2,5}$ и PM_{10} . S3 уменьшается по функциональным зонам следующим образом: фоновые участки – пригород с малоэтажной застройкой, зона одноэтажной застройки – зона воздушного транспорта – общественно-деловая – зона энергетики – промышленная зона – зона многоэтажной застройки.

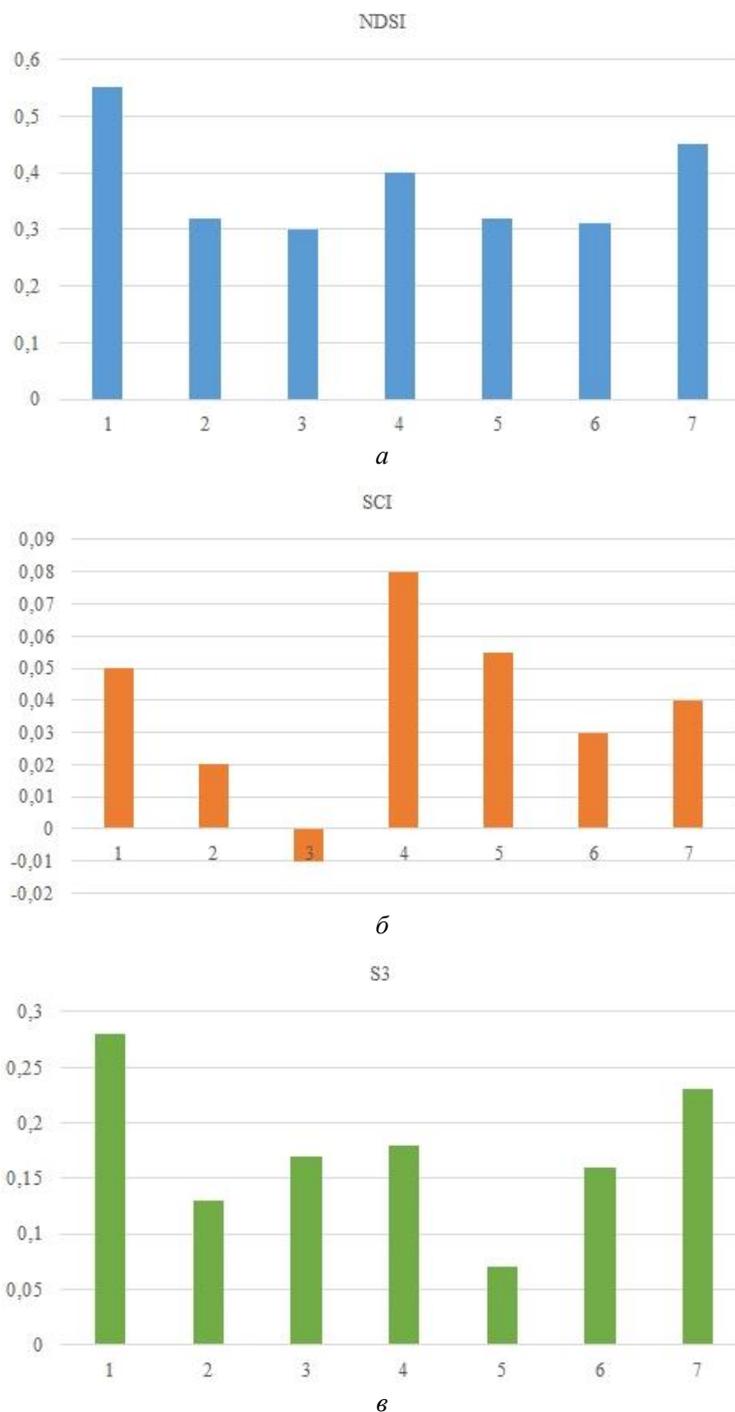


Рис. 4. Значения снеговых индексов (NDSI, S3, SCI) по различным функциональным зонам города и фоновой территории: 1 – фоновый участок; 2 – промышленная; 3 – общественно-деловая; 4 – транспорта; 5 – жилая многоэтажная; 6 – энергетики; 7 – жилая одноэтажная
Fig. 4. Values of snow indices (NDSI, S3, SCI) for various functional zones of the town and the background territory: 1 – background area; 2 – industrial; 3 – public and business; 4 – transport; 5 – residential multi-storey; 6 – energy; 7 – residential single-storey

Заключение

Полученные в процессе исследований данные о концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} позволяют сделать вывод о невысоком техногенном загрязнении приземных слоев атмосферы г. Сургут, не превышающем ПДКм.р. Выявлены две точки (точки 3 и 5, рис. 2) повышенного уровня мелкодисперсных взвешенных частиц для ведения последующего длительного наблюдения, определены факторы, влияющие на повышенные концентрации пылевых частиц в этих точках. Максимальные средние значения $PM_{2,5}$ и PM_{10} отмечаются в промышленной зоне, что определяется высоким техногенным давлением. Также высока концентрация взвешенных частиц в общественно-деловой и жилой многоэтажных зонах, где велика транспортная нагрузка.

Все снеговые индексы показали значительные различия между фоновыми участками и городской территорией. Стандартизованный индекс различий снежного покрова можно определить как "загрязненный".

В районе г. Сургут снежный покров территорий условного фона по значению NDSI близок к определению "загрязненный", что связано с влиянием многочисленных объектов нефтедобычи. При этом и по концентрации пылевых частиц, и по значению NDSI урбанизированная территория отличается от фоновой. Учитывающий влияние растительности индекс S3 продемонстрировал наибольшие различия между условно-фоновыми и городскими участками. На условно-фоновой территории данный индекс в два раза превышает урбанизированные. Такую же разницу показал SCI. Наибольшие показатели корреляционной связи содержания взвешенных частиц со спектральными характеристиками снега показал индекс NDSI. Также достоверная умеренная связь индекса отмечена и для индекса S3. Наименее содержательным для данного исследования оказался SCI. Этот индекс не показал достоверной корреляции с рассмотренными параметрами. Дифференциация по функциональным зонам г. Сургут показала, что наиболее загрязненный снег наблюдается в общественно-деловой и промышленной зонах, что объясняется высокой интенсивностью автотранспорта и влиянием промышленных предприятий. Именно в этих зонах также определена наибольшая концентрация взвешенных частиц, что указывает на связь этих показателей.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2026-0022).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Алексеев В. Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лед и снег. 2013. Т. 53, № 1. С. 127–140. EDN: QBXFJP.
- Боровлев А. Э. Исследования содержания мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе жилой зоны Белгорода // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44, № 1. С. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-97-103>. EDN: KDKELV.
- Касимов Н. С., Кошелева Н. Е., Власов Д. В., Терская Е. В. Геохимия снежного покрова в Восточном округе Москвы // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2012. № 4. С. 14–24. EDN: PJQDER.
- Май И. В., Загороднов С. Ю. Мелкодисперсные пыли в атмосферном воздухе городов федерального проекта "Чистый воздух" как фактор риска здоровью и объект управления // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2024. Т. 32, № 12. С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-12-39-47>. EDN: MJLUEW.
- Сухинин А. И., Воробьева М. В., Охоткина Е. А. Космический мониторинг снегового покрова Сибири по данным радиометра MODIS // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 4(37). С. 90–96. EDN: OXPSQN.
- Тигеев А. А., Фахретдинов А. В., Пожитков Р. Ю. Пылевая нагрузка и спектральные характеристики снежного покрова в нефтегазодобывающих регионах (на примере г. Сургута) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2022. № 6(309). С. 45–51. DOI: [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6\(309\)-45-51](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6(309)-45-51). EDN: VCMPPM.
- Титкова Т. Б., Китаев Л. М., Виноградова В. В. Короткопериодная изменчивость сроков залегания снежного покрова по данным MODIS на севере Евразии в условиях современного климата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 5. С. 223–238. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-223-238>. EDN: ZTMXPZ.
- Тунакова Ю. А., Новикова С. В., Шагидуллин А. Р., Шагидуллин Р. Р. Искусственные нейронные сети для расчета концентраций микрочастиц ($PM_{2,5}$ и PM_{10}) в атмосферном воздухе на основе результатов измерения суммарного количества взвешенных частиц (на примере г. Казани) // Российский журнал прикладной экологии. 2018. № 1(13). С. 32–37. EDN: OUKSUR.
- Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н. С. Касимова. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1995. 327 с.

- Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data // *Remote Sensing of Environment*. 1995. Vol. 54, Iss. 2. P. 127–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P).
- Janssen N. A. H., Fischer P., Marra M., Ameling C. [et al.]. Short-term effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on daily mortality in the Netherlands // *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 463–464. P. 20–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>.
- Karimian H., Li Q., Li C., Jin L. [et al.]. An improved method for monitoring fine particulate matter mass concentrations via satellite remote sensing // *Aerosol and Air Quality Research*. 2016. Vol. 16. P. 1081–1092. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0424>.
- Kour R., Patel N., Krishna A. P. Development of a new thermal snow index and its relationship with snow cover indices and snow cover characteristic indices // *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. Article number: 71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2143-6>.
- Maji K. J., Dikshit A. K., Deshpande A. Disability-adjusted life years and economic cost assessment of the health effects related to PM_{2.5} and PM₁₀ pollution in Mumbai and Delhi, in India from 1991 to 2015 // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 4709–4730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8164-1>.
- Negi H. S., Kulkarni A. V., Semwal B. S. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, Iss. 2. P. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802261197>.
- Pozhitkov R. Y., Tigeev A. A., Moskovchenko D. V. Estimation of dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2021. Vol. 34. P. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856021010103>.
- Reche C., Moreno T., Amato F., Viana M. [et al.]. A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of PM₁₀ and PM_{2.5} samples in urban environments // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. Vol. 78. P. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
- Shimamura Y., Izumi T., Matsuyama H. Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, Iss. 21. P. 4867–4884. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>.
- Sicard P., Khaniabadi Y. O., Perez S., Gualtieri M. [et al.]. Effect of O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} on cardiovascular and respiratory diseases in cities of France, Iran and Italy // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 32645–32665. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06445-8>.

References

- Alekseev, V. R. 2013. Snow cover as an indicator of cumulative land pollution. *Ice and Snow*, 53(1), pp. 127–140. EDN: QBXFJP. (In Russ.)
- Borovlev, A. E. 2020. Studies of the content of fine particles in the atmospheric air of the residential area of Belgorod. *Regional Geosystems*, 44(1), pp. 97–103. DOI: <https://doi.org/10.18413/2712-7443-2020-44-1-97-103>. EDN: KDKELV. (In Russ.)
- Kasimov, N. S., Kosheleva, N. E., Vlasov, D. V., Terskaya, E. V. 2012. Geochemistry of snow cover in the eastern district of Moscow. *Lomonosov Geography Journal*, 4, pp. 14–24. EDN: PJQDER. (In Russ.)
- May, I. V., Zagorodnov, S. Yu. 2024. Fine particles in ambient air of the cities included in the clean air federal project as health risk factors and control objects. *Public Health and Life Environment – PH&LE*, 32(12), pp. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2024-32-12-39-47>. EDN: MJLUEW. (In Russ.)
- Sukhinin, A. I., Vorob'eva, M., Okhotkina, E. A. 2011. Space monitoring of the Siberian snow cover according to the MODIS radiometer. *Vestnik SIBSAU. Aerospace Technologies and Control Systems*, 4(37), pp. 90–96. EDN: OXPSQN. (In Russ.)
- Tigeev, A. A., Fakhretdinov, A. V., Pozhitkov, R. Yu. 2022. Dust load and spectral characteristics of snow cover in oil and gas producing regions (on the example of Surgut). *Environmental Protection in Oil and Gas Complex*, 6(309), pp. 45–51. DOI: [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6\(309\)-45-51](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2022-6(309)-45-51). EDN: VCMPPM. (In Russ.)
- Titkova, T. B., Kitaev, L. M., Vinogradova, V. V. 2017. Short-period variability of snow cover periods according to MODIS data in northern Eurasia under modern climate conditions. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 14(5), pp. 223–238. DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-5-223-238>. EDN: ZTMXPZ. (In Russ.)
- Tunakova, Yu. A., Novikova, S. V., Shagidullin, A. R., Shagidullin, R. R. 2018. Artificial neural networks for calculation of microparticle concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) in atmospheric air based on the results of measurement of the total amount of suspended particles (on the example of Kazan). *Russian Journal of Applied Ecology*, 1(13), pp. 32–37. EDN: OUKSUR. (In Russ.)
- Ecogeochemistry of urban landscapes. 1995. Ed. N. S. Kasimov. Moscow. (In Russ.)

- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), pp. 127–140. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00137-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00137-P).
- Janssen, N. A. H., Fischer, P., Marra, M., Ameling, C. et al. 2013. Short-term effects of $PM_{2.5}$, PM_{10} and $PM_{2.5-10}$ on daily mortality in the Netherlands. *Science of the Total Environment*, 463–464, pp. 20–26. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.062>.
- Karimian, H., Li, Q., Li, C., Jin, L. et al. 2016. An improved method for monitoring fine particulate matter mass concentrations via satellite remote sensing. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, pp. 1081–1092. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0424>.
- Kour, R., Patel, N., Krishna, A. P. 2016. Development of a new thermal snow index and its relationship with snow cover indices and snow cover characteristic indices. *Arabian Journal of Geosciences*, 9. Article number: 71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2143-6>.
- Maji, K. J., Dikshit, A. K., Deshpande, A. 2017. Disability-adjusted life years and economic cost assessment of the health effects related to $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution in Mumbai and Delhi, in India from 1991 to 2015. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, pp. 4709–4730. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8164-1>.
- Negi, H. S., Kulkarni, A. V., Semwal, B. S. 2009. Study of contaminated and mixed objects snow reflectance in Indian Himalaya using spectroradiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), pp. 315–325. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802261197>.
- Pozhitkov, R. Y., Tigeev, A. A., Moskovchenko, D. V. 2021. Estimation of dust depositions in snow cover using Earth's remote sensing data: Example of Nizhnevartovsk. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 34, pp. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1024856021010103>.
- Reche, C., Moreno, T., Amato, F., Viana, M. et al. 2012. A multidisciplinary approach to characterise exposure risk and toxicological effects of PM_{10} and $PM_{2.5}$ samples in urban environments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 78, pp. 327–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.043>.
- Shimamura, Y., Izumi, T., Matsuyama, H. 2006. Evaluation of a useful method to identify snow-covered areas under vegetation – comparisons among a newly proposed snow index, normalized difference snow index, and visible reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), pp. 4867–4884. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160600639693>.
- Sicard, P., Khaniabadi, Y. O., Perez, S., Gualtieri, M. et al. 2019. Effect of O_3 , PM_{10} and $PM_{2.5}$ on cardiovascular and respiratory diseases in cities of France, Iran and Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, pp. 32645–32665. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06445-8>.

Сведения об авторе

Тигеев Александр Анатольевич – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026;
Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН,
канд. геогр. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: fic@tmnsc.ru, ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>

Alexander A. Tigeev – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026;
Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of RAS,
Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher;
e-mail: fic@tmnsc.ru, ttrruubbaa@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5449-5086>

УДК 556.114.7

Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района)

Д. И. Чуйкина, И. С. Король*, Н. А. Мухортина

*Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Томск, Россия;

e-mail: irinakorol@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
17.12.2025;

получена
после доработки
20.02.2026;

принята
к публикации
24.02.2026

Ключевые слова:

поверхностные воды,
ионный состав,
полиароматические
углеводороды,
антропогенная нагрузка,
индекс загрязненности
воды,
гидрохимические
показатели,
малые озера

Оценка состояния природных вод требует комплексного подхода, включающего определение широкого спектра физико-химических показателей, на основе которых разрабатываются специализированные индексы и классификации. Традиционные методы анализа не всегда учитывают влияние ряда загрязняющих веществ, таких как полиароматические углеводороды (ПАУ), которые могут оказывать значительное воздействие на экосистемные процессы и качество водной среды. В работе представлены результаты исследований малых озер Томского района (Томская обл.), испытывающих влияние антропогенной деятельности и представляющих собой пресноводные водоемы с показателями электропроводности не более 0,34 мСм/см, значениями pH до 7,2. Содержание неорганических макрокомпонентов (катионов и анионов) не превышает предельно допустимых концентраций (ПДК), что свидетельствует об удовлетворительном химическом составе воды. Детально проанализировано содержание фотопигментов в донных отложениях. Для всех исследованных образцов зафиксирован широкий диапазон концентраций хлорофилла а от 0,35 до 2,3 мкг/г, что может быть обусловлено неоднородностью пространственного распределения фитопланктона и трофическим статусом водоемов. Детально исследовано индивидуальное и суммарное содержание тринадцати приоритетных ПАУ в поверхностных водах. Их суммарные концентрации варьируются от 0,37 до 0,54 мкг/л, что указывает на наличие умеренного уровня загрязнения; в составе преобладают нафталин, флуорен, фенантрен и бенз[а]антрацен, обладающие способностью к биоаккумуляции. На основании полученных данных рассчитан индекс загрязненности воды (ИЗВ), который показал, что все исследованные озера относятся к категории умеренно загрязненных, приближаясь к границе с загрязненными водоемами. Проведенное исследование позволило оценить влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод малых водоемов Томского района. Особое внимание уделено роли полиароматических углеводородов в формировании экологического состояния водных объектов и их вкладу в изменение значений индекса загрязнения вод. Полученные результаты демонстрируют значимость подобных исследований для мониторинга и охраны водных экосистем.

Для цитирования

Чуйкина Д. И. и др. Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89>.

Chemical composition of surface water under anthropogenic load (on the example of small reservoirs in the Tomsk region)

Daria I. Chuikina, Irina S. Korol*, Natalia A. Mukhortina

*Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk Department, Tomsk, Russia;
e-mail: irinakorol@yandex.ru, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Article info

Received
17.12.2025;
received
in revised form
20.02.2026;
accepted
24.02.2026

Abstract

Assessment of the natural waters' state requires an integrated approach including the determination of a wide range of physico-chemical parameters, on the basis of which specialized indexes and classifications are developed. Traditional analysis methods do not always take into account the effects of a number of pollutants, such as polyaromatic hydrocarbons (PAHs), which can have a significant impact on ecosystem processes and the quality of the aquatic environment. The paper presents the results of studies of small lakes in the Tomsk district (Tomsk region) affected by anthropogenic activity, which are freshwater reservoirs with electrical conductivity values of no more than 0.34 ms/cm, pH values up to 7.2. The content of inorganic macro components (cations and anions) does not exceed the maximum permissible concentrations (MPC), which indicates a satisfactory chemical composition of the water. The content of photopigments in bottom sediments has been analyzed in detail. A wide range of chlorophyll a concentrations from 0.35 to 2.3 µg/g has been recorded for all the studied samples, which may be due to the heterogeneity of the spatial distribution of phytoplankton and the trophic status of reservoirs. The individual and total content of 13 priority PAHs in surface waters has been studied in detail. Their total concentrations range from 0.37 to 0.54 µg/l, which indicates the presence of a moderate level of contamination; naphthalene, fluorene, phenanthrene and benz[a]anthracene predominate in the composition, which have the ability to bioaccumulate. Based on the data obtained, the water pollution index (WPI) has been calculated showing that all the lakes studied belong to the category of moderately polluted, approaching the border with polluted reservoirs. Thus, the study has made it possible to assess the impact of unintended anthropogenic impact on the chemical composition of surface waters of small reservoirs in the Tomsk region. Special attention has been paid to the role of polyaromatic hydrocarbons in the formation of the ecological state of water bodies and their contribution to changes in the values of the water pollution index. The results obtained demonstrate the importance of such studies for monitoring and protecting aquatic ecosystems.

Key words:

surface water,
ionic composition,
polyaromatic
hydrocarbons,
anthropogenic load,
water pollution index,
hydrochemical
indicators,
small lakes

For citation

Chuikina, D. I. et al. 2026. Chemical composition of surface water under anthropogenic load (on the example of small reservoirs in the Tomsk region). *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 75–89. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89>.

Введение

Проблема загрязнения природных вод вследствие техногенной деятельности человека приобретает все большие масштабы. Вода – ключевой ресурс, как ее очистить, быстро найти и устранить загрязнения – эти вопросы становятся все более и более актуальными. Поверхностные воды представляют собой многокомпонентные природные системы, характеризующиеся высокой степенью динамичности и взаимодействием различных факторов, что делает их сложным объектом для оценки, особенно в количественном аспекте. Геохимические, гидрологические, географические, сезонные, климатические и антропогенные компоненты оказывают комплексное влияние на химический состав поверхностных вод, что требует системного подхода к их изучению и мониторингу.

Для всестороннего описания состояния природных поверхностных вод используются ключевые физико-химические параметры, такие как температура, водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh), содержание макрокомпонентных ионов, железа, а также наличие тяжелых металлов, нефтепродуктов и стойких органических загрязнителей. Эти параметры позволяют оценить степень антропогенного воздействия и выявить потенциальные экологические риски.

По всему миру для оценки качества природных вод активно применяются различные интегральные показатели и индексы, позволяющие объективно охарактеризовать экологическое состояние водных объектов. Так, в Австралии для этих целей используется индекс WSC (Rogers, 2020), который учитывает широкий спектр химических и биологических параметров. В южных регионах Индии оценка качества подземных вод проводится с помощью индекса загрязнения подземных вод (PIG) и индекса качества воды (WQI), что позволяет выполнять пространственный анализ распределения загрязнений (Sunithal et al., 2022). В Российской Федерации и странах Европейского экономического сообщества применяются различные индексы для оценки качества природных вод, основанные на гидрохимических характеристиках воды. Среди них можно выделить удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), баварский индекс (CJ), индекс загрязненности воды и канадский индекс (CCME WQI), индексы загрязнения рек тяжелыми металлами и токсичными веществами, индекс потенциального загрязнения, общесанитарные индексы качества и индекс токсичности (Зубарев, 2014). Эти индексы позволяют проводить сравнительный анализ состояния водных экосистем и разрабатывать эффективные меры по их защите и восстановлению (Кимстач, 1993). Для расчета индексов существует аналитическая и правовая системы, которые учитывают широкий набор показателей.

В настоящее время вопросам региональной гидрогеологии не уделяется достаточного внимания. Антропогенное воздействие иногда является ландшафтно-деструктивным, неосознанным, когда человек не предполагает последствий своей деятельности и осознает только тогда, когда появляются побочные эффекты. Риски, которым подвергаются малые водоемы, практически не попадают в системы мониторинга до того момента, пока не наступает ситуация катастрофы.

Нерациональные управленческие решения в аграрном секторе, а также бытовые и промышленные сточные воды, способствующие увеличению концентрации стойких органических загрязнителей и биогенных веществ в экосистемах пресноводных водоемов, приводят не только к деградации трофического статуса водных экосистем и ухудшению качества водной среды, но и к снижению биологического и видового разнообразия. В частности, эвтрофирование водоемов обусловлено поступлением биогенных элементов на территории водосборов через атмосферные процессы (Минакова и др., 2022).

Вопросы по прогнозированию экологических последствий, где учитывались бы антагонистические, кумулятивные, синергетические эффекты от одномоментного присутствия загрязнителей решаются, к сожалению, не быстро. Уровень воздействия на природные водные системы высок, и гидрогеологических показателей уже недостаточно, чтобы полноценно описать уровень отрицательного воздействия на среду.

В последние годы наблюдается усиленное загрязнение водных экосистем токсичными веществами: стойкими органическими загрязнителями, тяжелыми металлами, фенолами, нефтепродуктами и др. Научные исследования сосредоточены на изучении количественного содержания полиароматических углеводородов и их структурных соотношений, что является ключевым аспектом в анализе экологической ситуации. В рамках многолетних изысканий для данного класса органических соединений были разработаны и апробированы различные критерии оценки канцерогенности, мутагенности и токсичности. Кроме того, изучение их сорбционных, консервационных и концентрирующих свойств, особенно в контексте донных отложений (ДО), позволило сформировать обширную доказательную базу, которая может быть использована в качестве надежного индикатора для оценки антропогенного воздействия на водные экосистемы с учетом временного фактора. Анализ кернов донных осадков предоставляет возможность не только оценить степень вторичного загрязнения водных объектов, но и идентифицировать вероятные источники поступления ПАУ, а также оценить ряд ключевых параметров качества воды (Yunkera et al., 2002; Семенов и др., 2017;

Чуйкина и др., 2024). Для установления трофического статуса водоема и оценки качества вод Kumari et al. (2023) успешно использовали такие показатели, как содержание ионов тяжелых металлов, pH, содержание растворенного кислорода в среде, биологическое потребление кислорода.

В настоящее время широко применяется методология оценки экологических рисков, включающая комплексный анализ содержания тяжелых металлов, ПАУ и растительных пигментов в донных отложениях. Данный подход позволяет проводить детальный мониторинг и оценку состояния экосистем, что подтверждается многочисленными исследованиями (Tarnawski et al., 2018; Беляева, 2014). Построение системы мониторинга на основе описанных выше показателей делает данные исследования перспективными и актуальными.

В черте больших городов всегда есть участки, которые местные жители используют для активного отдыха. Там часто расположены базы отдыха, садоводческие товарищества, а в последнее время стали популярны глэмпинги и экотуризм. В результате нагрузка на малые водоемы возросла. В тридцати пяти километрах от г. Томска расположены небольшие озера, которые служат местом отдыха горожан (Иогансен и др., 1951). Эти водоемы регулярно изучают и наблюдают за ними, так как они страдают от неконтролируемого воздействия человека. Пять малых водоемов Томского района (Томская область) были определены для исследования, отобраны пробы поверхностных вод и ДО (рис. 1).

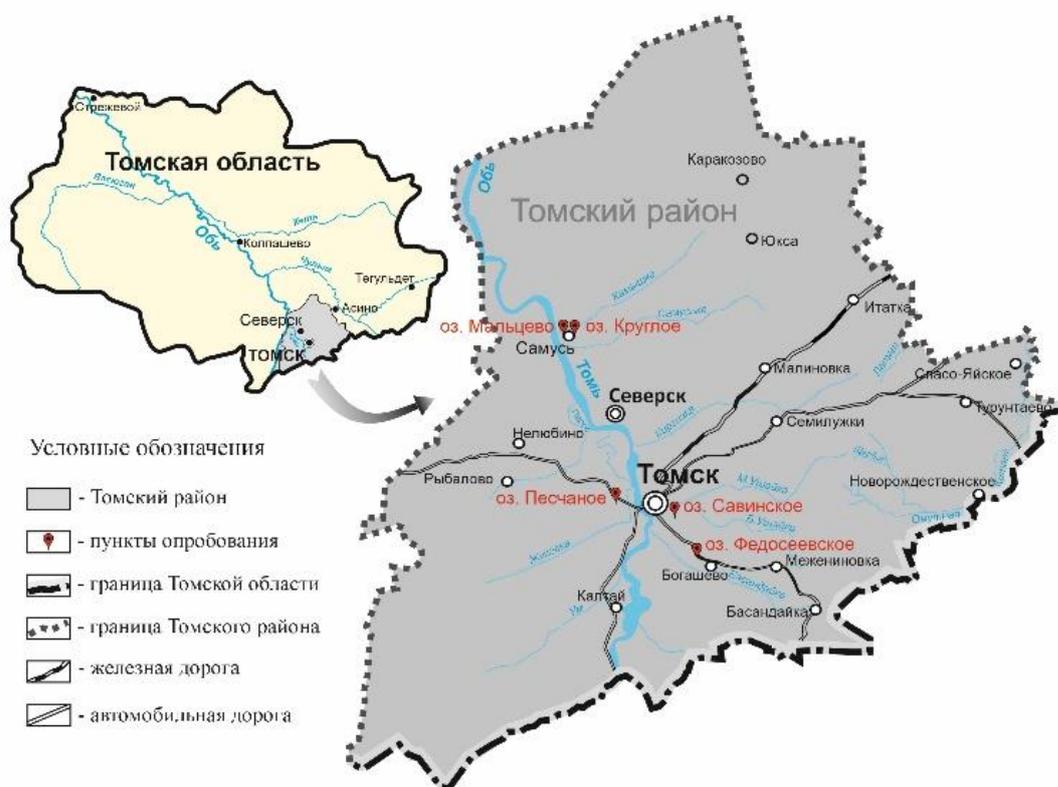


Рис. 1. Томский район (карта фактического материала)
Fig. 1. Tomsk region (map of the actual material)

Отобранные для изучения пруды и озера Томского района представляют собой водоемы природного и искусственного происхождения. Среди них – озера Мальцево и Круглое в поселке Самусь, сочетающие природные и антропогенные особенности и образующие единую гидрологическую систему. Они соединены между собой протокой и размещены каскадом на поверхности второй надпойменной террасы р. Томь. Дно обоих водоемов – песчаное. Питание за счет ручьев, берущих начало в близлежащих торфяных болотах, поэтому вода имеет насыщенный коричневатый оттенок.

Озеро Мальцево диаметром около 800 м, круглой формы, максимальная глубина достигает 5 м, а площадь водного зеркала – 280 000 м². Озеро Круглое, расположенное рядом, немного меньше, его диаметр составляет около 600 м, наибольшая глубина варьируется в пределах 3,5–4 м, а площадь – около 230 000 м².

Природным объектом является озеро Песчаное, расположенное в юго-западной части села Тимирязевское, находящегося в пределах Тимирязевского бора. Геометрическая форма водоема является строго круглой, а его диаметр составляет около 300 м. Максимальная глубина озера достигает 3,5 м. Вода в озере характеризуется низкой прозрачностью и желтоватым оттенком, что свидетельствует о наличии в ней растворенных органических веществ. Береговая линия озера преимущественно песчаная, однако южные

и юго-западные сектора подвержены заболачиванию. В северо-восточной части наблюдается урбанизация территории, выраженная в застройке дачными участками. В последние годы отмечается тенденция к обмелению водоема и его зарастанию ряской, что вызывает обеспокоенность у местного населения. Местные активисты и владельцы дачных участков ежегодно проводят мероприятия по очистке озера и поддержанию его водного баланса. Для этого используется вода из близлежащей скважины, что позволяет частично компенсировать дефицит водных ресурсов и предотвратить дальнейшее ухудшение экологического состояния озера.

Савинское озеро представляет собой антропогенно созданный водоем, который был сформирован в 1970-х годах посредством возведения плотины-запруды. Эта плотина не только перекрывает естественную долину, но и выполняет функцию транспортной артерии, соединяющей садоводческие товарищества "Весна" (расположено на северной оконечности озера) и "Красивый пруд" – находится на южной стороне водоема вдоль его восточного берега. Пруд характеризуется неправильной прямоугольной формой, вытянутой с северо-востока на юго-восток. Его ширина составляет приблизительно 230 м, а длина достигает до 1 км. Общая площадь водного зеркала – 175 000 м². Максимальная глубина водоема наблюдается в южной части, непосредственно за плотиной, и варьируется в пределах 5–7 м. Водный режим пруда формируется за счет весеннего стока с окружающих полей, он расположен в 1,5–2 км к востоку от поселка Зональная Станция и в 2 км к западу от деревни Трубачево.

Федосеевское озеро, также являющееся искусственным водоемом, находится в юго-восточной части села Богашево. Оно образовано посредством плотины, аккумулирующей сток с прилегающих лесных и сельскохозяйственных территорий. Площадь водного зеркала этого пруда подвержена значительным сезонным колебаниям: в засушливые периоды лета она минимальна и составляет около 1320 м², в то время как в мае, в период максимального наполнения, достигает 2650 м². Максимальная глубина водоема составляет до 2–2,5 м. Восточный берег пруда, характеризующийся обрывистым рельефом, служит границей природного заказника "Богашевский кедровник", что придает этому водоему особую экологическую значимость.

Цель исследования – изучить влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод и выявить взаимосвязь между определяемыми показателями качества вод на примере малых водоемов Томского района.

Материалы и методы

Отбор проб для изучения проводили в августе 2022 г., каждая из проб проанализирована не менее 3-х раз, в статье приведены усредненные значения. Пробы воды отбирали в стеклянную емкость с глубины 0,4–0,6 м и консервировали н-гексаном (х.ч.). С помощью пробоотборника ПДО-500 отобраны донные отложения с глубины 0–10 см. Отложения озер Савинское, Круглое и Мальцево представлены мелким песчаником, а в озерах Федосеевское и Песчаное – песчано-илистый тип грунта.

Массовые концентрации ионного состава водных растворов были определены в соответствии с методиками ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.74-2012, ПНД Ф 14.1:2:4.167-000, ПНД Ф 14.1:2:3:4.282-18 и ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10¹, используя аналитический прибор "Капель-205" производства компании "Люмэкс" (Россия).

Для определения биологического потребления кислорода применялась методика НДП 10.1:2:3.131-2016², регламентирующая процедуру измерения биохимического потребления кислорода (БПК₅) в течение пяти дней инкубации для проб питьевых, природных и сточных вод с использованием амперометрического метода.

Используя методику (Сигарева и др., 2021), одностадийной экстракцией 90%-м раствором ацетона фотосинтетические пигменты были выделены из донных отложений, рассчитаны их концентрации. Количественное определение проведено на спектрофотометре Cary 50 (Австралия) на характеристических длинах волн 350–800 нм (Меркушина и др., 2013).

Определение содержания ПАУ в водных образцах проводили согласно ПНД Ф 14.1:2:4.70-96³, подробное описание методики извлечения и условий опубликовано (Чуйкина и др., 2024). Используя метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, в пробах поверхностных вод изученных озер были идентифицированы и количественно определены отдельные приоритетные соединения класса ПАУ: высокомолекулярные полиароматические углеводороды (ВМ ПАУ) – пирен, хризен, флуорантен, бенз[а]антрацен, бенз[б]флуорантен, бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, дибенз[а,h]антрацен и низкомолекулярные (НМ ПАУ) – 2-метилнафталин, флуорен, нафталин, антрацен, фенантрен.

Результаты и обсуждение

Водоемы, выбранные для настоящего исследования, подвергаются значительному антропогенному воздействию в результате их близости к крупным населенным пунктам, таким как г. Томск, поселок Самусь, село Богашево и деревня Тимирязевское, данное воздействие проявляется в виде трансформации природных экосистем, вызванной деятельностью человека.

¹ URL: <https://gostassistant.ru/>.

² Там же.

³ Там же.

В августе 2022 г. в полевых условиях были проведены исследования гидрохимических параметров озер с использованием портативных датчиков фирмы Hanna. В момент отбора проб температура воды варьировалась в пределах 18–21 °С, что соответствует климатической норме данного региона и сезона. В озерах Мальцево, Круглое, Савинское, Федосеевское и Песчаное значение водородного показателя (рН) фиксировалось от 6,8 до 7,2, что свидетельствует о нейтральной реакции среды, а изменение электропроводности (Еh) фиксировалось в диапазоне от 0,14 до 0,34 мСм/см, поэтому эти водные объекты классифицируются как пресноводные водоемы.

На удовлетворительное качество природных вод указывает макрокомпонентный состав, включающий основные катионы: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и анионы: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^- . Их содержание не превышает предельно-допустимые концентрации (СанПиН 1.2.3685-21⁴), а метод капиллярного электрофореза с высокой точностью (нижний порог обнаружения составляет 0,004 мг/л) и погрешностью не более 2 % позволяет определять данные параметры не только в воде, но и в водных вытяжках донных отложений. Результаты представлены в табл. 1.

Для районов с антропогенной нагрузкой уровень нитратов (NO_3^-), как правило, выше нормы 4,5 мг/л. Норма для фосфат-ионов не должна превышать 3,5 мг/л (Агбалян и др., 2019). Фиксация увеличения концентраций по различным соединениям азота и фосфора в природных водах однозначно указывает на присутствие в системе промышленных загрязнений и бытовых стоков, а вот недостаток нитратов связывают с возможной активностью денитрифицирующих природных микроорганизмов. К сожалению, мы не анализировали их содержание в воде и ДО. В исследованных малых водоемах Томского района концентрация биогенных ионов NO_3^- и PO_4^{3-} остается в пределах допустимых значений, таким образом, на изучаемые водные системы влияние существующих загрязняющих стоков незначительно.

Таблица 1. Макрокомпонентный ионный состав водоемов Томского района
Table 1. Macro-component ionic composition of reservoirs in the Tomsk district

Водоемы	Содержание, мг/л								
	SO_4^{2-}	Cl^-	PO_4^{3-}	NO_3^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Круглое	2,81	2,66	<0,2	<0,2	<0,1	2,41	1,94	3,47	0,98
Мальцево	2,62	1,36	<0,2	<0,2	<0,1	1,83	2,25	2,83	0,96
Песчаное	0,56	0,43	<0,2	<0,2	0,38	6,78	0,13	16,35	5,11
Савинское	3,91	14,98	<0,2	<0,2	0,21	10,23	2,52	36,76	7,00
Федосеевское	2,91	2,51	<0,2	<0,2	0,20	6,13	1,22	52,19	9,48
ПДК	100	300	3,5	45	1,5	200	200	180	50

Для комплексной оценки экологического состояния малых озер Томского района, включая выявление признаков антропогенного воздействия (Сагдеев и др., 2017), был выбран один из наиболее распространенных и апробированных в отечественной практике показателей – индекс загрязнения воды (Гагарина, 2012). Его расчет выполнен по следующим основным гидрохимическим параметрам: содержание растворенного кислорода, БПК₅ и ионного состава воды (табл. 2). Использование индекса загрязнения воды позволяет не только оценить текущее качество воды, но и выявить тенденции изменения экологической обстановки в локальных водоемах, особенно в условиях растущего антропогенного давления.

Таблица 2. Коэффициент ИЗВ, рассчитанный по гидрохимическим показателям озер Томского района
Table 2. The WPI factor calculated from the hydrochemical parameters of the lakes of the Tomsk district

Показатель	Малые озера Томского района				
	Круглое	Мальцево	Песчаное	Савинское	Федосеевское
БПК ₅ (мгО ₂ /л)	3,8	3,1	3,1	3,5	3,4
Растворенный кислород (мг/л)	7,3	7,3	7,5	8,1	7,8
Ca^{2+} (мг/л)	3,47	2,83	16,35	36,76	52,19
Mg^{2+} (мг/л)	0,98	0,96	5,11	7,00	9,48
Cl^- (мг/л)	2,66	1,36	0,43	14,98	2,51
SO_4^{2-} (мг/л)	2,81	2,62	0,56	3,91	2,91
ИЗВ	1,86	1,74	1,80	2,00	1,95

⁴ СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные нормы и требования "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". URL: https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501.

Проведенные исследования позволили составить шкалу по значениям коэффициента ИЗВ для водных объектов. Так, было рекомендовано природные воды классифицировать на семь групп: I – очень чистые ($\leq 0,2$), II – чистые ($>0,2-1,0$), III – умеренно загрязненные ($1,0-2,0$), IV – загрязненные ($2,0-4,0$), V – грязные ($4,0-6,0$), VI – очень грязные ($6,0-10,0$), VII – чрезвычайно грязные (>10) (Гагарина, 2012).

Значения индекса загрязнения воды для исследуемых водоемов не превышают величину, равную 2 (рис. 2), что позволяет отнести их к III классу умеренно загрязненных, ближе к загрязненным водоемам. Следует обратить внимание на тот факт, что при расчете ИЗВ из всех используемых параметров наибольший вклад вносят значения растворенного кислорода и БПК, определенное на 5 суток.

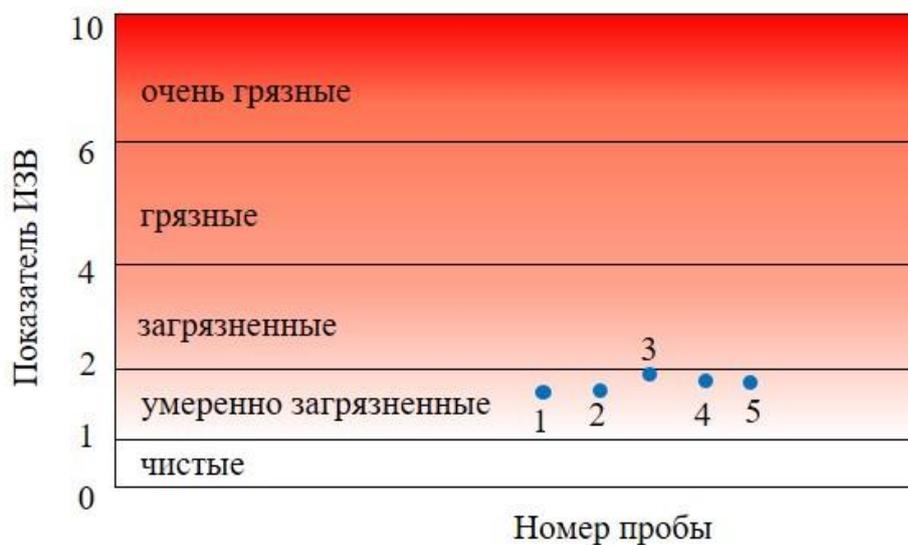


Рис. 2. Показатель ИЗВ и интегральная оценки качества воды для малых озер Томского района:
1 – оз. Мальцево; 2 – оз. Круглое; 3 – оз. Савинское; 4 – оз. Федосеевское; 5 – оз. Песчаное
Fig. 2. WPI indicator and integrated assessment of water quality for small lakes of the Tomsk district:
1 – lake Maltsevo; 2 – lake Krugloye; 3 – lake Savinskoe; 4 – lake Fedoseevskoe; 5 – lake Peschanoye

При исследовании водных экосистем необходимы сведения об основном показателе, позволяющем оценить формирование и трансформацию органического вещества. Содержание основного фотосинтетического пигмента хлорофилла а ("Хл а") служит характеристикой продукционных возможностей водорослей, их биомассы, а также трофического статуса водоема и качества воды (Винберг, 1960; Кумаев, 2007).

Вопрос о взаимосвязи содержания осадочных пигментов с трофическим уровнем водоема остается предметом научных дискуссий и требует дальнейшего углубленного изучения. Одним из ключевых показателей биологической активности в водных экосистемах является хлорофилл а – основной пигмент, присутствующий в клетках фотосинтезирующих организмов, включая одноклеточные водоросли, составляющие фитопланктон. Несмотря на наличие у водорослей нескольких десятков различных пигментов, именно "Хл а" играет центральную роль в процессе фотосинтеза, обеспечивая улавливание световой энергии и ее преобразование.

Концентрация данного пигмента в водной толще широко применяется в качестве интегрального показателя для оценки биомассы фитопланктона, его продуктивности и общего трофического статуса водоема. Согласно данным Сигаревой и др. (2021), увеличение продуктивности планктонных организмов обуславливает обогащение донных отложений органическим веществом, включающим фитопигменты, вследствие чего распределение пигментов в донных отложениях находится в прямой зависимости от их концентрации в водной среде.

Помимо этого, динамика содержания хлорофилла а выступает значимым индикатором антропогенного загрязнения и процессов эвтрофикации водоема. На скорость аккумуляции пигментов в донных отложениях оказывают влияние гидродинамические характеристики водоема и тип грунта. Такие факторы, как интенсивность освещения, температурный режим и морфология дна, обуславливают вариабельность состава водной массы и донных отложений, что может приводить к расхождениям в оценке трофического статуса одного и того же водоема.

Анализ соотношений между хлорофиллом а и его производными – продуктами разрушения (феопигментами), а также с другими фотосинтетическими пигментами, такими как хлорофилл в, хлорофилл c_1+c_2 и различными каротиноидами, дает представление о физиологическом состоянии водорослевых

популяций, их активности, стрессах и скорости метаболических процессов. Типичные спектры поглощения пигментов в ацетоновом экстракте приведены на рис. 3.

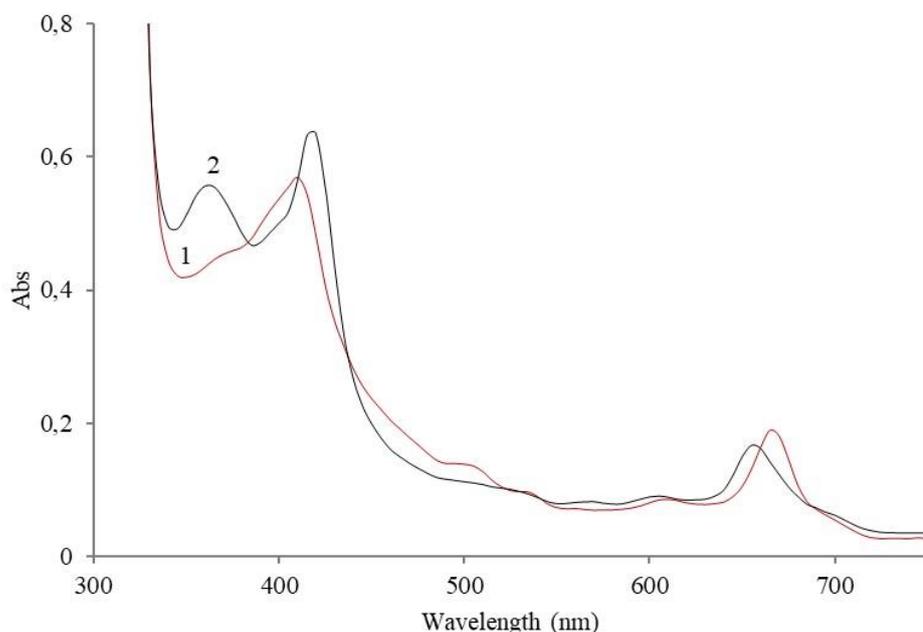


Рис. 3. Типичный спектр поглощения ацетоновой вытяжки из образцов донных отложений озер Томского района: 1 – исходный спектр; 2 – спектр, подкисленный 10%-й соляной кислотой
 Fig. 3. Typical absorption spectrum of acetone extract from bottom sediment samples of lakes in the Tomsk district: 1 – initial spectrum; 2 – spectrum acidified with 10 % hydrochloric acid

Поскольку донные отложения являются "природным архивом", то для оценки трофического состояния озер пигменты были выделены именно из них. Результаты спектрофотометрического анализа ацетоновых экстрактов на длинах волн 430, 480, 630, 645, 664, 750 нм в двух формах: исходной и подкисленной 10%-й соляной кислотой, позволили определить абсолютное содержание пигментов, а также определить относительное содержание "Хл а" от суммы всех присутствующих форм хлорофиллов в образцах ДО малых водоемов.

Как правило, трофический статус озер определяется по составу воды и ДО. В исследованиях (Минеева, 2004; Неверова-Дзюнак и др., 2020; Сигарева и др., 2021) установлено, что содержание "Хл а" в пресных водоемах в воде варьируется в диапазоне от 2 до 100 мкг/л и "Хл а + Фео" в ДО в диапазоне от 12 до 120 мкг/г сухого остатка (с.о.) в зависимости от уровня продуктивности экосистемы. Содержание пигментов в воде и ДО составляет: в олиготрофных озерах <3мкг/л и <12 мкг/г с.о., в мезотрофных – 3–60 мкг/л и 12–95 мкг/г с.о., в эфотрофных – >60 мкг/л и >95 мкг/г с.о. соответственно.

Таблица 3. Содержание фитопигментов в донных отложениях малых водоемов Томского района (в числителе – абсолютное содержание, мкг/г; в знаменателе – среднее значение, мкг/г)
 Table 3. Phytopigment content in bottom sediments of small reservoirs of the Tomsk district (in the numerator – the absolute content, µg/g; in the denominator – the average value, µg/g)

Озеро	Содержание, мкг/г				∑ всех пигментов	ПО	% Хл а от ∑ всех Хл
	Хл а	Хл в	Хл с	С карот			
Круглое	<u>0,28–0,45</u> 0,37	<u>0,09–0,15</u> 0,12	<u>0,10–0,18</u> 0,14	<u>0,45–0,71</u> 0,58	<u>0,91–1,51</u> 1,21	<u>1,56–1,61</u> 1,59	<u>57,29–59,15</u> 58,22
Мальцево	<u>0,24–0,84</u> 0,56	<u>0,10–0,15</u> 0,12	<u>0,12–0,15</u> 0,14	<u>0,49–0,92</u> 0,7	<u>0,99–2,06</u> 1,52	<u>1,05–1,98</u> 1,52	<u>49,44–76,2</u> 62,82
Песчаное	<u>6,60–23,00</u> 14,9	<u>0,94–1,49</u> 1,22	<u>0,94–1,53</u> 1,23	<u>11,79–31,3</u> 21,54	<u>20,29–57,53</u> 38,91	<u>1,78–1,35</u> 1,56	<u>77,88–88,49</u> 83,19
Савинское	<u>0,35–2,00</u> 1,14	<u>0,45–1,35</u> 0,82	<u>0,78–1,29</u> 1,04	<u>1,31–4,14</u> 2,92	<u>2,9–8,78</u> 5,93	<u>2,07–3,69</u> 2,94	<u>21,03–43,11</u> 34,7
Федосеевское	<u>2,2–3,30</u> 2,8	<u>1,16–1,5</u> 1,33	<u>1,15–1,97</u> 1,56	<u>4,51–7,34</u> 5,93	<u>10,22–13,01</u> 1,61	<u>2,01–2,19</u> 2,1	<u>39,28–59,18</u> 49,23

Примечание. Хлорофилл а – Хл а; хлорофилл в – Хл в; хлорофилл с – Хл с; каротиноиды – С карот; пигментное соотношение – ПО.

Для всех изученных образцов донных отложений наблюдается широкий разброс содержания "Хл а", например от 0,35 до 2,3 мкг/г в оз. Савинское (табл. 3). Это может быть связано с неоднородностью пространственного распространения фитопланктона (*Минеева, 2004*). При этом повышенное содержание "Хл а" в оз. Круглое, Мальцево и Песчаное может указывать на преобладание сине-зеленых водорослей, которые ухудшают состояние водоемов, однако в нашей работе отдельно фитопланктон не изучался.

Тип донных отложений является одним из основных факторов, влияющих на накопление и содержание пигментов. Так, ДО озера Круглое и Мальцево представлены мелким песчаником, в них содержание пигментов ниже, чем в песчано-илистых отложениях оз. Федосеевское и Песчаное.

Для характеристики функциональной активности водорослевых сообществ (фитоценозов) применяется показатель, известный как пигментное отношение (ПО). Этот параметр рассчитывается как соотношение суммарной концентрации общих каротиноидов к содержанию хлорофилла а (*Смольская, 2018*). ПО отражает адаптационные процессы в клетках фитопланктона и позволяет судить о физиологическом состоянии популяций под влиянием внешних факторов.

В условиях оптимального функционирования водорослевых сообществ значение пигментного отношения, как правило, находится в диапазоне от 2 до 5. При этом важно учитывать сезонную динамику – величина ПО может варьироваться в течение года в зависимости от температуры, интенсивности солнечного света и доступности питательных веществ. В мезотрофных водоемах, характеризующихся умеренной биологической продуктивностью, типично преобладание каротиноидов над зелеными пигментами, что обусловлено защитной ролью каротиноидов при умеренном уровне светового стресса.

Для всех исследованных озера Томского района значение ПО не превысило 3, что укладывается в нормативный диапазон и свидетельствует об удовлетворительной работе фитопланктонных сообществ. Полученные данные подтверждают, что водорослевые популяции находятся в состоянии физиологического равновесия, а экосистемы озера функционируют без признаков стресса или чрезмерной эвтрофикации.

Так как разложение хлорофиллов происходит быстрее, то практически во всех образцах наблюдается преобладание каротиноидов над хлорофиллом а. Повышение пигментного отношения указывает на ухудшение физиологического состояния фитопланктона оз. Савинское по сравнению с остальными озерами. Это согласуется с показателем ИЗВ, по которому озера относятся к умеренно загрязненным, и для оз. Савинского характерно самое высокое содержание коэффициента ИЗВ (табл. 3).

Повышенное суммарное содержание пигментов в ДО озера Песчаное может быть связано с типом грунта.

На содержание пигментов в донных отложениях влияют различные факторы, например, климатические условия (*Schreider et al., 2023*), содержание тяжелых металлов (*Томилина и др., 2014*), нефтепродуктов (*Азбалин и др., 2019*) и др. Взаимосвязь между содержанием пигментов в ДО и ионным составом вод, нефтезагрязнениями, в том числе ПАУ, изучена недостаточно, поэтому нами предпринята попытка проанализировать взаимосвязь экологического состояния водных объектов и содержания полиароматических углеводородов.

Наибольшей токсичностью обладают легкие фракции нефти, среди ароматических соединений опасность повышается в ряду бензол-толуол-ксилол-триметилбензол, некоторые из алифатических и ароматических углеводородов могут поглощаться и вовлекаться в процесс обмена веществ с их последующей трансформацией, что отрицательно сказывается на растениях (*Шулаев и др., 2016*). В научной литературе отмечается, что полиароматические соединения с 5–6 циклами в структуре, как правило, имеют техногенное происхождение: связаны с процессами неполного сгорания органического топлива, промышленными выбросами и антропогенной активностью (*Опекунов и др., 2015; Халиков и др., 2020*). Как показано в работах *Ровинского и др. (1988)*, именно эти ПАУ с пяти- и шестичленными кольцами обладают высокой канцерогенностью и мутагенной активностью и представляют серьезную экологическую опасность. К таким соединениям относятся бенз[к]флуорантен, бенз[а]пирен, бенз[б]флуорантен и дибенз[а, h]антрацен – вещества, способные накапливаться в биоте и оказывать долгосрочное негативное воздействие на экосистемы и здоровье человека, что вызывает беспокойство не только в научном, но и медицинском сообществе. В отличие от них, более легкие представители класса ПАУ, такие как нафталин и фенантрен, часто ассоциируются с природными источниками – в первую очередь с разложением гумусовых веществ и остатками наземной высшей растительности.

Отдельной проблемой на сегодняшний день в Российской Федерации заявлено отсутствие нормативов по большинству других приоритетных полиароматических углеводородов, что затрудняет комплексную оценку их влияния на водные ресурсы. Согласно СанПиН 1.2.3685-21⁵ только содержание нафталина в воде водных объектов не должно превышать 10 мкг/л, а концентрация бенз[а]пирена должна быть не выше 0,01 мкг/л. В табл. 4 представлены результаты количественного содержания ПАУ в малых водоемах изучаемого района.

⁵ СанПиН 1.2.3685-21. Санитарные нормы и требования "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания". URL: https://nagut6.gosuslugi.ru/netcat_files/174/2801/SP123685_21.pdf?ysclid=mm8xuh1vam332677501.

Таблица 4. Содержание ПАУ в поверхностных водах малых озер Томского района, в числителе – среднее значение \pm ошибка среднего, мкг/л; в знаменателе – относительное, %
 Table 4. PAHs content in the surface waters of small lakes of the Tomsk district, in the numerator – the average value \pm the error of the average, $\mu\text{g/l}$; in the denominator – relative, %

ПАУ	Содержание, мкг/л				
	Круглое	Мальцево	Песчаное	Савинское	Федосеевское
Нафталин	$0,04 \pm 0,002$ 9,20	$0,04 \pm 0,002$ 10,26	$0,03 \pm 0,002$ 8,42	$0,02 \pm 0,001$ 4,51	$0,02 \pm 0,001$ 4,18
2-метилнафталин	$0,03 \pm 0,002$ 5,75	$0,05 \pm 0,003$ 12,82	$0,03 \pm 0,002$ 7,54	$0,04 \pm 0,002$ 7,67	$0,02 \pm 0,001$ 4,07
Флуорен	$0,08 \pm 0,002$ 17,24	$0,04 \pm 0,002$ 10,26	$0,03 \pm 0,002$ 7,46	$0,12 \pm 0,012$ 21,51	$0,12 \pm 0,011$ 28,32
Фенантрен	$0,08 \pm 0,002$ 17,24	$0,09 \pm 0,003$ 21,79	$0,10 \pm 0,004$ 26,84	$0,06 \pm 0,003$ 11,84	$0,03 \pm 0,002$ 7,72
Антрацен	0,00 0,00	0,00 0,00	следы(traces) 0,27	следы(traces) 0,17	$0,01 \pm 0,004$ 1,78
Флуорантен	$0,06 \pm 0,003$ 12,64	$0,05 \pm 0,002$ 11,54	$0,07 \pm 0,002$ 17,98	$0,06 \pm 0,003$ 10,77	0,09 21,64
Пирен	$0,02 \pm 0,001$ 4,60	$0,02 \pm 0,001$ 3,85	$0,03 \pm 0,002$ 7,31	$0,01 \pm 0,004$ 1,95	$0,02 \pm 0,001$ 5,02
Бензо[а]антрацен	$0,05 \pm 0,003$ 11,49	$0,03 \pm 0,002$ 6,41	$0,04 \pm 0,002$ 10,46	$0,03 \pm 0,002$ 6,10	$0,02 \pm 0,001$ 5,71
Хризен	$0,03 \pm 0,002$ 6,90	$0,02 \pm 0,001$ 5,13	$0,03 \pm 0,002$ 6,97	$0,02 \pm 0,001$ 3,26	$0,02 \pm 0,001$ 4,69
Бенз[б]флуорантен	$0,01 \pm 0,004$ 2,30	$0,03 \pm 0,002$ 6,41	следы(traces) 0,33	$0,04 \pm 0,002$ 7,91	$0,01 \pm 0,004$ 1,78
Бенз[к]флуорантен	$0,01 \pm 0,004$ 1,15	$0,02 \pm 0,001$ 3,85	следы(traces) 0,16	$0,04 \pm 0,002$ 6,71	$0,01 \pm 0,004$ 1,85
Бенз[а]пирен	$0,01 \pm 0,004$ 2,30	$0,01 \pm 0,004$ 2,56	$0,01 \pm 0,004$ 1,84	$0,02 \pm 0,001$ 3,57	$0,01 \pm 0,004$ 2,70
Дибенз[аh]антрацен	$0,04 \pm 0,002$ 9,20	$0,02 \pm 0,001$ 5,13	$0,02 \pm 0,001$ 4,41	$0,08 \pm 0,002$ 14,02	$0,04 \pm 0,002$ 10,54
Σ НМ	0,22	0,22	0,19	0,25	0,19
Σ ВМ	0,22	0,18	0,18	0,29	0,23
Σ ПАУ	0,44	0,40	0,37	0,54	0,42
ВМ/ НМ	1	0,82	0,95	1,16	1,21

Интерес к экологическому состоянию водных объектов продолжает расти во всем мире, особенно в свете выявления распространения стойких органических загрязнителей, таких как ПАУ. Исследования, проведенные в Китае (Kuo Yao et al., 2023; Song et al., 2023), показали, что в городских водоемах, в частности в озерах Донг и Тансюнь, суммарная концентрация ПАУ варьируется в пределах 0,013–0,989 мкг/л. Мониторинг питьевых вод ряда китайских городов показал, что уровень ПАУ может изменяться от 0,004 до 0,231 мкг/л (Zhang et al., 2019), что свидетельствует о широком распространении этих соединений даже в системах водоснабжения. Антропогенное влияние на водные экосистемы охватывает не только урбанизированные территории, но и удаленные природные регионы. Так, на архипелаге Шпицберген, в озере Стамме, средние концентрации ПАУ находятся в интервале от 0,002–0,29 мкг/л. А для летне-осеннего периода они возрастают до 0,713 мкг/л, что, вероятно, связано с увеличением атмосферного переноса и таянием снегов (Третьяков и др., 2021). Одно из самых уникальных и чистых озер мира – Байкал, в поверхностных водах содержание ПАУ колеблется от 0,03 до 0,13 мкг/л (Горшков и др., 2010), что указывает на поступление этих соединений даже в малонаселенные и охраняемые территории.

В ходе анализа проб из малых озер Томского района установлено, что такие индивидуальные приоритетные ПАУ, как фенантрен, флуорен и флуорантен, наиболее представлены в выделенных экстрактах из водных проб. Максимальные значения флуорена (до 0,12 мкг/л) зафиксированы в озерах Федосеевское и Савинское, где также отмечено повышенное содержание флуорантена и дибенз[а,h]антрацена. В целом, в исследуемых водах преобладают низкомолекулярные ПАУ (двух- и трехкольцевые), входящие в список приоритетных для мониторинга. Их высокая растворимость в водной среде способствует более легкому переносу и накоплению. Для всех изученных озер подтверждена типичная закономерность: флуорантен превышает по концентрации пирен, что объясняется его большей гидрофильностью и устойчивостью в водной фазе (Ровинский и др., 1988; AMAR, 2007).

Минимальные суммарные значения концентраций ПАУ определены в озере Песчаное (0,37 мкг/л), и в нем же отмечено максимальное содержание фенантрена (0,1 мкг/л), источником которого, вероятно, являются пирогенные процессы, связанные с бытовой и хозяйственной деятельностью населения. Согласно данным *Ровинского и др. (1988)*, высокое содержание фенантрена в природных водах может быть связано со способностью почвы генерировать фенантрен и хризен в результате трансформации погребенной органической биомассы.

Содержание ПАУ меняется в зависимости от времени года. Наши исследования показали, что в образцах, взятых в конце лета, уровень ПАУ соответствует типичным летним значениям, независимо от антропогенного воздействия (*Третьяков и др., 2021*) и колеблется в области концентраций от 0,37 до 0,54 мкг/л для поверхностных вод малых водоемов Томского района.

Показатель соотношения суммы высокомолекулярных (ВМ) к сумме низкомолекулярных (НМ) ПАУ для изучаемых водоемов Томского района находится в интервале от 0,82 до 1,21. Отношение $\Sigma\text{ВМ}/\Sigma\text{НМ} > 1$ свидетельствует о преобладании четырех- и более кольцевых соединений, которые относятся к трудноокисляемой растворенной органической материи. Эти соединения практически не участвуют в процессах биохимического потребления кислорода (БПК₅), поэтому не учитываются при расчете индекса загрязнения воды (*Гагарина, 2012*) и не влияют на классификацию водоема по степени загрязненности.

Таким образом, существует значительный разрыв между реальной токсикологической опасностью и методами оценки качества воды: потенциально опасные, канцерогенные ПАУ, способные к биоаккумуляции и длительному сохранению в экосистемах, не нормируются и не включаются в действующие индексы. Устойчивость ПАУ, их медленная трансформация и способность к накоплению делают их ценными маркерами антропогенного воздействия. Включение количественных данных по полиароматическим углеводородам в систему мониторинга позволило бы не только расширить критерии оценки антропогенной нагрузки, но и повысить достоверность контроля состояния водных экосистем.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать обоснованный вывод о текущем экологическом состоянии малых озер Томского района. На основании расчетов индекса загрязнения воды установлено, что изученные водоемы попадают в диапазон умеренно загрязненных и загрязненных водных объектов. Такое ранжирование свидетельствует о наличии выраженного антропогенного влияния, несмотря на относительно низкую степень урбанизации территории.

Показано, что содержание пигментов очень неравномерно распределено по площади озер, что может быть связано с неоднородностью пространственного распространения фитопланктона. Наибольшее значение ПО определено в оз. Савиновское, что подтверждает его более сильное загрязнение по сравнению с остальными озерами. Оценка трофического статуса озер на основании содержания природных пигментов коррелирует с показателем ИЗВ.

Нормативные значения предельно допустимых концентраций ПАУ в России, странах Европы и США существенно различаются, что обусловлено отличиями в подходах к оценке экологического риска, методологиях мониторинга и степени изученности токсикологических свойств этих соединений. Для поверхностных вод малых озер Томского района установлено, что содержание этих приоритетных ПАУ соответствуют установленным нормативам (концентрации находятся ниже или на уровне ПДК). Исключение – водоем Савинский, там зафиксировано превышение по бенз[а]пирену 0,02 мкг/л, т. е. в два раза выше допустимого значения. Это может свидетельствовать о локальном источнике загрязнения, вероятно, связанном с пирогенными процессами (сжигание топлива, органического сырья, мусора в жилом секторе) и переносом воздушными массами продуктов горения на расстояние. При этом важно отметить, что большинство других ПАУ, включая такие токсичные соединения, как бенз[а]антрацен, хризен и дибенз[а,h]антрацен, в РФ на данный момент в воде не нормируются, что ограничивает возможности полной оценки экологического и санитарно-гигиенического состояния вод.

Обобщая проведенные исследования, была предпринята попытка установить взаимосвязь между всеми предложенными показателями: ИЗВ, суммарным содержанием пигментов, суммой ПАУ и трофическим статусом озер. Все показатели находятся в тесной зависимости друг от друга, но делать однозначный вывод пока рано, так как необходимо увеличение количества исследуемых образцов малых озер для получения полной картины с использованием статистических методов.

Следует обратить внимание, что влияние антропогенного воздействия на химический состав поверхностных вод на примере малых водоемов Томского района происходит постоянно, так как данные территории активно используются населением. Полученные результаты подчеркивают необходимость расширения системы мониторинга за счет включения дополнительных показателей, в том числе токсичных органических соединений, для более объективной оценки экологического здоровья малых водоемов.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках проекта фундаментальных научных исследований РАН № FWZZ-2026-004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Агбалян Е. В., Шинкарук Е. В. Химический состав вод малых озер нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 7. С. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37158>.
- Беляева П. Г. Трофический статус Камского водохранилища по фитопланктону в летний период // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Т. 16, № 5. С. 244–248.
- Винберг Г. Г. Первичная продукция водоемов. Минск : Изд-во АН БССР. 1960. 329 с.
- Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы // *Ижевск : Изд-во "Удмуртский университет"*. 2012. 199 с.
- Горшков А. Г., Маринайте И. И., Земская Т. И., Ходжер Т. В. Современный уровень нефтепродуктов в воде оз. Байкал и его притоков // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010. № 18. С. 711–718.
- Зубарев В. А. Гидрохимические индексы оценки качества поверхностных вод // *Региональные проблемы*. 2014. Т. 17, № 2. С. 71–77. EDN: RRRLTP.
- Иоганзен Б. Г., Попов М. А., Якубова А. И. Водоемы окрестностей города Томска. Из цикла работ по изучению биологической продуктивности водоемов Сибири // *Труды Том. ун-та*. 1951. Т. 115. С. 121–190.
- Кимстач В. А. Классификации качества поверхностных вод в странах Европейского экономического сотрудничества. СПб. : Гидрометеиздат, 1993. 48 с.
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2007. 395 с.
- Меркушина Г. А., Ларина Н. С. Особенности фотосинтетических пигментов в торфах различного генезиса // *Вестник КазНУ. Серия химическая*. 2013. № 4(72). С. 103–110.
- Минакова Е. А., Шлычков А. П., Кондратьев С. А., Латыпова В. З. Миграционные потоки биогенных элементов в геосистеме "водосбор – водный объект" в современных условиях // *Геоэкология*. 2022. № 2. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-2-13-21>.
- Минева Н. М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М. : Наука, 2004. 156 с.
- Неверова-Дзиопак Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод : монография. Санкт-Петербург, 2020. 176 с. EDN: KOLTDW.
- Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Сани С. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 2015. Сер. 7. Вып. 4. С. 98–109.
- Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов // *Л. : Гидрометеиздат*, 1988. 233 с.
- Сагдеев М. А., Чигринаева Н. А., Сальникова В. И. Определение содержания катионов и анионов в питьевой воде методом капиллярного электрофореза // *Современные научные исследования и инновации*. 2017. № 3(71). С. 36–39.
- Семенов М. Ю., Маринайте И. И., Жученко Н. А. Выявление источников и путей поступления полициклических ароматических углеводородов в поверхностные воды на основе данных химического мониторинга // *Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология*. 2017. № 1. С. 40–49.
- Сигарева Л. Е., Тимофеева Н. А., Ложкина Р. А. Современное трофическое состояние бентали Ивановского и Угличского водохранилищ по содержанию осадочных пигментов // *Биология внутренних вод*. 2021. № 2. С. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320965221020145>.
- Смольская О. С., Жукова А. А., Люля А. С. Пигментные и физико-химические характеристики донных отложений озер Нарочь и Мясстро // *Белорусский государственный университет. Биология*. 2018. № 2. С. 65–77.
- Томилина И. И., Гремячих В. А., Гребенюк Л. П. Эколого-токсикологический мониторинг озер северо-запада и центра европейской части России, расположенных на особо охраняемых территориях // *Водные ресурсы*. 2014. Т. 41, № 3. С. 304–311. DOI: <https://doi.org/10.7868/S032105961403016X>.
- Третьяков М. В., Брызгало В. А., Румянцева Е. В., Ромашова К. В. Пресноводные ресурсы западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования АНИИ) : монография. Санкт-Петербург. 2021. 201 с.
- Халиков И. С., Лукьянова Н. Н. Содержание полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях озера Байкал по результатам мониторинга в 2017–2018 гг. // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. № 6–2(96). С. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050>.

- Чуйкина Д. И., Король И. С., Мухортина Н. А., Колубаева Ю. В. Полиароматические углеводороды малых водоемов Томского района // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 10. С. 216–225. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4497>.
- Шулаев Н. С., Пряничникова В. В., Быковский Н. А., Кадыров Р. Р. Изучение воздействия нефтяного загрязнения почв на развитие высших растений на примере рогоза широколистного // Успехи современного естествознания. 2016. № 2. С. 193–197. EDN: VOHWAF.
- AMAR (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic // Oslo. 2007. AMAR. 87 p.
- Kumari N., Thakur K., Kumar R., Kumar S. [et al.]. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: An analysis of the present situation // Water-Energy Nexus. 2023. Vol. 6. P. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.06.002>.
- Kuo Yao, Zhanling Xie, Lihao Zhi, Zefan Wang [et al.]. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: Spatial distribution, potential sources and risk assessment by // Water. 2023. Vol. 15(13). N 2416. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15132416>.
- Rogers B. C., Dunn G., Hammer K., Novalia W. [et al.]. Water sensitive cities index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions // Water Research. 2020. Vol. 186. Article number: 116411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116411>.
- Schreider S., Sommaruga R., Psenner R. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 905. Article number: 167750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167750>.
- Song Q., Xue Z., Wu H., Zhai Y. [et al.]. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of soil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study // Environmental Research. 2023. Vol. 216. Pt. 4. Article number: 114816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114816>.
- Sunithal V., Muralidhara B. Reddy geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India // Applied Water Science. 2022. Vol. 12. Iss. 41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01527-w>.
- Tarnawski M., Baran A. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2018. Vol. 74. P. 395–407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0513-2>.
- Yunkera M. B., Macdonaldb R. W., Vingarzanc R., Mitchelld R. H. [et al.]. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).
- Zhang Y., Zhang L., Huang Z. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2019. Vol. 177. P. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>.

References

- Agbalyan, E. V., Shinkaruk, E. V. 2019. Chemical composition of waters of small lakes in oil and gas producing regions of the north of Western Siberia. *Successes of Modern Natural Science*, 7, pp. 45–51. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37158>. (In Russ.)
- Belyaeva, P. G. 2014. Trophic status of the Kama reservoir by phytoplankton in the summer period. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 16(5), pp. 244–248. (In Russ.)
- Vinberg, G. G. 1960. Primary production of reservoirs. (In Russ.)
- Gagarina, O. V. 2012. Assessment and normalization of the quality of natural waters: Criteria, methods, existing problems. Izhevsk. (In Russ.)
- Gorshkov, A. G., Marinaite, I. I., Zemskaya, T. I., Hodger, T. V. 2010. The current level of petroleum products in the lake water. Baikal and its tributaries. *Chemistry in the Interests of Sustainable Development*, 18, pp. 711–718. (In Russ.)
- Zubarev, V. A. 2014. Hydrochemical indices of surface water quality assessment. *Regional Problems*, 17(2), pp. 71–77. EDN: RRRLTP. (In Russ.)
- Johanzen, B. G., Popov, M. A., Yakubova, A. I. 1951. Reservoirs in the vicinity of the city of Tomsk. From the cycle of work on the study of biological productivity of Siberian reservoirs. *Proceedings Tomsk Un-t*, 115, pp. 121–190. (In Russ.)
- Kimstach, V. A. 1993. Classification of surface water quality in the countries of the European Economic Community. St. Petersburg. (In Russ.)
- Kitaev, S. P. 2007. Fundamentals of limnology for marine biologists and ichthyologists. Petrozavodsk. (In Russ.)

- Merkushina, G. A., Larina, N. S. 2013. Features of photosynthetic pigments in peat of various genesis. *KazNU Bulletin. Chemical series*, 4(72), pp. 103–110. (In Russ.)
- Minakova, E. A., Shlychkov, A. P., Kondratiev, S. A., Latypova, V. Z. 2022. Migration flows of biogenic elements in the geosystem "watershed – water body" in modern conditions. *Geoecology*, 2, pp. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2022-2-13-21>. (In Russ.)
- Mineeva, N. M. 2004. Plant pigments in the water of the Volga reservoirs. Moscow. (In Russ.)
- Neverova-Dziopak, E., Tsvetkova, L. I. 2020. Assessment of the trophic state of surface waters. Monograph. St. Petersburg. EDN: KOLTDW. (In Russ.)
- Opekunov, A. Yu., Mitrofanova, E. S., Sanni, S. 2015. Polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of rivers and canals of St. Petersburg. *Vestnik SPb. univer. Series 7, 4*, pp. 98–109. (In Russ.)
- Rovinsky, F. Ya., Teplitskaya, T. A., Alekseeva, T. A. 1988. Background monitoring of polycycloaromatic coal deposits. Leningrad. (In Russ.)
- Sagdeev, M. A., Chigrineva, N. A., Salnikova, V. I. 2017. Determination of the content of cations and anions in drinking water by capillary electrophoresis. *Modern Scientific Research and Innovation*, 3(71), pp. 36–39. (In Russ.)
- Semenov, M. Yu., Marinaite, I. I., Zhuchenko, N. A. 2017. Identification of sources and routes of polycyclic aromatic hydrocarbons entering surface waters based on chemical monitoring data. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 1, pp. 40–49. (In Russ.)
- Sigareva, L. E., Timofeeva, N. A., Lozhkina, R. A. 2021. The current trophic state of bentali of the Ivankovsky and Uglichsky reservoirs in terms of sedimentary pigments. *Biology of Inland Waters*, 2, pp. 151–159. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0320965221020145>. (In Russ.)
- Smol'skaya, O. S., Zhukova, A. A., Lyulya, A. S. 2018. Pigment and physicochemical characteristics of bottom sediments of lakes Naroch and Myastro. *Belarusian State University. Biology*, 2, pp. 65–77. (In Russ.)
- Tomilina, I. I., Gremyachikh, V. A., Grebenyuk, L. P. 2014. Ecological and toxicological monitoring of lakes in the north-west and the center of the European part of Russia located in specially protected areas. *Water Resources*, 41(3), pp. 304–311. DOI: <https://doi.org/10.7868/S032105961403016X>. (In Russ.)
- Tretyakov, M. V., Bryzgalov, V. A., Rumyantseva, E. V., Romashova, K. V. 2021. Freshwater resources of western Spitsbergen in modern conditions (long-term research of AARI). Monograph. St. Petersburg. (In Russ.)
- Khalikov, I. S., Lukyanova, N. N. 2020. The content of polycyclic aromatic hydrocarbons in the bottom sediments of Lake Baikal according to the monitoring results in 2017–2018. *International Scientific Research Journal*, 6–2(96), pp. 69–73. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.96.6.050>. (In Russ.)
- Chuikina, D. I., Korol, I. S., Mukhortina, N. A., Kolubaeva, Yu. V. 2024. Polyaromatic hydrocarbons of small reservoirs of the Tomsk region. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering*, 335(10), pp. 216–225. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/10/4497>. (In Russ.)
- Shulaev, N. S., Pryanichnikova, V. V., Bykovsky, N. A., Kadyrov, R. R. 2016. Studying the effects of oil pollution of soils on the development of higher plants using the example of broadleaf cattails. *Successes of Modern Natural Science*, 2, pp. 193–197. EDN: VOHWAF. (In Russ.)
- AMAR (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Ch. 4. Sources, inputs and concentrations of petroleum hydrocarbons, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other contaminants related to oil and gas activities in the Arctic. 2007. Oslo. AMAR.
- Kumari, N., Thakur, K., Kumar, R., Kumar, S. et al. 2023. Freshwater lakes in the Western Himalayan Region: An analysis of the present situation. *Water-Energy Nexus*, 6, pp. 18–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.06.002>.
- Kuo, Yao, Zhanling, Xie, Lihao, Zhi, Zefan, Wang et al. 2023. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the water bodies of Dong Lake and Tangxun Lake, China: Spatial distribution, potential sources and risk assessment by. *Water*, 15(13). N 2416. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15132416>.
- Rogers, B. C., Dunn, G., Hammer, K., Novalia, W. et al. 2020. Water sensitive cities index: A diagnostic tool to assess water sensitivity and guide management actions. *Water Research*, 186. Article number: 116411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116411>.
- Schreider, S., Sommaruga, R., Psenner, R. 2023. Changes in air temperature, but not in precipitation, determine long-term trends in water chemistry of high mountain lakes of the Alps with and without rock glacier influence. *Science of The Total Environment*, 905. Article number: 167750. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167750>.
- Song, Q., Xue, Z., Wu, H., Zhai, Y. et al. 2023. The collaborative monitored natural attenuation (CMNA) of oil and groundwater pollution in large petrochemical enterprises: A case study. *Environmental Research*, 216. Pt. 4. Article number: 114816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114816>.
- Sunithal, V., Muralidhara, B. 2022. Reddy geochemical characterization, deciphering groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG), water quality index (WQI) and geographical information system (GIS) in hard rock aquifer, South India. *Applied Water Science*, 12(41). DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01527-w>.

- Tarnawski, M., Baran, A. 2018. Use of chemical indicators and bioassays in bottom sediment ecological risk assessment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 74, pp. 395–407. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0513-2>.
- Yunkera, M. B., Macdonald, R. W., Vingaranc, R., Mitchell, R. H. et al. 2002. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, 33, pp. 489–515. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00002-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00002-5).
- Zhang, Y., Zhang, L., Huang, Z. 2019. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in drinking water of China: Composition, distribution and influencing factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 177, pp. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.119>.

Сведения об авторах

Чуйкина Дарья Ивановна – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: dichuikina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Daria I. Chuikina – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;
e-mail: dichuikina@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5906-2148>

Король Ирина Степановна – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: irinakorol@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Irina S. Korol – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,
Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher;
e-mail: irinakorol@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8022-9678>

Мухортина Наталья Андреевна – пр. Академический, 4, г. Томск, Россия, 634055;
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
канд. хим. наук, науч. сотрудник;
e-mail: volkovana@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Natalia A. Mukhortina – 4 Akademichesky Ave., Tomsk, Russia, 634055;
Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Tomsk Department,
Cand. Sci. (Chemistry), Researcher;
e-mail: volkovana@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

УДК 622.275:622.274

Технико-экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом

Ю. Г. Антипин*, И. В. Никитин, Ю. М. Соломеин

*Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
27.11.2025;

получена
после доработки
24.12.2025;

принята
к публикации
29.12.2025

Ключевые слова:

глубокозалегающее
месторождение,
асбестовая руда, схема
комбинированной
разработки,
содержание асбеста,
производственная
мощность шахты,
схема вскрытия,
система разработки,
технико-экономические
показатели

Особенностью открытой разработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста является расположение карьеров "Центральный" и "Южный" в окружении промышленной и городской застройки, ограничивающей возможности дальнейшего развития открытых горных работ на глубоких горизонтах. Перенос этих строений сопряжен с колоссальными затратами и с экономической точки зрения не имеет смысла. В связи с этим актуальной является задача установления технической возможности и экономической целесообразности добычи асбеста подземным или открыто-подземным способами. Разработаны три варианта подземной геотехнологии вскрытия и отработки запасов за предельным контуром карьеров, учитывающих схему комбинированной разработки месторождения и отличающихся средним содержанием асбеста в балансовых запасах, применяемой системой разработки и годовой производственной мощностью шахты. Установлено, что комбинированная разработка месторождения технически возможна и экономически целесообразна по параллельной схеме с отработкой подземным способом запасов со средним содержанием асбеста 4,4 %, что обеспечивается применением современных высокоэффективных подземных геотехнологий. Это позволяет расширить сырьевую базу и продлить срок службы градообразующего предприятия на 8 лет.

Для цитирования

Антипин Ю. Г. и др. Технико-экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-90-100>.

Feasibility study of mining Bazhenov chrysotile asbestos deposit by combined method

Yuriy G. Antipin*, Igor V. Nikitin, Yuriy M. Solomein

*The Institute of Mining of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Article info

Received
27.11.2025;

received
in revised form
24.12.2025;

accepted
29.12.2025

Key words:

deposit, asbestos ore,
scheme of combined
mining, asbestos content,
mine production capacity,
scheme of opening,
mining system, technical
and economic indicators

Abstract

A special feature of the open-pit mining of the Bazhenov chrysotile asbestos deposit is the location of the Tsentralny and Yuzhny pits surrounded by industrial and urban buildings, limiting the possibilities for further development of open-pit mining in deep horizons. The transfer of these buildings is associated with enormous costs and economically does not make any sense. In this regard, the task of establishing the technical and economic feasibility of mining asbestos by underground or open-underground methods is very urgent. Three variants of underground geotechnology have been developed for opening and mining reserves beyond the limit contour of pit taking into account the scheme of combined mining and differing in the asbestos content in the balance reserves, the mining system used and the mine production capacity. It has been established that the combined mining of the Bazhenov deposit is technically possible and economically feasible according to a parallel scheme with underground mining of reserves with an average asbestos content of 4.4 %, which is ensured by the use of modern highly efficient underground geotechnologies. This makes it possible to extend the service life of the enterprise by at least 8 years.

For citation

Antipin, Yu. G. et al. 2026. Feasibility study of mining Bazhenov chrysotile asbestos deposit by combined method. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 90–100. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-90-100>.

Введение

Доходность горнодобывающих предприятий, осуществляющих разработку крупных месторождений малоценных руд, обеспечивается за счет применения низкочастотной открытой геотехнологии. Учитывая высокую востребованность сырья, открытые горные работы (ОГР) на таких месторождениях отличаются масштабностью и долговременностью (Яковлев и др., 2018). Основной проблемой, с которой в перспективе придется столкнуться многим предприятиям, является наличие вблизи границ карьеров промышленной или городской застройки, отвалов вскрыши, что сильно ограничивает или вовсе делает нерентабельной дальнейшую углубку карьеров (Яковлев и др., 2015). Уже сейчас данная проблема актуальна для градообразующего предприятия – комбината "Ураласбест", эксплуатирующего крупнейшее в мире по запасам и уникальное по природным свойствам и чистоте минерала Баженовское месторождение хризотил-асбеста (Пуненков и др., 2024).

В настоящее время разработка Баженовского месторождения ведется открытым способом – двумя крупными карьерами "Центральный" и "Южный" на глубине 350 м (Корнилков и др., 2025). Производительность карьеров по руде – 12 млн т/год. Среднегодовое понижение добычных работ – 7–8 м. Предельная по технико-экономическим условиям глубина карьеров составляет 470 м (2036 г.). Развитие ОГР на глубоких горизонтах связано с расширением контуров карьеров по поверхности и пересмотром существующих границ земельного отвода, что потребует больших затрат на перенос жилых поселков, производственной инфраструктуры, изыскание дополнительных площадей для размещения отвалов вскрыши. За предельным контуром обоих карьеров имеются запасы, позволяющие продолжить эксплуатацию месторождения подземными горными работами (ПГР). В связи с этим весьма актуальной является задача установления технической возможности и экономической целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом.

Материалы и методы

Методология решения поставленной задачи базируется на комплексном подходе и предполагает обоснование подземной геотехнологии вскрытия и отработки запасов за предельным контуром карьеров. Подземная геотехнология должна соответствовать реализуемой схеме комбинированной разработки месторождения (последовательной или параллельной) и обеспечивать приемлемый уровень капитальных и эксплуатационных затрат при высокой производительности труда на основных технологических процессах добычи руды (Соколов и др., 2021). Основные решаемые задачи:

- анализ горно-геологических и горнотехнических условий и выявление перспективных для освоения подземным способом участков месторождения;
- определение годовой производственной мощности шахты по горным возможностям;
- разработка рациональной схемы вскрытия и подготовки запасов шахтного поля;
- выбор схемы внутришахтного транспорта, вентиляции и водоотлива;
- изыскание и конструирование эффективной и безопасной системы разработки;
- выбор основного технологического оборудования для проходческих и очистных работ;
- составление календарных планов вскрытия и отработки запасов шахтного поля;
- определение основных технико-экономических показателей и оценка эффективности освоения месторождения комбинированным способом.

Результаты и обсуждение

Анализ теории и практики комбинированной разработки рудных месторождений показал, что при последовательной схеме (ведение ПГР после завершения ОГР) возможно применение малозатратных и высокопроизводительных систем разработки с обрушением (Каплунов и др., 2003; Булатов и др., 2022; Flores et al., 2019); при параллельной схеме (одновременное ведение ОГР и ПГР) – систем разработки с открытым очистным пространством с конструктивными параметрами, обеспечивающими устойчивость бортов карьера (Казикаев, 2008; Лейзерович и др., 2012). Одним из основных преимуществ параллельной схемы является возможность реализации комплексных схем вскрытия с выдачей добытой руды из шахты и карьера по общим транспортным выработкам (Демидов и др., 2009; Гибадуллин и др., 2016).

Рассмотрены три варианта подземной геотехнологии, обеспечивающих реализацию различных схем комбинированной разработки Баженовского месторождения и отличающихся объемом запасов, подлежащих отработке подземным способом, и годовой производственной мощностью подземного рудника: вариант 1 – последовательная схема: промышленные запасы – 201,8 млн т, производственная мощность – 12 млн т/год; вариант 2 – параллельная схема: промышленные запасы – 97,5 млн т, производственная мощность – 6 млн т/год; вариант 3 – параллельная схема: промышленные запасы – 58,9 млн т, производственная мощность – 4 млн т/год.

Учитывая большую протяженность месторождения (около 6 км), по аналогии с ОГР оно разделено в плане на два шахтных поля, обрабатываемых двумя шахтами "Центральная" и "Южная" (Соколов и др.,

2014). Каждое шахтное поле разделено по высоте на два яруса (очереди): 1-я очередь – прибортовые запасы (отм. +20/–280 м), 2-я очередь – подкарьерные запасы (отм. –280/–480 м).

Вскрытие запасов каждого шахтного поля предусматривается двумя центрально-сдвоенными вертикальными (скиповым и клетевым) стволами с поверхности, вспомогательными наклонными автосъездами и вентиляционными восстающими, проходимыми из карьера, со строительством вентиляционно-сборочного и концентрационного горизонтов (рис. 1). Применение наклонных автосъездов и восстающих, проходимых из карьера, позволяет существенно (до 30 %) сократить время вскрытия запасов верхних этажей (Никитин, 2024), при этом обеспечиваются требования безопасности: проветривание горных работ и наличие не менее двух выходов из шахты. Высота этажа принята с учетом мировых тенденций увеличения параметров вскрытия и составляет 100 м.

Свежий воздух подается по клетевому стволу, проходит по квершлагам и штрекам и поступает к местам ведения горных работ. Исходящая струя направляется на вентиляционно-сборочный горизонт и через вентиляционные восстающие выдается в карьер, частично по наклонным автосъездам и скиповому стволу – на поверхность. Общий расход воздуха – не более 360 м³/с. Комплекс главного водоотлива предусматривается в центре шахтного поля у клетевого ствола.

Добытая руда и порода от проходки выработок перепускаются на концентрационный горизонт, по которому осуществляется автоматизированная локомотивная откатка по кольцевой схеме до стволов. Погрузка горной массы в вагоны, ее перемещение со скоростью 15 км/ч и разгрузка производится в автономном режиме. На рельсах устанавливаются специальные метки, позволяющие контролировать скорость и расстояние между составами, автоматизировать прохождение перекрестков. Аналогичные системы автоматизации рельсового транспорта внедрены на рудниках Kiruna (Швеция), Grasberg (Индонезия) и El Teniente (Чили) (Громов, 2020). Вариант 1 предполагает подъем руды по скиповому стволу непосредственно на поверхность (рис. 1, а), а варианты 2 и 3 – до горизонта +120 м, откуда по штольням руда доставляется на перегрузочный пункт в карьере и далее транспортируется железнодорожным транспортом по карьере на обогатительную фабрику (ОФ) (рис. 1, б и 1, в).

Руды месторождения имеют невысокую ценность, что предопределяет применение технологий, обеспечивающих минимальный уровень затрат на добычу руды. Вместе с тем крутой угол падения и значительная мощность рудных тел (от 20 до 150 м) позволяют применять технологии, основанные на использовании высокопроизводительных комплексов самоходного оборудования с автоматизированным управлением (Li et al., 2018; Sanchez et al., 2020). Для варианта 1 обоснована система подэтажного обрушения с торцовым выпуском при высоте подэтажа 25 м, для вариантов 2 и 3 – подэтажно-камерная система разработки с оставлением междукамерных целиков при высоте подэтажа 33 м. Использование технологии камерной выемки позволяет извлекать запасы с минимальным разубоживанием (не более 6 %). Формирование предохранительного целика толщиной до 40 м (при отработке запасов, сопряженных с карьером) обеспечивает сохранение устойчивости бортов карьера в период совмещения ОГР и ПГР.

Высокая интенсивность проходческих и очистных работ обеспечивается применением современных комплексов самоходных машин преимущественно на аккумуляторных батареях, что позволяет отказаться от строительства третьего вертикального (воздухоподающего) ствола и устройства дополнительной главной вентиляционной установки.

Организация строительства шахт "Центральная" и "Южная" принята исходя из условий обеспечения минимальных сроков их ввода в эксплуатацию и оптимизации инвестиций (рис. 2). Строительство шахт ведется по последовательно-параллельной схеме: по завершению одного вида работ (например, проходки стволов) на шахте "Центральная" шахтостроительные бригады и их мощности переключаются на выполнение аналогичного вида работ на шахте "Южная". По окончании строительства эксплуатация шахт ведется одновременно.

Вариант 1 предполагает последовательный переход с ОГР на ПГР, т. е. добыча руды подземным способом начинается после полной отработки карьеров (начиная с 2037 г.). Основными факторами, оказывающими существенное влияние на экономическую эффективность данного варианта, являются значительные капитальные вложения, высокая себестоимость добычи руды ПГР (в 2,6 раза выше, чем ОГР), характерное падение объемов годовой добычи и производства товарной продукции предприятия в период набора производственной мощности подземного рудника.

Варианты 2 и 3 предполагают параллельное ведение ОГР и ПГР в период доработки карьеров (начиная с 2033 и 2032 г. соответственно). Период совмещения ОГР и ПГР по обоим вариантам составляет 7 лет. Совместное производство ОГР и ПГР позволяет:

- компенсировать капитальные вложения и снизить себестоимость добычи руды ПГР;
- продлить период эксплуатации карьеров за счет постепенного увеличения объемов годовой добычи ПГР при пропорциональном сокращении добычи ОГР;
- обеспечить стабильность объемов годовой добычи и товарной продукции предприятия.

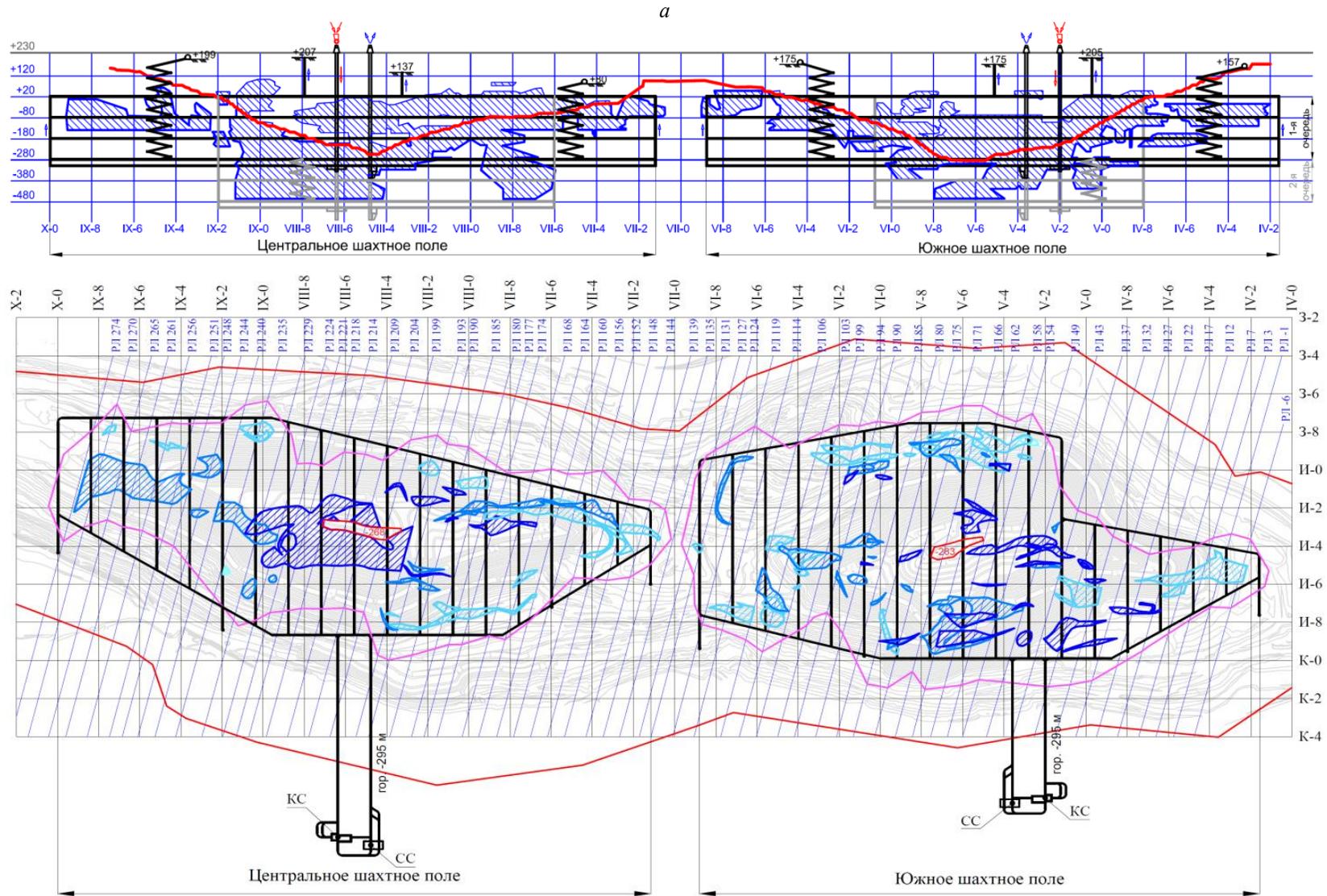


Рис. 1. Схема вскрытия запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения: *a* – вариант 1

Fig. 1. Scheme of opening of reserves of Bazhenov deposit outside the project outline of the quarries: *a* – option 1

б

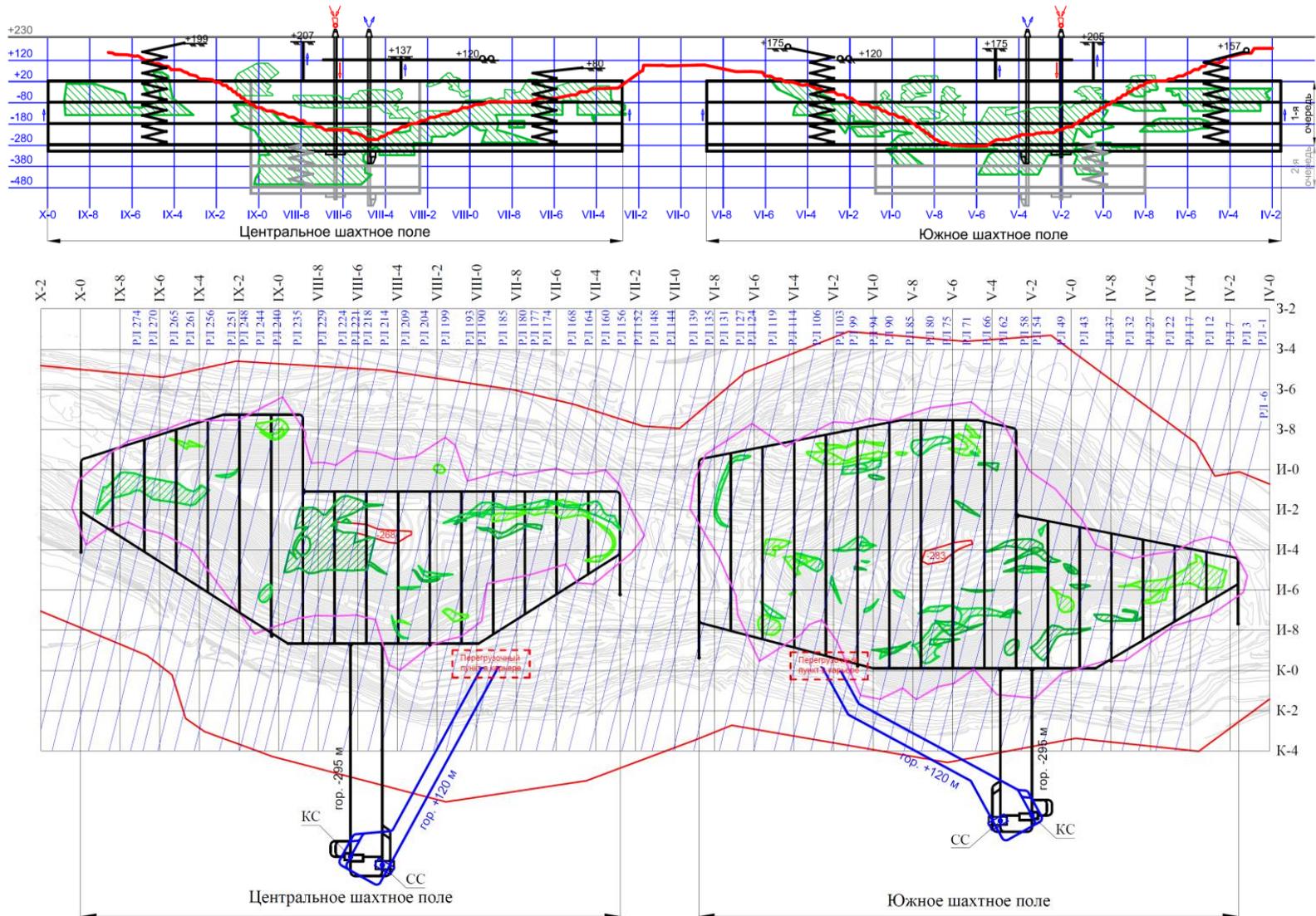


Рис. 1. Схема вскрытия запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения: б – вариант 2
Fig. 1. Scheme of opening of reserves of Bazhenov deposit outside the project outline of the quarries: б – option 2

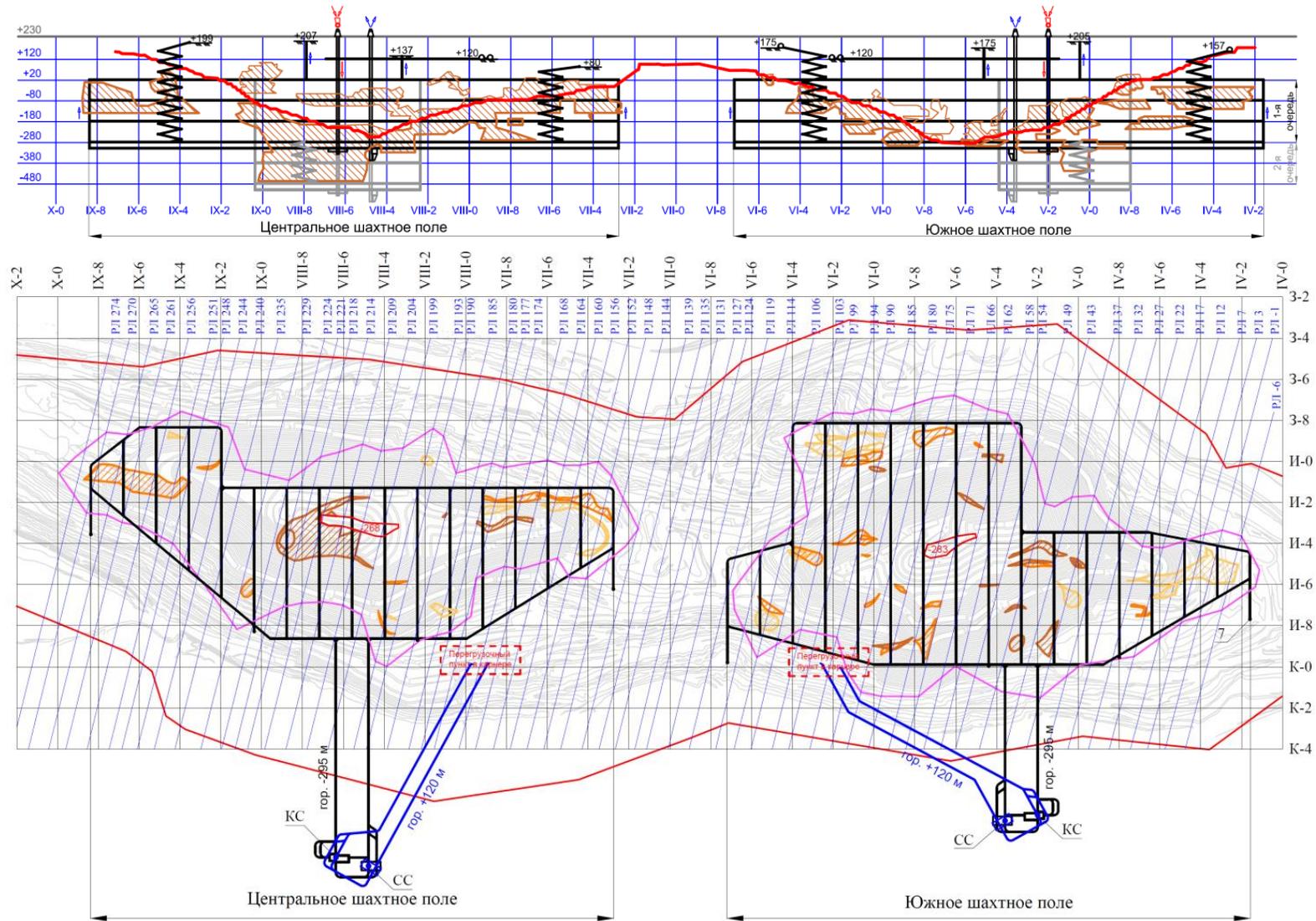


Рис. 1. Схема вскрытия запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения: в – вариант 3
 Fig. 1. Scheme of opening of reserves of Bazhenov deposit outside the project outline of the quarries: в – option 3

Выполнена укрупненная экономическая оценка целесообразности доработки Баженовского месторождения хризотил-асбеста комбинированным способом по методике, изложенной в "Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов"¹. В качестве основных оценочных показателей приняты:

– чистая прибыль – часть балансовой прибыли после уплаты налогов и других обязательных платежей в бюджет. Балансовая прибыль определяется как разница между выручкой от реализации продукции и себестоимостью продукции (без учета капитальных вложений);

– чистый дисконтированный доход (ЧДД) – сумма дисконтированных значений потока платежей, определяемого как разность между денежными притоками и оттоками, приведенными к единому моменту времени. Притоки денежных средств определяются выручкой от реализации товарной продукции, оттоки денежных средств – суммой капитальных и эксплуатационных затрат на добычу и обогащение руды, определенных с использованием данных комбината "Ураласбест" и предприятий-аналогов.

Выручка от реализации товарной продукции определена, исходя из количества асбеста, рассчитанного с учетом его выхода при добыче и обогащении, и цены реализации.

Капитальные затраты определены прямым суммированием затрат на горно-капитальные работы и приобретение технологического оборудования, необходимых для ввода в эксплуатацию обеих шахт и отработки запасов шахтных полей, а также затрат на строительство надшахтных зданий, сооружение инженерных сетей, реконструкцию транспортных коммуникаций и прочее.

Эксплуатационные затраты, связанные с производством асбеста, определены прямым суммированием затрат на добычу руды подземным и открытым способами, транспортирование добытой руды железнодорожным транспортом до ОФ, переработку добытой руды на ОФ.

Основные технико-экономические показатели по вариантам подземной геотехнологии приведены в таблице. Результаты оценки эффективности инвестиционного проекта по критерию чистого дисконтированного дохода (ЧДД) с учетом ОГР в пределах имеющихся мощностей обогащательного производства показаны на рис. 3. В качестве единого момента оценки принят 2026 г. Норма дисконта принята равной 12 % (на основе исследований SRK Consulting (Russia) Ltd).

Таблица. Основные технико-экономические показатели вариантов подземной геотехнологии
Table. Main technical and economic indicators of options for underground geotechnology

Показатель	Ед. изм.	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Промышленные запасы:				
– ОГР	млн т	0	48,0	60,0
– ПГР	млн т	201,8	97,5	58,9
Среднее содержание асбеста в промышленных запасах:				
– ОГР	%	2,25	2,25	2,25
– ПГР	%	3,3	4,0	4,4
Потери руды:				
– ОГР	%	0	6,0	6,0
– ПГР	%	14,1	47,9	47,4
Разубоживание руды:				
– ОГР	%	0	6,0	6,0
– ПГР	%	19,1	5,4	6,1
Эксплуатационные запасы:				
– ОГР	млн т	0	48,0	60,0
– ПГР	млн т	214,2	53,7	33,0
Производственная мощность подземного рудника	млн т/год	12	6	4
Объем горно-капитальных работ	млн м ³	3,1	2,7	2,4
Производительность труда	т/чел.-смену	145	105	100
Срок ввода шахты в эксплуатацию	лет	7,6	6,5	5,5
Срок отработки запасов	лет	22,5	11,8	12,4
Продолжительность периода совмещения ОГР и ПГР	лет	0	7	7
Объем асбеста:				
– ОГР	тыс. т	0	1 260	1 530
– ПГР	тыс. т	7 069	2 148	1 452

¹ Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция) : утв. Министерством экономики РФ; Министерством финансов; ГК по строительству, архитектуре и жилищной политике от 21.06.1999 № ВК 477. М., 2000. 423 с.

Общая выручка	млрд руб.	318,1	145,3	126,1
Капитальные затраты	млрд руб.	28,4	23,5	21,8
Эксплуатационные затраты	млрд руб.	217,2	83,7	63,9

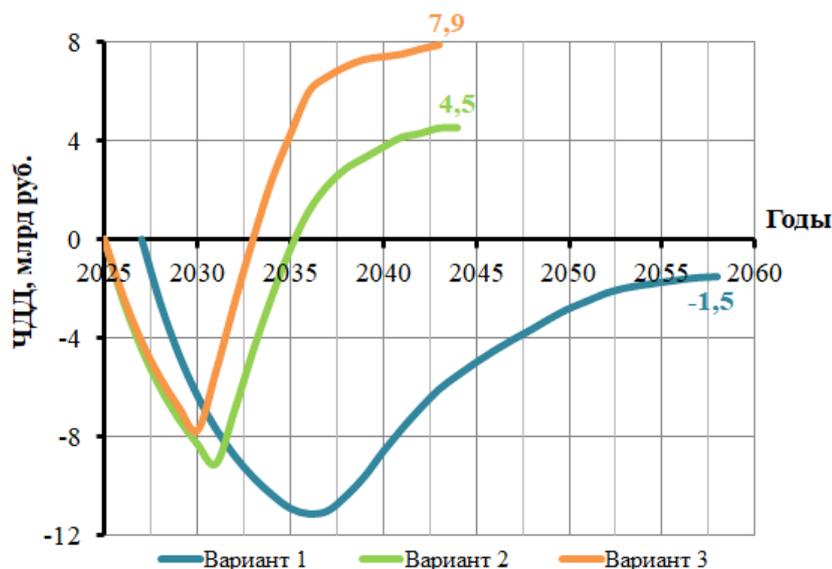


Рис. 3. График ЧДД нарастающим итогом по вариантам подземной геотехнологии
 Fig. 3. Graph of net present value (NPV) is cumulative by options for underground geotechnology

Анализ полученных результатов показал следующее:

– предложенные технические и организационные решения по вскрытию и отработке запасов за проектным контуром карьеров Баженовского месторождения ориентированы на применение современных высокоэффективных технологий и обеспечивают приемлемый уровень затрат на добычу руды;

– соотношение объемов выручки и текущих эксплуатационных затрат в операционной деятельности позволяет говорить о возможности извлечения нормальной прибыли (без учета капитальных вложений) по всем трем вариантам: среднегодовая чистая прибыль – 3,5–4,0 млрд руб.;

– реализация проекта требует весьма значительных инвестиций: общий объем капитальных вложений – 21,8–28,4 млрд руб., в том числе первоначальных – 9,4–14,8 млрд руб. Финансирование проекта может быть осуществлено только за счет заемных средств;

– расчетные значения критерия ЧДД (с учетом капитальных вложений) позволяют утверждать, что проект в нынешних условиях спроса и цены на продукцию комбината по варианту 3 является наиболее эффективным: ЧДД – 7,9 млрд руб., индекс доходности – 0,84, срок окупаемости – 7,4 лет.

Реализация проекта, помимо извлечения прибыли инвестором, обеспечивает достижение следующих целей: поддержание сырьевой базы и продление срока службы комбината "Ураласбест" на 8 лет без расширения границ горного отвода, поддержание уровня занятости населения и обеспечение социальной стабильности в г. Асбест, уплата налогов в бюджеты разных уровней.

Заключение

В результате исследования установлено, что комбинированная разработка Баженовского месторождения хризотил-асбеста, характеризующегося невысокой ценностью добываемой руды, технически возможна и экономически целесообразна при реализации параллельной схемы с отработкой подземным способом запасов со средним содержанием асбеста 4,4 %, что обеспечивается применением современных высокоэффективных подземных геотехнологий. Это позволяет расширить сырьевую базу и продлить срок службы градообразующего предприятия на 8 лет.

Благодарности

Исследования выполнены в рамках госзадания № 075-00408-26-00, № гос. рег. 125070908257-0. Тема 1 (2025–2027) "Методология обоснования перспектив технологического развития комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов твердых полезных ископаемых России" (FUWE-2025-0001).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Булатов К. В., Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С. [и др.]. Новые технологические решения разработки кимберлитовых месторождений Якутии. Екатеринбург, 2022. 544 с.
- Гибадуллин З. Р., Калмыков В. Н., Петрова О. В. Технологические схемы транспортирования рудной массы при подземной отработке приконтурных запасов карьеров. Магнитогорск, 2016. 159 с.
- Громов Е. В. Цифровая трансформация технологических процессов подземных горных работ: ретроспективный анализ и мировой опыт // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 90–108. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-90-108>. EDN: AZQVDD.
- Демидов Ю. В., Звонарь А. Ю. Методические принципы проектирования схем вскрытия при комбинированной технологии разработки рудных месторождений // Горный журнал. 2009. № 6. С. 57–59. EDN: KWVCEP.
- Казикаев Д. М. Комбинированная разработка рудных месторождений. М. : Горная книга, 2008. 361 с.
- Каплунов Д. Р., Калмыков В. Н., Рыльникова М. В. Комбинированная геотехнология. М. : Руда и металлы, 2003. 558 с.
- Корнилков С. В., Харисов Т. Ф., Масальский Н. А., Коптяков Д. А. Исследование физико-механических свойств пород прибортового массива карьера ПАО "Ураласбест" // Проблемы недропользования. 2025. № 1(44). С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>. EDN: RZQVWR.
- Лейзерович С. Г., Помельников И. И., Сидорчук В. В., Томаев В. К. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / под ред. Д. Р. Каплунова. М. : Горная книга, 2012. 547 с.
- Никитин И. В. Исследование схем вскрытия подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 262–274. EDN: CXIKQG.
- Пуненков С. Е., Козлов Ю. С., Пуненков Н. С. Добыча и обогащение хризотилсодержащих руд // Горный журнал. 2024. № 4. С. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.04.05>. EDN: UBFBNB.
- Соколов И. В., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. Методология выбора подземной геотехнологии при комбинированной разработке рудных месторождений / под общ. ред. И. В. Соколова. Екатеринбург, 2021. 340 с.
- Соколов И. В., Смирнов А. А., Антипин Ю. Г., Никитин И. В. [и др.]. Об эффективности подземной разработки Тарыннахского и Горкитского железорудных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 3(47). С. 5–11. EDN: SMWLMJ.
- Яковлев В. Л., Корнилков С. В. Геотехнологические проблемы и особенности ведения горных работ на глубоких карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S56. С. 54–66. EDN: VGHNLV.
- Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Соколов И. В. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 2018. 360 с.
- Flores G., Catalan A. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11, Iss. 3. P. 549–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>.
- Li J.-g., Zhan K. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering. 2018. Vol. 4, Iss. 3. P. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.
- Sánchez F., Hartlieb P. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020. Vol. 37. P. 1385–1399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-11>.

References

- Bulatov, K. V., Dik, Ju. A., Kotenkov, A. V., Tankov, M. S. et al. 2022. New technological solutions for the mining of kimberlite deposits in Yakutia. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Gibadullin, Z. R., Kalmykov, V. N., Petrova, O. V. 2016. Technological schemes of ore mass transportation during underground mining of open-pit reserves. Magnitogorsk. (In Russ.)
- Gromov, E. V. 2020. Digital transformation of technological processes of underground mining operations: A retrospective analysis and world experience. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 8, pp. 90–108. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-90-108>. EDN: AZQVDD. (In Russ.)
- Demidov, Yu. V., Zvonar, A. Yu. 2009. Methodological principles for designing opening schemes in combined mining technology for ore deposits. *Gornyi Zhurnal*, 6, pp. 57–59. EDN: KWVCEP. (In Russ.)
- Kazikaev, D. M. 2008. Combined mining of ore deposits. Moscow. (In Russ.)
- Kaplunov, D. R., Kalmykov, V. N., Ryl'nikova, M. V. 2003. Combined geotechnology. Moscow. (In Russ.)
- Kornilkov, S. V., Kharisov, T. F., Masal'skij, N. A., Koptjakov, D. A. 2025. Research of the physico-mechanical properties of rocks of the nearboard array of the quarry of PJSC "Uralasbest". *Problems of Subsoil Use*, 1(44), pp. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2025.01.016>. EDN: RZQVWR. (In Russ.)
- Lejzerovich, S. G., Pomel'nikov, I. I., Sidorchuk, V. V., Tomaev, V. K. 2012. Resource-producing waste-free geotechnology for the integrated development of deposits in the Kursk Magnetic Anomaly. Moscow. (In Russ.)

- Nikitin, I. V. 2024. Research of schemes for opening of sub-pit reserves of kimberlite deposits. *Izvestija Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*, 2, pp. 262–274. EDN: CXIKQG. (In Russ.)
- Punenkov, S. E., Kozlov, Yu. S., Punenkov, N. S. 2024. Mining and processing of chrysotile-bearing ore. *Mining Journal*, 4, pp. 36–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.04.05>. EDN: UBFBNS. (In Russ.)
- Sokolov, I. V., Antipin, Yu. G., Nikitin, I. V. 2021. Methodology for the selection of underground geotechnology in the combined mining of ore deposits. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Sokolov, I. V., Smirnov, A. A., Antipin, Yu. G., Nikitin, I. V. et al. 2014. On the effectiveness of underground mining of Tarynnakh and Gorkit iron ore deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 3(47), pp. 5–11. EDN: SMWLMJ. (In Russ.)
- Yakovlev, V. L., Kornilkov, S. V. 2015. Geotechnological problems and features of mining operations in deep quarries. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S56, pp. 54–66. EDN: VGHNLV. (In Russ.)
- Yakovlev, V. L., Kornilkov, S. V., Sokolov, I. V. 2018. Innovative basis of the strategy of complex development of mineral resources. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Flores, G., Catalan, A. 2019. A transition from a large open pit into a novel "macroblock variant" block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), pp. 549–561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>.
- Li, J.-g., Zhan, K. 2018. Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment. *Engineering*, 4(3), pp. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.
- Sánchez, F., Hartlieb, P. 2020. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, pp. 1385–1399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00262-11>.

Сведения об авторах

Антипин Юрий Георгиевич – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, канд. техн. наук;
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Yuriy G. Antipin – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: geotech@igduran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3564-0310>

Никитин Игорь Владимирович – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: geotech910@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Igor V. Nikitin – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;
e-mail: geotech910@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3593-4319>

Соломенн Юрий Михайлович – ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, Россия, 620075;
Институт горного дела Уральского отделения РАН, науч. сотрудник;
e-mail: yuriysolo@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>

Yuriy M. Solomein – 58 Mamina-Sibiryaka Str., Ekaterinburg, Russia, 620075;
Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Researcher;
e-mail: yuriysolo@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8226-6894>

Повышение безопасности труда процессов очистных работ при разработке пологих маломощных рудных месторождений

А. Н. Любин

Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: a.lyubin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8033-1309>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
03.02.2025;

получена
после доработки
10.03.2025;

принята
к публикации
17.03.2025

Ключевые слова:

пологие маломощные
рудные месторождения,
технология очистной
выемки, парные заходки,
процессы очистных
работ,
самоходное
технологическое
оборудование,
техничко-экономический
анализ

Для цитирования

В работе рассматривается одна из острых проблем горнорудной промышленности – механизация процессов очистных работ при разработке пологих маломощных рудных месторождений. Применение мобильных комплексов самоходного технологического оборудования (СТО) с использованием традиционных схем очистной выемки ограничено требованием обеспечения ценности извлекаемых запасов, близкой по значению их балансовой ценности. В качестве технического решения этой задачи можно использовать раздельную (селективную) выемку рудной массы и породы. Для повышения эффективности такой технологии очистных работ рассмотрена селективная выемка парными заходками с подрывом вмещающих пород почвы во второй заходке. Рассмотренное техническое решение технологии разработки парными заходками характеризуется как самостоятельное направление совершенствования систем разработки пологих маломощных месторождений. Для условий рудника "Карнасурт" были рассчитаны затраты выполнения процессов отбойки и доставки рудной массы в каждом из двух рассматриваемых вариантов очистной выемки – с использованием СТО и переносного технологического оборудования (ПТО). При этом вариант с применением СТО рассмотрен с шириной первой заходки 3,5 и 7,0 м, а второй заходки в обоих случаях – 3,5 м. Анализ выполненных расчетов показал, что при очистной выемке парными заходками увеличение ширины первой заходки в два раза, без изменения ширины второй заходки, позволит сократить разницу между затратами процессов отбойки и доставки технологий с применением СТО и ПТО соответственно на 5 и 6 %.

Любин А. Н. Повышение безопасности труда процессов очистных работ при разработке пологих маломощных рудных месторождений. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-101-110>.

Increase of labor safety processes of underground mining during development of flat thin ore deposits

Alexander N. Lyubin

Mining Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: a.lyubin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8033-1309>

Article info

Received
03.02.2025;

received
in revised form
10.03.2025;

accepted
17.03.2025

Key words:

flat thin ore bodies,
technology of stoping
excavation, double cut,
processes of stoping
excavation,
self-propelled
technological equipment,
technical and economic
analysis

For citation

Abstract

The paper considers one of the acute problems of the mining industry – the mechanization of mining processes during the development of flat thin ore deposits. The use of mobile complexes of self-propelled technological equipment (SPTE) using traditional stoping excavation schemes is limited by the requirement to ensure the value of extracted reserves close to their balance value. As a technical solution to this problem, selective excavation of ore mass and rock can be used. To increase the efficiency of this mining technique, selective excavation by double-cut stoping with blasting of the soil waste rock in the second cut has been considered. The given technical solution of the mining technology by double-cut stoping is characterized as an independent direction for improving the mining methods of flat thin ore deposits. For the conditions of the Karnasurt mine, the cost of performing the processes of blasting and ore mass haulage in each of the two considered options for stoping excavation has been calculated. At the same time, the option using of the SPTE complex has been considered with the width of the first cut of 3.5 and 7.0 m, and the second cut in both cases – 3.5 m. An analysis of the calculations performed has shown that doubling the width of the first cut makes it possible to reduce the cost difference between the blasting and haulage processes in the compared variants by 5 and 6 %.

Lyubin, A. N. 2026. Increase of labor safety processes of underground mining during development of flat thin ore deposits. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 101–110. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-101-110>.

Введение

Развитие современной технологии подземной добычи руд в основном ориентировано на применение мобильных комплексов самоходного технологического оборудования (СТО), что позволяет существенно интенсифицировать горные работы и минимизировать объемы ручного труда. Применение подобной техники и технологии для разработки рудных месторождений от средней мощности и выше на строящихся и реконструируемых рудниках является глубоко изученным вопросом. Использование же переносного технологического оборудования (ПТО) с большим объемом тяжелого ручного труда в настоящее время сохраняется лишь при очистной выемке маломощных и тонких рудных тел со сложной морфологией и высоким содержанием полезных компонентов. В большинстве случаев содержание полезного компонента в разрабатываемых тонких и маломощных месторождениях значительно выше, чем в месторождениях, которые представлены мощными рудными телами. Например, отношение содержания полезного компонента в них составляет соответственно для олова 5 : 1, вольфрама – 3,2 : 1, молибдена – 2,2 : 1, драгоценных металлов – 2 : 1 (*Михайлов и др., 2008; Чабан, 2022*).

Поэтому достижение высоких показателей полноты и качества извлекаемых балансовых запасов и обеспечение высокой степени безопасных условий труда с минимальной себестоимостью добычи одной тонны руды при разработке такого типа месторождений является актуальной задачей.

Из анализа отечественного и зарубежного опыта разработки маломощных пологих рудных месторождений следует, что совершенствование технологии добычи и выполнение ее основных процессов происходит по следующим двум направлениям: выемка сплошным забоем, которая обеспечивает полноту извлечения полезного ископаемого, и раздельная (селективная) выемка руды и породы, при которой достигается качество добытой рудной массы. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и недостатки.

Выемка сплошным забоем в исполнении проще, чем селективная, и позволяет в определенных горно-геологических условиях использовать более мощное СТО, чем ПТО в очистных выработках и тем самым повысить производительность труда и снизить себестоимость добычи одной тонны рудной массы.

Селективная выемка является более сложной в организации производственного процесса, чем выемка сплошным забоем, так как возникает необходимость доставлять и транспортировать рудную массу и породу разными потоками. Эта технология добычи требует дополнительных затрат во всех вариантах систем разработки как с применением ПТО, так и СТО. Основным преимуществом применения СТО в этом случае является его высокая мобильность при выполнении всех технологических процессов очистных работ и возможность повысить вариативность конструктивных элементов в системах разработки с селективной выемкой балансовых запасов и вмещающих пород.

Следует заметить, что очистная выемка всех систем подземной разработки включает следующие технологические процессы: отбойка, доставка и управление горным давлением. В рассмотренных направлениях совершенствования технологии добычи полезных ископаемых пологих маломощных месторождений их можно выполнять как из очистного пространства, так и из нарезных выработок (*Голик и др., 2018; Голик и др., 2019*). При этом нарезные и очистные выработки по мере продвижения очистного забоя образуют единое пространство, в результате чего из нарезных выработок производится выполнение только процесса отбойки. Выполнение двух других процессов – доставка и управление непосредственной кровлей – производится в едином пространстве. В результате две части горнорабочих очистного забоя (ГРОЗ) выполняют процессы очистных работ в разных условиях. ГРОЗ процесса отбойки ведут работы из нарезной выработки и находятся в условиях небольшого пролета по кровле, которая при необходимости может быть закреплена анкерной крепью, что позволяет им находиться в относительно безопасных условиях. ГРОЗ процессов доставки и управления непосредственной кровлей ведут работы уже в очистном пространстве и, находясь в стесненном (ограниченном) пространстве, подвергаются опасности получить травмы разной степени тяжести, иногда даже со смертельным исходом, в результате отслоений и вывалов пород кровли. Такая же участь уготовлена взрывнику, который в силу необходимости вынужден заходить в зону произошедших обрушений для ликвидации негабарита из отслоившихся и вывалившихся пород кровли.

Таким образом, использование нарезных выработок для выполнения процессов очистных работ в условиях разработки пологих маломощных месторождений не позволяет избежать присутствия горнорабочих в очистном пространстве и является ошибочным представлением о создании безопасных условий труда в очистных забоях. При этом время пребывания ГРОЗ в опасной зоне не может рассматриваться как фактор, влияющий на безопасность ведения горных работ в очистных выработках, так как частота вывалов и отслоений пород кровли не происходит с заданной регулярностью, а происходит непредсказуемо, особенно в условиях динамически напряженного состояния массива. Все рекомендации по поддержанию кровли очистного пространства в стесненных условиях, которые успешно применяются, когда горнорабочий имеет возможность их выполнять в полный рост, здесь обретают повышенную опасность. Это является одной из весомых причин распространенности камерно-столбовой системы разработки пологих маломощных месторождений, так как естественное поддержание пород кровли в процессе продвижения фронта очистных работ в блоке позволяет предотвратить преждевременное расслоение и ослабление сцепления в замковой части трещиноватых пород кровли. Даже при таком преимуществе камерно-столбовой системы с позиций безопасности ведения

горных работ, по сравнению с другими (сплошной или с искусственным креплением), возникает необходимость крепить участки месторождения с неустойчивыми породами кровли анкерной крепью. Следовательно, все процессы очистных работ в этом случае ГРОЗ вынуждены выполнять, находясь в очистном пространстве, поэтому в конструктивных элементах систем разработки пологих маломощных и тонких месторождений в первую очередь необходимо предусмотреть создание безопасных и эргономичных условий труда для своевременного выполнения процесса крепления.

Цель работы – исследование влияния конструктивных элементов системы разработки и их параметров на показатели процессов отбойки и доставки при совершенствовании технологии очистной выемки парными заходками пологих маломощных рудных месторождений.

Совершенствование подземной технологии очистной выемки пологих маломощных рудных залежей на основе использования парных заходок

Существующие технические решения для повышения эффективности разработки (применение производительного самоходного оборудования, использование раздельной выемки рудной массы и вмещающих пород и их сортировку взрывом, создание относительно безопасных условий выполнения всех процессов очистных работ) можно успешно реализовать комбинированием селективной и валовой выемкой пологих маломощных месторождений.

Для исследования такого подхода к повышению эффективности разработки пологих маломощных месторождений был разработан способ отбойки, который предусматривал разнонаправленное взрывание рудного массива с подрыванием вмещающих пород почвы и размещением рудной и породной масс в разных зонах очистного пространства.

Экспериментальные работы с целью исследования процесса отбойки с селективной выемкой рудной массы и вмещающих пород почвы в заходке проводились на руднике "Умбозеро" (Ловозерский ГОК). Испытания включали серию опытов из девяти наблюдений, по результатам которых было установлено, что величина разубоживания при селективной отбойке руды и породы с их разнонаправленными взрывами за один прием, по сравнению с валовой выемкой, снизилась в 4,9 раза и составила 3,0 % (Любин и др., 1998).

В связи с остановкой работы рудника "Умбозеро" и последующей мокрой его консервацией в 90-е годы XX в. далее такие исследования не проводились.

В последующем испытанный вариант очистной выемки разработки был усовершенствован и дополнен другим техническим решением. В нем предусматривалось использовать комбинирование селективного и валового способов очистной выемки на базе конструктивного элемента системы разработки как парные заходки (рис.). На рисунке показана схема выемки балансовых запасов в очистной выработке парными заходками: 1, 2 – первая и вторая заходки в парной заходке соответственно; 3 – анкерная крепь; 4 – рудная залежь; 5 – ось выработки; 6 – контур технологического оборудования; 7, 8 – направление бурения в парной заходке соответственно в первой и второй заходках; 9, 10 – направление перемещения отбитой рудной массы энергией взрыва соответственно из первой и второй заходок; 11 – общее направление перемещения отбитой рудной массы энергией взрыва из парной заходки в смежную; S_1, S_2 – отбиваемая за цикл площадь рудной залежи в первой и второй заходках соответственно, м²; $B_1 = l_{CK} \cdot \cos \alpha$ – ширина первой заходки, м; l_{CK} – длина скважины малого диаметра в первой заходке, м; α – угол падения рудной залежи, град; $B_2 = b_{mo} + 2\Delta_b$ – ширина второй заходки; b_{mo} – ширина самоходного технологического оборудования (СТО); Δ_b – минимальный размер зазоров между стенками траншеи и вертикальной плоскостью максимально выступающей части СТО; $h_{то}$ – высота СТО, м; Δ_h – минимальный размер зазоров между кровлей и горизонтальной плоскостью максимально выступающей части СТО, м.

Из анализа рисунка следует, что основная идея этого технического решения разработки маломощных пологих и наклонных рудных залежей заключается в том, что в первой заходке производится только очистная выемка полезного ископаемого, а во второй – очистная выемка с созданием траншеи для передвижения самоходных горных машин. Процесс отбойки руды в границах мощности месторождения в обеих заходках и вмещающих пород во второй заходке производится за один прием с раздельным размещением рудной массы и отбитых вмещающих пород. Рудная масса располагается в траншее предыдущей парной заходки, а вмещающие породы – в траншее смежной проводимой парной заходки, где вслед за продвижением забоя в кровле устанавливается анкерная крепь на участках месторождения с неустойчивыми породами кровли¹.

Рассмотренное техническое решение технологии разработки парными заходками характеризуется как самостоятельное направление совершенствования систем разработки пологих маломощных месторождений. В этом техническом решении отработка первой заходки производится только сплошным забоем в границах контура рудной залежи, а второй – с селективной выемкой полезного ископаемого в тех же контурах с подрывом пород почвы. Таким образом, сформировано комбинированное направление очистной выемки пологих маломощных месторождений, которое с увеличением мощности рудной залежи может легко трансформироваться в направление совершенствования технологии разработки парными заходками со сплошным

¹ Способ разработки маломощных пологих и наклонных рудных залежей : пат. № 2068092 Рос. Федерация / Любин А. Н., Боборыкин В. Н., Киреев Г. П., Ферулев Д. П. ; заявл. 26.06.89 ; опубл. 20.10.96, Бюл. № 29.

забоем и обратно в случае, когда происходит уменьшение ее мощности, т. е. повышается вариативность конструкции системы разработки сложно-структурных участков месторождения. Использование же высокопроизводительного самоходного оборудования для выполнения процессов очистных работ с минимальным разубоживанием отвываемых объемов рудной массы и сокращения объемов извлечения пород позволит достичь экономического эффекта при использовании комбинированной очистной выемки пологих тонких и маломощных месторождений по сравнению с двумя другими направлениями, когда применяется только селективная или только валовая выемка. При этом дополнительный экономический эффект может быть получен при обогащении добытой рудной массы за счет снижения объемов ее переработки для получения одной тонны концентрата.

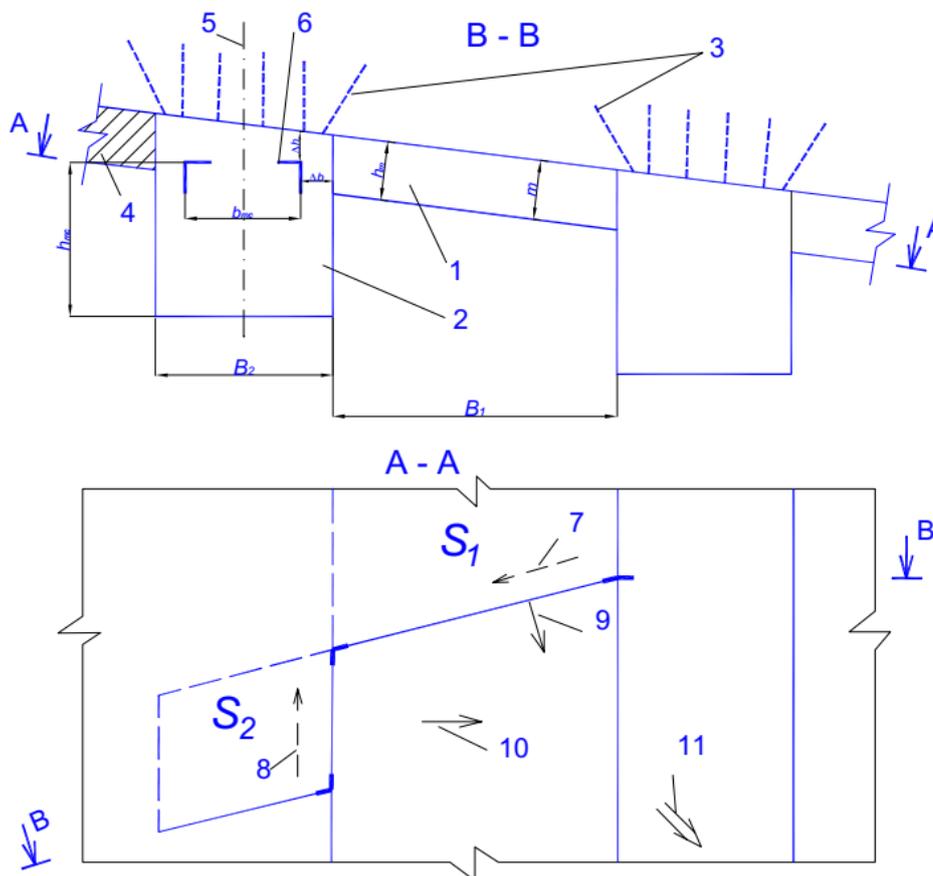


Рис. Схема выемки балансовых запасов в очистной выработке парными заходками
Fig. The scheme of excavation of balance reserves in the stope by double cut

Кроме того, своевременная установка анкерного крепления на участках месторождения с неустойчивыми породами кровли, расположенными вдоль траншеи, создает относительно комфортные и безопасные условия труда ГРОЗ для выполнения остальных процессов очистных работ.

Действующими нормами и правилами комфортная и безопасная высота горных выработок в местах передвижения горнорабочих должна быть не менее 1,8 м.

Дополнительная высота подрыва вмещающих пород почвы в траншее должна удовлетворять следующему неравенству:

$$\text{если } (h_{то} + \Delta_h + m/\cos\alpha) \geq (1,8), \text{ то } \Delta h_{ПП} = 0,$$

где m и α – мощность и угол падения рудной залежи, м и град; $h_{то}$ – высота технологического оборудования, м; Δ_h – минимальный размер зазоров между кровлей и горизонтальной плоскостью максимально выступающей части технологического оборудования, регламентированный нормами и правилами, м; $\Delta h_{ПП}$ – дополнительная высота подрыва вмещающих пород почвы в траншее.

Для оценки общей величины подрыва вмещающих пород почвы в траншее как конструктивного элемента системы разработки введем параметр – коэффициент подрыва вмещающих пород в парной заходке, который определяется как отношение площади подрываемой породы к площади отвываемой руды в ней по направлению ее выемки. Это отношение можно представить в виде формулы

$$k_{ПП} = S_{ПЗ}/S_{РЗ}, \quad (1)$$

где $k_{ПП}$ – коэффициент подрыва вмещающих пород в парной заходке; $S_{ПЗ}$ и $S_{РЗ}$ – площади подрываемой породы и отвываемой рудной массы в парной заходке соответственно, м².

В соответствии с конфигурацией сечения парной заходки на рисунке и параметрами образующих ее геометрических фигур, формулу (1) можно преобразовать

$$k_{\text{ПП}} = ((2 \cos \alpha \cdot (h_{\text{то}} + \Delta_h) + (b_{\text{то}} + 2\Delta_b) \cdot \sin \alpha - 2m) \cdot (b_{\text{то}} + 2\Delta_b)) / ((2m \cdot (b_{\text{то}} + 2\Delta_b) + (L_{\text{ск}} \cdot \cos \alpha)), \quad (2)$$

где α – угол падения рудной залежи, град; $h_{\text{то}}$ – высота технологического оборудования, м; Δ_h – минимальный размер зазоров между кровлей и горизонтальной плоскостью максимально выступающей части технологического оборудования; $b_{\text{то}}$ – ширина технологического оборудования; Δ_b – минимальный размер зазоров между стенками выработки и вертикальной плоскостью максимально выступающей части технологического оборудования; m – мощность рудной залежи; $L_{\text{ск}}$ – длина скважин малого диаметра, которыми разбуривают первую заходку, м.

Следует заметить, что в процессе преобразования выражений (1) в (2) высота очистного пространства в первой заходке принята равной высоте рудной залежи $m/\cos \alpha$, а значения законтурных разрушений в обеих заходках от взрыва заряда в шпурах или в скважинах малого диаметра на данном этапе исследований не рассматриваются.

Из анализа формулы (2) следует, что при использовании комплекса с заданными параметрами коэффициент подрыва вмещающих пород в парной заходке будет зависеть от горно-геологических условий месторождения (мощности m и угла падения α) рудной залежи и от ширины первой заходки. При этом происходит подрыв вмещающих пород почвы во второй заходке и все процессы очистных работ СТО выполняет из такой заходки во всех парных заходках.

В зависимости от выбранного СТО меняется сечение второй заходки и, как следствие, будет меняться значение коэффициента подрыва почвы. При использовании самоходной буровой каретки (СБК) МУКИ FF для различных горно-геологических условий были определены значения коэффициента подрыва почвы (табл. 1). Из таблицы видно, что с увеличением угла падения рудной залежи величина коэффициента подрыва почвы тоже растет, а с увеличением ее мощности – падает.

Таблица 1. Значения коэффициента подрыва пород почвы при различном сочетании угла падения и мощности рудной залежи (для МУКИ FF)

Table 1. The values of the coefficient of soil rocks' blasting with a different combination of the incidence angle and the thickness of the ore deposit (for the MUKI FF)

Угол падения, град	Параметры рудной залежи				
	Мощность рудной залежи, м				
	0,7	1,0	1,3	1,6	1,9
10	1,558/1,036	0,941/0,626	0,609/0,406	0,402/0,267	0,260/0,173
15	1,641/1,095	0,998/0,686	0,652/0,435	0,436/0,291	0,288/0,192
20	1,743/1,151	1,070/0,703	0,707/0,462	0,481/0,312	0,325/0,209
25	1,782/1,202	1,092/0,737	0,721/0,480	0,489/0,330	0,330/0,222
30	1,840/1,251	1,129/0,768	0,747/0,508	0,508/0,345	0,344/0,234

Примечание. Значения в числителе и знаменателе соответствуют бурению скважин малого диаметра в первой заходке – 3,5 и 7,0 м.

Параметры первой заходки определяются устойчивостью пролета непосредственной кровли и точностью бурения скважин малого диаметра по заданному направлению. Из табл. 1 также видна обратно пропорциональная зависимость изменения коэффициента подрыва почвы от ширины первой заходки.

Для повышения точности настройки бурового станка по направлению бурения скважин и обеспечения параллельности их расположения в массиве была разработана конструкция станка КБУ-50ПТ и изготовлен опытный образец, испытания которого проводили на руднике "Карнасурт". Конструкция станка КБУ-50ПТ по сравнению со станком КБУ-50М включала две распорные колонны, расположенные в створе линии перемещения станка, по которым в вертикальной плоскости перемещалась подвижная траверса, а по ней в горизонтальной плоскости могла перемещаться каретка с податчиком и перфоратором (*Боборыкин и др., 1995*). Такая конструкция бурового станка позволяла с первой установки пробурить пять скважин, в дальнейшем, при перестановке станка, пятая скважина использовалась для его настройки по направлению их бурения. За счет более точного оконтуривания рудной залежи скважинами и лучшего обеспечения параллельности их расположения в массиве качество добытой рудной массы повысилось на 40 %. При этом длина зарядов выброса увеличилась в 2 раза, с 3,5 до 7 м.

В настоящее время мировой рынок представлен относительно широкой линейкой малогабаритных горных машин различного назначения². Самоходные буровые каретки (СБК) выпускаются для бурения

² URL: <http://balum.net/catalog/burenie-glubokikh-skvazhin/muki-22/> (дата обращения: 15.11.2024); <https://www.directindustry.com.ru/prod/resemin/product-139062-2085373.html> (дата обращения: 15.11.2024); <https://youtu.be/mdyQQm2Lwwc> (дата обращения: 15.11.2024); <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 15.11.2024).

шпуров диаметром от 33 до 75 мм как с фронтальным, так и веерным их расположением. При веерном расположении скважин малого диаметра максимальная глубина их бурения достигает 40 м. Малогабаритные погрузочно-доставочные машины (ПДМ) выпускаются, в основном, с емкостью ковша до 0,6 м³. Цена их на российском рынке в среднем составляет 100 и 9 млн руб. соответственно зарубежного и отечественного производства.

Для эффективного использования СБК в парных заходках необходимо, чтобы ее технические возможности позволяли бурить шпуров по направлению движения забоя парной заходки, а скважины малого диаметра – под любым углом к этому направлению. В этом случае одна СБК сможет разбивать массив для выполнения процессов отбойки и анкерного крепления. Доставку рудной массы и подрываемой породы может выполнять ПДМ любой модификации, размеры которой соответствуют сечению второй заходки.

Оценка и сравнительный анализ эффективности технологических процессов отбойки и доставки горной массы из очистных выработок при использовании комплекса СТО и ПТО для условий рудника "Карнасурт"

В настоящее время на Кольском полуострове производится добыча лопаритовых руд на участке Карнасурт Ловозерского месторождения. Действующий рудник с одноименным названием по камерно-столбовой системе разрабатывает две согласно залегающие рудные залежи со средним углом падения 10° – малинитовую и уртитовую, мощностью 0,7 и 1,0 м. При этом средняя фактическая выемочная мощность соответствует проектной и составляет 1,2 м. Некоторое время назад ее величина была равна 1,0 м.

Другие системы на руднике не применяются. В конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века проводились испытания системы разработки с открытым очистным пространством и системы с магазинированием руды. В обоих классах испытанных систем разработки отбойку полезного ископаемого в очистных забоях производили скважинными зарядами малого диаметра. Кроме длины зарядов, параметры отбойки были одинаковыми как в применявшейся технологии разработки, так и в испытывавшихся классах систем разработки.

Согласно методике проведения опытных работ для изучения закономерностей формирования высоты очистного пространства при отбойке рудной залежи изменяли также и другие параметры отбойки – сетку расположения зарядов, расстояние между рядами и в ряду их расположения, расположение верхней границы рудной залежи относительно кровли выработки, из которой разбивали рудную залежь (табл. 2).

Таблица 2. Параметры процесса отбойки при проведении опытных работ
Table 2. The parameters of the process of rock destruction during experimental work

№	Наименование показателей	Ед. изм.	Значения	
			ПТО	СТО
1	Диаметр шпуров (скважины)	мм	42	42
2	Длина шпура (скважины)	м	до 4,5	до 15
3	ЛНС	м	0,5	0,5
4	Тип ВВ	–	Амм. 6ЖВ	Грам. М
5	Удельный расход ВВ при выемочной мощности 1 м	кг/т	2,3	2,3
6	Расположение зарядов в забое	–	"змейка"	"змейка"
7	Расстояние:	м	–	–
	– между рядами зарядов	–	0,7	0,7
	– между зарядами в ряду	–	0,5	0,5
8	Угол наклона зарядов к плоскости падения рудной залежи в ряду:	град	–	–
	– верхних	–	(+)4	(+)3
	– нижних	–	(-)4	(-)3
9	Угол наклона зарядов к плоскости забоя	град	–	–
	– верхних	–	75	75
	– нижних	–	75	75
10	Величина прирезки вмещающих пород при длине заряда до 5–7 м	м	0,1	0,1
11	Разубоживание при длине заряда до 5–7 м	%	8,5	8,5
12	Дальность перемещения отбитой рудной массы зарядами 1-го ряда	м	до 30	до 30
13	До 60 % объема отбитой рудной массы располагалось от плоскости забоя на расстоянии	м	до 10	до 10

Примечание. (+)4, (-)4 и (+)3, (-)3 – углы наклона для шпуров и скважин в вертикальной плоскости, (+) и (-) – наклон в сторону выше и ниже плоскости рудной залежи.

В табл. 2 по результатам выполненных исследований приведены рациональные параметры БВР во взаимосвязи с основными факторами, влияющими на прирезку вмещающих пород. При этом процессы очистных работ применяемой и испытываемой технологий выполнялись с использованием переносного оборудования.

Вопросы геомеханики тогда не исследовались из соображений, что люди будут выведены из очистного пространства, а как поведут себя породы кровли, уже никого не интересовало. Испытанные системы разработки не оправдали ожиданий – они были опасными и неэффективными. Было установлено, что сама идея использовать такой подход является тупиковой.

В данной статье предложено использовать новый идейный подход, на основе которого независимо от мощности разрабатываемого месторождения будут созданы относительно безопасные условия для выполнения горнорабочими в полный рост всех процессов очистных работ. Это будет достигаться созданием конструктивных элементов систем разработки, имеющих защищенные современными средствами от вывалов и отслоений пород кровли места, для выполнения всех процессов очистных работ, но уже на базе использования комплекса СТО.

Использование современных низкопрофильных моделей СТО в сочетании с инновационными решениями проблем разработки пологих маломощных рудных месторождений в горнотехнической литературе еще не рассматривалось. Исследование влияния параметров конструктивных элементов технических решений для повышения безопасности труда процессов очистных работ на их показатели эффективности, по мнению авторов современной учебной литературы, является важной научной задачей.

В связи с этим для условий рудника "Карнасурт" были выполнены расчеты себестоимости выполнения процессов отбойки и доставки рудной массы в каждом из двух вариантов очистной выемки – с использованием СТО и ПТО. При этом вариант с применением комплекса СТО был рассмотрен с разными параметрами первой заходки: 3,5 и 7,0 м, а второй заходки в обоих случаях – 3,5 м. Все расчеты были выполнены для выемочной мощности 1 м, так как на период проведения опытных работ она составляла 1 м.

Объемы в парной заходке с сочетанием в ней заходок с одинаковой и разной их шириной приведены в табл. 3.

Из анализа табл. 3 видно, что увеличение ширины первой заходки в два раза сопровождается увеличением в 1,5 раза объема извлекаемой рудной массы без увеличения объема подрываемых вмещающих пород.

Таблица 3. Соотношение извлекаемых объемов горной массы парными заходками за цикл при разной ширине первой заходки

Table 3. The ratio of extracted volumes of rock mass by double cut per cycle with different widths of the first cut

Значения ширины первой заходки	Единицы измерения	Извлекаемые объемы руды и породы в парной заходке		Итого
		первая заходка	вторая заходка	
3,5 м	м ³	12,25/0	12,25/11,53	24,5/11,53
7,0 м	м ³	24,5/0	12,25/11,53	36,75/11,53

Примечание. Числитель и знаменатель значения извлекаемых объемов соответственно руды и породы.

В качестве бурового оборудования комплекса СТО была выбрана СБК МУКИ FF, а доставочного оборудования – ПДМ ПД-1Э. Для зарядания шпуров и скважин рекомендовано использовать зарядную машину (ЗМ) Ульба-400 МИ, их характеристики представлены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристика и показатели эксплуатационной производительности комплекса малогабаритного СТО для очистных работ

Table 4. Characteristics and performance indicators of the low-profile SPTE for stoping

№	Наименование характеристик	Ед. измер.	Комплекс СТО		
			СБК МУКИ FF	ПДМ ПД-1Э	Ульба-400 МИ
1	Мощность электродвигателя	кВт	15	30	129
2	Геометрические параметры:				
	– длина	м	8,33	5,29	2,07
	– ширина	м	1,05	1,00	1,00
	– высота	м	1,90	1,95	1,59
3	Емкость ковша	м ³	–	0,50	–
4	Масса	кг	7 380	2 950	1 700
5	Скорость передвижения	м/сек	2,5	1,06	2,01
6	Максимально преодолеваемый уклон	град	15	15	15
7	Длина электрического кабеля	м	100	100	–
8	Тип колесной базы	–	колесная	колесная	колесная
9	Эксплуатационная производительность по выходу горной массы при диаметре шпура 42 мм	т/ч	33,75	9,5	28,8
10	Диаметр бурения	мм	33–64	–	–

11	Глубина бурения	м	30	–	–
12	Зона бурения забоя	м ²	18,4	–	–
13	Стрела (вращение)	град	360		
14	Скорость бурения по породам крепостью 12–14 по шкале Протодяконова	м/ч	50	–	–
15	Тип заряжаемого ВВ	–	–	–	рассыпное
16	Стоимость СТО в ценах 2022 года	млн руб.	100	8,596	5,0
17	Страна-производитель	–	Китай	Россия	Россия

В комплексе СТО (табл. 4) использовано технологическое оборудование СБК иностранного производства, так как аналогичного технологического оборудования отечественного производства в настоящее время пока нет. При этом следует обратить внимание на разницу цены отечественного и зарубежного производства горного оборудования. Они друг от друга отличаются на порядок. Это может сдерживать поиск технических решений и накапливание опыта использования СТО в очистных забоях пологих маломощных месторождений. Кроме того, рудники, разрабатывающие месторождения подобного типа, проектировались под переносное оборудование, по этой причине схемы вскрытия и сечения выработок не всегда подходят для применения в них СТО, хотя бы для проведения опытно-промышленных работ. Проектные институты также не рассматривают варианты применения СТО в очистных забоях пологих маломощных месторождений, так как накоплено недостаточно информации для принятия надежных решений в новых проектах.

Для расчета затрат на выполнение процессов отбойки и доставки при использовании ПТО в аналогичных условиях была принята технология разработки месторождения по камерно-столбовой системе и прямые затраты рудника "Карнасурт" по этим процессам.

В качестве бурового оборудования комплекса ПТО была выбрана переносная буровая установка (ПБУ) "Скамейка" производства Ловозерского ГОКа, а доставочного оборудования – переносные скреперные установки (ПСУ) 55ЛС-С и 30ЛС-С.

По технологии проекта на руднике "Карнасурт" рудную массу из очистного забоя доставляют в аккумулирующую выработку лебедкой 30ЛС-С. Затем ее доставляют в рудоспуск лебедкой 55ЛС-С. Заряжание шпуров в забое производится вручную. Производительность труда звена из двух человек в тоннах руды при заряжании шпуров вручную составляет 8,5 т/чел.-ч. Характеристика и показатели производительности остального применяемого ПТО представлены в табл. 5.

Таблица 5. Характеристика и показатели производительности комплекса ПТО для очистных работ
Table 5. Characteristics and indicators of the operational performance of the stopping hauling equipment (HE)

	Наименование характеристик	Ед. измерен.	ПБУ "Скамейка"	ПСУ 55ЛС-С	ПСУ 30ЛС-С
1	Мощность электродвигателя	кВт	–	55	30
2	Геометрические параметры:	–	–	–	–
	– длина	м	3,15	1,75	1,50
	– ширина	м	0,2	1,30	0,95
	– высота	м	0,70–1,30	0,60	0,50
3	Емкость ковша	м ³	–	0,30	0,20
4	Масса	кг	75	800	650
5	Диаметр бурения	мм	33–46	–	–
6	Глубина бурения	м	до 5	–	–
7	Эксплуатационная скорость бурения пород крепостью 12–14 по шкале Протодяконова	м/чел.-ч	17,0	–	–
8	Эксплуатационная производительность по выходу горной массы при диаметре шпура 42 мм	т/чел.-ч	11,39	17,0	8,5
9	Стоимость ПТО в ценах 2022 года	млн руб.	0,5	2,5	2,0

Из анализа табл. 4 и 5 следует, что значения производительности труда ГРОЗ СТО и ПТО процесса доставки сопоставимы друг с другом и составляют соответственно 8,26 и 8,5 т/чел.-ч. Этот же показатель для процесса отбойки по выходу горной массы при бурении и заряжании шпуров у ГРОЗ СТО выше, чем у ГРОЗ ПТО в 3,0 и 3,4 раза и составляет 33,75 и 28,8 т/чел.-ч.

Затраты на одну тонну добытой горной массы по процессам отбойки и доставки приведены в табл. 6. Расчеты, приведенные в табл. 6, показали, что затраты на отбойку и доставку горной массы при использовании СТО составляют соответственно 247,88 и 107,71 руб./т, а при использовании ПТО они составляют 162,93 и 130,32 руб./т.

Таблица 6. Показатели статей затрат по процессам отбойки и доставки при применении СТО и ПТО в очистных забоях
Table 6. Costs for the processes of haulage and blasting using SPTE and HE in stopes

Статьи затрат	Единицы измерения	СТО		Всего	ПТО		Всего
		отбойка	доставка		отбойка	доставка	
Зарплата	руб./т	26,56	69,71	96,27	86,22	94,06	180,28
Амортизация	руб./т	114,82	23,0	137,82	3,35	26,29	29,64
Материалы	руб./т	104,45	6,90	111,35	72,34	7,89	10,23
Энергия	руб./т	2,05	8,1	10,15	1,01	2,08	3,09
Итого	руб./т	247,88	107,71	355,59	162,92	130,32	293,24

Из анализа результатов расчета, приведенных в табл. 6, следует, что значения затрат процессов отбойки и доставки при использовании СТО и ПТО заметно отличаются. Рост затрат на эти процессы при использовании СТО, в основном, произошел за счет более высоких значений по статьям "амортизация" и "материалы", чем при использовании ПТО.

Большое отличие затрат по статье "амортизация процесса отбойки" при использовании СТО объясняется высокой стоимостью СБК иностранного производства по сравнению с другим оборудованием этого комплекса, являющегося продукцией отечественного производства.

Таким образом, общие затраты на отбойку и доставку 1 т рудной массы при очистной выемке парными заходками с шириной каждой по 3,5 м и использовании СТО отличаются от выемки такого же объема балансовых запасов и использовании ПТО на 62,35 руб./т и составят соответственно 355,59 и 293,24 руб./т.

Из сравнения результатов расчета следует, что затраты для выполнения процессов очистных работ (отбойки и доставки) при очистной выемке парными заходками с шириной каждой по 3,5 м и использовании СТО по сравнению с использованием для выполнения этих же процессов ПТО и выемке такого же объема балансовых запасов на 21 % дороже.

Чтобы провести оценку затрат на выполнение процессов отбойки и доставки по обоим вариантам очистной выемки в равных условиях, их сравнение проводилось в режиме работы предприятия "цикл в сутки" (4 смены в сутки: бурение; доставка ВВ, зарядание и взрывание; проветривания; доставка рудной массы). Это было принято в связи с невозможностью организовать иначе режим работы в блоках рудника "Карнасурт" с использованием ПТО. Технология очистной выемки парными заходками позволяет организовать одновременно работу технологического оборудования в нескольких забоях блока и выполнять цикл в смену с проветриванием их во время междусменных перерывов. Это позволит повысить эффективность очистной выемки парными заходками.

Аналогичные расчеты были проведены при выполнении процессов отбойки и доставки при очистной выемке парными заходками с использованием в них заходок разной ширины (7,0 и 3,5 м). Выполненными расчетами установлено, что с увеличением ширины первой заходки в два раза доля затрат времени смены на перестановки СБК от забоя к забою, от скважины к скважине и переезды в течение смены бурового и доставочного оборудования в другие заходки сократилось. Это позволило снизить затраты процессов отбойки и доставки соответственно с 247,88 до 235,49 руб./т и с 107,71 до 102,32 руб./т. В этом случае общие затраты на отбойку и доставку 1 т горной массы при очистной выемке парными заходками разной ширины с использованием СТО и ПТО отличаются на 44,57 руб./т и составят соответственно 337,81 и 293,24 руб./т.

Таким образом, при очистной выемке парными заходками увеличение ширины первой заходки в два раза без изменения ширины второй заходки, позволит сократить разницу между затратами процессов (отбойка и доставка) технологий с применением СТО и ПТО соответственно на 5 и 6 % и снизить относительный показатель разницы общих затраты с 21 до 15 %.

Заключение

В статье предложено использовать новый идейный подход, на основе которого независимо от мощности разрабатываемого месторождения будут созданы относительно безопасные условия для выполнения горнорабочими в полный рост всех процессов очистных работ. Это будет достигаться созданием конструктивных элементов систем разработки, имеющих защищенные современными средствами от вывалов и отслоений пород кровли места для выполнения всех процессов очистных работ в блоке.

Использование парных заходок в очистных выработках как конструктивного элемента систем разработки пологих маломощных рудных месторождений может вывести на новый уровень обеспечение безопасных условий труда для ГРОЗ, несмотря на превышение суммарных затрат при выполнении процессов отбойки и доставки очистных работ СТО по сравнению с выполнением их ПТО. Относительный показатель разницы общих затрат снижается с 21 до 15 % соответственно для заходок с одинаковой и разной их шириной. При этом парными заходками можно вести очистную выемку в границах контура пологих маломощных

рудных залежей с использованием комплекса СТО и, тем самым, сократить затраты на стадии производства одной тонны концентрата за счет повышения ценности извлекаемых запасов полезного ископаемого.

Кроме того, в условиях возникшего дефицита ресурса рабочей силы на предприятиях отечественной промышленности, в том числе горной, повышение производительности труда процесса отбойки в очистных забоях пологих маломощных месторождений при бурении и зарядании шпуров соответственно в 3,0 и 3,4 раза имеет существенное значение для компенсации недостатка численности рабочих в горнодобывающей промышленности.

Дальнейшее совершенствование рассматриваемой технологии разработки пологих маломощных месторождений будет продолжено после завершения исследований процесса управления непосредственной кровлей в очистных выработках на руднике "Карнасурт", что позволит определить объективные показатели извлекаемой ценности балансовых запасов и затрат на добычу и обогащение рудной массы для получения одной тонны лопаритового концентрата.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Боборыкин В. Н., Бессонов И. И., Любин А. Н. Совершенствование буровой техники для скважинной отбойки лопаритовых руд // Горный журнал. 1995. № 2. С. 30–32. EDN: SJRIMF.
- Голик В. И., Лукьянов В. Г., Масленников С. А., Мельков Д. В. Повышение безопасности труда при разработке пологих маломощных залежей // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 9. С. 66–70. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-9-66-70>. EDN: XZFCTR.
- Голик В. И., Разоренов Ю. И., Дмитрак Ю. В., Кожиев Х. Х. Повышение безопасности труда при разработке пологих маломощных месторождений // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-48-53>. EDN: FWPYKO.
- Любин А. Н., Бессонов И. И., Пернацкий С. И., Уханов А. А. [и др.]. Повышение эффективности панельно-столбовой системы разработки на руднике "Умбозеро" // Горный журнал. 1998. № 4. С. 66–70. EDN: SBSCOB.
- Михайлов Ю. М., Красников Ю. Д. Ценные руды: Технология и механизация подземной разработки месторождений. М.: Академия, 2008. 256 с.
- Чебан А. Ю. Технология разработки тонких рудных тел с предварительной лазерной дезинтеграцией прочных горных пород // Прикладная физика. 2022. № 1. С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-64-69>. EDN: RBUOHW.

References

- Boborykin, V. N., Bessonov, I. I., Lyubin, A. N. 1995. Improvement of drill equipment for long hole blasting of loparite ore. *Gornyi Zhurnal*, 2, pp. 30–32. EDN: SJRIMF. (In Russ.)
- Golik, V. I., Lukyanov, V. G., Maslennikov, S. A., Melkov, D. A. 2018. Improving safety of work at the development of flat thinbeds. *Occupational Safety in Industry*, 9, pp. 66–70. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-9-66-70>. EDN: XZFCTR. (In Russ.)
- Golik, V. I., Razorenov, Yu. I., Dmitrak, Yu. V., Kozhiev, K. K. 2019. Occupational safety improvement at the development of steep shallow deposits. *Occupational Safety in Industry*, 11, pp. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-11-48-53>. EDN: FWPYKO. (In Russ.)
- Lyubin, A. N., Bessonov, I. I., Pernautskiy, S. I., Uhanov, A. A. et al. 1998. Improving the efficiency of the panel-pillar mining system at the "Umbozero" mine. *Gornyi Zhurnal*, 4, pp. 66–70. EDN: SBSCOB. (In Russ.)
- Mikhailov, Yu. V., Krasnikov, Yu. D. 2008. High value ore: Technology and mechanization of underground mining, study guide for higher education institutions. Moscow. (In Russ.)
- Cheban, A. Yu. 2022. Technology of development of thin ore bodies with preliminary laser disintegration of strong rocks. *Applied Physics*, 1, pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-1-64-69>. EDN: RBUOHW. (In Russ.)

Сведения об авторе

Любин Александр Нестерович – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, науч. сотрудник;
e-mail: a.lyubin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8033-1309>

Alexander N. Lyubin – 24 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;
e-mail: a.lyubin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8033-1309>

УДК 550.8.052

Особенности строения верхней осадочной толщи и рельефа дна Баренцева моря в прибрежной акватории полуострова Рыбачий

В. А. Путанс*, С. Л. Никифоров, Н. О. Сорохтин,
Р. А. Ананьев, Е. А. Сухих, Н. Е. Козлов

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: vitanu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-1619>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
16.10.2025;

получена
после доработки
12.01.2026;

принята
к публикации
13.01.2026

Ключевые слова:
сейсмостратиграфия,
сейсмоакустика,
волновое поле,
четвертичные
оледенения,
Баренцево море

Для цитирования

В рамках геофизических исследований строения верхней осадочной толщи и рельефа шельфов арктических морей проведена геофизическая съемка участка дна в прибрежной зоне полуострова Рыбачий (Кольский полуостров). Анализ сейсмоакустических данных выявил три сейсмических комплекса, разделенных поверхностями несогласия, условно выделенных методами сейсмостратиграфии и отражающих события четвертичного оледенения и межледниковья. Батиметрические данные позволили обнаружить множественные следы ледовой экзарации, которые имеют как современное, так и реликтовое происхождение. Внутренняя структура осадочной толщи не всегда типична для ледниковых осадков, отличается большим разнообразием и значительной латеральной изменчивостью. Кроме того, проявляются многочисленные признаки дегазации в виде покмарок, однако отсутствие газовых факелов и стабильных подводных каналов миграции свидетельствует о том, что в данный момент покмарки не активны или носят импульсный характер.

Путанс В. А. и др. Особенности строения верхней осадочной толщи и рельефа дна Баренцева моря в прибрежной акватории полуострова Рыбачий. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 111–124. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-111-124>.

Structural features of the upper sedimentary sequence and seafloor topography in the coastal waters of the Rybachy Peninsula, Barents Sea

Victoria A. Putans*, Sergey L. Nikiforov, Nikolay O. Sorokhtin,
Roman A. Ananiev, Elena A. Sukhikh, Nikolay E. Kozlov

*P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia;
e-mail: vitanu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-1619>

Article info

Received
16.10.2025;

received
in revised
12.01.2026;

accepted
13.01.2026

Key words:
seismostratigraphy,
seismoacoustics,
wave field,
quaternary ice age,
Barents Sea

For citation

Abstract

As part of geophysical studies on the structure of the upper sedimentary sequence and the topography of the Arctic seas' shelves, a geophysical survey has been conducted on a section of the seabed in the coastal zone of the Rybachy Peninsula (Kola Peninsula). The analysis of seismic-acoustic data has revealed three seismic complexes, separated by unconformity surfaces. These complexes are tentatively identified using methods of sequence stratigraphy and reflect events of Quaternary glaciation and interglacial periods. Bathymetric data have allowed for the identification of multiple traces of ice scouring, which are of both modern and relict origin. The internal structure of the sedimentary sequence is not always typical of glacial deposits but is distinguished by considerable diversity and significant lateral variability. Furthermore, numerous signs of degassing in the form of pockmarks are evident. However, the absence of gas flares and stable migration pathways suggests that these pockmarks are currently inactive or of an impulsive nature.

Putans, V. A. et al. 2026. Structural features of the upper sedimentary sequence and seafloor topography in the coastal waters of the Rybachy Peninsula, Barents Sea. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 111–124. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-111-124>.

Введение

Баренцево море, за исключением южной части печороморского шельфа (Nikiforov et al., 2023; Svendsen et al., 2004), расположено на верхнекайнозойском гляциальном шельфе. В его пределах развит маломощный, преимущественно четвертичный осадочный чехол, резко и несогласно перекрывающий докайнозойские толщи (Старовойтов, 1999). Специфика формирования определила состав чехла: в первичном залегании, как и на других гляциальных шельфах, наблюдаются осадки лишь последнего (верхневалдайско-голоценового) гляциоседиментационного цикла (Эпштейн, 2019; Соловьева и др., 2023). При изучении четвертичной истории и палеогеографии баренцевоморского шельфа необходим анализ четвертичных оледенений в его пределах. Материалы неглубокого инженерного бурения и полученные в ходе исследований геофизические данные подтверждают присутствие ледниковых отложений на островных и материковых центрах оледенения. Ледниковые отложения вскрыты практически всеми инженерными скважинами на шельфе (Система..., 2021; Токарев и др., 2023). Таким образом, следует считать доказанным факт значительного продвижения покровных ледников на шельф Баренцева моря (Никифоров и др., 2019). Вместе с тем остаются нерешенными вопросы о пространственном положении ледниковых комплексов, их строении, мощности и направлении движения ледниковых потоков.

Специфической особенностью шельфа является прерывистость осадочного покрова, что затрудняет сопоставление отдельных частей его разреза и приводит к значительному расхождению в выделении сейсмокомплексов (Старовойтов и др., 2002). Характерная особенность строения позднечетвертичного осадочного чехла шельфа Баренцева моря – его дискретность, т. е. значительная латеральная изменчивость состава слагающих его осадков и резкие изменения мощностей отдельных толщ. Исследования методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП) позволили разработать критерии выделения ледниковых отложений по сейсмоакустическим данным (Девдариани и др., 1993); как правило, им соответствуют участки разреза с хаотическим типом волновой картины. Расчленение разреза с характеристикой сейсмофаций представлено в работе (Musatov, 1998).

Согласно сеймостратиграфической схеме четвертичных отложений в серии работ О. Г. Эпштейна (Эпштейн и др., 2019), а также в обобщающих работах (Костин и др., 2011; Тарасов, 2015; Грушевская и др., 2023), верхневалдайские осадки составляют сеймостратиграфический комплекс III (ССК III). Они несогласно залегают на коренных мезозойских образованиях или сохранившейся участками нижневалдайской морене (ССК V) и с несогласием перекрываются позднеледниковыми гляциоморскими (ССК II) и голоценовыми морскими (ССК I) осадками. Сеймостратиграфический комплекс III латерально неоднороден и состоит из двух сейсмофаций (СФ): доминирующей СФ III-С с хаотическим типом сейсмоакустической записи и СФ III-П – с прозрачным типом волновой картины. СФ III-С включает обычную морену (с гляциодинамическими текстурами) и в незначительной мере – краевые моренные образования. Своеобразие фациального состава верхневалдайских ледниковых отложений отчетливо проявляется и в характере их накопления. Мощности преимущественно <10 м наблюдаются главным образом в зонах возле Кольского полуострова и Новой Земли, на Центральной возвышенности, Центральном плато и в Центральной впадине. В покрове верхневалдайских отложений наблюдаются и такие морфологически исключительно выразительные структурные формы, как краевые морены и субгляциальные врезы. Фациальные и структурно-морфологические элементы покрова верхневалдайских отложений возникли на разных стадиях процесса его формирования. На стадии, когда действующие в регионе ледниковые покровы функционировали как части единого сложно построенного Баренцево-Карского ледникового щита (Svendsen et al., 2004; Эпштейн и др., 2011), происходило образование морен и подледниковых каналов, формирование которых связано с подтоком субгляциальных вод из внутренних районов ледниковых щитов. Краевые морены возникли в ходе завершающей стадии образования покрова верхневалдайских отложений.

Материалы и методы

Геофизические исследования проведены с использованием профилографа Парасаунд (Parasound P70, НИС "Академик Борис Петров") и EdgeTech 3300 (НИС "Академик Николай Страхов") и многолучевого эхолота Teledyne Seabat (на НИС "Академик Николай Страхов" до 2022 г. включительно применялся мелководный эхолот RESON Seabat 8111) в юго-западной части баренцевоморского шельфа на траверзе полуострова Рыбачий. Съёмка выполнена в 2021, 2022, 2025 гг. в ходе рейсов НИС "Академик Николай Страхов" и "Академик Борис Петров" (Никифоров и др., 2022; 2023). В результате исследования получены батиметрические данные высокого разрешения и разрез рыхлых отложений глубиной ниже поверхности дна до 50 м при вертикальной разрешающей способности не хуже 2 м. Сбор и обработка батиметрических данных проводилась с применением программы PDS2000. Обработка сейсмоакустических данных выполнялась в программном пакете RadexPro. Интерпретация и построение карт изохрон проводились в специализированном пакете Kingdom Suite.

Результаты исследования

Строение рельефа морского дна

Батиметрическая съемка многолучевым эхолотом выполнена с полным перекрытием за исключением небольшого участка в восточной части исследованной зоны (рис. 1). В ходе камеральных исследований построена цифровая модель рельефа и выполнен ее геоморфометрический анализ. Глубина моря на участке исследований варьирует от 136 до 276 м. В рельефе дна четко выделяются три зоны и два типа объектов.

Зона 1, расположенная в юго-западной и южной частях полигона, имеет сравнительно небольшие глубины и представляет собой поднятие дна в сторону берега. Также небольшое поднятие в форме клинообразного вала наблюдается к востоку от центра исследованной области. Вал вытянут по оси СЗ – ЮВ, имеет ярко выраженные границы в рельефе дна и ограничен объектами типа 1 (рис. 1).

Зона 2 – ложбина – имеет форму сглаженной дуги общей ориентации СЗ – ЮВ и ограничена достаточно резкими поднятиями, на бортах которых наблюдаются объекты типа 1. Дно ложбины частично покрыто объектами типа 2 (рис. 1), их концентрация особенно увеличивается с глубин около 250 м и к СВ-берегу ложбины. Приблизительно по центру ложбины наблюдается локальное резкое понижение дна овальной формы. Дно ложбины медленно поднимается к юго-востоку и переходит в клиновидный вал зоны 1.

Зона 3 – основное ложе – сравнительно ровное дно с небольшими перепадами глубин (невысокими холмами) – осложнено объектами типа 1 в западной части и объектами типа 2 – в восточной.

Объекты типа 1 – вытянутые узкие понижения рельефа – в арктическом регионе обычно интерпретируются как борозды ледового выпахивания (*Ananyev et al., 2016; Миронюк и др., 2018*). Большинство борозд вытянуто по линиям СЗ – ЮВ, особенно в зоне 1. Однако в восточной части зоны 2 наблюдается несколько "закругленных" борозд, которые образуются при развороте ледовых масс и айсбергов. В зоне 3 борозды выражены слабо и практически не наблюдаются.

Необходимо отметить, что борозды ледового выпахивания на полигоне обнаружены практически на всем диапазоне глубин моря (от 136 до 268 м). При этом максимальная глубина, при которой происходит современное ледовое выпахивание в Баренцевом море, не превышает 180 м (*Миронюк и др., 2018*). Обнаруженные борозды ледового выпахивания на глубинах более 180 м являются реликтовыми. Вероятно, их формирование происходило под воздействием шельфовых ледников в эпохи оледенения при трансгрессии моря. Помимо этого, во время деградации покровного оледенения могли образовываться огромные айсберги, которые оказывали воздействие на дно до глубин, значительно превышающих максимальные глубины воздействия айсбергов, продуцируемых ледниками в настоящее время (*Никифоров и др., 2019*).

Объекты типа 2 – покмарки – мелкие локальные понижения рельефа округлой формы. Зона их распространения начинается на западном борту зоны 2, и далее к востоку их количество и выраженность нарастает. В отдельных местах наблюдается "слияние" покмарок, а также "наложение" объектов типа 1 и 2 друг на друга (покмарки на дне широких борозд).

Сейсмостратиграфическая характеристика

Исследованная область (рис. 1) делится на два разнесенных в пространстве полигона: А (32 профиля) и Б (12 профилей). Все профили расположены параллельно друг другу по направлению ЮЗ – СВ (см. таблицу).

На полигонах А и Б присутствует некоторое число отражающих границ, местами довольно ярких, однако ни одна из них не обладает достаточной выдержанностью и яркостью, чтобы выделить региональный рефлектор (опорный отражающий горизонт). На отдельных участках полигонов такие границы наблюдаются, но быстро "сходят на нет". Тем не менее распределение характеристик волнового поля, а также соотношение наблюдаемых акустических границ позволяют прибегнуть к методу сейсмостратиграфического анализа (*Payton, 1977; Cataneau, 2006*) и выделить две региональные поверхности несогласия.

Поверхность 1 выделяется по местам резкого изменения характеристик акустического сигнала. Поверхность представляет условный уровень, на котором вместо формирования отражающей границы происходит резкое рассеяние сигнала, и последовательность выраженных отражений сменяется зоной акустической прозрачности. Практически на всем протяжении поверхность 1 условна, за исключением районов на западе полигона А и юго-востоке полигона Б, где условно проведенная поверхность 1 встречается и сливается с подходящей снизу одной из ясно выделяемых локальных границ, выделенных внутри нижележащего "прозрачного" слоя.

Поверхность 2 в основе имеет слабый отражающий горизонт со сложным рельефом, состоящий из набора мелких отражающих площадок, которые в совокупности отмечают зону контакта двух акустически прозрачных пачек со следами слабых субпараллельных подошве границ. Ближе к западу поверхность 2 отмечает в том числе и угловое несогласие этих границ.

Таблица. Поверхности несогласия и сейсмокомплексы
Table. Unconformity surfaces and seismic complexes

Поверхность	Зона 1 (поднятия)	Зона 2 (ложбина)	Зона 3 (равнины)	
			Запад	Восток
Дно	Расчлененный рельеф, наклон к востоку (полигон А), клинообразная гряда (полигон Б), обилие борозд	Слегка волнистая вогнутая поверхность, местами наблюдаются покмарки (ближе к восточному краю)	Пологий склон от зоны 1 к зоне 2, наблюдаются отдельные борозды	Почти ровная поверхность, слегка волнистая, обилие покмарок (число увеличивается к востоку)
Сейсмокомплекс В	В большинстве случаев условно-слоистая толща из слитых воедино сильных отражений. В некоторых местах останцы слоистых сейсмофаций	Слоистость, субпараллельные границы, внутренние несогласия (выклинивания)	Выдержанная мощность, прослеживается слоистость	Выдержанная мощность, прослеживается слоистость. В местах под покмарками иногда наблюдается ослабление границ, но несильное
Поверхность 1	Проводится условно по началу зоны акустической прозрачности либо совпадает с одним из горизонтов из комплекса С. Рельеф неровный. Распадается на отдельные яркие площадки, часто теряется	Рельеф неровный. Проводится условно по выраженному переходу от слоя сильных отражений к слою акустической прозрачности		
Сейсмокомплекс С	Акустическая прозрачность со следами слабых субпараллельных подошве границ. Ближе к западу один из горизонтов сливается с поверхностью 1	Преобладает акустическая прозрачность. Выделяется несколько ярких отражающих локальных горизонтов, большая часть из которых прослеживается фрагментарно	Акустическая прозрачность со следами слабых субпараллельных подошве границ. Ближе к западу один из горизонтов сливается с поверхностью 1	Акустическая прозрачность со следами слабых субпараллельных подошве границ
Сейсмокомплекс С	–	Горизонты субпараллельны и расположены под небольшим углом (до 10°) к поверхности 2, местами сливаясь с ней	–	–
Поверхность 2	Почти не прослеживается	Распадается на отдельные яркие площадки, часто теряется	Прослеживается условно, по угловому несогласию	Почти не прослеживается
Сейсмокомплекс Ф	Преобладает акустическая прозрачность; местами наблюдаются мелкие хаотичные отражения, которые складываются в слабые отражающие горизонты, расположенные параллельно друг другу под углом 45° к поверхности 2			

Выделенные выше поверхности разделяют разрез на три сейсмических комплекса.

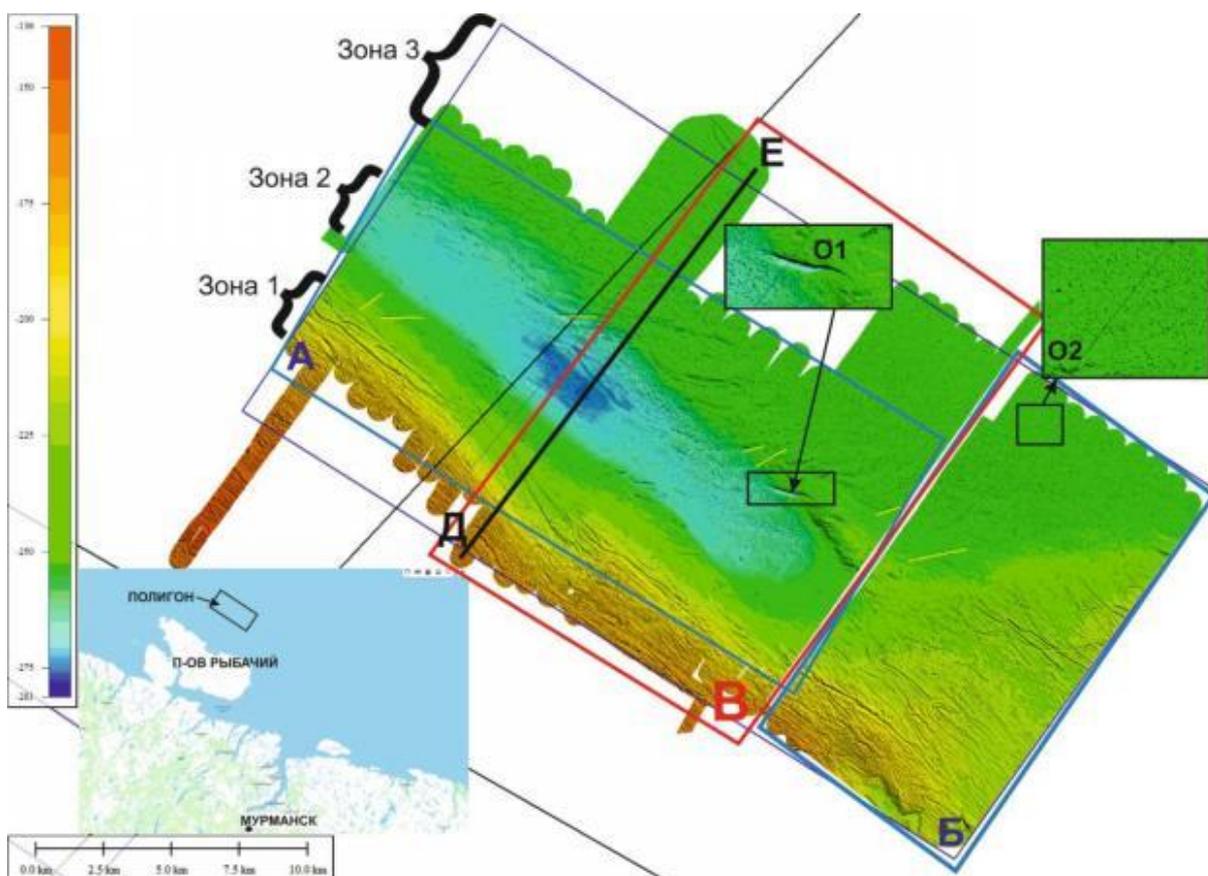


Рис. 1. Положение полигона. Цифровая модель рельефа дна полигона (Сорохтин и др., 2024, с изменениями и дополнениями): А, Б – участки полигона; В – участок полигона, на котором построены карты изохрон отражающих горизонтов (рис. 4); Д, Е – профиль Parasound [см. рис. 2; O1 – объекты типа 1; O2 – объекты типа 2]. Слева – шкала глубин

Fig. 1. Study area location. Digital elevation model of the study area seafloor (adapted from Sorokhtin et al., 2024). The depth scale is on the left. А, Б – parts of the study area; В – part of the study area where the isochron maps of the reflecting horizons were constructed (Fig. 4); Д, Е – Parasound profile shown in Fig. 2. O1 – Type 1 objects (example); O2 – Type 2 objects (example)

Сейсмокомплекс В (верхний). Кровля: современное дно. Подошва: поверхность 1. Преобладают яркие отражения. Внутренние сейсмофации видоизменяются по латерали от параллельно-слоистой толщи на востоке до хаотической на западе. Общая мощность комплекса приблизительно одинакова на всем протяжении, с локальными увеличениями (в зоне 2) и выклиниванием при контакте с объектами типа 1. Объекты типа 2 образуют мелкорасчлененный рельеф современного морского дна, и в отдельных местах под ними наблюдается ослабление сигнала.

Сейсмокомплекс С (средний). Кровля: поверхность 1. Подошва: поверхность 2. Преобладает акустическая прозрачность. Выделяется несколько ярких отражающих локальных горизонтов, большая часть из которых прослеживается фрагментарно. Горизонты субпараллельны между собой и расположены под небольшим углом (до 10°) к поверхности 2, местами сливаясь с ней. Один из горизонтов сливается с поверхностью 1.

Сейсмокомплекс Ф (акустический фундамент). Кровля: поверхность 2. Подошва: за пределами записи. Преобладает акустическая прозрачность. Местами наблюдаются мелкие хаотичные отражения, которые складываются в слабые отражающие горизонты, расположенные параллельно друг другу под углом около 45° к поверхности 2.

Пример сейсмоакустического профиля с обозначением сейсмических комплексов и разделяющих их поверхностей приведен на рис. 2. На рис. 3 показаны увеличенные фрагменты профилей для иллюстрации особенно ярких примеров угловых несогласий.

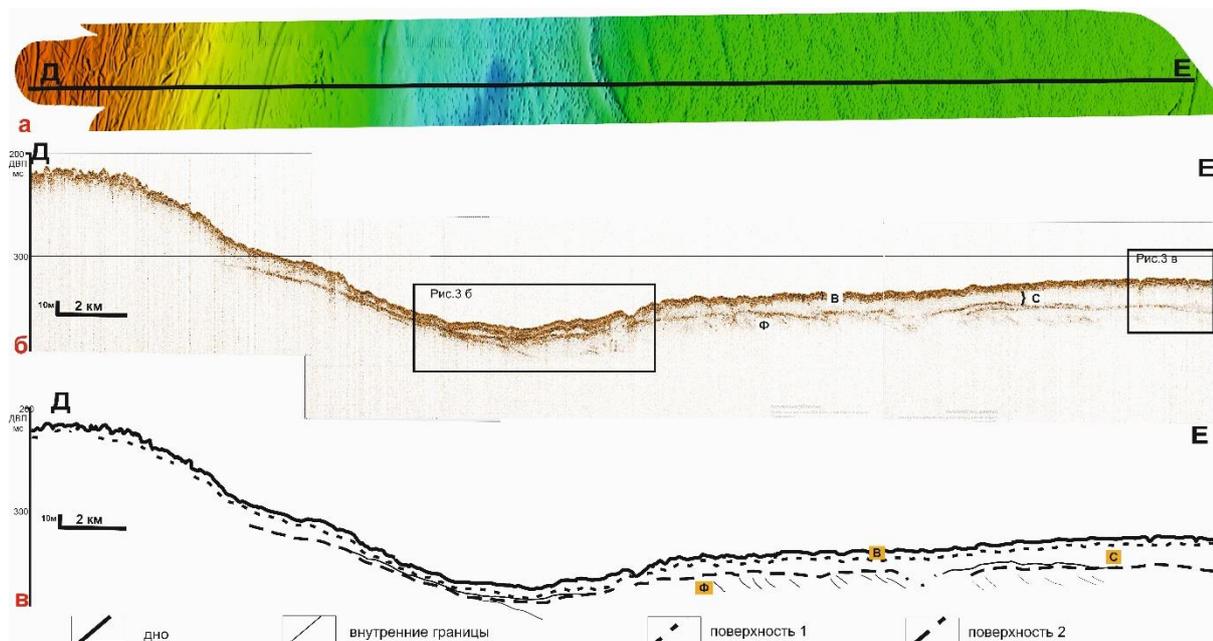


Рис. 2. Пример геофизического профиля с обозначением сейсмических комплексов (см. таблицу) и разделяющих их поверхностей: *a* – батиметрический профиль; *б* – сейсмоакустический профиль; *в* – интерпретация сейсмоакустического профиля. Положение профиля обозначено на рис. 1
 Fig. 2. An example of a geophysical profile showing the seismic complexes (Table) and the bounding surfaces: *a* – bathymetric profile; *б* – seismic-acoustic profile; *в* – interpretation of the seismic-acoustic profile. The profile location is shown in Fig. 1

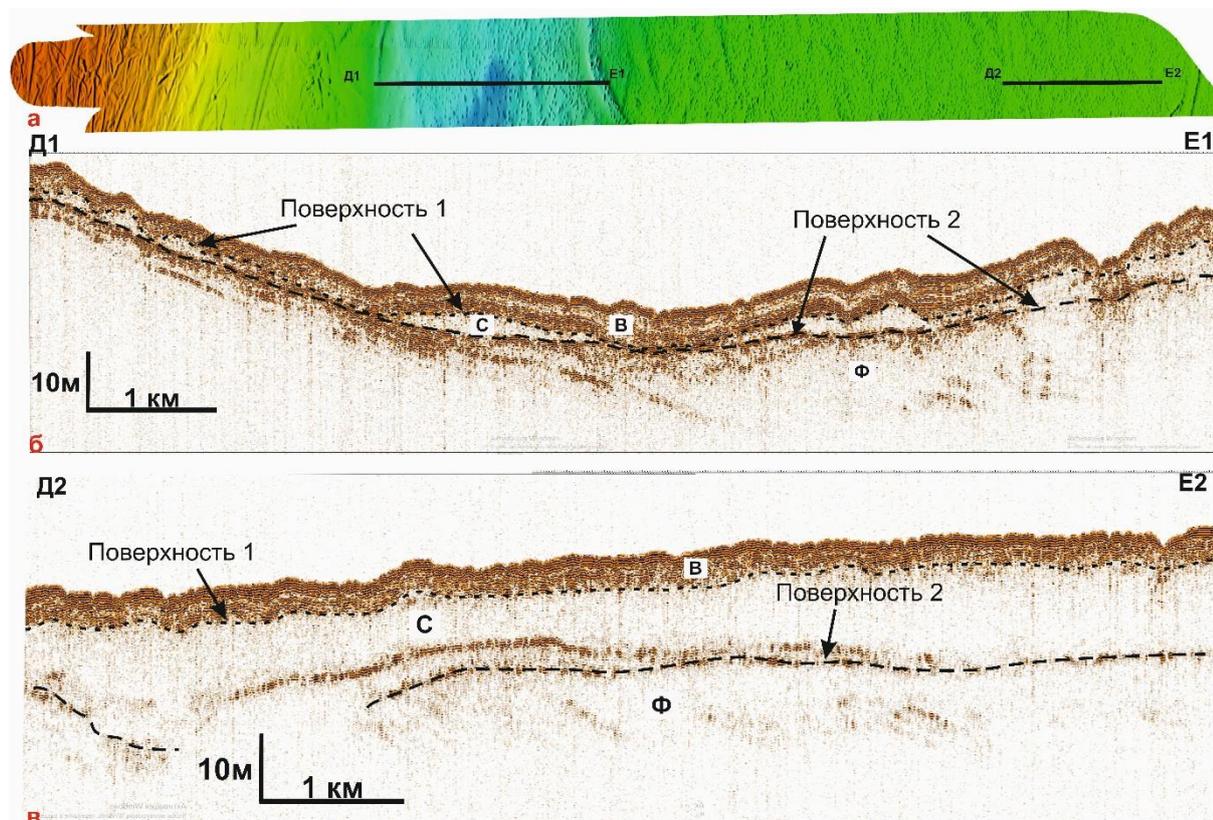


Рис. 3. Пример геофизического профиля с обозначением сейсмических комплексов и разделяющих их поверхностей (см. таблицу): *a* – батиметрический профиль; *б, в* – сейсмоакустические профили. Положение профиля обозначено на рис. 2 и 4
 Fig. 3. Examples of a geophysical profile showing the seismic complexes and the bounding surfaces (Table): *a* – bathymetric profile; *б, в* – seismic-acoustic profiles. Location is shown in Figs. 2 and 4

Сейсмостратиграфическая интерпретация и обсуждение Осадочная толща

В рамках интерпретации данных были построены карты-схемы изохрон для поверхностей 1 и 2 (рис. 4). Изохроны дна и поверхности 1 практически полностью повторяют друг друга, что говорит о согласном залегании слоев. На юго-западной оконечности наблюдается небольшая "петля" изохрон, особенно выраженная на поверхности 2. При ближайшем рассмотрении профиля в этом месте (рис. 5, а) на сейсмической записи можно увидеть небольшое понижение дна с сильно расчлененным рельефом, локальный выступ куполообразной формы и v-образное понижение (объект 1). Похожее поведение изохрона прослеживается далее к востоку (рис. 4, б), где изохроны горизонта 1 складываются в рисунок, характерный для резкого локального понижения типа "русло". Тем не менее на сейсмической записи (рис. 5, б) вместо понижений наблюдаются два ярко выраженных куполообразных объекта.

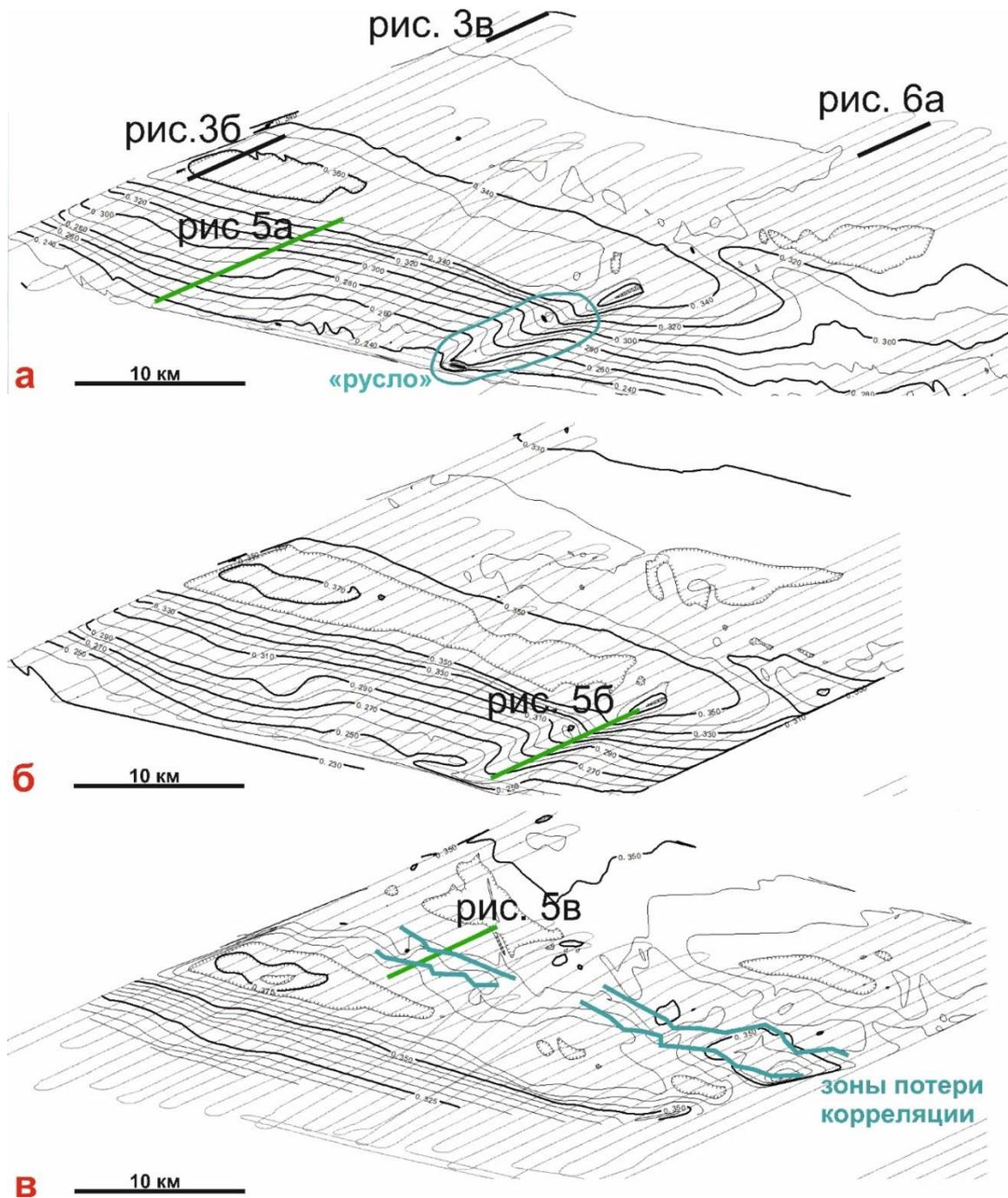


Рис. 4. Карты изохрон: а – изохроны дна; б – поверхность 1; в – поверхность 2.
Положение сейсмоакустических разрезов приведено на рис. 3, 5, 6
Fig. 4. Isochron maps: а – seafloor isochrons; б – surface 1; в – surface 2. The locations of the seismic-acoustic sections are shown in Figs. 3, 5, and 6

Изохроны горизонта 2 (рис. 4, в) повторяют рисунок изохрон поверхности 1 и дна лишь частично, что свидетельствует о резком несогласии и подтверждает вывод о границе сейсмического комплекса регионального масштаба (акустический фундамент). В северной части полигона поверхность местами прерывается, чему на сейсмических разрезах соответствуют области, на которых невозможно уверенно коррелировать отражающие площадки и выделить горизонт (рис. 5, в). В то же время непосредственно над зоной ослабления сигнала в рельефе дна виден объект 1 (борозда выпахивания) и отражения под ним, повторяющие этот рельеф. Отражения не являются кратными, поскольку сохраняют угол наклона и нигде более кратность не прослеживается.

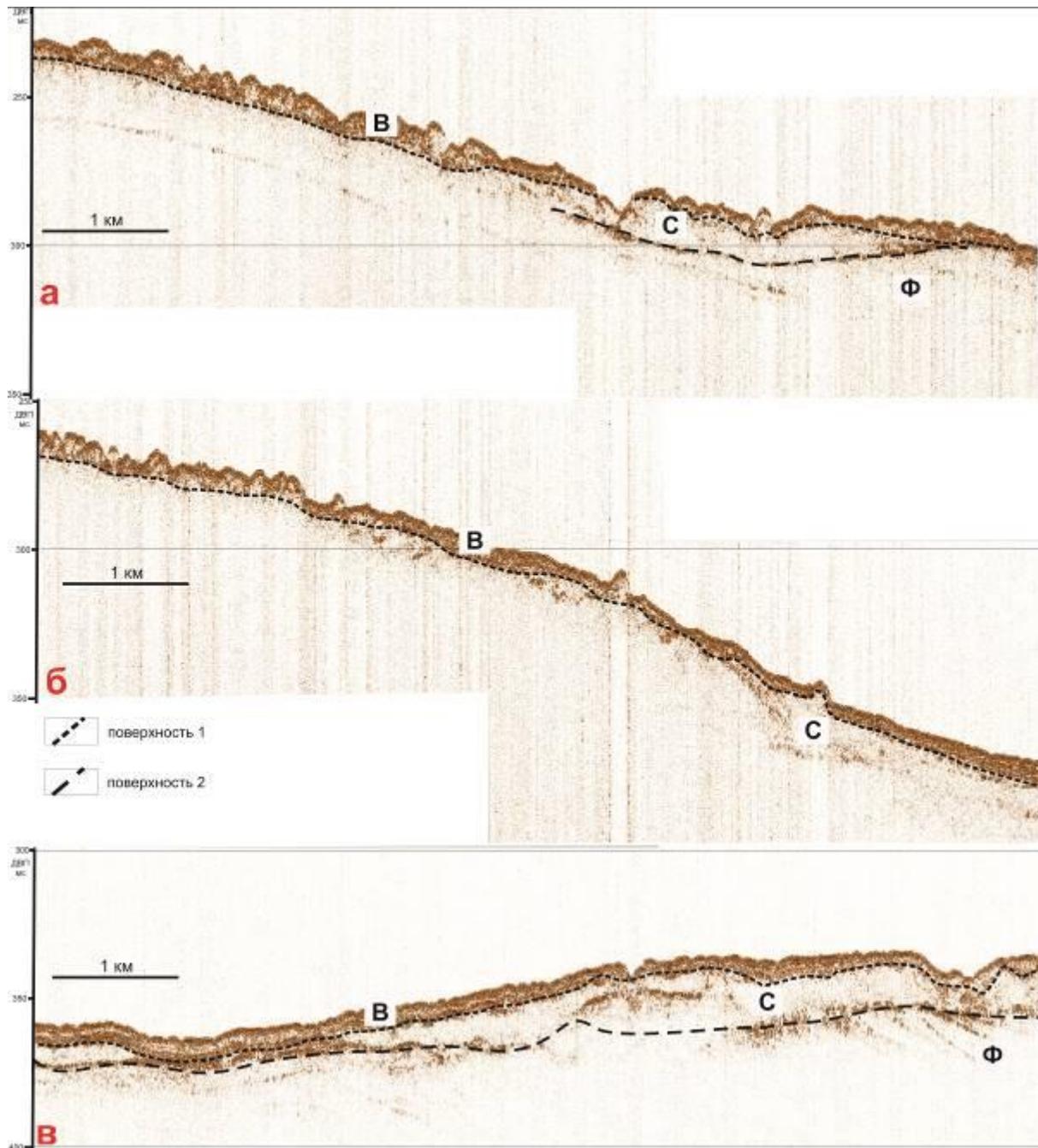


Рис. 5. Сейсмоакустические разрезы (ДВП – двойное время пробега; мс – миллисекунды). Обозначены сейсмические комплексы В, С, Ф и разделяющие их поверхности (см. таблицу).

Положение разрезов показано на рис. 4

Fig. 5. Seismic-acoustic sections, location shown in Fig. 4. TWT – two-way travel time, ms – milliseconds. The seismic complexes and bounding surfaces (Table) are indicated

В работе (*Девдариани и др., 1993*) разработаны основные признаки волнового поля, по которым можно сделать вывод о типе осадков. Ледниковые отложения представлены на сейсмоакустических записях хаотическим типом волновой картины. Характерно наличие коротких осей синфазности с переменной интенсивностью, сложной конфигурацией и изменчивой мощностью. Наиболее характерен этот тип записи для отложений конечных морен. Ледниковые отложения на сейсмограммах выделяются прежде всего хаотическим типом волновой картины с короткими, разнонаклонными отражающими горизонтами переменной интенсивности и неравномерной мощностью.

Так как подошва хаотической толщи (кровля коренных отложений мелового возраста) имеет сложную морфологию, на сейсмограммах граница между хаотическими и слоистыми коренными отложениями не всегда отчетливо выражена. Таким образом, рассматриваемая толща представляет собой полигенетическое образование, подвергшееся местами интенсивному динамическому воздействию продвигавшихся наддонных ледниковых потоков. На отдельных участках отчетливо выделяются протяженные оси синфазности отраженных волн, которые свидетельствуют о том, что формирование этого комплекса проходило в несколько этапов.

Покмарки

Северная, восточная и северо-восточная части полигонов, соответствующие батиметрической зоне 3, испещрены округлыми образованиями – покмарками (объекты типа 2), которые считаются приуроченными к выходам газа или флюидов ниже уровня акустического фундамента. В Баренцевом море покмарки развиты практически повсеместно, однако плотность их распространения изменяется в очень широких пределах (*Pau et al., 2014*). Участки с наиболее высокой плотностью покмарок выявлены в районе Мурманской банки, где их количество достигает 300–500 шт/км² (*Миرونюк и др., 2019*). Ключевую роль в повышении плотности покмарок играет наличие газоподводящих каналов, разломов, нефтегазовых структур, а также неглубокое залегание коренных пород с коллекторскими свойствами (*Мороз и др., 2023; Karaseva et al., 2021*). На описываемых сейсмоакустических разрезах покмаркам в рельефе дна соответствуют небольшие вертикальные углубления v-образной формы, а ниже – неоднородности в сейсмofации структурного комплекса В. Неоднородности практически не распространяются ниже, однако в некоторых местах можно проследить зоны ослабления сигнала до границы 2 и сейсмокомплекса Ф (рис. 6). Анализ связи размеров флюидогенных форм с литологией четвертичных отложений (*Денисова и др., 2024*) показал, что крупные в плане формы тяготеют к участкам более крупнодисперсных осадков, морским и ледово-морским осадкам с повышенным содержанием песка, гравия, гальки, щебня. Более мелкие покмарки, наоборот, в большинстве случаев встречаются на участках распространения глинистых алевритов и глин морского происхождения. Морфологические особенности покмарок обусловлены литологическим составом четвертичных отложений. Для ареалов распространения глинистых отложений характерны меньшие размеры покмарок и их v-образный профиль. Эта закономерность может быть связана с дифференцированной интенсивностью потока флюидов в осадках разного литологического состава. Также установлено, что самые глубокие покмарки приурочены обычно к областям с близким к поверхности залеганием ледниковых отложений (*Денисова и др., 2025; de Groot et al., 2024*).

Изученные объекты находятся в непосредственной близости от полуострова Рыбачий и расположены в зоне сочленения древней (архейской) континентальной коры Балтийского щита и более молодой (гренвильской) Баренцевоморской плиты. Слоистые осадочно-вулканогенные комплексы полуострова Рыбачий представлены образованиями рифейского (палеопротерозойского) возраста, которые прослеживаются и в прилегающей акватории Баренцева моря, образуя на приведенных сейсмических разрезах зоны акустического фундамента.

Проведенная в 2000-х гг. на полуостровах Средний и Рыбачий северной оконечности Балтийского щита аэрогазовая съемка по метану позволила обнаружить неоднородно распределенные в пространстве приповерхностные ореолы его концентрации (*Сорохтин и др., 2022*). Выявленная неоднородность хорошо коррелируется с расположением основных линейментов (глубинных разломов) на поверхности полуостровов Средний и Рыбачий (рис. 7) (*Сорохтин и др., 2022*).

Анализ приведенных данных показывает, что характер газовых выделений метана не только приурочен к наиболее крупным разломам земной коры, но и зависит от условий их сейсмической активности, которая связана с изостатическим постледниковым выравниванием поверхности Балтийского щита. Таким образом, тектонические нарушения выступают в роли каналов миграции флюидов глубинного происхождения к поверхности (*Serck et al., 2019; Денисова и др., 2024, 2025; Сорохтин и др., 2024*) и обуславливают импульсность проявления процессов выброса газов из толщи диагенетированных и метаморфизованных осадков в воздушную и водную среду. С нашей точки зрения, именно этим можно объяснить обилие покмарок на дне прилегающей к полуострову Рыбачий акватории Баренцева моря, которые в момент наблюдения являлись неактивными.

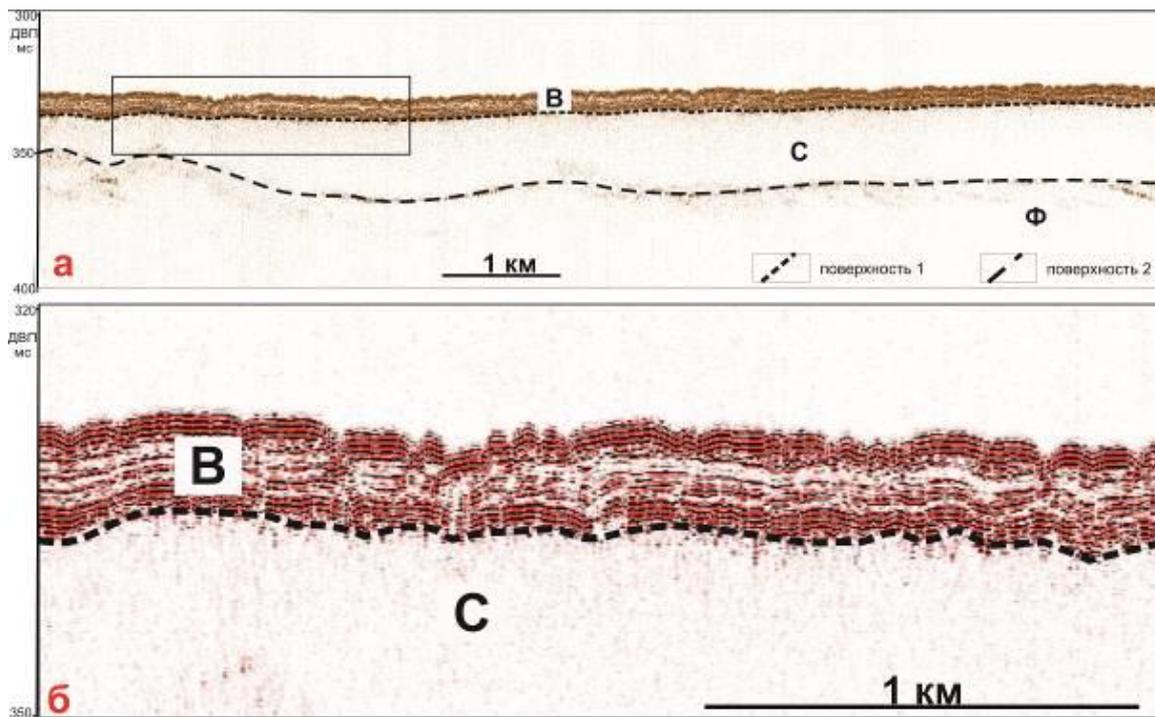


Рис. 6. Покмарки: *a* – сейсмоакустический профиль; *б* – сейсмоакустический профиль (крупно). Обозначены сейсмические комплексы В, С, Ф и разделяющие их поверхности (см. таблицу).

Положение профиля показано на рис. 4

Fig. 6. Pockmarks: *a* – seismic-acoustic profile; *б* – pockmarks on the seismic profile. Profile location is shown in Fig. 4. The seismic complexes and bounding surfaces (Table) are indicated

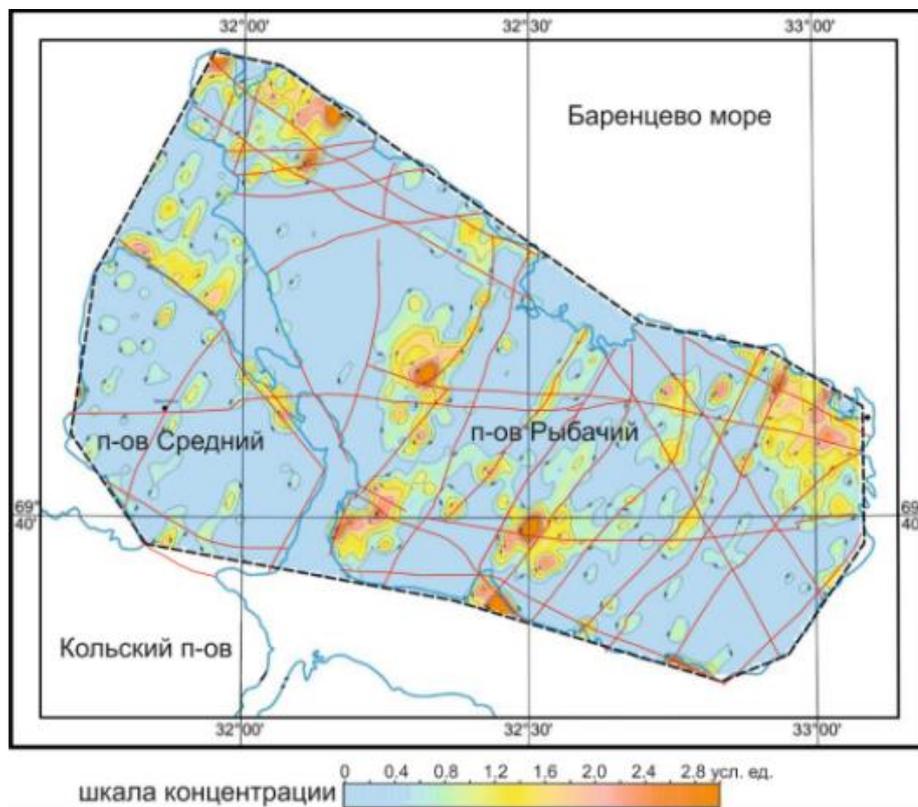


Рис. 7. Карта результатов газовой аэросъемки и распределение основных структурных элементов на полуостровах Средний и Рыбачий (Сорохтин и др., 2022)

Fig. 7. Map of aerial gas survey results and the distribution of the main structural elements on the Sredny and Rybachy Peninsulas (Sorokhtin et al., 2022)

Заключение

Результаты исследования строения осадочной толщи и рельефа дна на полигоне в акватории Баренцева моря на траверзе полуострова Рыбачий позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ строения осадочной толщи по сейсмическим данным выявил три отдельных сейсмических комплекса, внутренняя структура которых не всегда типична для осадков ледникового типа. Хаотичная запись чаще просматривается в акустическом фундаменте (сейсмокомплекс Ф, предположительный возраст – мезозой и старше), в то время как четвертичные придонные осадки (сейсмокомплекс В, предположительный возраст – голоцен) показывают ярко выраженную слоистость. Каждый из них отличается большим разнообразием и значительной латеральной изменчивостью, особенно сейсмокомплекс С (предположительно четвертичного доголоценового возраста, по литературным данным, в том числе и поздний плейстоцен).

2. Изученные площади дна характеризуются многочисленными неактивными покмарками, часто вытянутыми вдоль элементов структурной неоднородности. Выявленное обилие покмарок, отсутствие долговременных газовых факелов и отсутствие стабильных подводных каналов в поверхностной зоне рыхлых осадков говорит о том, что процессы выбросов газа носят (или носили) кратковременный импульсный характер, вероятно, связанный с механикой энергетической разгрузки в зоне развития разломов.

3. Батиметрические данные позволили обнаружить множественные следы ледовой экзарации, имеющие как современное, так и реликтовое происхождение.

Благодарности

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования НИС "Академик Николай Страхов" и "Академик Борис Петров" в составе ЦКП "Научный флот ИО РАН", <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-strahov>, <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-boris-petrov>.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Грушевская О. В., Соловьев А. В., Васильева Е. А., Петрушина Е. П. [и др.]. Условия формирования и развития клиноформных комплексов в Баренцевом море // Геология нефти и газа. 2023. № 3. С. 25–45. DOI: <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-3-25-45>. EDN: LWKAXS.
- Девдариани Н. А., Старовойтов А. В., Рыбалко А. Е. Типы волновой картины и условия залегания ледниковых отложений Белого и Баренцева морей по данным непрерывного сейсмопрофилирования // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1993. Т. 68, № 3. С. 117–122.
- Денисова А. П., Еременко Е. А., Мороз Е. А., Кохан А. В. [и др.]. Морфология покмарок на шельфе Баренцева моря и определяющие ее факторы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2025. Т. 80, № 2. С. 99–115. DOI: <https://doi.org/10.55959/msu0579-9414.5.80.2.8>. EDN: DTFURJ.
- Денисова А. П., Мороз Е. А., Еременко Е. А. Морфология покмарок южной и северо-восточной частей Баренцевоморского шельфа // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-95-103>. EDN: OYMYAC.
- Костин Д. А., Тарасов Г. А. Четвертичный осадочный чехол Баренцево-Карского бассейна // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. М.: ГЕОС, 2011. С. 107–130. EDN: TTOQWT.
- Миронюк С. Г., Иванова А. А., Колобакин А. А. Экстремальные глубины современного ледового выпаживания на шельфе северо-восточной части Баренцева моря // Российские полярные исследования. 2018. № 1(31). С. 12–14. EDN: HDYREU.
- Миронюк С. Г., Росляков А. Г. Типы, активность и закономерности распространения покмарок в арктических морях // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018): Труды междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19–22 ноября 2018 г. Том II (IV). М.: ПолиПРЕСС, 2019. С. 70–76. EDN: DAOSOA.
- Мороз Е. А., Еременко Е. А., Денисова А. П., Мутовкин А. Д. [и др.]. Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского желоба (Печорское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 1. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31857/s2686739723600820>. EDN: HZIHSE.
- Никифоров С. Л., Ананьев Р. А., Либина Н. В., Дмитриевский Н. Н. [и др.]. Ледовая экзарация на арктическом шельфе России // Океанология. 2019. Т. 59, № 3. С. 466–468. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0030-1574593466-468>. EDN: WOFXGG.
- Никифоров С. Л., Сорохтин Н. О., Ананьев Р. А., Дмитриевский Н. Н. [и др.]. Исследования в Баренцевом и Карском морях в 52-м рейсе НИС "Академик Николай Страхов" // Океанология. 2022. Т. 62, № 3. С. 499–501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157422030078>. EDN: VANPRO.
- Никифоров С. Л., Сорохтин Н. О., Ананьев Р. А., Дмитриевский Н. Н. [и др.]. Геолого-геофизические, геоморфологические и гидрофизические исследования в Баренцевом и Карском морях в 51-м рейсе НИС "Академик Борис Петров" в 2022 г. // Океанология. 2023. Т. 63, № 5. С. 858–861. DOI: <https://doi.org/10.31857/s003015742305009x>. EDN: PYDDZA.

- Система Баренцева моря / отв. ред. А. П. Лисицын. М. : ГЕОС, 2021. 672 с.
- Соловьева М. А., Рыбалко А. Е., Монтели А. И., Терёхина Я. Е. [и др.]. Эволюция валдайского оледенения в восточной части баренцевоморского шельфа // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. 2023. № 10. С. 261–268. DOI: <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-261-268>. EDN: MQGZZD.
- Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Глазнев В. Н., Куликов Н. В. [и др.]. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность. Апатиты : ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 853 с. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.591137.469.3>. EDN: СТУХКВ.
- Сорохтин Н. О., Никифоров С. Л., Лобковский Л. И., Ананьев Р. А. [и др.]. Геодинамические условия газонасыщения осадочных толщ юго-западной части Баренцева моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 6. С. 995–1009. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157424060118>. EDN: FHRWOU.
- Старовойтов А. В. О максимальном позднеплейстоценовом оледенении восточной части шельфа Баренцева моря // Доклады академии наук. 1999. Т. 364, № 2. С. 227–230. EDN: LFGBRT.
- Старовойтов А. В. Сейсмоакустические исследования ледниковых отложений восточной части шельфа Баренцева моря // Разведка и охрана недр. 2002. № 1. С. 27–31.
- Тарасов Г. А. Четвертичный осадочный чехол Западно-Арктического шельфа: литологическое строение, пространственное распределение // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2(21). С. 124–134. EDN: UAORNP.
- Токарев М. Ю., Рыбалко А. Е., Терехина Я. Е., Росляков А. Г. Опасные геологические процессы и явления в Баренцевом и Карском морях по данным сейсмоакустического профилирования // Геофизика. 2023. № 2. С. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.34926/geo.2023.43.37.002>. EDN: CYPPEI.
- Эпштейн О. Г., Длугач А. Г., Старовойтов А. В. Покров отложений последнего оледенения в восточной части Баренцева моря: специфичность состава, распределения мощностей, грандиозность и необычность структурных форм // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487. № 5. С. 547–550. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0869-56524875547-550>. EDN: FWJWGB.
- Эпштейн О. Г., Длугач А. Г., Старовойтов А. В., Романюк Б. Ф. Плейстоценовые отложения восточной части Баренцева моря (районы Центральной впадины и Мурманской банки). Сообщение 2. Литологический состав и условия образования // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 3. С. 249–281. EDN: MMCSES.
- Ananyev R., Dmitrevskiy N., Lobkovsky L., Nikiforov S. [et al.]. Sea-ice ploughmarks in the Eastern Laptev Sea, East Siberian Arctic shelf // Geological Society Memoir. 2016. Vol. 46, Iss. 1. P. 301–302. DOI: <https://doi.org/10.1144/m46.109>. EDN: YUVTRD.
- Catuneau O. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier, 2006.
- de Groot T. R., Kalenitchenko D., Moser M., Argentino C. [et al.]. Methanotroph activity and connectivity between two seep systems north off Svalbard // Frontiers in Earth Science. 2024. Vol. 12. Article number: 1287226. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1287226>.
- Karaseva N., Kanafina M., Gantsevich M., Rimskaya-Korsakova N. [et al.]. Distribution of *Nereilinum murmanicum* (Annelida, Siboglinidae) in the Barents Sea in the context of its oil and gas potential // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, Iss. 12. Article number: 1339. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9121339>.
- Musatov E. E. Cenozoic sedimentary structure and neotectonics of newline the Barents – Kara shelf from reflection profiling data // Russian Journal of Earth Sciences. 1998. № 2. С. 151–177.
- Nikiforov S., Ananiev R., Jakobsson M., Moroz E. [et al.]. The extent of glaciation in the Pechora Sea, Eurasian Arctic, based on submarine glacial landforms // Geosciences. 2023. Vol. 13, Iss. 2. Article number: 53. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences13020053>.
- Pau M., Hammer Ø., Chand S. Constraints on the dynamics of pockmarks in the SW Barents Sea: Evidence from gravity coring and high-resolution, shallow seismic profiles // Marine Geology. 2014. Vol. 355. P. 330–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.06.009>.
- Serck C. S., Braathen A. Extensional fault and fold growth: Impact on accommodation evolution and sedimentary infill // Basin Research. 2019. Vol. 31, Iss. 5. P. 967–990.
- Svendsen J. I., Gataullin V., Mangerud J., Polyak L. The glacial history of the Barents and Kara Sea region // Developments in Quaternary Sciences / eds.: J. Ehlers, P. L. Gibbard. Elsevier, 2004. Vol. 2, Part 1. P. 369–378. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1571-0866\(04\)80086-1](https://doi.org/10.1016/s1571-0866(04)80086-1).

References

- Grushevskaya, O. V., Soloviev, A. V., Vasilyeva, E. A., Petrushina, E. P. et al. 2023. Conditions for the formation and development of clinoform complexes in the Barents Sea. *Oil and gas geology*, 3, pp. 25–45. DOI: <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2023-3-25-45>. EDN: LWKAXS. (In Russ.)
- Devdariani, N. A., Starovoitov, A. V., Rybalko, A. E. 1993. Types of wave pattern and conditions of occurrence of glacial deposits in the White and Barents Seas according to continuous seismic profiling. *Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological Series*, 68(3), pp. 117–122. (In Russ.)

- Denisova, A. P., Eremenko, E. A., Moroz, E. A., Kokhan, A. V. et al. 2025. Morphology of pockmarks on the Barents Sea shelf and the factors determining it. *Lomonosov Geography Journal*, 80(2), pp. 99–115. DOI: <https://doi.org/10.55959/msu0579-9414.5.80.2.8>. EDN: DTFURJ. (In Russ.)
- Denisova, A. P., Moroz, E. A., Eremenko, E. A. 2024. Morphology of pockmarks in the southern and northeastern parts of the Barents Sea shelf. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, 11, pp. 95–103. DOI: <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2024-11-95-103>. EDN: OYMYAC. (In Russ.)
- Kostin, D. A., Tarasov, G. A. 2011. Quaternary sedimentary cover of the Barents-Kara Basin In *Geology and Geoecology of the Continental Margins of Eurasia*, pp. 107–130. EDN: TTOQWT. (In Russ.)
- Mironyuk, S. G., Ivanova, A. A., Kolyubakin, A. A. 2018. Extreme depths of modern ice scouring on the shelf of the northeastern Barents Sea. *Russian Polar Research*, 1(31), pp. 12–14. EDN: HDYREU. (In Russ.)
- Mironyuk, S. G., Roslyakov, A. G. 2019. Types, activity and distribution patterns of pockmarks in the Arctic seas. In coll. of abstracts of the VII Intern. Scien. and Pract. Conf. "Marine Research and Education" MARESEDU-2018, pp. 70–76. EDN: DAOSOA. (In Russ.)
- Moroz, E. A., Eremenko, E. A., Denisova, A. P., Mutovkin, A. D. et al. 2023. Manifestation of degassing in the sedimentary cover and relief of the South Novaya Zemlya Trough Pechora Sea. *Doklady Earth Sciences*, 512(1), pp. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31857/s2686739723600820>. EDN: HZIHSE. (In Russ.)
- Nikiforov, S. L., Ananyev, R. A., Libina, N. V., Dmitrevsky, N. N. et al. 2019. Ice scouring on the Russian Arctic shelf. *Oceanology*, 59(3), pp. 466–468. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0030-1574593466-468>. EDN: WOFXGG. (In Russ.)
- Nikiforov, S. L., Sorokhtin, N. O., Ananyev, R. A., Dmitrevsky, N. N. et al. 2022. Research in the Barents and Kara Seas during the 52nd cruise of the R/V "Akademik Nikolai Strakhov". *Oceanology*, 62(3), pp. 499–501. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157422030078>. EDN: VANPRO. (In Russ.)
- Nikiforov, S. L., Sorokhtin, N. O., Ananyev, R. A., Dmitrevsky, N. N. et al. 2023. Geological-geophysical, geomorphological and hydrophysical studies in the Barents and Kara Seas during the 51st cruise of the R/V "Akademik Boris Petrov" in 2022. *Oceanology*, 63(5), pp. 858–861. DOI: <https://doi.org/10.31857/s003015742305009x>. EDN: PYDDZA. (In Russ.)
- The Barents Sea system. 2021. Ed. A. P. Lisitsyn. Moscow. (In Russ.)
- Solovyeva, M. A., Rybalko, A. E., Montelli, A. I., Terekhina, Ya. E. et al. 2023. Evolution of the Valdaian glaciation in the eastern part of the Barents Sea shelf. *Relief and Quaternary Deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, 10, pp. 261–268. DOI: <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-261-268>. EDN: MQGZZD. (In Russ.)
- Sorokhtin, N. O., Kozlov, N. E., Glaznev, V. N., Kulikov, N. V. et al. 2022. Archean and Neoproterozoic of the Rybachy and Sredny Peninsulas (Baltic Shield) : Geology, geodynamics, petroleum potential and diamond potential. Apatity. DOI: <https://doi.org/10.37614/978.591137.469.3>. EDN: CTYXKV. (In Russ.)
- Sorokhtin, N. O., Nikiforov, S. L., Lobkovsky, L. I., Ananyev, R. A. et al. 2024. Geodynamic conditions of gas saturation of sedimentary sequences in the southwestern part of the Barents Sea. *Oceanology*, 64(6), pp. 995–1009. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157424060118>. EDN: FHRWOU. (In Russ.)
- Starovoitov, A. V. 1999. On the maximum Late Pleistocene glaciation in the eastern part of the Barents Sea shelf. *Doklady Earth Sciences*, 364(2), pp. 227–230. EDN: LFGBRT. (In Russ.)
- Starovoitov, A. V. 2002. Seismic-acoustic studies of glacial deposits in the eastern part of the Barents Sea shelf. *Razvedka i Okhrana Nedr*, 1, pp. 27–31. (In Russ.)
- Tarasov, G. A. 2015. Quaternary sedimentary cover of the Western Arctic shelf: Lithological structure, spatial distribution. *Vestnik of the Kola Science Centre of RAS*, 2(21), pp. 124–134. EDN: UAORNP. (In Russ.)
- Tokarev, M. Yu., Rybalko, A. E., Terekhina, Ya. E., Roslyakov, A. G. 2023. Hazardous geological processes and phenomena in the Barents and Kara Seas according to seismic-acoustic profiling data. *Geophysics*, 2, pp. 10–20. DOI: <https://doi.org/10.34926/geo.2023.43.37.002>. EDN: CYPPEL. (In Russ.)
- Epstein, O. G., Dlugach, A. G., Starovoitov, A. V. 2019. The cover of deposits of the last glaciation in the eastern part of the Barents Sea: specificity of composition, distribution of thicknesses, grandeur and unusualness of structural forms. *Doklady Earth Sciences*, 487(5), pp. 547–550. DOI: <https://doi.org/10.31857/s0869-56524875547-550>. EDN: FWJWGB. (In Russ.)
- Epstein, O. G., Dlugach, A. G., Starovoitov, A. V., Romanyuk, B. F. 2011. Pleistocene deposits of the eastern Barents Sea areas of the central depression and the Murmansk Bank. Report 2. Lithological composition and formation conditions. *Lithology and Mineral Resources*, 3, pp. 249–281. EDN: MCMFES. (In Russ.)
- Ananyev, R., Dmitrevskiy, N., Lobkovsky, L., Nikiforov, S. et al. 2016. Sea-ice ploughmarks in the Eastern Laptev Sea, East Siberian Arctic shelf. *Geological Society Memoir*, 46(1), pp. 301–302. DOI: <https://doi.org/10.1144/m46.109>. EDN: YUVTDR.
- Catuneau, O. 2006. Principles of sequence stratigraphy. Elsevier.
- de Groot, T. R., Kalenitchenko, D., Moser, M., Argentino, C. et al. 2024. Methanotroph activity and connectivity between two seep systems north off Svalbard. *Frontiers in Earth Science*, 12. Article number: 1287226. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1287226>.

- Karaseva, N., Kanafina, M., Gantsevich, M., Rimskaya-Korsakova, N. et al. 2021. Distribution of *Nereilinum turmanicum* (Annelida, Siboglinidae) in the Barents Sea in the context of its oil and gas potential. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(12). Article number: 1339. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9121339>.
- Musatov, E. E. 1998. Cenozoic sedimentary structure and neotectonics of newline the Barents – Kara shelf from reflection profiling data. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2, pp. 151–177.
- Nikiforov, S., Ananiev, R., Jakobsson, M., Moroz, E. et al. 2023. The extent of glaciation in the Pechora Sea, Eurasian Arctic, based on submarine glacial landforms. *Geosciences*, 13(2). Article number: 53. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences13020053>.
- Pau, M., Hammer, Ø., Chand, S. 2014. Constraints on the dynamics of pockmarks in the SW Barents Sea: Evidence from gravity coring and high-resolution, shallow seismic profiles. *Marine Geology*, 355, pp. 330–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.06.009>.
- Serck, C. S., Braathen, A. 2019. Extensional fault and fold growth: Impact on accommodation evolution and sedimentary infill. *Basin Research*, 31(5), pp. 967–990.
- Svendsen, J. I., Gataullin, V., Mangerud, J., Polyak, L. 2004. The glacial history of the Barents and Kara Sea region. In *Developments in Quaternary Sciences*. Eds.: J. Ehlers, P. L. Gibbard. Elsevier, Vol. 2, Part 1, pp. 369–378. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1571-0866\(04\)80086-1](https://doi.org/10.1016/s1571-0866(04)80086-1).

Сведения об авторах

Путанс Виктория Албертсовна – пр. Нахимовский, 36, г. Москва, Россия, 117997;
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: vitapu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-1619>

Victoria A. Putans – 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997;
P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Researcher;
e-mail: vitapu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3538-1619>

Никифоров Сергей Львович – пр. Нахимовский, 36, г. Москва, Россия, 117997;
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геогр. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: nikiforov@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5107-1402>

Sergey L. Nikiforov – 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997;
P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Main Researcher;
e-mail: nikiforov@ocean.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5107-1402>

Сорохтин Николай Олегович – пр. Нахимовский, 36, г. Москва, Россия, 117997;
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: nsorokhtin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-3693>

Nikolay O. Sorokhtin – 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997;
P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Main Researcher;
e-mail: nsorokhtin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-3693>

Ананьев Роман Александрович – пр. Нахимовский, 36, г. Москва, Россия, 117997;
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, ст. науч. сотрудник;
e-mail: corer@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4486-8974>

Roman A. Ananiev – 36 Nakhimovskiy Ave., Moscow, Russia, 117997;
P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Senior Researcher;
e-mail: corer@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4486-8974>

Сухих Елена Александровна – Пыжевский пер., 7, стр. 1, г. Москва, Россия, 119017;
Геологический институт РАН, ст. науч. сотрудник;
e-mail: sukhikh_ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4691-0415>

Elena A. Sukhikh – 7-1 Pyzhevskiy Lane, Moscow, Russia;
Geological Institute RAS, Senior Researcher;
e-mail: sukhikh_ea@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4691-0415>

Козлов Николай Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Россия, 184209;
Геологический институт КИЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор;
e-mail: n.kozlov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-7127>

Nikolay E. Kozlov – 14 Fersman Str., Apatity, Russia, 184209;
Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Professor;
e-mail: n.kozlov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3766-7127>

УДК 574.51

Обзор инвазивных гидробионтов бассейна восточного побережья Балтийского моря

Е. В. Ульрих

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия;
e-mail: elen.ulrich@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
17.02.2025;

получена
после доработки
15.05.2025;

принята
к публикации
08.09.2025

Ключевые слова:

промышленные
инвазивные
гидробионты,
Балтийское море,
водоросли,
беспозвоночные,
рыбы,
страны Балтии

В настоящее время недостаточно фундаментальных исследований влияния инвазивных видов гидробионтов на экосистемы бассейна Балтийского моря. Целью исследования являлось рассмотрение и обобщение существующих знаний об инвазивных видах гидробионтов бассейна восточного побережья Балтийского моря. Показано, что на данной акватории зарегистрировано по крайней мере 76 водных (или полуводных) инвазивных видов. Микроводоросль *Prorocentrum minimum* является пока единственной инвазивной планктонной микроводорослью, известной в водной среде бассейна Балтийского моря. Исследователи связывают ее с накоплением токсичных веществ, но повышенная токсичность *Prorocentrum* не подтверждена. Зеленые водоросли *Cladophora glomerata* являются одним из интродуцированных видов макроводорослей, обнаруженных в прибрежных районах Балтики. Список инвазивных водных, полуводных и прибрежных сосудистых растений насчитывает 16 видов. В морских прибрежных и внутренних пресноводных средах бассейна Балтийского моря зарегистрировано 30 инвазивных беспозвоночных. Большинство из них – бентосные и нектобентосные виды, остальные – зоопланктон (3 вида) и паразиты (1 вид). Всего в бассейне Балтийского моря зарегистрировано 28 инвазивных видов рыб, относящихся к 8 семействам, 27 из них были намеренно завезены для разведения. Примерно половина видов (14–15) происходит из разных азиатских регионов (в основном с Дальнего Востока России и Сибири), пять видов – из Понто-Каспийского региона, а четыре вида – из Северной Америки. Имеющаяся информация об инвазивных видах требует инициирования систематических и хорошо скоординированных исследований их жизнедеятельности для предоставления необходимых научных рекомендаций (например, оценки экологической уязвимости) для изучения водных вселенцев. Данное исследование должно послужить катализатором для дальнейшего изучения инвазивных гидробионтов бассейна Балтийского моря.

Для цитирования

Ульрих Е. В. Обзор инвазивных гидробионтов бассейна восточного побережья Балтийского моря. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-125-133>.

Review of invasive aquatic organisms in the Baltic Sea basin

Elena V. Ulrikh

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia;
e-mail: elen.ulrich@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Article info

Received
17.02.2025;

received
in revised form
15.05.2025;

accepted
08.09.2025

Key words:

commercial invasive
hydrobionts,
Baltic Sea,
algae,
invertebrates,
fish,
Baltic countries

Abstract

There is currently a lack of fundamental research on the impact of invasive aquatic species on the ecosystems of the Baltic Sea basin. The aim of the study is to review and summarize the existing knowledge on invasive aquatic species in the Baltic Sea basin. The present study has shown that at least 76 aquatic (or semi-aquatic) invasive species have been recorded on the eastern coast of the Baltic Sea. The microalga *Prorocentrum minimum* is so far the only invasive planktonic microalga known in the aquatic environment of the Baltic Sea basin. Researchers associate it with the accumulation of toxic substances, but increased toxicity of *Prorocentrum* has not been confirmed. Green algae *Cladophora glomerata* are one of the introduced macroalgae species found in the coastal areas of the Baltic. The list of invasive aquatic, semi-aquatic and coastal vascular plants includes 16 species. 30 invasive invertebrates have been recorded in marine coastal and inland freshwater environments of the Baltic Sea basin. Most of them are benthic and nektobenthic species, the rest are zooplankton (3 species) and parasites (1 species). A total of 28 invasive fish species belonging to eight families have been registered in the Baltic Sea basin, 27 of which were intentionally introduced for breeding. About half of the species (14–15) originate from different Asian regions (mainly from the Russian Far East and Siberia), five species from the Ponto-Caspian region, and four species from North America. The available information on invasive species requires the initiation of systematic and well-coordinated studies of their vital functions to provide the necessary scientific recommendations (e.g., vulnerability assessments) for the study of aquatic invaders. The present study should serve as a catalyst for further serious studies of invasive aquatic organisms in the Baltic Sea basin.

For citation

Ulrikh, E. V. 2026. Review of invasive aquatic organisms in the Baltic Sea basin. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 125–133. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-125-133>.

Введение

На протяжении нескольких столетий гидробионты намеренно или случайно перевозились человеком из их естественного ареала и вселялись в экосистемы восточного побережья Балтийского моря. Инвазивный вид определяется как вид, который в новых условиях обитания начинает активно размножаться (Rai et al., 2020). К началу XXI в. около 105 видов животных и растений были идентифицированы как инвазивные на восточном побережье Балтийского моря, прилегающих прибрежных лагунах и озерах. Предполагается, что около 70 инвазивных видов населяют данные районы (Abbasi et al., 2019). Современные знания о вселении инвазивных видов в бассейн Балтийского моря развивались целое столетие: от первых записей о новых видах в 1920–1950-х годах (Leppäkoski et al., 2002a; *Invasive aquatic...*, 2002) к более сложным исследованиям инвазивных видов в 2010–2025 гг. Первые наблюдения (HELCOM, 2013) выявили 35–40 инвазивных видов.

Международное сотрудничество в области инвазивных видов бассейна Балтийского моря началось в 1994 г., когда неправительственная научная организация "Балтийские морские биологи" (БМБ) создала рабочую группу по инвазивным эстуарным и промысловым морским организмам. Систематическая работа БМБ по исследованиям инвазивных видов привела к созданию базы данных, выпущенной в 1997 г., в которой было перечислено 78 инвазивных видов (как акклиматизированных, так и случайных вселенцев). В 2000 г. Комиссия по защите морской среды Балтийского моря (HELCOM) поддержала разработку базы данных по чужеродным видам гидробионтов бассейна Балтийского моря (Adolf et al., 2019), которая стала региональным информационным центром по биологическим инвазиям в районе Балтийского моря (<http://www.ku.lt/nemo/mainnemo.htm>). К этому времени число зарегистрированных инвазивных видов выросло до 100. В 2002 г. по инициативе основателей БМБ был опубликован современный обзор водных инвазий в Европе (Leppäkoski et al., 2002b), который является стандартным справочником по инвазиям в европейских водах до 2000 г. (Andersen et al., 2015).

В последнее десятилетие были приложены существенные исследовательские усилия по изучению проблемы водных инвазивных видов в бассейне Балтийского моря (Leppäkoski et al., 2002a), однако многие вопросы, касающиеся балтийских инвазивных видов, остаются недоисследованными. Большая часть данных недоступна для международной науки, поскольку они были опубликованы на местных языках и в труднодоступных источниках (местные журналы, экологические отчеты и т. д.). До сих пор недостаточно фундаментальных исследований воздействия инвазивных видов гидробионтов на важные экосистемы бассейна Балтийского моря (*Самые опасные...*, 2018).

Цель исследования – обобщение и анализ существующих знаний об инвазивных видах гидробионтов восточного побережья Балтийского моря. Этот документ не является исчерпывающим исследованием, поскольку экологические и экономические последствия инвазий, а также возможные выгоды для общества от некоторых интродукций здесь не рассматриваются. Синописис имеющихся данных привел к созданию первого общего обзора биологических инвазий в водоемы бассейна Балтийского моря, который может способствовать повышению осведомленности о проблемах биологических инвазий и послужить катализатором для привлечения национальных ресурсов с целью поддержки дальнейшей работы по изучению инвазивных гидробионтов.

Материалы и методы

Объектами данного исследования являлись научные публикации и отчеты российских и зарубежных авторов, касающиеся инвазивных гидробионтов в восточной части бассейна Балтийского моря. Для поиска информации были использованы базы данных Scopus, Web of Science, PubMed, Elibrary за период с начала 1950-х годов (появление первой публикации по теме) до 01.02.2025 г. Были отобраны и проанализированы доступные обзорные и исследовательские статьи по воздействию инвазивных видов на биоразнообразие Балтийского моря, а также отдельные статьи, связанные с обоснованием актуальности темы, пониманием свойств и механизмов инвазии гидробионтов, определением перспективных направлений исследований в этой области, на английском и русском языках. Основное внимание уделялось статьям, опубликованным в научных рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования за последние пять лет. При проведении анализа использовали также материалы конференций и главы из книг. В системе PubMed был проведен поиск исследований, опубликованных в период 1950–2025 гг., с использованием следующих комбинаций ключевых слов: инвазивные гидробионты, Балтийское море, водоросли, беспозвоночные, рыбы, страны Балтии. Использовались статьи, доступные в виде рефератов, а также библиографии, редакционные материалы и статьи, опубликованные не на английском и русском языках. Основным методом служило обобщение данных (Paré et al., 2017). Были проанализированы обзорные и исследовательские данные, относящиеся к исследованию различных путей инвазии гидробионтов, в том числе промысловых, и их влияние на биоразнообразие водных систем бассейна Балтийского моря.

Результаты и обсуждение

Краткий обзор истории окружающей среды и биологической промысловой инвазии в бассейне Балтийского моря

Балтийское море является крупнейшим в мире солоноватым морем (площадь 382 000 км²). С точки зрения геологической истории Балтийское море является молодой и экологически нестабильной водной системой. После последнего таяния ледников пресноводные периоды чередовались с морскими. Около 7 000 лет назад Балтийское море стало солоноватым. Следовательно, большинство видов животных и растений, обитающих в Балтийском море, являются постледниковыми иммигрантами, многие из них живут в условиях оптимальной солености. Местная флора и фауна Балтийского моря представляет собой комплекс морских бореальных атлантических видов, арктических реликтов, а также бореальных пресноводных организмов, способных переносить олигогалинные условия заливов и прибрежных лагун.

Балтийское море – полузамкнутый водоем, изолированный от Северного моря как географическими, так и экологическими барьерами. Глубина составляет 18 м, а соленость – до 6–8 практических единиц солености (psu) в море и до 1–2 psu во внутренних частях крупных заливов (Ботнический и Финский заливы). Вода сильно стратифицирована, особенно в открытой части моря, из-за разницы в солености между верхними и нижними слоями воды. Температурные условия изменяются от бореальных атлантических в юго-западных районах моря до субарктических в его самой северной части. Район Балтийского моря (т. е. проливы Каттегат и Бельт, бассейн Арконы, собственно Балтийское море, крупные заливы, прилегающие солоновато-пресноводные лагуны и заливы) представляет собой цепь субрегионов, различающихся по своей геоморфологической конфигурации, гидрологическому режиму и биогеографическому составу их биоты. Таким образом, современное Балтийское море представляет собой экологический континуум, который возник в результате значительных естественных изменений за последние 10 000 лет его постледниковой истории (*Leppäkoski et al., 2002a; Andersen et al., 2020*). Около ста лет назад появились первые коридоры инвазии (*Reckermann et al., 2022*), которые определяются как регулярная опосредованная человеком связь между изолированными биогеографическими территориями, которая разрушает естественные экологические барьеры и делает возможным перенос чужеродных видов. Коридор инвазии может быть установлен разными способами, например: как интенсивное морское судоходство, которое включает перенос видов в балластных танках или на корпусах судов; частая воздушная или наземная транспортировка видов в качестве живого материала для зарыбления, семян и т. д.; или как внутренний водный путь (*Olenin, 2002*).

Существует три основных механизма инвазий водных биологических организмов в Балтийское море (*Andersson et al., 2010*): 1) преднамеренное вселение видов для рыболовства, аквакультуры или аквариумной торговли; 2) транспортировка самой водной среды обитания с потенциально инвазивными организмами, например, планктонными видами в балластной воде, обрастаниями на корпусах судов или организмами, связанными с интродуцированными видами; 3) активное или пассивное внутриконтинентальное распространение через каналы между реками, которые относятся к водосборным площадям Балтийского и других морей. Коридоры для инвазий внутренних водных организмов стали доступны в конце XVIII в., когда началось строительство системы водных путей, соединяющих Балтийское море и Понто-Каспийский регион (включая Черное, Азовское и Каспийское моря). Инвазия в Балтийском море, по-видимому, возросла за последние 50 лет из-за антропогенного воздействия (*Leppäkoski et al., 2000*). Теперь большее количество судов прибывают в Балтийское море с большими объемами балластной воды из большего количества регионов за меньшее время, чем 50 лет назад. Кроме того, увеличился отток интродуцированных видов ракообразных и рыб из соседних пресноводных источников в прибрежные заливы и лагуны Балтийского моря (*Andersson et al., 2010*). Многочисленные эксперименты по акклиматизации гидробионтов проводились в Прибалтике и северо-западных частях бывшего СССР в 1960-х и 1970-х годах с целью улучшить их видовой состав для промышленного рыболовства. В настоящее время судоходство стало важным методом инвазии водных организмов в Балтийское море (*Leppäkoski et al., 2000*). Однако количество видов, занесенных в Балтийское море на корпусах судов или в балластных танках в течение любого временного интервала, остается неизвестным.

Обзор инвазивных промысловых водных видов в странах Балтии

В таблице представлены наиболее распространенные инвазивные виды восточного побережья Балтийского моря.

Таблица. Наиболее распространенные инвазивные виды восточного побережья Балтийского моря
 Table. The most common invasive species on the eastern coast of the Baltic Sea

Название вселенца	Таксон (класс)	Семейство	Биогеографическая характеристика	Источник
<i>Zizania aquatica</i>	Liliopsida	Poaceae	бореальный	<i>Minchin et al., 2005</i>
<i>Elodea canadensis</i>	Liliopsida	Anacharidoideae	бореальный	<i>Minchin et al., 2005</i>
<i>Idotea baltica</i>	Malacostraca	Idoteidae	арктический	<i>Martin et al., 2003</i>
<i>Gammarus salinus</i>	Malacostraca	Gammaridae	бореально-арктический	<i>Martin et al., 2003</i>
<i>Rhitropanopeus harrisi</i>	Malacostraca	Panopeidae	субтропическо-бореальный	<i>Овчарук и др., 2025</i>
<i>Eriocheir sinensis</i>	Malacostraca	Varunidae	бореально-арктический	<i>Ивин, 2024</i>
<i>Palaemon adspersus</i>	Malacostraca	Palaemonidae	бореально-арктический	<i>Martin et al., 2003</i>
<i>Cercopagis pengoi</i>	Branchiopoda	Crustacea	бореально-арктический	<i>Arbačiauskas, 2002</i>
<i>Evadne anonyx</i>	Branchiopoda	Podonidae	бореально-арктический	<i>Arbačiauskas, 2002</i>
<i>Anguillicola crassus</i>	Secernentea	Anguillicolidae	бореальный	<i>Buchmann et al., 1987</i>
<i>Pseudodactylogyrus anguillae</i>	Monogenea	Dactylogyridae	бореальный	<i>Buchmann et al., 1987</i>
<i>Maeotias marginata</i>	Hydrozoa	Olinidiidae	бореально-арктический	<i>Arbačiauskas, 2002; Боровикова и др., 2018</i>
<i>Cordylophora caspia</i>	Hydrozoa	Cordylophoridae	бореально-арктический	<i>Arbačiauskas, 2002; Боровикова и др., 2018</i>
<i>Potamopyrgus jenkinsi</i>	Gastropoda	Hydrobioidea	арктический	<i>Семин и др., 2016</i>
<i>Dreissena polymorpha</i>	Bivalvia	Dreissenidae	арктическо-бореальный	<i>Давдова, 2024</i>
<i>Carassius auratus</i>	Actinopterygii	Cyprinidae	бореальный	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Actinopterygii	Cyprinidae	арктический	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Percottus glehni</i>	Actinopterygii	Eleotridae	бореально-арктический	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Salvelinus fontinalis</i>	Actinopterygii	Salmoninae	субтропическо-бореальный	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Ictalurus punctatus</i>	Actinopterygii	Ictaluridae	субтропическо-бореальный	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Ictiobus cyprinellus</i>	Actinopterygii	Catostomidae	бореально-арктический	<i>Virbickas, 2000</i>
<i>Neogobius melanostomus</i>	Actinopterygii	Gobiidae	бореально-арктический	<i>Гущин и др., 2021</i>

Рассмотрим подробнее наиболее распространенные инвазивные виды, приведенные в таблице.

Микроводоросли

Динофлагеллята *Prorocentrum minimum* является пока единственной инвазивной планктонной микроводорослью, известной в бассейне Балтийского моря. Этот вид был впервые зарегистрирован в Северном море в 1976 г. (*Smayda, 1990*) и с тех пор постепенно проник во внутренние части Балтийского моря до Финского залива. В водах стран Балтии *P. minimum* был впервые зарегистрирован в 1992 г. при численности $1,7 \cdot 10^3$ клеток/л в прибрежной зоне Литвы (*Hajdu et al., 2000*). В 1999 г. вид был впервые зарегистрирован в Рижском заливе (*BalticLINES, 2016*).

Этот вид динофлагеллят характеризуется широкой экологической толерантностью, встречаясь как в солоноватой, так и в полностью морской воде. Лабораторные эксперименты показывают, что *P. minimum* хорошо развивается при солености ниже 5 psu, что указывает на возможность его проникновения в районы с пониженной соленостью северной и восточной частей Балтийского моря (*Hajdu et al., 2000*). Полевые

наблюдения также подтверждают наличие этого вида в олигогалинных водах Куршского залива. В 1990-х годах в прибрежных районах восточной и северной Балтики наблюдалось несколько цветений, вызванных *P. minimum*, но межгодовые колебания *P. minimum* в этих районах имели нерегулярный характер. Максимальная численность *P. minimum* для Балтийского моря была зарегистрирована в одном из бассейнов гавани г. Гдыня (Польша): 350 млн клеток/л⁻¹ (Hajdu et al., 2000). В бассейне Балтийского моря максимальная численность этого вида достигла 8 млн клеток/л в 1999 г. (Khanaychenko et al., 2019). В ряде отчетов публикаций *P. minimum* связывают с накоплением токсичных веществ, но фактическая токсичность *Prorocentrum* в Балтийском море убедительно не подтверждена, и эта водоросль, по-видимому, не является токсичной (Khanaychenko et al., 2019).

Макроводоросли

Эстуарные зеленые водоросли *Chara connivens* (Chlorophyta) являются одним из интродуцированных видов макроводорослей, обнаруженных в прибрежных районах Балтики (Jensen et al., 2023). Первые записи об этом виде в солоноватом Балтийском море датируются 1858 г. Вид, скорее всего, был завезен с балластными водами (Jensen et al., 2023).

Ch. connivens также известен из внутренних озер Прибалтики, где он считался исчезающим видом из-за эвтрофикации и уничтожения местообитаний (Rybak et al., 2019). Однако некоторые наблюдения выявили, что в прибрежных водах Эстонии *Ch. connivens* показал признаки восстановления и больше не может рассматриваться как редкий вид (Martin et al., 2003). Более низкий пресс хищничества на *Ch. connivens* по сравнению с другими видами харовых водорослей может обеспечить определенные преимущества для этого вида, что, вероятно, является причиной для объяснения недавнего увеличения района его распространения (Martin et al., 2003).

Сосудистые растения

Предварительный список инвазивных водных, полуводных и прибрежных сосудистых растений состоит из 16 видов. Только два из них являются настоящими водными видами (дикий рис *Zizania aquatica* и канадская элодея *Elodea canadensis*), шесть считаются полуводными и восемь являются прибрежными травами, обитающими на морских побережьях или берегах рек.

Представленный перечень не свободен от пробелов и в будущем должен быть пересмотрен и дополнен. Большинство видов сосудистых растений (9) были завезены из Америки для декоративного использования. Другими векторами интродукции являются: торговля аквариумами, посадки в технических целях и непреднамеренные интродукции в качестве загрязнителя семян или зерна (Wallentinus, 2002; Minchin et al., 2005).

Беспозвоночные

В морских прибрежных и внутренних пресноводных средах стран Балтии зарегистрировано 30 инвазивных беспозвоночных. Большинство из них – бентосные (и нектобентосные виды), остальные – зоопланктон (3 вида) и паразиты (1 вид). Большинство инвазивных видов беспозвоночных – ракообразные (17 видов), шесть видов – олигохеты, а другие группы (гидроидные, паразитические нематоды, многощетинковые черви и двустворчатые моллюски) представлены 1 или 2 видами.

Большинство инвазивных видов беспозвоночных (11) были первоначально интродуцированы в одну из стран Балтии и впоследствии распространились по всему региону Балтийского моря. Два вида были впервые зарегистрированы в Эстонии: гидромедуза *Maotias marginata*, ветвистоусый рачок *Cercopagis pengoi*, оба вида были занесены непреднамеренно, предположительно, с балластной водой из региона Прикаспия. Девять видов впервые зарегистрированы в Литве: семь из них (понто-каспийские мизиды и амфиподы) намеренно интродуцированы в 1960-х годах (Arbačiauskas, 2002; Боровикова и др., 2018), в то время как два других (гидроид *Cordylophora caspia* и двустворчатый моллюск *Dreissena polymorpha*) появились во внутренних водах Литвы в начале 19 века, после строительства канала между рр. Неман и Днепр.

Остальные инвазивные виды (15) попали в водоемы стран Балтии в результате вторичного распространения после их первоначальной интродукции в другие части региона Балтийского моря. В некоторых случаях присутствие вида еще не подтверждено, хотя весьма вероятно. Например, паразитическая нематода *Anguillicola crassus* пока не была зарегистрирована в морских прибрежных водах Латвии, но уже была обнаружена в соседних прибрежных районах Эстонии (Kangur et al., 2003), Швеции (Höglund et al., 1989), Польши (Kangur et al., 2003) и Литвы (Kangur et al., 2003). Кроме того, два вида паразитов *Pseudodactylogyrus anguillae* (Monogeneoidea, Monopisthocotylea) пока не были зарегистрированы в прибрежных морских водах стран Балтии, однако их присутствие вероятно, поскольку оба вида уже более десяти лет присутствуют в датских водах Балтийского моря (Buchmann et al., 1987). Способы инвазий включают: а) преднамеренную интродукцию для зарыбления водоемов или для содержания в аквариумах;

б) непреднамеренное занесение судоходством (включая балластные воды судов, корпуса лодок, лесные плоты и плавающий мусор, перемещаемые по внутренним каналам); в) интродукцию, связанную с аквакультурой.

Все виды беспозвоночных создали самовоспроизводящиеся популяции в прибрежных и внутренних водах стран Балтии (Gherardi, 2007).

Рыбы

Всего в странах Балтии зарегистрировано 29 инвазивных видов рыб, относящихся к восьми семействам, причем 27 из них были намеренно завезены для расселения в бассейне Балтийского моря. Большинство интродуцированных видов (21) не создали самовоспроизводящихся популяций; поэтому их присутствие в водах бассейна Балтийского моря зависит от искусственного воспроизводства их запасов. Четыре из намеренно завезенных видов (серебряный карась *Carassius auratus gibelio*, белый амур *Ctenopharyngodon idella*, ротан *Percottus glehni* и голец *Salvelinus fontinalis*) рассматриваются как способные размножиться в естественных условиях (<https://www.researchgate.net/publication/237801551>; Virbickas, 2000). Канальный сом *Ictalurus punctatus* и большеротый буффало *Ictiobus cyprinellus* способны размножиться только в искусственно подогреваемых водоемах тепловых электростанций (Virbickas, 2000).

Примерно половина видов (14–15) рыб происходят из разных азиатских регионов (в основном с Дальнего Востока России и Сибири), происхождение пяти видов можно отнести к Понто-Каспийскому региону, а четыре вида – из Северной Америки.

Только два вида были интродуцированы непреднамеренно: бычок-кругляк *Neogobius melanostomus* и китайский элеотрис *Micropercops cinctus*. Бычок-кругляк впервые был отмечен в 1990 г. в Гданьском заливе, Польша, вероятно, из-за переноса балластных вод из Понто-Каспийского региона. Позднее *N. melanostomus* распространился в соседние немецкие и шведские прибрежные зоны (Wallin et al., 2023), а в 2002 г. он был зарегистрирован в эстонских и литовских прибрежных морских водах (Adrian-Kalchhauser et al., 2020). В сентябре 2003 г. взрослый самец в брачном окрасе был замечен водолазом с морской стороны волнолома Клайпедского порта (Matern et al., 2021). К настоящему времени бычок-кругляк, вероятно, появился и в латвийских водах. Китайский элеотрис был случайно завезен вместе с мальками некоторых азиатских растительноядных рыб в небольшое (20 га) озеро Дунояус в Литве в 1963 г. Однако в 1990 г. во время специально спланированного обследования этого водоема он не был обнаружен (van Deurs et al., 2021).

Заключение

Настоящее исследование показывает, что в странах Балтии зарегистрировано по крайней мере 76 водных (или полуводных) неместных видов. Хотя не все из них можно считать инвазивными видами, это число дает основание предполагать, что масштаб биологических инвазий в наших странах в значительной степени недооценен. Кроме того, это исследование выявило существенные пробелы в знаниях о распространении, а также об экологических эффектах и экономическом воздействии инвазивных видов в различных регионах стран Балтии. Между странами Балтии не существует естественных экологических барьеров; после вступления в Европейский Союз в мае 2004 г. также устраняются последние препятствия для свободного перемещения людей и товаров. По этим причинам инвазии в одно из государств Балтии являются релевантным индикатором потенциальной инвазии в другое. Поэтому необходимо разработать схему эффективного и своевременного обмена информацией об инвазивных видах между исследователями для всего региона Балтийского моря. Эти знания имеют высокий приоритет для надлежащего управления экосистемой. Изучение инвазий в бассейн Балтийского моря требует инициирования систематических и хорошо скоординированных исследований особенностей жизнедеятельности данных видов для предоставления лучших научных рекомендаций (например, таких, как оценки экологической уязвимости) для управления водными вселенцами. Мы надеемся, что настоящее исследование послужит катализатором для привлечения национальных и международных ресурсов с целью поддержки дальнейших многосторонних работ по промысловым инвазивным водным видам в Балтии.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с утвержденным планом тематик научных исследований ФГБОУ ВО "Калининградский государственный технический университет", осуществляемых за счет средств федерального бюджета (бюджетный цикл 2025–2027, регистрационный номер карты ЕГИСУ НИОКТР 1124072300009-1 от 23.07.2024 г.), соглашением о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

References

- Abbasi, G., Li, L., Breivik, K. 2019. Global historical stocks and emissions of PBDEs. *Environmental Science & Technology*, 53(11), pp. 6330–6340. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07032>.
- Adolf, J. E., Burns, J., Walker, J. K., Gamiao, S. 2019. Near shore distributions of phytoplankton and bacteria in relation to submarine groundwater discharge-fed fishponds, Kona coast, Hawaii, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 219, pp. 341–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.01.021>.
- Adrian-Kalchhauser, I., Blomberg, A., Larsson, T., Musilova, Z. et al. 2020. The round goby genome provides insights into mechanisms that may facilitate biological invasions. *BMC Biology*, 18. Article number: 11. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12915-019-0731-8>.
- Andersen, J. H., Al-Hamdani, Z., Harvey, E. T., Kallenbach, E. et al. 2020. Relative impacts of multiple human stressors in estuaries and coastal waters in the North Sea – Baltic Sea transition zone. *Science of The Total Environment*, 704. Article number: 135316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135316>.
- Andersen, J. H., Halpern, B. S., Korpinen, S., Murray, C. et al. 2015. Baltic Sea biodiversity status vs. cumulative human pressures. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 161, pp. 88–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.002>.
- Andersson, M. H., Öhman, M. C. 2010. Fish and sessile assemblages associated with wind-turbine constructions in the Baltic Sea. *Marine and Freshwater Research*, 61, pp. 642–650. DOI: <https://doi.org/10.1071/MF09117>.
- Arbaciauskas, K. 2002. Ponto-Caspian amphipods and mysids in the inland waters of Lithuania: History of introduction, current distribution and relations with native Malacostracans. In *Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management*. Eds.: E. Leppäkoski, S. Gollasch, S. Olenin. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9956-6_11.
- Baltic LINes. 2016. Shipping in the Baltic Sea – Past, present and future developments relevant for Maritime Spatial Planning. Project Report I. 35 p.
- Borovikova, E. A., Ezhova, E. E., Malina, Yu. I., Molchanova, N. S. 2018. Features of genetic polymorphism of the population of the alien crustacean *Dikerogammarus villosus* (Amphipoda: Gammaridae) from the Vistula Lagoon (Baltic Sea). Actual problems of studying crustaceans. Coll. of abstracts and materials of reports of the scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of N. N. Smirnov. Papanin Institute of Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, May 17–20, 2018. Yaroslavl, pp. 10–11 (In Russ.) = Боровикова Е. А., Ежова Е. Е., Малина Ю. И., Молчанова Н. С. Особенности генетического полиморфизма популяции чужеродного рачка *Dikerogammarus villosus* (Amphipoda: Gammaridae) из Вислинского залива (Балтийское море). Актуальные проблемы изучения ракообразных // Сборник тезисов и материалов докладов науч.-практ. конф., посвященной 90-летию со дня рождения Н. Н. Смирнова. Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН, Борок, 17–20 мая 2018 г. Ярославль : Филигрань, 2018. С. 10–11.
- Buchmann, K., Møllergaard, S., Køie, M. 1987. *Pseudoda ctylogyrus* infections in eel: A review. *Diseases of Aquatic Organisms*, 3, pp. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.3354/dao003051>.
- Daudova, M. D. 2024. *Dreissena polymorpha* – A naturalized invader species in the fauna of the Circucasus *Science Bulletin*, 2, pp. 2163–2171. (In Russ.) = Даудова М. Д. Дрейссена полиморфа (*Dreissena polymorpha*) – натурализованный вид инвайдер в фауне Предкавказья // Международный научный журнал "Вестник науки". 2024. Т. 6, № 75. С. 2163–2171.
- Gherardi, F., Tricarico, E. 2007. Can hermit crabs recognize social partners by odors? And why? *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*, 40(3), pp. 201–212. DOI: <https://doi.org/10.1080/10236240701562297>.
- Gushchin, A. V., Ezhova, E. E., Borovikova, E. A. 2021. Nutrition of the invasive round goblet *Neogobius melanostomus* (Perciformes: gobiidae) in the Southeast Baltic. *Russian Journal of Biological Invasions*, 4, pp. 43–53. (In Russ.) = Гушин А. В., Ежова Е. Е., Боровикова Е. А. Питание вселенца бычка-кругляка *Neogobius melanostomus* (Perciformes: Gobiidae) в юго-восточной Балтике // Российский журнал биологических инвазий. 2021. Т. 4. С. 43–53. DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-2021-14-4-43-53>.
- Hajdu, S., Edler, L., Olenina, I., Witek, B. 2000. Spreading and establishment of the potentially toxic Dinoflagellate *Prorocentrum minimum* in the Baltic Sea. *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 85, pp. 561–575. DOI: [https://doi.org/10.1002/1522-2632\(200011\)85:5/6<561::AID-IROH561>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1522-2632(200011)85:5/6<561::AID-IROH561>3.0.CO;2-3).
- HELCOM Red List of Baltic Sea species in danger of becoming extinct. 2013. Ed.: T. Kontula, J. Haldin. Helsinki Commission (Baltic Sea Environment Proceedings No. 140).
- Höglund, J., Andersson, J., Thulin, J. 1989. Asiatick ålparasit *Anguillicola* nu etablerad i svenska kust-vatten (*Anguillicola*, the Asian parasite of eel now established in Swedish coastal waters) Solna. Statens naturvårdsverk. (in Swedish with English summary).
- Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management. 2002. Eds.: E. Leppäkoski, S. Gollasch, S. Olenin. Springer Dordrecht. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9956-6>.

- Ivin, V. 2024. Distribution of the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards, 1853 in the eastern Gulf of Finland basin. *Russian Journal of Biological Invasions*, 2024, pp. 113–125. DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-3-113-125>. (In Russ.) = Ивин В. В. Распространение китайского мохнаторукого краба *Eriocheir sinensis* H. Milne Edwards, 1853 в бассейне восточной части Финского залива // Российский журнал биологических инвазий. 2024. Т. 3. С. 113–125. DOI: <https://doi.org/10.35885/1996-1499-17-3-113-125>.
- Jensen, K. R., Andersen, P., Andersen, N. R., Bruhn, A. et al. 2023. Reviewing introduction histories, pathways, invasiveness, and impact of non-indigenous species in Danish marine waters. *Diversity*, 15(3). Article number: 434. DOI: <https://doi.org/10.3390/d15030434>.
- Kangur, A., Turovski, A. 2003. *Anguilla anguilla* (L.). In *Fishes of Estonia*. Eds.: E. Ojaveer, E. Pihu, T. Saat. Tallinn : Estonian Academy Publishers, pp. 159–163.
- Khanaychenko, A., Telesh, I., Skarlato, S. 2019. Bloom-forming potentially toxic dinoflagellates *Prorocentrum cordatum* in marine plankton food webs. *Protistology*, 13(3), pp. 95–125. DOI: <https://doi.org/10.21685/1680-0826-2019-13-3-1>.
- Leppäkoski, E., Gollasch, S., Gruszka, P., Ojaveer, H. et al. 2002a. The Baltic – A sea of invaders. *Canadian Journal of Fishery and Aquatic Sciences*, 59(7), pp. 1175–1188. DOI: <https://doi.org/10.1139/f02-089>.
- Leppäkoski, E., Olenin, S. 2000. Non-native Species and Rates of Spread: Lessons from the Brackish Baltic Sea. *Biological Invasions*, 2, pp. 151–163. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010052809567>.
- Leppäkoski, E., Olenin, S., Gollasch, S. 2002b. The Baltic Sea – A field laboratory for invasion biology. In *Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management*. Springer, Dordrecht, pp. 253–259. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9956-6_27.
- Martin, G., Torn, K., Kotta, J. 2003. Recent changes in distribution pattern of introduced charophyte species *Chara connivens* in Estonian coastal waters of the Baltic Sea. Abstracts. Third International Conference on Marine Bioinvasions. La Jolla, California, USA, pp. 16–19.
- Matern, S., Herrmann, J.-P., Temming, A. 2021. Differences in diet compositions and feeding strategies of invasive round goby *Neogobius melanostomus* and native black goby *Gobius niger* in the Western Baltic Sea. *Aquatic Invasions*, 6(2), pp. 314–328. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2021.16.2.07>.
- Minchin, D., Gollasch, S., Wallentinus, I. 2005. Vector pathways and the spread of exotic species in the sea. ICES Cooperative Research Report 271.
- Olenin, S. Black Sea – Baltic Sea invasion corridors. 2002. Alien marine organisms introduced by ships in the Mediterranean and Black Seas. Monaco, pp. 29–33.
- Ovcharuk, A. S., Sudnik, S. A. 2025. Food composition and feeding strategy of the crab *Rhithropanopeus harrisi* (Brachyura: panopeidae) from the Taman bay of the Azov Sea in summer 2011. National (All-Russian) Scientific and Practical Conference "Natural Resources, Their Current State, Protection, Commercial and Technical Use", Petropavlovsk-Kamchatsky, XVI, pp. 37–40. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-35030-2025-1-37-40>. EDN: IXLBEV. (In Russ.) = Овчарук А. С., Судник С. А. Состав пищи, стратегия питания краба *Rhithropanopeus harrisi* (Brachyura: Panopeidae) из Таманского залива Азовского моря летом 2011 г. // Национальная (всероссийская) науч.-практ. конф. "Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование", Петропавловск-Камчатский, 2025, Т. XVI, с. 37–40. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-35030-2025-1-37-40>. EDN: IXLBEV.
- Paré, G., Kitsiou, S. 2017. Methods for literature reviews. In *Handbook of eHealth Evaluation: An Evidence-based Approach*. Eds.: F. Lau, C. Kuziemsky. Victoria (BC): University of Victoria. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK481583>. (Chapter 9).
- Rai, P. K., Singh, J. S. 2020. Invasive alien plant species: Their impact on environment, ecosystem services and human health. *Ecological Indicators*, 111. Article number: 106020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106020>.
- Reckermann, M., Omstedt, A., Soomere, T., Aigars, J. et al. 2022. Human impacts and their interactions in the Baltic Sea region. *Earth System Dynamics*, 13, pp. 1–80. DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-13-1-2022>.
- Rybak, A. S., Woyda-Ploszczyca, A. M. 2019. Ecology and distribution patterns of *Chara connivens* (Charophyta, Characeae) on the Canary Islands – the first record from Fuerteventura. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 48(4), pp. 368–380. DOI: <https://doi.org/10.2478/ohs-2019-0033>.
- Smayda, T. J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epi-demic. In *Toxic Marine Phytoplankton*. Proc. Fourth. Int. Conf., Toxic Marine Phytoplankton.
- Syomin, V. L., Bulysheva, N. I., Savikin, A. I., Kovalenko, E. P. 2016. Alien species of polychaetes in the benthic communities of the Sea of Azov at the beginning of the twenty-first century. *Multi thematic Online Electronic Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*, 117, pp. 1354–1366. (In Russ.) = Семин В. Л., Булышева Н. И., Савикин А. И., Коваленко Е. П. Чужеродные виды полихет в донных сообществах Азовского моря в начале XXI века // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. Т. 117. С. 1354–1366.

- The most dangerous invasive species in Russia (TOP-100). 2018. Eds. Dgebuadze Yu. Yu., Petrosyan V. G., Khlyap L. A. Moscow. (In Russ.) = Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100) / под ред. Ю. Ю. Дгебуадзе, В. Г. Петросян, Л. А. Хляп. Москва, 2018. 688 с.
- van Deurs, M., Moran, N. P., Schreiber Plet-Hansen, K., Dinesen, G. E. et al. 2021. Impacts of the invasive round goby (*Neogobius melanostomus*) on benthic invertebrate fauna: A case study from the Baltic Sea. *NeoBiota*, 68, pp. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.3897/neobiota.68.67340>.
- Virbickas, J. 2000. Lietuvos žuvis (Fish of Lithuania). Vilnius: Trys žvaigždutės. (In Lithuanian).
- Wallentinus, I. 2002. Introduced marine algae and vascular plants in European aquatic environments. In *Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management*. Eds.: E. Leppäkoski, S. Gollasch, S. Olenin. Springer, Dordrecht, pp. 27–52. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-015-9956-6_4.
- Wallin Kihlberg, I., Florin, A.-B., Lundström, K., Östman, Ö. 2023. Detection of multiple fish species in the diet of the invasive round goby reveals new trophic interactions in the Baltic Sea. *Aquatic Invasions*, 18(2), pp. 141–162. DOI: <https://doi.org/10.3391/ai.2023.18.2.104960>.

Сведения об авторе

Ульрих Елена Викторовна – пр-т Советский, 1, г. Калининград, Россия, 236022;
Калининградский государственный технический университет, д-р техн. наук, профессор;
e-mail: elen.ulrich@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

Elena V. Ulrich – 1 Sovetsky Ave., Kaliningrad, Russia, 236022;
Kaliningrad State Technical University, Dr Sci. (Engineering), Professor;
e-mail: elen.ulrich@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4107-7277>

УДК 524.1:550.385

Повышение достоверности результата ПЛС-анализа при оценке температурного эффекта мюонов в атмосфере

В. Л. Янчуковский*, Р. З. Хисамов, М. А. Калюжная, В. С. Кузьменко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия;

e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
18.12.2026;

получена
после доработки
10.02.2026;

принята
к публикации
11.02.2026

Ключевые слова:

космические лучи,
атмосфера, мюоны,
температурный эффект,
распределение
плотности
температурных
коэффициентов

Знание функции распределения плотности температурных коэффициентов для мюонов в атмосфере необходимо для корректного учета температурного эффекта в данных мюонных телескопов космических лучей. Распределение плотности температурных коэффициентов найдено с использованием информации, полученной в ходе непрерывных наблюдений интенсивности мюонов с помощью мюонных телескопов на поверхности и под землей на глубине 7, 20 и 40 м.в.э. в 2016–2018 гг., и измерения температуры на 17 изобарических уровнях атмосферы (по результатам аэрологического зондирования за этот же период). Анализ многомерных данных при исследовании температурного эффекта проведен с применением метода главных компонент и метода проекций на латентные структуры. Распределение плотности температурных коэффициентов найдены с учетом одной и двух главных компонент с последующим сопоставлением полученных результатов. При двух главных компонентах информативность увеличивается на ~4 % и составляет 97,4 % (основная доля вариаций исходной выборки приходится на первую главную компоненту, которая содержит 93,5 % информации), однако возрастает вероятность вклада шумов, который при одной ГК минимален. В процессе исследования показано, что при высоком уровне шума (при низком качестве исходных данных) с целью повышения достоверности конечного результата ПЛС-анализ целесообразно осуществлять при привлечении только одной главной компоненты.

Для цитирования

Янчуковский В. Л. и др. Повышение достоверности результата ПЛС-анализа при оценке температурного эффекта мюонов в атмосфере. Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 134–143. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-134-143>.

Increasing the reliability of the results of PLS analysis in assessing the temperature effect of muons in the atmosphere

Valery L. Yanchukovsky*, Rashit Z. Khisamov,

Marina A. Kalyuzhnaya, Vasilii S. Kuz'menko

*A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia;

e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Article info

Received
18.12.2026;

received
in revised
10.02.2026;

accepted
11.02.2026

Key words:

cosmic rays,
atmosphere, muons,
temperature effect,
temperature coefficient
density distribution

Abstract

Knowledge of the temperature coefficient density distribution function for muons in the atmosphere is required to correctly account for the temperature effect in data from cosmic-ray muon telescopes. Temperature coefficient density distributions were found using continuous muon intensity observations obtained by muon telescopes at the surface and underground at depths of 7, 20, and 40 m.w.e. for the period from 2016 to 2018, and temperature data at 17 isobaric atmospheric levels obtained from upper-air soundings over the same period. Multivariate data analysis for the temperature effect has been conducted using principal component analysis and latent structure projection (LSP). Temperature coefficient density distributions are determined using one and two principal components, followed by a comparison of the results. With two principal components, the information content increases by ~4 % to 97.4 % (the majority of the original sample's variations are attributed to the first principal component, which contains 93.5 % of the information). However, the likelihood of noise contribution increases, while noise contribution is minimal with a single LC. The study has demonstrated that, in the presence of high noise levels (with low initial data quality), PLS analysis should be performed using only one principal component to increase the reliability of the final result.

For citation

Yanchukovsky, V. L. et al. 2026. Increasing the reliability of the results of PLS analysis in assessing the temperature effect of muons in the atmosphere. *Vestnik of MSTU*, 29(1), pp. 134–143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-134-143>.

Введение

Мюоны в атмосфере являются в основном результатом распада пионов, рожденных в ядерных взаимодействиях первичных протонов космических лучей в верхних слоях атмосферы (Мурзин и др., 1968). В области энергий, превышающих несколько сотен МэВ, мюоны являются релятивистскими и ультрарелятивистскими частицами. Потери энергии мюона на ионизацию в среднем составляют около 2 МэВ на 1 г/см² вещества, т. е. определяются количеством вещества n на его пути. Мюоны – нестабильные частицы со средним временем жизни $\tau_\mu^0 \approx 2,2 \cdot 10^{-6}$ с. Более эффективно образование мюонов происходит в атмосфере на глубине с некоторой плотностью ρ . Длина пробега l_μ мюона с энергией E до распада обусловлена его временем жизни в атмосфере τ и равна

$$l_\mu = c\tau = c\tau_\mu^0 \frac{E}{mc^2}. \quad (1)$$

Предположим, частице необходимо пройти путь l до уровня ее регистрации у земной поверхности. Интенсивность мюонов на уровне регистрации будет определяться значениями параметров l , n , ρ . Изменения этих параметров вызывают временные вариации интенсивности мюонов (барометрический и температурный эффекты). В данном случае в качестве среды на пути мюона следует рассматривать атмосферу, параметры которой могут меняться во времени и вызывать вариации интенсивности мюонов. Регистрация мюонов будет наблюдаться при выполнении условия $l_\mu \geq l$. При возрастании давления количество вещества n на пути мюонов увеличивается, что приводит к возрастанию ионизационных потерь, а значит, и к уменьшению энергии E мюонов и длины пробега l_μ . Тогда для некоторой доли потока мюонов условие $l_\mu \geq l$ выполняться не будет. В то же время увеличение плотности ρ приводит к уменьшению относительной доли распада пионов с образованием мюонов. Оба фактора приводят к уменьшению регистрируемой интенсивности мюонов. И, наоборот, при уменьшении атмосферного давления происходит увеличение интенсивности мюонов (отрицательный барометрический эффект).

При изменении температуры происходит расширение или сжатие атмосферы, что приводит к изменению параметра l . Для некоторой доли потока мюонов условие $l_\mu \geq l$ не выполняется. Доля эта будет меняться с изменением l в зависимости от температуры (отрицательный температурный эффект).

Изменения давления (барометрический эффект) вызывают изменения длины пробега мюонов до распада l_μ , а изменения температуры атмосферы приводят к изменению расстояния l , которое необходимо пройти мюонам до регистрации (температурный эффект). Интегральный метод учета температурного эффекта значительно сложнее, поскольку он описывается многими параметрами, определяющими состояние атмосферы от уровня генерации до уровня регистрации мюонов. Связь интенсивности мюонов $\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t)$ с изменениями высотного профиля температуры атмосферы $\Delta T(h, t)$ во времени (Дорман, 1972) представим следующим образом:

$$\frac{\Delta I_k}{I_k}(T, t) = \int_0^h w_k(h) \Delta T(h, t) dh, \quad (2)$$

где $w_k(h)$ – функция распределения плотности температурных коэффициентов.

Функция распределения $w_k(h)$ описывает связь интенсивности мюонов с высотным профилем температуры атмосферы и отражает интегральный температурный эффект интенсивности от всей атмосферы. Таким образом, исследование температурного эффекта сводится к определению функции распределения $w_k(h)$ (Yanchukovsky, 2023; Yanchukovsky et al., 2025), которая необходима при учете вариаций атмосферного происхождения в данных, полученных с помощью телескопов для наблюдения космических лучей (Дорман, 1975). Данные непрерывных наблюдений космических лучей высоких энергий с помощью подземного комплекса мюонных телескопов на газоразрядных и сцинтилляционных детекторах (Стародубцев и др., 2016) используются при решении задач солнечно-земной физики и астрофизики космических лучей. Это приводит к необходимости более точного знания функции распределения $w_k(h)$, которая определялась в ходе теоретических расчетов.

Значения плотности температурных коэффициентов, рассчитанные теоретически, использовать на практике сложно, поскольку все установки регистрации мюонов далеки от идентичности. Они имеют различные конструктивные особенности, экраны, апертуры углов и диаграммы направленности, различную энергетическую чувствительность (коэффициенты связи, приемные векторы). На практике для учета температурного эффекта, чтобы обойти эти трудности, были разработаны различные методы, например,

оригинальный метод скрещенных телескопов (Скритин и др., 1965). Впоследствии появились другие достаточно эффективные методы учета температурного эффекта: метод эффективного уровня генерации, метод эффективной температуры, метод среднемассовой температуры (Berkova et al., 2011.; Osipenko et al., 2015), с помощью которых возможно температурный эффект атмосферы выразить через один параметр, например, через среднемассовую температуру. Температурный коэффициент от среднемассовой температуры легко находится по экспериментальным данным для конкретной установки регистрации мюонов (Янчуковский и др., 2007; Зверев и др., 2019). Использование метода главных компонент (Айвазян и др., 1989) впервые позволило по экспериментальным данным и данным аэрологического зондирования проводить оценку функции $w_k(h)$ для конкретной экспериментальной установки. Дальнейшее повышение точности оценки функции $w_k(h)$ обеспечит возможность решения и другой задачи (обратной) – получение высотного профиля температуры атмосферы по результатам непрерывных наблюдений космических лучей (Yanchukovsky, 2020).

Исходные данные и методы анализа

В качестве исходных привлечены часовые данные непрерывной регистрации интенсивности мюонов на поверхности и под землей на глубине 7, 20 и 40 м.в.э. (Стародубцев и др., 2016) за период 2016–2018 гг.¹, а также часовые показатели температуры на 17 изобарических уровнях атмосферы за тот же период, взятые из базы данных² национальных центров экологического прогнозирования США (NCEP)³.

Анализ многомерных данных при исследовании температурного эффекта проводился с помощью метода главных компонент (МГК) (Айвазян и др., 1989; Айвазян, 2001). В качестве переменных рассматривается температура на 17 изобарических уровнях атмосферы. Так как эти переменные коррелированы между собой, в анализе были использованы методы проекций на латентные структуры (ПЛС) (Esbensen, 2002). Суть метода заключается в построении пространства из некоторого числа неявных параметров, ортогональных друг к другу, т. е. в преобразовании в новую систему координат (Esbensen, 2002). Новым началом координат является центр облака данных, который определяется путем центрирования исходных данных и называется нулевой главной компонентой (ГК). Первой ГК считается первая координата, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна. Второй ГК является вторая координата, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна при условии ортогональности первой координате. За k -ю ГК принимают k -ю координату, выборочная дисперсия данных вдоль которой максимальна при условии ее ортогональности к предыдущим координатам $k - 1$. Исходные данные предварительно следует представить в виде исходной матрицы переменных X размерностью $I \times J$. Затем вводятся новые переменные t_a ($a = 1, \dots, A$), представляющие собой линейную комбинацию исходных переменных x_j ($j = 1, \dots, J$):

$$t_a = p_{a1}x_1 + \dots + p_{aJ}x_J, \quad (3)$$

что позволяет преобразовать исходную матрицу X в произведение матриц T и P :

$$X = TP^t + E = \sum_{a=1}^A t_a p_a^t + E. \quad (4)$$

Матрицу T размерностью $I \times A$ называют матрицей счетов, матрицу P размерностью $J \times A$ – матрицей нагрузок, матрицу E размерностью $I \times J$ – матрицей остатков. Новые переменные t_a называются главными компонентами, а число столбцов t_a в T -матрице и число столбцов p_a в P -матрице называют числом ГК (A), которое намного меньше числа переменных J и числа образцов I . ПЛС-анализ представляет собой два МГК-анализа, осуществляемых для X и Y :

$$X = \sum_A TP^t + E, \quad Y = \sum_A UQ^t + F.$$

Здесь T и P – счета и нагрузки, составляющие X , а для Y они выражены через U и Q соответственно. ПЛС-декомпозиция проводится не в виде двух независимых операций МГК-анализа в разных пространствах, а с учетом связи пространств X и Y . При этом проекция строится так, чтобы максимизировать корреляцию между соответствующими векторами X -счетов t_a и Y -счетов u_a . Преобразование привело к значительному понижению размерности данных, а также к ортогональности новых переменных (главных компонент). Число ГК определяет грань между структурной частью, где матрица T содержит основную информацию исходной матрицы X , и шумом матрицы E .

Распределение плотности температурных коэффициентов было получено (Yanchukovsky et al., 2025) при выбранном числе главных компонент, равном 2. При $A = 2$ информативность составляет 97,4 %, причем основная доля вариаций исходной выборки приходится на первую главную компоненту, которая

¹ См.: URL.: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/mt> ; URL.: <https://ikfia.ysn.ru/data/heclab/ipm>.

² URL.: <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>.

³ URL.: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>.

содержит 93,5 % информации. При двух ГК информативность увеличивается менее, чем на 4 %, но при этом возрастает вероятность вклада шумов, который при одной ГК минимален (рис. 1).

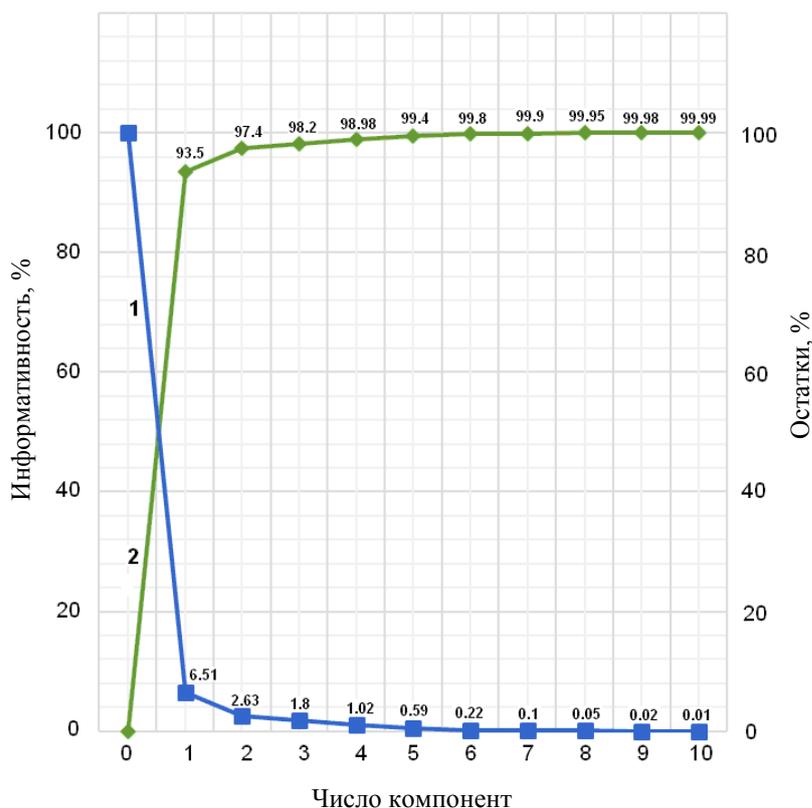


Рис. 1. Дисперсия остатков (кривая 1) и информативность преобразованных данных (кривая 2)
 Fig. 1. Dispersion of residuals (curve 1) and information content of transformed data (curve 2)

Результаты и обсуждение

При анализе, как и ранее (Yanchukovsky, 2023), использовалась программа The Unscrambler X⁴. Программа дает возможность вести ПЛС-анализ, используя несколько алгоритмов. Алгоритм Orthogonal Scores PLS не позволяет проводить обработку в случае, когда отсутствует несколько значений в рядах данных (Martens et al., 1991); алгоритм Wide-kernel PLS годится для обработки данных, содержащих большое число переменных, но незначительное количество образцов (Rannar et al., 1994); алгоритм Kernel PLS обеспечивает обработку данных при большом числе образцов (тысячи образцов) со значительным числом переменных (Lindgren et al., 1993; de Jong et al., 1994; Dayal et al., 1997). Для решения данной задачи оптимальным выбором является алгоритм Kernel PLS. Температурные коэффициенты α_i (% / °C) и плотности температурных коэффициентов w_i (% / °Catm) для мюонов, наблюдаемых на глубине 0, 7, 20 и 40 м.в.э., найденные с помощью ПЛС-анализа с использованием одной ГК, представлены в табл. 1–4 для направлений вертикаль (00), север и юг под углом к зениту 30° (N30, S30), а также под углом к зениту 60° (N60, S60).

Таблица 1. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на поверхности MT00

Table 1. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope on the MT00 surface

i	h_i , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-687	-711	-679	-758	-789	15	-4 350	-4 500	-4 300	-4 800	-5 002
2	20	-679	-697	-661	-747	-765	10	-4 299	-4 413	-4 186	-4 733	-4 846
3	30	-609	-571	-541	-612	-626	15	-3 855	-3 613	-3 428	-3 875	-3 968
4	50	-654	-672	-637	-720	-738	20	-3 108	-3 190	-3 027	-3 422	-3 504
5	70	-616	-632	-600	-678	-694	20	-2 925	-3 002	-2 848	-3 220	-3 297
6	100	-669	-687	-651	-736	-754	45	-1 412	-1 449	-1 375	-1 555	-1 592

⁴ URL.: <http://www.camo.com/rt/Products/Unscrambler/unscrambler.html>.

7	150	-650	-667	-633	-716	-733	50	-1 235	-1 268	-1 203	-1 360	-1 392
8	200	-443	-454	-431	-487	-499	50	-841	-863	-819	-926	-948
9	250	-718	-737	-699	-791	-810	50	-1 365	-1 401	-1 329	-1 502	-1 538
10	300	-1 366	-1 402	-1 330	-1 504	-1 540	75	-1 730	-1 776	-1 685	-1 905	-1 950
11	400	-1 935	-1 985	-1 884	-2 130	-2 181	100	-1 838	-1 886	-1 789	-2 023	-2 072
12	500	-2 106	-2 161	-2 050	-2 318	-2 373	100	-2 000	-2 053	-1 948	-2 202	-2 255
13	600	-2 163	-2 220	-2 106	-2 381	-2 438	100	-2 055	-2 109	-2 001	-2 262	-2 316
14	700	-2 258	-2 317	-2 198	-2 486	-2 545	150	-1 430	-1 468	-1 392	-1 574	-1 612
15	850	-2 798	-2 872	-2 724	-3 080	-3 154	100	-2 658	-2 728	-2 588	-2 926	-2 996
16	925	-3 527	-3 620	-3 435	-3 883	-3 976	50	-6 702	-6 879	-6 526	-7 378	-7 555

Таблица 2. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 7 м.в.э. МТ07

Table 2. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 7 m.w.e. МТ07

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-410	-443	-395	-514	-349	15	-2 595	-2 805	-2 501	-3 255	-2 211
2	20	-396	-428	-382	-502	-339	10	-2 506	-2 711	-2 419	-3 179	-2 146
3	30	-321	-347	-310	-407	-275	15	-2 033	-2 200	-1 963	-2 580	-1 741
4	50	-388	-420	-375	-493	-334	20	-1 844	-1 995	-1 780	-2 340	-1 579
5	70	-348	-377	-336	-442	-298	20	-1 655	-1 791	-1 598	-2 101	-1 418
6	100	-374	-405	-361	-474	-320	45	-790	-854	-762	-1 002	-676
7	150	-359	-388	-346	-455	-307	50	-681	-737	-658	-864	-583
8	200	-242	-262	-233	-307	-207	50	-459	-497	-443	-583	-394
9	250	-396	-429	-382	-503	-339	50	-753	-815	-727	-955	-645
10	300	-749	-811	-723	-951	-642	75	-949	-1 027	-916	-1 204	-813
11	400	-1 062	-1 149	-1 025	-1 348	-910	100	-1 009	-1 092	-974	-1 280	-864
12	500	-1 158	-1 253	-1 118	-1 469	-992	100	-1 101	-1 190	-1 062	-1 395	-942
13	600	-1 191	-1 289	-1 150	-1 511	-1 020	100	-1 132	-1 224	-1 092	-1 435	-969
14	700	-1 245	-1 347	-1 201	-1 579	-1 066	150	-788	-853	-761	-1 001	-675
15	850	-1 544	-1 671	-1 491	-1 959	-1 322	100	-1 467	-1 587	-1 336	-1 861	-1 256
16	925	-1 946	-2 106	-1 878	-2 469	-1 667	50	-3 698	-4 001	-3 569	-4 691	-3 166

Таблица 3. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 20 м.в.э. МТ20

Table 3. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 20 m.w.e. МТ20

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-5}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-269	-256	-267	-253	-269	15	-1 705	-1 621	-1 691	-1 603	-1 704
2	20	-256	-251	-258	-249	-264	10	-1 624	-1 591	-1 635	-1 576	-1 673
3	30	-210	-206	-211	-204	-216	15	-1 329	-1 303	-1 339	-1 291	-1 370
4	50	-256	-249	-259	-249	-264	20	-1 216	-1 181	-1 225	-1 182	-1 254
5	70	-232	-223	-234	-226	-240	20	-1 104	-1 060	-1 112	-1 073	-1 138
6	100	-253	-248	-254	-245	-260	45	-533	-523	-537	-518	-549
7	150	-245	-241	-247	-238	-253	50	-466	-457	-469	-453	-481
8	200	-167	-164	-168	-162	-172	50	-317	-311	-320	-309	-327
9	250	-271	-266	-273	-263	-279	50	-515	-505	-519	-501	-531
10	300	-516	-506	-519	-501	-531	75	-653	-641	-658	-635	-673
11	400	-731	-716	-736	-709	-753	100	-694	-681	-699	-674	-715
12	500	-795	-779	-801	-772	-819	100	-755	-741	-761	-733	-778
13	600	-817	-801	-823	-793	-842	100	-776	-761	-781	-754	-799
14	700	-853	-836	-859	-828	-878	150	-540	-529	-544	-524	-556
15	850	-1 057	-1 036	-1 064	-1 026	-1 089	100	-1 004	-984	-1 011	-975	-1 034
16	925	-1 332	-1 306	-1 341	-1 293	-1 372	50	-2 531	-2 481	-2 549	-2 458	-2 608

Таблица 4. Температурные коэффициенты и плотности температурных коэффициентов мюонного телескопа на глубине 40 м.в.э. МТ40

Table 4. Temperature coefficients and densities of temperature coefficients of the muon telescope at the depth of 40 m.w.e. МТ40

<i>i</i>	<i>h_i</i> , мб	$\alpha_i \cdot 10^{-6}$					Δh_i , мб	$w_i \cdot 10^{-4}$				
		00	30N	30S	60N	60S		00	30N	30S	60N	60S
1	10	-933	-906	-933	-861	-1 081	15	-591	-574	-591	-545	-685
2	20	-878	-853	-878	-813	-1 045	10	-556	-540	-556	-515	-662
3	30	-718	-698	-718	-665	-856	15	-455	-442	-455	-421	-542
4	50	-876	-850	-876	-810	-1 017	20	-416	-404	-416	-385	-483
5	70	-796	-773	-796	-737	-895	20	-378	-367	-378	-350	-425
6	100	-866	-839	-866	-801	-1 030	45	-183	-177	-183	-169	-217
7	150	-841	-815	-841	-778	-1 001	50	-160	-155	-160	-148	-190
8	200	-573	-555	-573	-530	-681	50	-109	-105	-109	-101	-129
9	250	-929	-901	-929	-860	-1 106	50	-176	-171	-176	-163	-210
10	300	-1 767	-1 714	-1 767	-1 636	-2 103	75	-224	-217	-224	-207	-266
11	400	-2 503	-2 427	-2 503	-2 317	-2 978	100	-238	-231	-238	-220	-283
12	500	-2 724	-2 641	-2 724	-2 521	-3 242	100	-259	-251	-259	-240	-308
13	600	-2 799	-2 714	-2 799	-2 590	-3 330	100	-266	-258	-266	-246	-316
14	700	-2 922	-2 832	-2 922	-2 704	-3 476	150	-185	-179	-185	-171	-220
15	850	-3 620	-3 510	-3 620	-3 350	-4 308	100	-344	-333	-344	-318	-409
16	925	-4 564	-4 425	-4 564	-4 224	-5 431	50	-867	-841	-867	-803	-1 032

Переход от α_i к w_i осуществляется посредством учета весового коэффициента $\Delta h_i / \sum_{i=1}^{17} \Delta h_i$, который отражает относительную массу слоя *i* атмосферы. Число ГК, равное 1 (*A* = 1), объясняет 93,5 % исходной вариации и доводит вклад шумов до минимума. Этим повышается способность выделить эффект на фоне шума, что повышает мощность теста. Интеграл (2) допускает применение теоремы о среднем, тогда

$$\frac{\Delta I}{I}(T) = \overline{w(T_0, h_0, h)} \int_0^h \Delta T(h) dh \text{ или } \frac{\Delta I}{I}(T) = \alpha_{sm} \Delta T_{sm}.$$

Здесь α_{sm} – температурный коэффициент от среднемассовой температуры атмосферы ΔT_{sm} , которая находится как $\Delta T_{sm} = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i / \sum_{i=1}^n \Delta h_i$, где ΔT_i – изменения температуры слоя *i* относительно среднего (или опорного) значения. Таким образом, интегральный температурный эффект можно представить в виде эффекта от среднемассовой температуры атмосферы. Тогда среднее значение w_i на интервале от 0 до 950 мб должно быть равно значению α_{cm} в пределах точности оценки коэффициентов. Результаты проверки с помощью метода ПЛС при *A* = 1 представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты проверки
 Table 5. Test results

Угол к зениту		0	N30	S30	N60	S60
МТ 00	$\overline{w_i}$	-0,237 ± 0,0088	-0,243 ± 0,0085	-0,231 ± 0,0078	-0,261 ± 0,0064	-0,267 ± 0,0059
	α_{cm}	-0,225 ± 0,0018	-0,230 ± 0,002	-0,21 ± 0,0019	-0,245 ± 0,004	-0,251 ± 0,0045
МТ 07	$\overline{w_i}$	-0,132 ± 0,005	-0,143 ± 0,0044	-0,127 ± 0,0043	-0,165 ± 0,0041	-0,113 ± 0,0039
	α_{cm}	-0,125 ± 0,0023	-0,134 ± 0,003	-0,120 ± 0,0031	-0,157 ± 0,0047	-0,107 ± 0,0029
МТ 20	$\overline{w_i}$	-0,0891 ± 0,0034	-0,0877 ± 0,003	-0,0898 ± 0,0028	-0,0866 ± 0,0027	-0,0919 ± 0,0024
	α_{cm}	-0,086 ± 0,0022	-0,084 ± 0,002	-0,087 ± 0,0022	-0,084 ± 0,0022	-0,088 ± 0,0022
МТ 40	$\overline{w_i}$	-0,0307 ± 0,003	-0,0296 ± 0,0025	-0,0307 ± 0,002	-0,0282 ± 0,0013	-0,0360 ± 0,0010
	α_{cm}	-0,029 ± 0,0007	-0,029 ± 0,001	-0,029 ± 0,0008	-0,027 ± 0,0013	-0,035 ± 0,0014

Наблюдается согласие средних значений $\overline{w_i}$, полученных с использованием ПЛС-анализа, с коэффициентом α_{cm} среднемассовой температуры атмосферы. Аналогичной проверке удовлетворяли и результаты, полученные ранее при двух ГК (*A* = 2) (Yanchukovsky, 2023; Yanchukovsky et al., 2025). Для

сопоставления полученных результатов на рис. 2 представлены распределения $w_i(h)$ для мюонов в атмосфере с вертикального направления, полученные с помощью методов ПЛС при $A = 1$ и $A = 2$.

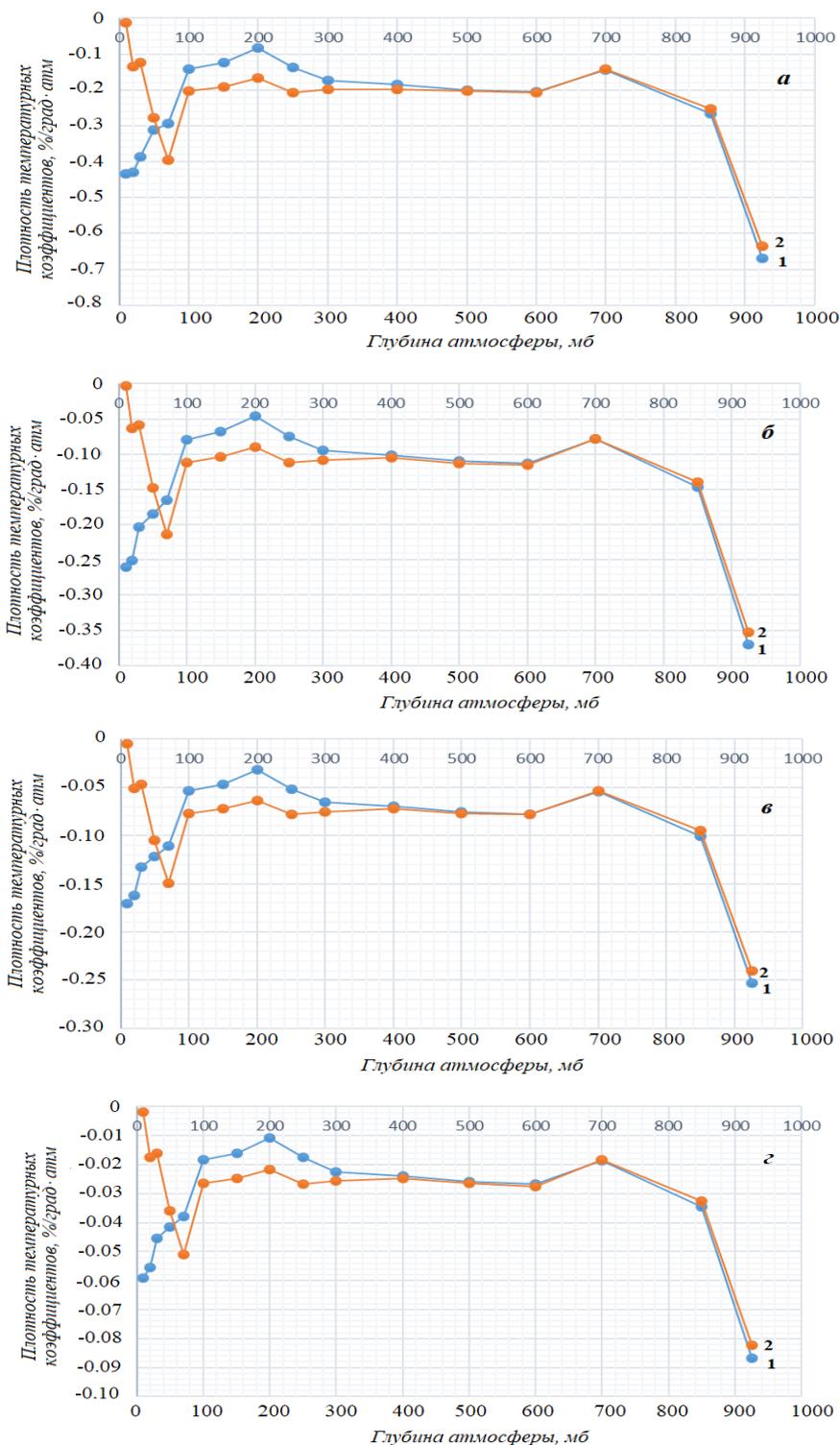


Рис. 2. Распределение плотности температурных коэффициентов для мюонов, регистрируемых на поверхности (а) и глубине 7 (б), 20 (в) и 40 м.в.э. (г) с вертикальных направлений, найденные методами ПЛС

с привлечением одной (кривая 1) и двух (кривая 2) главных компонент
 Fig. 2. Distributions of the density of temperature coefficients for muons registered on the surface (а) and underground at the depth of 7 m.w.e. (б), 20 m.w.e. (в) and 40 m.w.e. (г) from the vertical directions, found by PLS methods using one (curve 1) and two (curve 2) principal components

Результаты, полученные при $A = 1$ и $A = 2$, согласуются с учетом широкой области атмосферы 300–950 мб и всех уровней наблюдений мюонов (0, 7, 20 и 40 м. в. э.) В то же время наблюдаются различия в характере распределений в области атмосферы ≤ 300 мб, обусловленные зашумленностью исходных данных (качеством данных). Измерения вариаций интенсивности $\frac{\Delta I_k}{I_k}(t)$ мюонов осуществлялось с точностью 0,05 %. Оценить ошибки при определении изменений температуры $\Delta T_i(t)$ по данным аэрологического зондирования затруднительно, так как аэрологическое зондирование осуществляется два раза в сутки и предполагает проведение измерений до высот 30 км, однако часто зонды не достигают и меньших высот. Число пропусков измерений температуры при этом возрастает с высотой и зависит от сезона. Наибольшее число пропусков происходит в зимний период. Данные прямых измерений температуры в эти периоды представляют собой результат экстраполяции (Дорман, 1972). Эффект от пропусков становится статистически значимым в области атмосферы менее 300 мб, т. е. на высотах более 9–10 км (рис. 2).

Заключение

В результате исследования выполнен анализ многомерных данных, полученных в ходе длительных наблюдений интенсивности мюонов с помощью подземного комплекса мюонных детекторов (г. Якутск), и данных аэрологического зондирования атмосферы при определении температурного эффекта мюонов. С использованием методов главных компонент найдено распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере.

При высоком уровне шума (т. е. при низком качестве исходных данных) с целью повышения достоверности конечного результата ПЛС-анализ целесообразно осуществлять с учетом только одной главной компоненты.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Результаты получены с использованием оборудования УНУ-85 "Российская национальная сеть станций космических лучей" (<http://www.ckr-rf.ru/usu/433536>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М. : Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- Айвазян С. А. Прикладная статистика и основы эконометрики. М. : Юнити, 2001. 403 с.
- Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей. М. : Наука, 1972. 211 с.
- Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М. : Наука, 1975. 462 с.
- Зверев А. С., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. Учет температурного эффекта в данных измерений мюонных телескопов // Физика околоземного космического пространства: материалы Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФФ-2019). Иркутск : ИСЗФ СО РАН, 2019. С. 151–153.
- Мурзин В. С., Сарычева Л. И. Космические лучи и их взаимодействие. М. : Атомиздат, 1968. 391 с.
- Скрипин Г. В., Кривошапкин П. А., Крымский Г. Ф. Изучение анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5, № 5. С. 817–822.
- Стародубцев С., Григорьев В., Гололобов П. Якутский спектрограф космических лучей им. А. И. Кузьмина: современное состояние // сб. тр. Всероссийской конференции "Гелиогеофизические исследования в Арктике", 19–23 сентября 2016 г., г. Мурманск. Мурманск : Полярный геофизический институт, 2016. С. 125–129.
- Янчуковский В. Л., Филимонов Г. Я., Хисамов Р. З. Атмосферные вариации интенсивности мюонов для различных зенитных углов регистрации // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71, № 7. С. 1066–1068.
- Berkova M. D., Belov A. V., Eroshenko E. A., Yanke V. G. Temperature effect of the muon component and practical questions for in real time // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2011. Vol. 75, Iss. 6. P. 820–824.
- Dayal B. S., McGregor J. F. Improved PLS algorithms // Journal of Chemometrics. 1997. Vol. 11. P. 73–65. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199701\)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199701)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#).
- De Jong S., Ter Braak C. Comments on the PLS kernel algorithm // Journal of Chemometrics. 1994. Vol. 8. P. 169–174.
- Esbensen K. Multivariate data analysis in practice: An introduction to multivariate data analysis and experimental design. Oslo, Norway: Camo Process AS, 2002. 598 p.
- Lindgren F., Geladi P., Wold S. The kernel algorithm for PLS // Journal of Chemometrics. 1993. Vol. 7. P. 45–59.

- Martens H., Naes T. *Multivariate calibration*. Chichester, UK : John Wiley and Sons, 1991.
- Osipenko A. S., Abunina A. A., Berkova M. D., Barbashina N. S. [et al.]. Analyzing the temperature effect of high mountain cosmic ray detectors using the database of the global network of muon telescopes // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. Vol. 79, Iss. 5. P. 662–666. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873815050317>.
- Rannar S., Lindgren F., Geladi P., Wold S. A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. Part 1: Theory and algorithm // *Journal of Chemometrics*. 1994. Vol. 8. P. 111–125.
- Yanchukovsky V. L. Muon intensity variations and atmospheric temperature // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2020. Vol. 6, Iss. 1. P. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-61202013>.
- Yanchukovsky V. L. Temperature effect of muons detected underground in Yakutsk using telescopes on gas-discharge counters // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2023. Vol. 9, Iss. 2. P. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-92202307>.
- Yanchukovsky V. L., Khisamov R. Z. Temperature effect of muons detected underground using scintillation detectors // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2025. Vol. 11, Iss. 1. P. 98–108. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-111202511>. EDN: WIHSJQ.

References

- Ayvazyan, S. A., Bukhtaber, V. M., Enyukov, I. S., Meshalkin, L. D. 1989. *Applied statistics. Classification and dimensionality reduction*. Moscow. (In Russ.)
- Ayvazyan, S. A. 2001. *Applied statistics and fundamentals of econometrics*. Moscow. (In Russ.)
- Dorman, L. I. 1972. *Meteorological effects of cosmic rays*. Moscow. (In Russ.)
- Dorman, L. I. 1975. *Experimental and theoretical foundations of cosmic ray astrophysics*. Moscow. (In Russ.)
- Zverev, A. S., Grigoriev, V. G., Starodubtsev, S. A. 2019. Taking into account the temperature effect in the measurement data of muon telescopes. *Physics of Near-Earth Space. Section B. In Baikal school of fundamental physics*. Irkutsk, pp. 151–153. (In Russ.)
- Murzin, V. S., Sarycheva, K. I. 1968. *Cosmic rays and their interactions*. Moscow. (In Russ.)
- Skripin, G. V., Krivoschapkin, P. A., Krymsky, G. F. 1965. Study of cosmic ray anisotropy by the crossed telescope method. *Geomagnetism and Aeronomy*, 5(5), pp. 817–822. (In Russ.)
- Starodubcev, S., Grigor'ev, V., Gololobov, P. 2016. The Yakutsk cosmic ray spectrograph named after A. I. Kuzmin: Current status. In coll. of Proceedings of the All-Russian Conference *Heliogeophysical Research in the Arctic*. Murmansk, 19–23 September, 2016. Murmansk, pp. 125–129. (In Russ.)
- Yanchukovsky, V. L., Filimonov, G. Ya., Khisamov, R. Z. 2007. Atmospheric variations of muon intensity for different zenith angles of registration. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physical Series*, 71(7), pp. 1066–1068. (In Russ.)
- Berkova, M. D., Belov, A. V., Eroshenko, E. A., Yanke, V. G. 2011. Temperature effect of the muon component and practical questions for in real time. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 75(6), pp. 820–824.
- Dayal, B. S., McGregor, J. F. 1997. Improved PLS algorithms. *Journal of Chemometrics*, 11, pp. 73–65. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-128X\(199701\)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-128X(199701)11:1<73::AID-CEM435>3.0.CO;2-#).
- De Jong, S., Ter Braak, C. 1994. Comments on the PLS kernel algorithm. *Journal of Chemometrics*, 8, pp. 169–174.
- Esbensen, K. 2002. *Multivariate data analysis in practice: An introduction to multivariate data analysis and experimental design*. Oslo.
- Lindgren, F., Geladi, P., Wold, S. 1993. The kernel algorithm for PLS. *Journal of Chemometrics*, 7, pp. 45–59.
- Martens, H., Naes, T. 1991. *Multivariate calibration*. Chichester.
- Osipenko, A. S., Abunina, A. A., Berkova, M. D., Barbashina, N. S. et al. 2015. Analyzing the temperature effect of high mountain cosmic ray detectors using the database of the global network of muon telescopes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 79(5), pp. 662–666. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1062873815050317>.
- Rannar, S., Lindgren, F., Geladi, P., Wold, S. 1994. A PLS kernel algorithm for data sets with many variables and fewer objects. Part 1: Theory and algorithm. *Journal of Chemometrics*, 8, pp. 111–125.
- Yanchukovsky, V. L. 2020. Muon intensity variations and atmospheric temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 6(1), pp. 108–115. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-61202013>.
- Yanchukovsky, V. L. 2023. Temperature effect of muons detected underground in Yakutsk using telescopes on gas-discharge counters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 9(2), pp. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-92202307>.
- Yanchukovsky, V. L., Khisamov, R. Z. 2025. Temperature effect of muons detected underground using scintillation detectors. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 11(1), pp. 98–108. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-111202511>. EDN: WIHSJQ.

Сведения об авторах

Янчукский Валерий Леонидович – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Valery L. Yanchukovsky – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS,
Dr Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher;
e-mail: yanchukovskiyvl@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-8626>

Хисамов Рашит Замалтдинович – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, вед. инженер;
e-mail: khisamovrz@ipgg.sbras.ru

Rashit Z. Khisamov – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Leading Engineer;
e-mail: khisamovrz@ipgg.sbras.ru

Калюжная Марина Анатольевна – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, инженер;
e-mail: kalyuzhnayama@ipgg.sbras.ru

Marina A. Kalyuzhnaya – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Engineer;
e-mail: kalyuzhnayama@ipgg.sbras.ru

Кузьменко Василий Сергеевич – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090;
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, техник;
e-mail: KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3355-3179>

Vasiliy S. Kuz'menko – 3 Koptug Ave., Novosibirsk, Russia, 630090;
A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics SB RAS, Engineer;
e-mail: KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3355-3179>

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

Оформить подписку онлайн на журнал «Вестник МГТУ» можно:

– по Объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Подписной индекс – 41212

URL: <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/i41212/>

Электронные версии журнала «Вестник МГТУ» размещены:

– на веб-сайте ФГАОУ ВО «МАУ» (URL: <http://vestnik.mstu.edu.ru>)

– в Научной электронной библиотеке «eLIBRARY.RU» (URL: <http://elibrary.ru>)

– в Научной электронной библиотеке «CYBERLENINKA» (URL: <http://cyberleninka.ru>)

– в электронно-библиотечной системе ИД «Лань» (URL: www.e.lanbook.com)

– в базе данных Applied Science & Technology Source Ultimate компании
EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost

– в каталоге журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals
(DOAJ, Швеция) (URL: <https://doaj.org/toc/1997-4736>)

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
95 2000 ОК 005-93

ВЕСТНИК МГТУ

Том 29, № 1 (январь – март) 2026 г.



Подписано в печать 23.03.2025
Дата выхода в свет 26.03.2026
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 16.74. Тираж 500 экз. Заказ № 38.
Цена 2 961 руб. 00 коп.

Адрес издателя:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в Издательстве МАУ :
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13