

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 27, № 1 (январь – март), 2024 г.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ



EARTH SCIENCES

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 27, N 1 (January – March), 2024

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 27, № 1 (январь – март), 2024 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 27, N 1 (January – March), 2024**

**Мурманск
2024**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 27, № 1 (январь – март), 2024 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель

ФГАОУ ВО "Мурманский государственный
технический университет"

Главный редактор

Власов А. Б., д-р техн. наук, профессор
(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 (Лулео, 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@mstu.edu.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 27, N 1 (January – March), 2024
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder

FSAEI HE "Murmansk State
Technical University"

Editor-in-Chief

Vlasov A. B., Dr Sci. (Engineering),
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)

Zhirov 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@mstu.edu.ru

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

ISSN 1560-9278 (Print) © ФГАОУ ВО "Мурманский арктический университет", 2024

ISSN 1997-4736 (Online) © FSAEI HE "Murmansk Arctic University", 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Геология, геофизика

Бобачев А. А., Дешеревский А. В., Сидорин А. Я. Эффект выбора сетки разносов при прецизионном решении обратной задачи вертикального электротзондирования.....	5
Гойчук О. Ф., Коноплёва Н. Г., Лепеха С. В., Савченко Е. Э., Паникоровский Т. Л. Нетипичные компоненты в составе нефелина из пород Хибинского массива по данным ИК спектроскопии.....	24
Гравис А. Г., Устинова Е. В., Пономарева О. Е., Дроздов Д. С., Бердников Н. М., Голубкова Я. А. Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара.....	39
Кузина З. Я., Неведрова Н. Н., Санчаа А. М. Геоэлектрическая модель выхода пород фундамента на дневную поверхность в Уймонской впадине Горного Алтая на основе численного трехмерного моделирования.....	52
Решетняк М. Ю. Высокая теплопроводность ядра Земли и геодинамо.....	61

Геоэкология

Королёв В. А. Особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов..	67
Кочетова Ж. Ю., Лазарев И. С., Зиброва Н. В., Базарский О. В. Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск).....	83
Мязин В. А., Шушков Д. А., Фокина Н. В., Чапоргина А. А., Канивец А. В., Брянцев А. В. Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы.....	91

Горное дело

Гусак С. А. Сравнительный анализ применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для теоретической оценки эффективной теплопроводности горных пород.....	103
---	-----

C O N T E N T S

Geology, Geophysics

Bobachev A. A., Deshcherevskii A. V., Sidorin A. Ya. The effect of spacing grid in the precision solution of the inverse vertical electric sounding problem.....	5
Goychuk O. F., Konopleva N. G., Lepekha S. V., Savchenko Ye. E., Panikorovskii T. L. Atypical components in the composition of nepheline from rocks of the Khibiny massif according to IR spectroscopy data.....	24
Gravis A. G., Ustinova E. V., Ponomareva O. E., Drozdov D. S., Berdnikov N. M., Golubkova Ya. A. The main results of monitoring the power of the active layer at CALM sites of the Nadymsky object.....	39
Kuzina Z. Ya., Nevedrova N. N., Sanchaa A. M. Geoelectric model of the exposure of basement rocks to the surface in the Uimon depression of Goriy Altay based on three-dimensional numerical modeling.....	52
Reshetnyak M. Yu. High thermal conductivity of the Earth's core and geodynamo.....	61

Geoecology

Korolev V. A. Peculiarities of ecological and geological systems of coarse-clastic soil massifs.....	67
Kochetova Zh. Yu., Lazarev I. S., Zibrova N. V., Bazarsky O. V. Detailed chemical analysis of soils and identification of priority pollutants on the territory of the state aviation airfield (Krymsk).....	83
Myazin V. A., Shushkov D. A., Fokina N. V., Chaporgina A. A., Kanivets A. V., Bryantsev A. V. Effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for treatment oil-contaminated soil.....	91

Mining

Gusak S. A. Comparative analysis of the application of the Lichtenecker and Lichtenecker – Asaad models for the theoretical assessment of the rocks effective thermal conductivity.....	103
--	-----

УДК 550.837.311

Эффект выбора сетки разносов при прецизионном решении обратной задачи вертикального электротондирования

А. А. Бобачев, А. В. Дещеревский*, А. Я. Сидорин

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: adeshere@ifz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9934-0341>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
15.11.2023;

получена
после доработки
18.12.2023;

принята к публикации
20.12.2023

Ключевые слова:

геоэлектрический мониторинг, прецизионные зондирования, ВЭЗ, погрешность инверсии данных ВЭЗ, сетка разносов, эффект раскочки сопротивлений как особый вид эквивалентности

Для цитирования

Реферат

Электрические методы мониторинга напряженно-деформированного состояния земной коры предполагают измерение кажущегося сопротивления, однако физический интерес представляют изменения удельного сопротивления. В ходе ежедневного (в течение 12 лет) измерения кажущегося сопротивления земной коры с помощью стационарной 32-электродной установки вертикального электрического зондирования в высокосейсмичном районе Таджикистана и прецизионной аппаратуры получен профиль вертикального электрического зондирования особого вида, у которого от пикета к пикету меняется дата зондирования. Для инверсии полевых данных была разработана специальная версия программы IPI, учитывающая особенности измерительной установки. Первоначально прямая и обратная задачи вертикального электрического зондирования решались на стандартной логарифмической сетке разносов, что существенно увеличивало скорость расчетов. Фактические данные интерполировались к данной сетке. Однако тестирование алгоритма на синтетических данных показало, что в этом случае предельно достижимая точность ограничивается особым видом эквивалентности – эффектом раскочки сопротивлений. В прецизионной версии программы IPI реализовано несколько алгоритмических приемов, нацеленных на уменьшение погрешности решения обратной задачи. При описании эффектов, зависящих от выбора той или иной сетки разносов, произведено сравнение результатов решения обратной задачи для синтетических профилей в двух версиях программы IPI и определен полезный эффект от перехода на фактическую сетку разносов. При сравнении результатов инверсии экспериментального профиля вертикального электрического зондирования, полученного в результате многолетних наблюдений, по косвенным признакам произведена оценка амплитуды ошибок, возникающих при использовании логарифмической сетки разносов.

Бобачев А. А. и др. Эффект выбора сетки разносов при прецизионном решении обратной задачи вертикального электротондирования. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 5–23. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-5-23>.

The effect of spacing grid in the precision solution of the inverse vertical electric sounding problem

Alexey A. Bobachev, Alexey V. Deshcherevskii*, Alexander Ya. Sidorin

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: adeshere@ifz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9934-0341>

Article info

Received
15.11.2023;

received
in revised
18.12.2023;

accepted
20.12.2023

Key words:

geoelectric monitoring, precision solution, VES curve inversion error, VES spacing grid, the buildup effect as a special kind of equivalence

Abstract

Electrical methods for monitoring the stress-strain state of the Earth's crust involve measuring apparent resistivity, but changes in resistivity are of physical interest. During daily (for 12 years) measurements of the apparent resistivity of the Earth's crust using a stationary 32-electrode vertical electrical sounding installation in a highly seismic region of Tajikistan and precision equipment, a vertical electrical sounding profile of a special type was obtained for which the sounding date changes from picket to picket. To invert field data, a special version of the IPI program was developed taking into account the features of the measuring setup. Initially, the direct and inverse problems of vertical electrical sounding were solved on a standard logarithmic spacing grid which significantly increased the speed of calculations. The actual data were interpolated to this grid. However, testing the algorithm on synthetic data showed that in this case the maximum achievable accuracy is limited by a special type of equivalence – the effect of resistance buildup. The precision version of the IPI program implements several algorithmic techniques aimed at reducing the error in solving the inverse problem. When describing the effects that depend on the choice of one or another spacing grid, the results of solving the inverse problem for synthetic profiles in two versions of the IPI program were compared and the beneficial effect of switching to the actual spacing grid was determined. When comparing the results of inversion of the experimental vertical electrical sounding profile obtained as a result of long-term observations, the amplitude of errors arising when using a logarithmic spacing grid was assessed using indirect evidence.

For citation

Bobachev, A. A. et al. 2024. The effect of spacing grid in the precision solution of the inverse vertical electric sounding problem. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 5–23. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-5-23>.

Введение

Высокая чувствительность электрического сопротивления горных пород к изменениям напряженно-деформированного состояния обусловила широкое использование электрических методов при геодинамическом мониторинге (Бектемиров и др., 1988; Wilkinson et al., 2011; Богданов и др., 2013; Loke et al., 2014; Supper et al., 2014a, 2014b и др.). Однако прямые измерения удельного сопротивления горных пород (УЭС) на глубине залегания возможны лишь в исключительных случаях. Измерительные установки вертикального электротзондирования (ВЭЗ) почти всегда располагаются на поверхности, а для расчета удельных сопротивлений решается обратная задача ВЭЗ (Заборовский, 1963; Якубовский, 1980; Куфуд, 1984; Электрическое..., 1988, 1992; Электроразведка..., 1994; Бобачев и др., 2022г и др.). Именно по такой схеме проводились измерения сопротивления на Гармском прогностическом полигоне в 1979–1992 гг. (Сидорин, 1990). Несмотря на то что этот эксперимент был выполнен более 30 лет назад, он до сих пор не имеет аналогов в мировой практике по длительности и точности непрерывных наблюдений, которые выполнялись на протяжении 12 лет ежедневно. Сейсмическая активность района (Лукк и др., 1990) была настолько высокой, что за время наблюдений очаговые зоны местных землетрясений несколько раз захватывали зондируемый объем. Информативная ценность полученных данных возрастает благодаря тому, что на полигоне одновременно проводились другие непрерывные геофизические наблюдения с использованием широкого комплекса методов, что существенно расширяет интерпретационные возможности каждого метода. Вышеизложенные факты в полной мере относятся и к изучению явлений, протекающих в очаговой зоне землетрясения как в период его подготовки, так и после сейсмического события (Сидорин, 1992). Таким образом, исключительное научное значение полученных данных сохраняется до настоящего времени.

Основным результатом эксперимента является набор из нескольких тысяч кривых ВЭЗ, полученных на одной стационарной многоэлектродной установке (Децереvский и др., 2017). Она включала 12 питающих и 4 приемных диполя с общим центром, расположенных на одной линии (Децереvский и др., 2018б, табл. 1, рис. 1). Полученную совокупность кривых ВЭЗ можно рассматривать как профиль ВЭЗ особого типа, каждый пикет которого соответствует определенной календарной дате. С формальной точки зрения, инверсия такого профиля аналогична обработке данных обычных полевых профильных зондирований методом ВЭЗ, с той разницей что любые изменения сопротивлений вдоль профиля будут характеризовать не пространственные вариации УЭС, а изменения сопротивлений во времени (Бобачев и др., 2020а, 2020б). Разница, однако, состоит в том, что пространственные изменения обычно имеют достаточно высокую амплитуду, в то время как амплитуда временных вариаций сопротивления быстро уменьшается с глубиной (Сидорин, 1986; Децереvский и др., 2004, 2018б). При этом наибольший интерес с точки зрения мониторинга представляют вариации сопротивления нижних, самых глубоких слоев разреза (Сидорин, 1986, 1992; Бобачев и др., 2022в, 2023). Это определяет особые требования к точности как измерительной установки, так и алгоритма инверсии кривых ВЭЗ.

Используемая для наблюдений цифровая станция электрического зондирования СЭЗ (Осташевский и др., 1990, 1991; Сидорин и др., 1996) обеспечивала точность единичных измерений сопротивления порядка 0,01 %, однако на практике из-за неизбежных помех фактическая погрешность могла возрастать до 0,1 % (Децереvский и др., 2004, 2018а). Тем не менее эти значения были выдающимися для своего времени и остаются достаточно высокими даже по сегодняшним меркам. Основная неопределенность при восстановлении значений УЭС обусловлена не погрешностями измерений, а точностью решения обратной задачи.

Как известно, обратная задача ВЭЗ является неустойчивой и некорректной. В общем случае ее решение невозможно без наложения некоторых априорных ограничений на модель геоэлектрического разреза (Заборовский, 1963; Якубовский, 1980; Куфуд, 1984; Электрическое..., 1988, 1992; Электроразведка..., 1994). При использовании установки ВЭЗ модель разреза обычно упрощается до одномерной, т. е. среда рассматривается в горизонтально-слоистом приближении. При необходимости могут накладываться дополнительные ограничения (например, фиксируются число и мощность слоев) (Колесников, 2007).

Изначально обратная задача ВЭЗ решалась именно в таком приближении. Однако почти сразу же выяснилось, что широко используемые в традиционной электроразведке алгоритмы инверсии данных ВЭЗ (Заборовский, 1963; Якубовский, 1980; Куфуд, 1984; Электрическое..., 1988, 1992; Электроразведка..., 1994) не обеспечивают ту точность, которая необходима при мониторинге временных вариаций сопротивления (Сидорин, 1986; Богданов и др., 2013). В частности, это было установлено при использовании программы IPI (Induced Polarization Interpretation)¹ (Bobachev, 2002).

Для преодоления возникших трудностей мы двигались в трех направлениях. Во-первых, наличие 12-летних рядов с сильным сезонным эффектом позволило разработать особый подход к построению базовой (среднепогодной) модели геоэлектрического разреза. При определении количества и мощности слоев учитывались не только особенности среднепогодной кривой ВЭЗ и значения

¹ Бобачев А. А. Комплекс IPI-1D – одномерная профильная интерпретация данных ВЭЗ и ВЭЗ-ВП [Электронный ресурс]. URL: <http://geoelectric.ru/ipi2win.htm> (дата доступа: 26.06.2020).

сопротивлений, но и амплитуда сезонного хода сопротивления на разных глубинах. Именно по этой причине в верхней части разреза было выделено несколько слоев с минимальным контрастом сопротивлений, но резко отличающейся амплитудой сезонных эффектов. Это позволило наиболее точно отслеживать изменения сопротивлений во времени, включая и сезонный эффект (Децеровский и др., 2018а, 2018б).

Во-вторых, мы учли, что при мониторинговых исследованиях наиболее интересны не абсолютные значения сопротивлений слоев, а их изменения. В частности, приповерхностные неоднородности искажают кривую ВЭЗ и увеличивают невязку подбора, однако сами по себе интереса не представляют. Это дало основания ввести в данные ВЭЗ так называемую поправку за геологический шум, в результате чего фактическая среднесезонная кривая ВЭЗ приблизилась к теоретической кривой ВЭЗ для построенного разреза (Децеровский и др., 2017). Подчеркнем, что корректировались только средние значения кажущегося сопротивления на отдельных разностях, а все изменения сопротивлений во времени сохранялись.

В-третьих, нами была разработана специальная прецизионная версия программы IPI, учитывающая специфику использовавшейся на ст. Хазор-Чашма установки (заглубление электродов и др.) (Децеровский и др., 2017).

В совокупности это способствовало уменьшению погрешности решения обратной задачи и невязки подбора почти на порядок по сравнению с обычно используемыми программами (Децеровский и др., 2018а, 2018б). Однако анализ полученных решений (прежде всего амплитуд, фаз и других особенностей сезонных эффектов в разных слоях) позволил обоснованно предположить, что фактические погрешности рассчитанных значений УЭС в действительности значительно превышают те величины, которые можно было бы ожидать при невязках порядка 1 % и менее (Децеровский и др., 2018б; Бобачев и др., 2020а).

Чтобы детально изучить причины возможных ошибок, был построен пакет синтетических профилей ВЭЗ и УЭС, моделирующих возможные сценарии сезонного хода сопротивления различных слоев. Для каждого модельного профиля сначала решалась прямая задача, затем на полученные кривые ВЭЗ накладывался дополнительный шум, аналогичный реальным шумам, после чего решалась обратная задача ВЭЗ и анализировались ошибки решения. В результате было показано, что при малых невязках подбора фактическая ошибка оценки УЭС может на один-два порядка превосходить достигнутую невязку (Бобачев и др., 2020а). В такой ситуации величина невязки не должна служить индикатором качества решения обратной задачи. Реальная точность ограничивается так называемым эффектом раскачки сопротивлений – особым видом эквивалентности, проявляющимся в том числе и для того типа разрезов, который характерен для ст. Хазор-Чашма (Бобачев и др., 2020а, 2020б).

Для подавления эффекта раскачки разработано несколько алгоритмов регуляризации обратной задачи ВЭЗ (Бобачев и др., 2020б, 2022а). Это позволило дополнительно уменьшить погрешность восстановления истинных значений УЭС еще в несколько раз (Бобачев и др., 2022б, 2022в, 2022г). Одновременно было замечено, что помимо использования регуляризации точность инверсии можно существенно увеличить при правильном выборе сетки разностей, на которой решается прямая задача.

Традиционно при инверсии ВЭЗ для расчета прямой задачи применяется логарифмическая сетка разностей, согласованная с параметрами фильтра (Электрическое..., 1988). Это позволяет более чем на порядок ускорить расчеты интегрального преобразования Ханкеля, так как один и тот же спектральный потенциал используется при расчетах для нескольких разностей [см. ниже формулы (3) и (4)]. При этом фактические данные измерений (либо синтетические тестовые данные) интерполируются к используемой сетке разностей. Понятно, что такой пересчет может приводить к смещению некоторых оценок.

Поскольку начало расчетной шкалы разностей выбирается произвольно, то одна и та же фактическая сетка разностей интерполируется к расчетной шкале разными способами. В работе (Бобачев и др., 2022а) сравнивались результаты инверсии для двух вариантов программы, в которых расчетная сетка разностей [см. ниже формулу (4)] привязывалась к максимальному либо к минимальному разности экспериментальной установки. Тестирование алгоритма на синтетических данных показало, что эффект сетки разностей может быть очень существенным при прецизионной инверсии. Выбор той сетки разностей, которая лучше соответствует фактическим разностям экспериментальной установки, позволяет значительно уменьшить ошибки решения и подавить раскачку на некоторых границах.

С учетом этого, в следующей версии программы IPI при расчетах использовалась фактическая (полевая) шкала разностей экспериментальной установки ВЭЗ с шестью точками на декаду (см. ниже табл. 3). Это позволило отказаться от интерполяции данных кажущегося сопротивления и выполнять минимизацию непосредственно по измеренным данным.

Основная цель настоящей работы – демонстрация влияния сетки разностей на точность восстановления истинных значений УЭС и амплитуду эффекта раскачки. С этой целью проводится сравнение решений обратной задачи в двух версиях программы IPI: IPI_2020 и IPI_2023. Программа IPI_2020 выполняет расчеты на логарифмической сетке разностей с семью точками на декаду, интерполируя экспериментальные или синтетические данные к указанной сетке, а программа IPI_2023 – на фактической сетке разностей (другие опции, добавленные в программу IPI_2023, при расчетах были отключены).

Материалы и методы

Исходные данные и методика тестирования

Поскольку основная цель работы состояла в максимально точном восстановлении динамики изменений УЭС в нижних слоях геоэлектрического разреза ст. Хазор-Чашма Гармского полигона, методика тестирования оптимизировалась конкретно под данный разрез. Для этого был построен пакет синтетических профилей УЭС, моделирующих экспериментальный разрез (Децереvский и др., 2018а; Бобачев и др., 2020а, 2022б). Все модельные профили включали по 1 461 пикету, каждый из которых сопоставлялся с определенной календарной датой. Шаг между пикетами составлял 2 сут, полная длина профилей – 8 лет, что примерно соответствует реальным рядам с учетом пропущенных наблюдений.

Ранее при обработке данных многолетнего мониторинга различных природных процессов на Гармском полигоне было установлено, что большинство таких временных рядов представляют собой суперпозицию сезонной и фликкер-шумовой (ФШ) составляющих (Децереvский и др., 1994, 1996, 1997б, 1999б, 1999в, 2001, 2003, 2021а, 2021б; Децереvский, 1996а, 1996б; Лукк и др., 1996). Данная модель в полной мере применима и в случае кажущегося сопротивления (Децереvский и др., 1996, 1997а; 1999а). С учетом этого, синтетические временные ряды УЭС строились в виде суммы сезонной S_{365} и фликкер-шумовой составляющих:

$$УЭС_i^{(j)} = S_{365,i}^{(j)} + ФШ^{(j)}, \quad (1)$$

где i – это номер модели (табл. 1), а j – номер слоя. Всего было построено девять синтетических профилей УЭС, отличающихся фазой и амплитудой сезонной вариации в нижних слоях разреза.

Таблица 1. Фаза сезонной вариации $S_{365,i}^{(j)}$ в слоях 1–4 для моделей М1–М9 (Бобачев и др., 2020а, 2022б).

Значения фазы приведены в сутках относительно сезонной вариации в верхнем слое

Table 1. Phase of seasonal variation $S_{365,i}^{(j)}$ in layers 1–4 for models М1–М9 (Bobachev et al., 2020a, 2022b).

Phase values are given in days relative to seasonal variation in the upper layer

Модель (вариант профиля)	Слой модельного разреза			
	1	2	3	4
М1	0	0	0	0
М2	0	0	=*	0
М3	0	0	0	=
М4	0	9	30	90
М5	0	9	=	90
М6	0	9	30	=
М7	0	9	213	90
М8	0	9	30	273
М9	0	9	=	=

Примечание. *Знаком "=" показаны случаи, когда задана нулевая амплитуда сезонной вариации (нет сезонных эффектов в слое).

Как видно из табл. 1, регулярная (сезонная) составляющая вариаций УЭС задавалась аналогично работам (Бобачев и др., 2020а, 2022а, 2022б). Однако в отличие от указанных работ, в настоящей работе уменьшена амплитуда фликкер-шумовой составляющей УЭС (табл. 2). Целесообразность такой корректировки обусловлена уточнением характеристик как экспериментальных рядов УЭС, восстановленных в ходе выполненного цикла исследований, так и шумов, присутствующих в данных кажущегося сопротивления. Из-за этого стохастические различия между моделями уменьшились, что позволяет более точно отследить влияние эффекта сетки разносов на погрешность решения и раскочку для профилей (разрезов), аналогичных разрезу Гармского полигона.

Таблица 2. Базовый геоэлектрический разрез (Децереvский и др., 2018а) и амплитуда сезонной (Бобачев и др., 2022б) и фликкер-шумовой составляющих синтетических рядов УЭС

Table 2. Basic geoelectric section (Deshcherevsky et al., 2018a) and amplitude of seasonal (Bobachev et al., 2022b) and flicker-noise components of electrical resistivity synthetic series

Слой	Мощность	Среднее значение УЭС, Ом·м	Амплитуда сезонной компоненты УЭС, %	Отношение амплитуды ФШ-компоненты УЭС к амплитуде сезонной вариации УЭС, %
1	1,5	30,0	24	6,27
2	8,7	40,0	3,5	11,62
3	56	30,0	1,2	49,47
4	∞	250,0	2,8	16,37

Процедура тестирования воспроизводила схему, предложенную в работах (Бобачев и др., 2020а, 2022а, 2022б):

1. По синтетическим рядам УЭС_{*i*}^(*p*) [формула (1)] рассчитывались временные ряды кажущегося сопротивления $\rho_{a,i}^{(p)}$ (прямая задача ВЭЗ). Здесь $i = 1, \dots, 9$ – номер модели, а $p = 1, \dots, 18$ – номер разноса.

2. Для каждого разноса p генерировался шум $\text{Noise}^{(p)}$, имитирующий реальные шумы экспериментальной установки. При этом мы стремились обеспечить максимальную реалистичность шумов. С этой целью шум Noise генерировался по алгоритму Фосса (Voss, 1985, 1991), причем параметр Фосса (Децереvский, 1997) подбирался так, чтобы спектральные характеристики синтетического фликкер-шума соответствовали таковым у реальных шумов (Децереvский, 1996а, 1996б; Децереvский и др., 1996, 1997а, 1997б, 1999в, 2003; Бобачев и др., 2022в). Амплитуда шума задавалась равной амплитуде несезонной компоненты вариаций ρ_k , осредненной по нескольким ближайшим разносам. Кроме того, обеспечивалась коррелированность шумов $\text{Noise}^{(p)}$ на разносах с общими питающими либо приемными линиями, аналогичная таковой для реального эксперимента (Бобачев и др., 2020а, 2022а). Полученный шум добавлялся к рядам $\rho_{a,i}^{(p)}$:

$$\rho_{a,i}^{*(p)} = \rho_{a,i}^{(p)} + \text{Noise}^{(p)}. \quad (2)$$

Подробнее методика построения модельных рядов $\rho_{a,i}^{(p)}$ с наложенным фликкер-шумом описана в работе (Бобачев и др., 2020а) (см. рис. 5 из указанной работы), однако для настоящего исследования был сгенерирован новый набор шумов, а их амплитуда немного увеличена по сравнению с процитированной работой.

3. На следующем этапе для полученного зашумленного профиля $\rho_{a,i}^{*(p)}$ решалась обратная задача ВЭЗ, оценивались и анализировались ошибки решения [см. рис. 6 из работы (Бобачев и др., 2020а)]. Такие расчеты выполнялись для построенных рядов в целом, а также для сезонной и фликкер-шумовой составляющих (Бобачев и др., 2020б, 2022б), однако для экономии места в работе показаны только результаты для совокупных рядов.

Инверсия проводилась в двух вариантах: в программе IPI_2020, использующей логарифмическую сетку разносов, и в программе IPI_2023, использующей фактическую сетку разносов. Поскольку целью работы была оценка эффекта сетки разносов, регуляризация, в отличие от работ (Бобачев и др., 2022а, 2022б, 2022в, 2022г, 2023), не использовалась.

Алгоритм инверсии на логарифмической и фактической сетках разносов

Для решения прямой задачи ВЭЗ выполняется численный расчет интеграла Ханкеля

$$\rho_k(r) = \rho_1 r^2 \int_0^\infty R(m) m J_1(mr) dm, \quad (3)$$

где r – разнос установки ВЭЗ; J_1 – функция Бесселя первого порядка; $R(m)$ называется кернел-функцией и является электрическим полем в спектральной области; m – обобщенная пространственная частота.

Вычисление этого интеграла осложняется наличием осциллирующей и слабо затухающей функции J_1 , бесконечным пределом интегрирования и необходимостью вычисления кернел-функции при большом числе различных значений параметра m .

В настоящее время для расчета кривых электрических зондирований чаще всего применяется метод линейной фильтрации (Электроразведка..., 1994). Исходный интеграл Ханкеля заменой переменных преобразуется в интеграл свертки, который после дискретизации приводится к виду линейного фильтра, позволяющего вычислять кажущееся сопротивление ρ_k :

$$\rho_k(r) = \rho_1 \sum_{k=1}^N R(m_k) G_k, \quad (4)$$

где m_k – пространственная частота; G_k – коэффициенты фильтра; N – длина фильтра.

Пространственные частоты зависят от разноса r и растут в геометрической прогрессии. Шаг прогрессии зависит от параметров фильтров и примерно равен $\sqrt[3]{10} \approx 1,39$. Число коэффициентов фильтра $N \sim 10-20$. Таким образом, расчет одного разноса требует более 10 расчетов кернел-функции. Если использовать сетку разносов с геометрическим шагом, совпадающим с параметром фильтра, то число расчетов кернел-функции сокращается на порядок, так как значения пространственной частоты m_k будут повторяться на разных разносах.

Таблица 3. Фактическая (полевая) сетка разносов установки ВЭЗ на ст. Хазор-Чашма и стандартная вычислительная сетка с семью ступенями на декаду

Table 3. Actual (field) spacing grid of the vertical electrical sounding (VES) installation at Khazor-Chashma station and a standard computational grid with seven steps per a decade

Факт.	3	4,5	6	9	15	25	40	65	100	150	225	325	–	–	–
Станд.	3,0	4,17	5,79	8,05	11,18	15,54	21,59	30,0	41,68	57,92	80,48	111,8	155,4	215,9	300,0

Кривая ВЭЗ всегда достаточно гладкая (углы наклона кривой ВЭЗ не превышают 45 градусов), поэтому пересчет полевой кривой ВЭЗ на новую сетку разносов обычно никак не сказывается на результатах расчета. Особенно если учесть, что типичная точность измерений методом ВЭЗ равна 2–5 %.

Как показано ниже, при прецизионной инверсии подобные манипуляции с данными недопустимы, так как возникающие при этом ошибки уже нельзя считать пренебрежимо малыми. С учетом этого, мы отказались от работы с фиксированной сеткой разносов (табл. 3, строка "Станд.") и перешли к вычислениям на фактической сетке (табл. 3, строка "Факт."), что немедленно отразилось на результатах инверсии (рис. 1). Фактически из процедуры расчетов был полностью исключен этап интерполяции данных к стандартной сетке разносов, привнесший в вычисления дополнительный шум. "Платой" за такое повышение точности инверсии является увеличение времени счета.

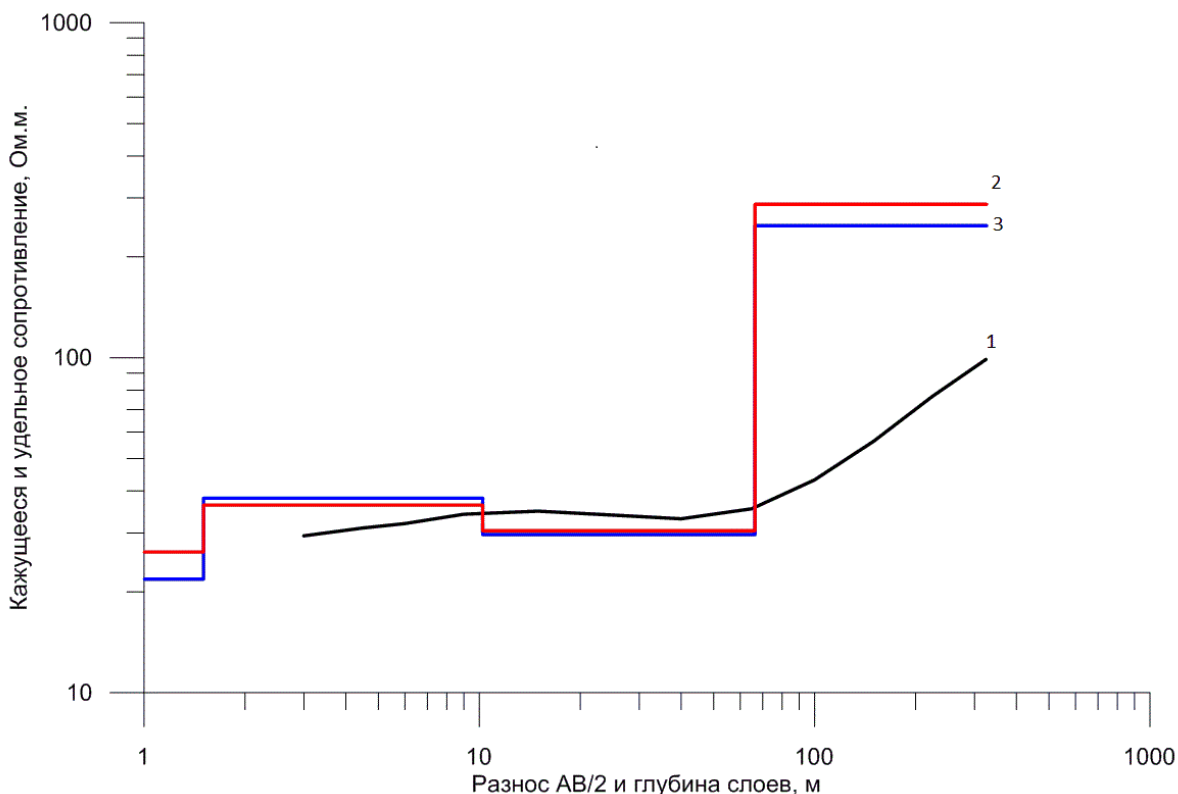


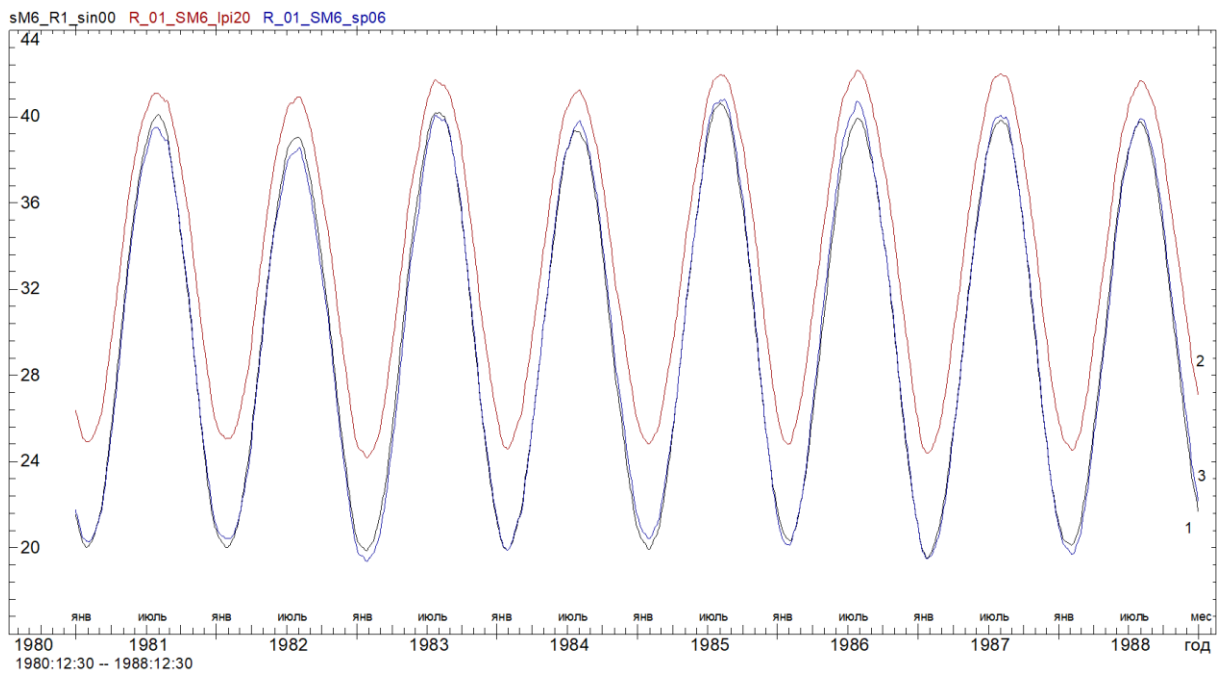
Рис. 1. Пример полевой кривой ВЭЗ (кривая 1) и две эквивалентные модели, полученные при инверсии по различным сеткам разносов: логарифмическая (кривая 2, красная) и фактическая (кривая 3, синяя)
 Fig. 1. An example of the typical VES curve (curve 1) and two equivalent variants of 1D inversion: standard spacing grid (red) and field data spacing (blue). All thicknesses were fixed before inversion

Результаты и обсуждение

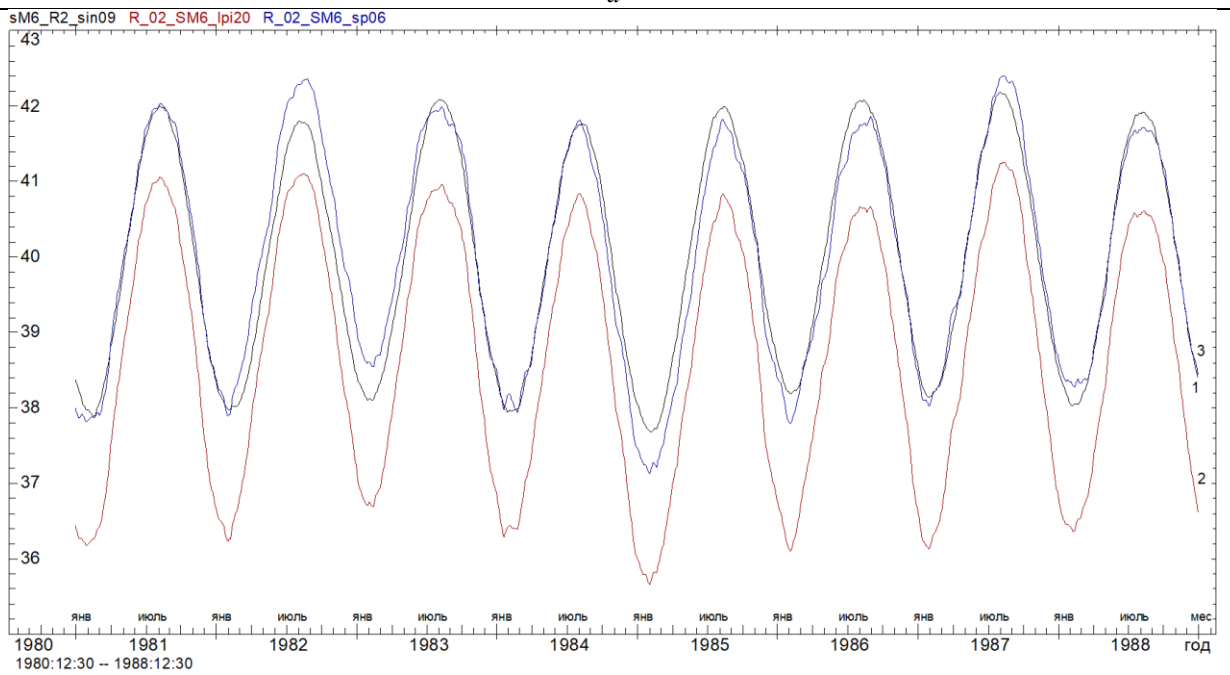
Сравнение результатов для синтетических данных

Примеры восстановленных кривых УЭС для модели М6 приведены на рис. 2. На каждом графике показана исходная (модельная) кривая УЭС, а также кривые УЭС, рассчитанные двумя способами: 1) на логарифмической сетке разносов и 2) на фактических разносах.

Как видно из рис. 2, расчеты в программе IPI_2020, использующей логарифмическую сетку разносов, привели к существенному смещению значений УЭС во всех четырех слоях. Кривая (2) смещена относительно истинных значений УЭС (кривая 1) намного сильнее, чем кривая (3), рассчитанная на фактической сетке разносов в программе IPI_2023.



a



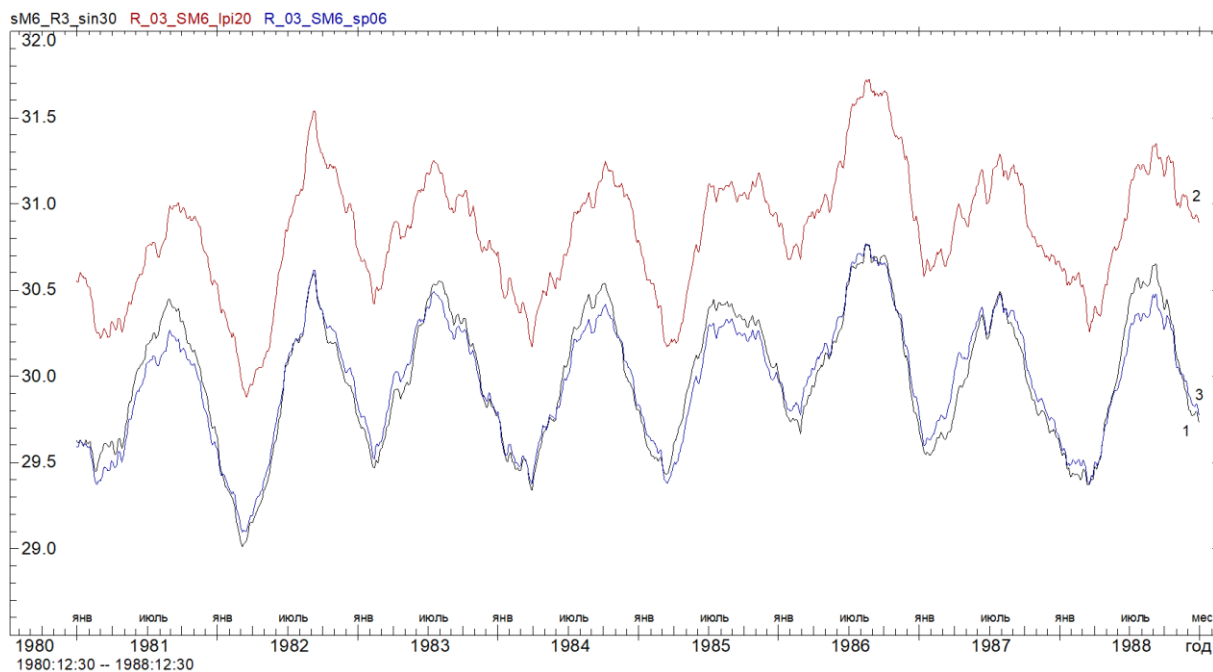
b

Рис. 2. Модельные (синтетические) вариации УЭС (кривая 1) и результат инверсии в программах IPI_2020 (кривая 2) и IPI_2023 (кривая 3) для модели М6:

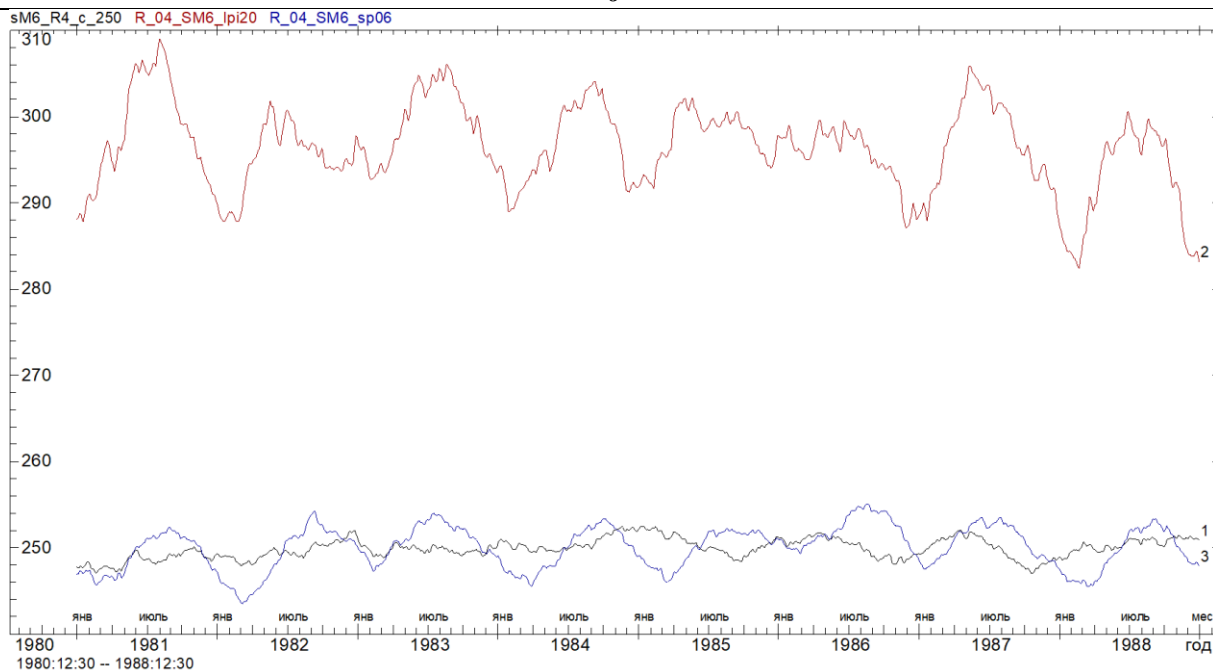
a – слой 1; *b* – слой 2

Fig. 2. Model (synthetic) variations of VES (curve 1) and the result of inversion in the programs IPI_2020 (curve 2) and IPI_2023 (curve 3) for the model M6:

a – layer 1; *b* – layer 2



6



2

Рис. 2 (продолжение). Модельные (синтетические) вариации УЭС (кривая 1) и результат инверсии в программах IPI_2020 (кривая 2) и IPI_2023 (кривая 3) для модели М6:
 v – слой 3; z – слой 4

Fig. 2 (continued). Model (synthetic) variations of VES (curve 1) and the result of inversion in the programs IPI_2020 (curve 2) and IPI_2023 (curve 3) for the model M6:
 v – layer 3; z – layer 4

Также стоит обратить внимание на рис. 2, z , где показана исходная и восстановленные кривые вариаций УЭС в слое 4. Сезонный ход УЭС в этом слое в модели М6 был задан константой (табл. 1), что показано на рис. 2, z (кривая 1 не имеет регулярной периодической составляющей и представлена фликкер-шумом). Однако несмотря на нулевую амплитуду сезонного хода модельной кривой УЭС, на кривой 2 очевиден мощный сезонный эффект, согласованный с сезонным ходом УЭС в слое 3. При этом амплитуда сезонной вариации в слое 3 занижена по сравнению с истинной (рис. 2, v), а в слое 4 – резко завышена, что приводит к значительной антикорреляции между ошибками решений (табл. 4). Именно

этот эффект называется раскачкой сопротивлений (*Бобачев и др., 2020а, 2020б*). При расчетах на фактической сетке разносов (рис. 2, з, кривая 3) амплитуда раскачки значительно уменьшается, хотя высокая антикорреляция между ошибками решений по-прежнему сохраняется. Несмотря на уменьшение абсолютной величины ошибок в табл. 5 по сравнению с табл. 4, коэффициент корреляции между ошибками решения (который мы рассматриваем как один из основных индикаторов наличия раскачки) почти не уменьшается.

В более формальном виде сводка результатов для девяти моделей приведена в табл. 4 и 5. В каждой строке таблиц показаны результаты инверсии для одной из моделей М1–М9 (табл. 1). В табл. 6 показано отношение ошибок для двух вариантов инверсии.

Заметим, что в отличие от работы (*Бобачев и др., 2020а*) (см. табл. 2–5 из указанной работы) различия между моделями в настоящей работе значительно меньше, что обусловлено изменением характеристик фликкер-шумовой компоненты УЭС синтетических профилей, а также наложенного шума линий. Несмотря на существенное изменение тестовых данных, общие закономерности сохраняются.

Таблица 4. Невязка подбора, средний и максимальный модуль ошибки оценивания УЭС для каждой из моделей 1–9, %. Коэффициент корреляции между ошибками решения (со знаком) в слоях 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 (расчет на логарифмической сетке разносов)
 Table 4. Fitting discrepancy, average and maximum modulus of error in resistivity estimation for each of the models 1–9, %. Correlation coefficient between solution errors (signed) in layers 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4 (calculation on a logarithmic spacing grid)

Модель	Невязка	R1		R2		R3		R4		Корреляция ошибок		
		Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	r12	r23	R34
1	0,86	11,92	6,14	2,14	0,78	1,47	0,44	6,78	1,95	-0,60	-0,13	-0,75
2	0,86	11,86	6,10	2,08	0,75	1,49	0,45	7,36	2,19	-0,57	-0,12	-0,74
3	0,86	11,92	6,15	2,17	0,78	1,50	0,45	5,79	1,53	-0,60	-0,15	-0,77
4	0,86	11,97	6,17	2,14	0,78	1,49	0,46	5,92	1,59	-0,60	-0,14	-0,75
5	0,86	11,92	6,13	2,08	0,75	1,51	0,47	6,45	1,80	-0,58	-0,14	-0,74
6	0,86	11,97	6,17	2,14	0,78	1,51	0,46	5,82	1,58	-0,60	-0,15	-0,77
7	0,86	11,86	6,10	2,04	0,73	1,58	0,47	7,01	2,04	-0,56	-0,14	-0,73
8	0,86	11,97	6,17	2,14	0,78	1,52	0,46	6,09	1,74	-0,60	-0,15	-0,72
9	0,86	11,92	6,13	2,08	0,75	1,52	0,46	6,36	1,75	-0,58	-0,14	-0,78
Сред.	0,86	11,92	6,14	2,11	0,76	1,51	0,46	6,40	1,80	-0,59	-0,14	-0,75

Таблица 5. Невязка подбора, средний и максимальный модуль ошибки оценивания УЭС для каждой из моделей 1–9, %. Коэффициент корреляции между ошибками решения (со знаком) в слоях 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 (расчет на фактической сетке разносов)
 Table 5. Fitting discrepancy, average and maximum modulus of error in resistivity estimation for each of the models 1–9, %. Correlation coefficient between solution errors (signed) in layers 1 and 2, 2 and 3, 3 and 4 (calculation on the actual spacing grid)

Модель	Невязка	R1		R2		R3		R4		Корреляция ошибок		
		Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	r12	r23	R34
1	0,35	4,35	1,25	2,09	0,62	0,99	0,29	3,16	0,75	-0,31	0,21	-0,74
2	0,35	4,36	1,25	2,09	0,62	0,99	0,29	3,12	0,75	-0,31	0,21	-0,73
3	0,35	4,35	1,25	2,09	0,62	0,99	0,29	3,22	0,75	-0,31	0,21	-0,74
4	0,35	4,37	1,25	2,08	0,62	1,02	0,29	3,26	0,75	-0,31	0,21	-0,74
5	0,35	4,38	1,25	2,07	0,62	1,00	0,29	3,25	0,75	-0,31	0,21	-0,74
6	0,35	4,37	1,25	2,08	0,62	1,01	0,29	3,18	0,75	-0,31	0,21	-0,74
7	0,35	4,39	1,25	2,07	0,62	1,00	0,29	3,23	0,75	-0,31	0,21	-0,74
8	0,35	4,37	1,25	2,09	0,62	1,00	0,29	3,12	0,75	-0,31	0,21	-0,74
9	0,35	4,38	1,25	2,08	0,62	0,99	0,29	3,17	0,75	-0,31	0,21	-0,74
Сред.	0,35	4,37	1,25	2,08	0,62	1,00	0,29	3,19	0,75	-0,31	0,21	-0,74

Таблица 6. Отношение невязок подбора, среднего и максимального модуля ошибки оценивания УЭС для каждой из моделей 1–9 при расчетах на фактической и логарифмической сетках разносов
Table 6. The ratio of the fitting residuals, the average and maximum modulus of error in resistivity estimation for each of models 1–9 when calculating on actual and logarithmic spacing grids

Модель	Невязка	Ошибка R1		Ошибка R2		Ошибка R3		Ошибка R4	
		Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.
1	0,40	0,37	0,20	0,98	0,80	0,68	0,66	0,47	0,38
2	0,40	0,37	0,21	1,00	0,83	0,67	0,65	0,42	0,34
3	0,40	0,37	0,20	0,96	0,79	0,66	0,64	0,56	0,49
4	0,40	0,36	0,20	0,97	0,80	0,68	0,64	0,55	0,47
5	0,40	0,37	0,20	1,00	0,82	0,66	0,63	0,50	0,42
6	0,40	0,37	0,20	0,97	0,80	0,67	0,64	0,55	0,47
7	0,40	0,37	0,21	1,02	0,85	0,64	0,62	0,46	0,37
8	0,40	0,37	0,20	0,98	0,79	0,65	0,64	0,51	0,43
9	0,40	0,37	0,20	1,00	0,82	0,65	0,63	0,50	0,43
Сред.	0,40	0,37	0,20	0,99	0,81	0,66	0,64	0,50	0,42

При сравнении табл. 4 и 5 установлено, что переход к фактической сетке разносов позволяет резко уменьшить ошибки восстановления УЭС, однако величина эффекта отличается для разных слоев разреза. Отношение ошибок приведено в табл. 6. Наибольший эффект замечен в верхнем слое: после перехода на фактическую сетку (табл. 3) максимальная ошибка в слое 1 уменьшилась в 2,5 раза, а средняя по профилю – в 5 раз. Для второго слоя эффект значительно меньше: максимальная по профилю ошибка не изменилась, а средняя уменьшилась на 20 %. Сопротивление третьего слоя определяется наиболее точно; переход к фактической сетке разносов позволяет уменьшить ошибки примерно на треть. В нижнем четвертом слое разреза максимальная ошибка уменьшилась вдвое, а средняя по профилю – в 2,5 раза.

Ошибки для разных моделей почти одинаковы, что наиболее заметно при расчетах на фактической сетке разносов (табл. 5) и обусловлено тем, что наложенный на кривые кажущегося сопротивления фликкер-шум (формула 2) был одинаков для всех моделей М1–М9 (табл. 4). (Шум на разных линиях, разумеется, отличался.) Это было сделано для того, чтобы наиболее точно отследить эффекты, зависящие от модели. Одна из задач тестирования состояла в выборе наиболее адекватной модели сезонных эффектов для экспериментального разреза (Бобачев и др., 2022б); использование разных реализаций шума для разных моделей затруднило бы решение этой задачи.

Помимо уменьшения абсолютной величины ошибок (в относительных единицах), после перехода на фактическую сетку разносов значительно улучшилась структура ошибок. При решении обратной задачи на логарифмической сетке разносов высокоамплитудная раскачка наблюдается на границе слоев 1 и 2 (коэффициент корреляции ошибок $-0,59$, см. табл. 4). Аналогичные результаты были получены в работах (Бобачев и др., 2020а, 2020б), где использовались немного отличающиеся синтетические профили. По-видимому, раскачка на границе слоев 1 и 2 возникает прежде всего из-за смещения сопротивления верхнего слоя, которое определяется не очень надежно, а интерполяция данных к логарифмической сетке разносов данный эффект (раскачку) усугубляет. В этой связи стоит заметить, что при использовании моделей с большим числом слоев эффект раскачки многократно усиливается, что было показано в работах (Децеровский и др., 2018б; Бобачев и др., 2020а).

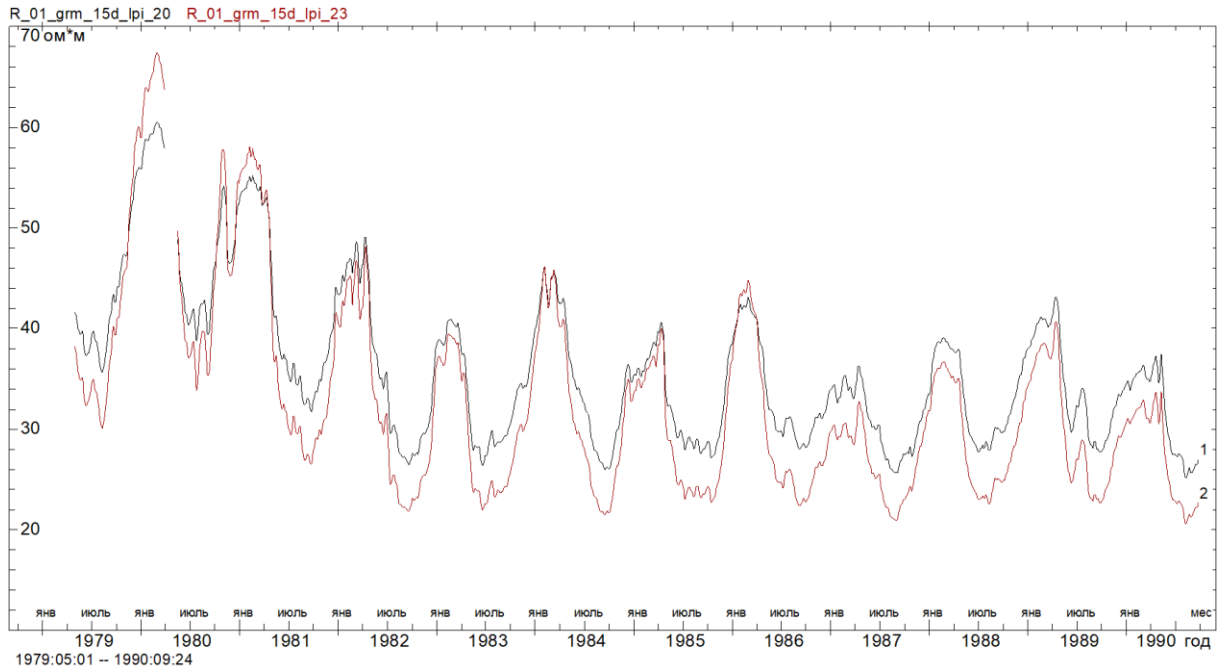
На границе слоев 2 и 3 эффект раскачки был умеренным при инверсии на логарифмической шкале (табл. 4) и исчез после перехода к фактической шкале разносов (табл. 5). Очевидно, это связано с хорошей проявленностью данных слоев сразу на нескольких разносах и достаточно малой ошибкой восстановления в них УЭС.

Вместе с тем раскачка на границе слоев 3 и 4 была очень высокой при расчетах на логарифмической сетке, и она практически не уменьшилась при переходе к фактической сетке разносов. Таким образом, эффект раскачки не обязательно связан с интерполяцией данных к логарифмической сетке разносов. Для борьбы с этим эффектом необходимо использовать регуляризацию алгоритма инверсии.

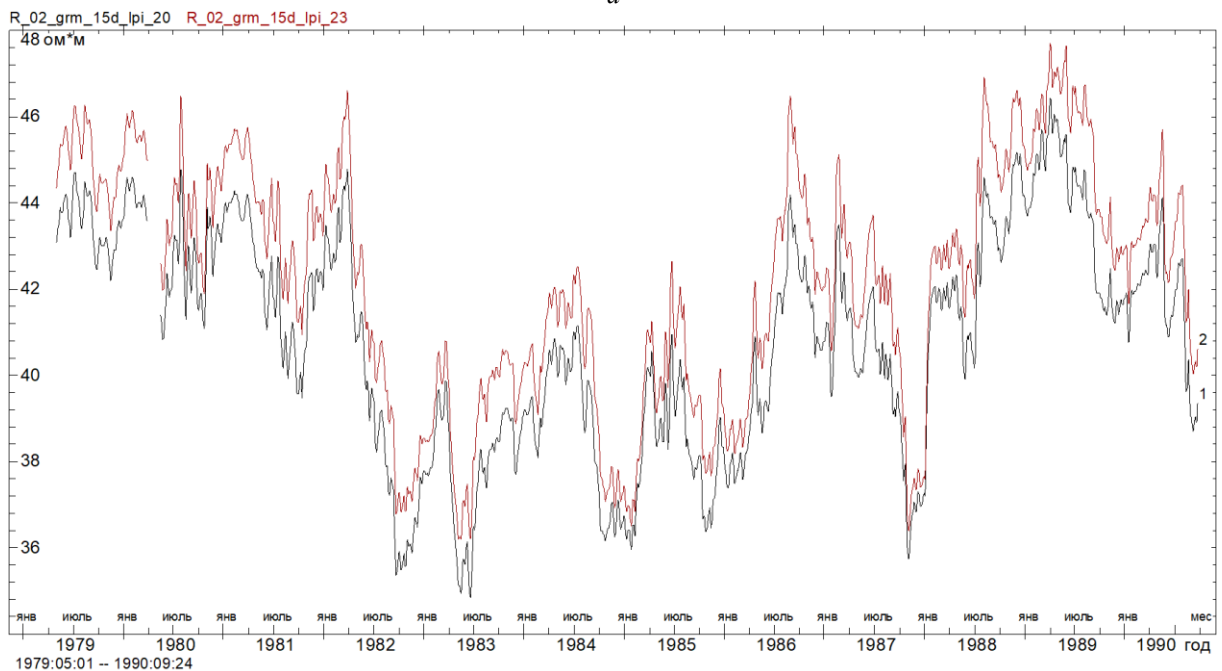
Сравнение результатов для экспериментального профиля

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что при обработке экспериментального профиля два варианта решения также характеризуются большим смещением кривых УЭС друг относительно друга. Выше при анализе синтетических данных было однозначно показано, что это смещение характерно именно для логарифмической сетки разносов (рис. 2). При расчетах на фактической сетке разносов величина смещения кратно меньше (кривые 1 и 3 лежат гораздо ближе друг к другу, чем кривые 1 и 2). С учетом этого, можно ожидать, что и для экспериментального профиля истинные значения УЭС гораздо более близки к тем значениям, которые рассчитаны в программе IPI_2023.

Оценки амплитуды смещения дают для слоев 1–4 значения, указанные в табл. 7. Как видно из таблицы, амплитуда смещения достаточно велика даже для слоев 2 и 3, УЭС которых, согласно результатам численных тестов, восстанавливается довольно надежно (табл. 4–6). В слоях 1 и 4 величина смещения достигает гигантских значений (10 и 20 %). И хотя при анализе временных вариаций постоянное смещение не является большой проблемой (так как основная цель мониторинга – контроль изменений УЭС), столь значительные погрешности говорят об очевидных проблемах с точностью инверсии при использовании логарифмической сетки разносов.



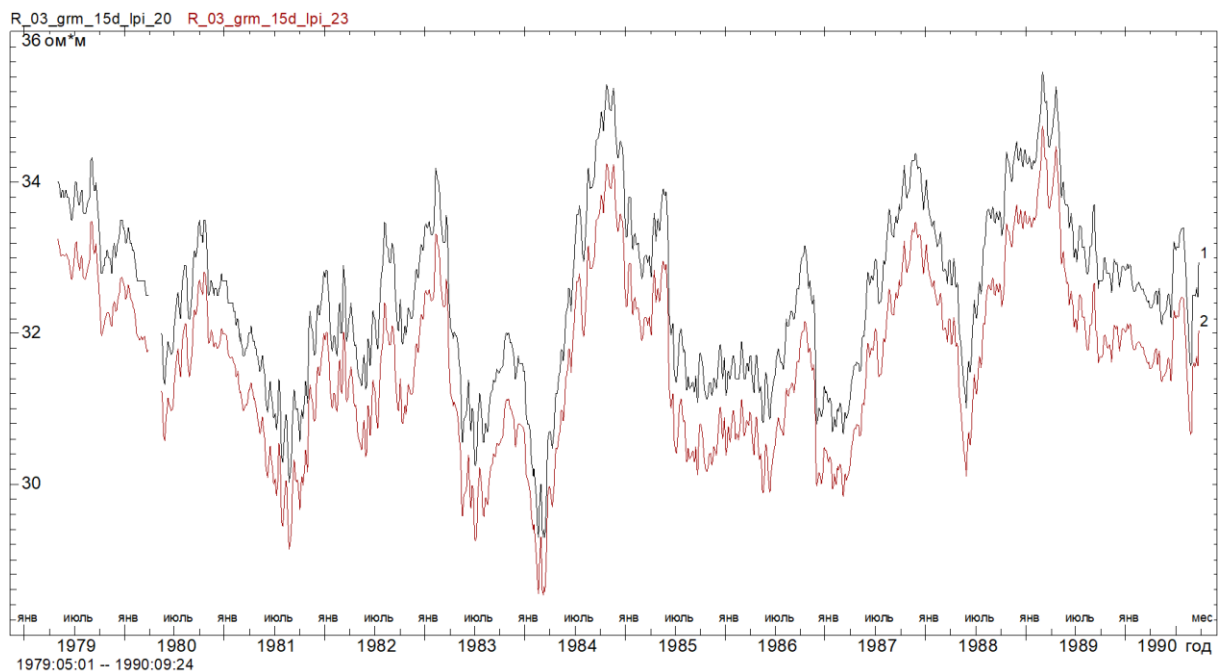
a



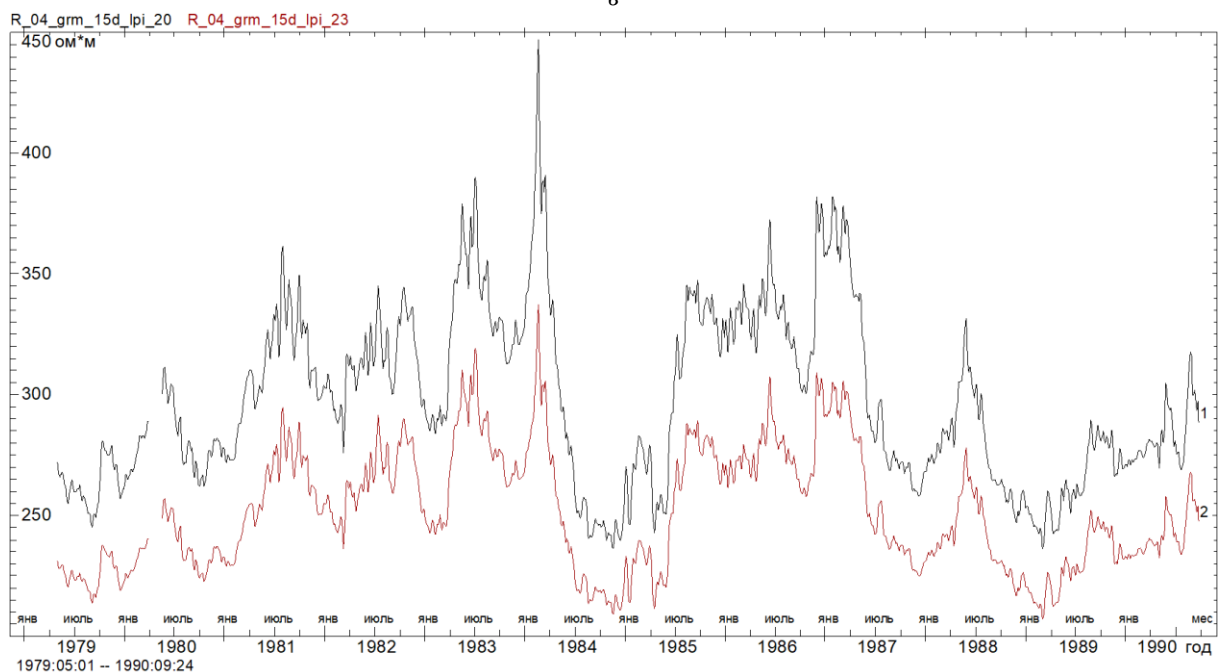
б

Рис. 3. Кривые УЭС для экспериментального профиля, сглаженного скользящим окном шириной 15 сут с гауссовым ядром (Дещеревский и др., 2016а, 2016б, 2016в), рассчитанные в программах IPI_2020 (кривая 1) и IPI_2023 (кривая 2): *a* – слой 1; *б* – слой 2

Fig. 3. Resistance curves for an experimental profile smoothed by a sliding window 15 days wide with a Gaussian core (Deshcherevskii et al., 2016a, 2016б, 2016в) calculated in programs IPI_2020 (curve 1) and IPI_2023 (curve 2): *a* – layer 1; *б* – layer 2



6



2

Рис. 3(продолжение). Кривые УЭС для экспериментального профиля, сглаженного скользящим окном шириной 15 сут с гауссовым ядром (Дещеревский и др., 2016а, 2016б, 2016в), рассчитанные в программах IPI_2020 (кривая 1) и IPI_2023 (кривая 2): v – слой 3; z – слой 4
 Fig. 3(continued). Resistance curves for an experimental profile smoothed by a sliding window 15 days wide with a Gaussian core (Deshcherevskii et al., 2016a, 2016b, 2016в) calculated in programs IPI_2020 (curve 1) and IPI_2023 (curve 2):
 v – layer 3; z – layer 4

Таблица 7. Смещение среднего значения УЭС при переходе на фактическую сетку разносов.

Показана величина смещения при обработке профилей ВЭС, сглаженных 3- и 15-суточным скользящим окном с гауссовым ядром (*Дещеревский и др., 2016а, 2016б, 2016в*)

Table 7. Shift of the average resistivity value when switching to the actual spacing grid. The magnitude of the displacement when processing VES profiles smoothed by the 3- and 15-day sliding window with a Gaussian kernel is shown (*Deshcherevskii et al., 2016a, 2016b, 2016в*)

Слой	Смещение при сглаживании окном 3 сут, %	Смещение при сглаживании окном 15 сут, %
1	-9,83	-9,81
2	3,21	3,20
3	-2,76	-2,75
4	-18,28	-18,26

Из позитивных моментов можно отметить тот факт, что относительно короткопериодные вариации УЭС, рассчитанные двумя способами, достаточно хорошо согласуются между собой (рис. 3). Это свидетельствует о том, что ошибки восстановления изменений УЭС, вероятно, значительно меньше, чем ошибки восстановления среднесуточных значений (приведенные в табл. 7 цифры можно рассматривать как верхнюю оценку этих ошибок). А учитывая, что разность между двумя решениями, согласно рис. 2 и табл. 4, 5, преимущественно обусловлена погрешностями решения в IPI_2020, можно предположить, что ошибки решения обратной задачи для экспериментального профиля в IPI_2023 должны быть кратно меньше, чем разница между двумя вариантами инверсии (в двух вариантах программы). Более детальное обсуждение величины этих ошибок выходит за рамки данной работы. [подробнее см. (*Бобачев и др., 2022б, 2022г*)]. Следует отметить, что при использовании улучшенных алгоритмов инверсии, реализованных в программе IPI_2023, данные ошибки должны еще немного уменьшиться.

Анализ рис. 3 показывает наличие сильных противофазных вариаций УЭС в слоях 3 и 4. Согласно результатам, представленным в работах (*Бобачев и др., 2020а, 2022а, 2022б*), это может косвенно свидетельствовать о наличии эффекта раскачки сопротивлений (в отличие от тестов на синтетических данных, для экспериментального профиля прямая проверка наличия раскачки путем анализа ошибок решения невозможна). Обсуждение методов борьбы с этим эффектом не входит в задачи настоящей работы [см. (*Бобачев и др., 2020б, 2022а, 2022б, 2022в, 2022г*)].

Заключение

Мониторинг геодинамических процессов с использованием электрометрических методов предполагает, что целевой физической характеристикой являются вариации удельного электрического сопротивления горных пород на различных глубинах. Однако на практике многие используемые методы, включая и метод вертикального электрического зондирования, непосредственно измеряют кажущееся сопротивление. В этом случае обязательным элементом интерпретации является переход от кажущихся сопротивлений к удельным. В частности, при использовании метода ВЭС с этой целью решается обратная задача ВЭС.

В конце XX в. авторами настоящей работы был проведен уникальный эксперимент по мониторингу вариаций сопротивления верхних слоев земной коры методом ВЭС в высокосейсмичном районе Памира с преобладанием мелкофокусных землетрясений. На полигоне функционировала плотная сеть стационарных сейсмических станций, которые окружали пункт зондирования со всех сторон, располагаясь на расстоянии от 15 до 50 км. Высочайший для своего времени методический уровень сейсмических наблюдений позволил оценивать координаты и особенно глубину гипоцентров землетрясений с недостижимой ранее точностью (*Лукк и др., 1973; Гармский..., 1990, Автоматизированная..., 1991; Попандопуло, 1991*). В частности, было установлено, что за время эксперимента в непосредственной близости от зондируемого объема произошло несколько местных землетрясений, причем в двух случаях очаг непосредственно захватил зондируемый объем. Второй особенностью этого эксперимента было широкое комплексирование методов мониторинга (*Гармский..., 1990, Автоматизированная..., 1991*), что резко расширяет возможности физической интерпретации результатов, полученных каждым методом, но и накладывает особые требования на точность выполняемых измерений.

Непрерывные (ежедневные) зондирования методом ВЭС продолжались более 10 лет. Для наблюдений использовалась специально разработанная аппаратура. Благодаря накоплению сигнала, точность измерений кажущегося сопротивления в полевых условиях достигала 0,01 % (*Осташевский и др., 1990, 1991; Сидорин и др., 1996*). С учетом различных помех и шумов, реальная погрешность измерений была близка к 0,1 % (*Дещеревский и др., 2004, 2018а*). Предполагалось, что это позволит обнаружить изменения напряженно-деформированного состояния геосреды во время подготовки и реализации близких сильных землетрясений, а также исследовать процесс релаксации геосреды после сейсмического события (*Сидорин, 1986, 1992*).

Однако анализ полученных данных ограничивался кажущимися сопротивлениями из-за непозволительно низкой точности доступных программ инверсии кривых ВЭЗ. Она вполне достаточна для решения геолого-структурных задач, но для эффективного мониторинга вариаций УЭС в нижних слоях разреза погрешность необходимо уменьшить примерно на два порядка (Децеровский и др., 1997а, 2004). Авторами были предприняты значительные усилия для решения этой задачи. Был подобран оптимальный вариант геоэлектрического разреза для пункта зондирования, позволяющий наиболее точно отслеживать вариации УЭС с учетом сезонных эффектов, а в данных был устранен так называемый "геологический шум" (Децеровский и др., 2017, 2018а, 2018б). Также была разработана прецизионная версия программы IPI, в которой учитывались специфические особенности измерительной установки. Тем не менее последующий анализ восстановленных в новой программе сезонных вариаций УЭС показал, что они не удовлетворяют критериям правдоподобности (Децеровский и др., 2018б; Бобачев и др., 2020а).

Причины этого были установлены после проведения большой серии численных экспериментов на синтетических данных. Эксперименты подтвердили, что первоначальное решение действительно содержит значительные ошибки, возникающие из-за особого вида эквивалентности по сопротивлениям, – эффекта раскочки сопротивлений (Бобачев и др., 2020а).

По результатам тестирования в программу IPI был внесен ряд усовершенствований и улучшений, направленных как на регуляризацию обратной задачи (Бобачев и др., 2020б, 2022а), так и на оптимизацию других вычислительных процедур. В настоящей работе рассмотрен один из аспектов данной модернизации, связанный с внедрением расчетов на фактической (вместо логарифмической) сетке разносов. Анализ результатов инверсии синтетических профилей показал, что для рассматриваемого разреза (установки) это позволяет многократно уменьшить погрешность восстановления первого (верхнего) и также, что более важно, четвертого (нижнего) слоя разреза. Одновременно переход к расчетам на фактической сетке разносов полностью подавил раскочку сопротивлений на границе слоев 1 и 2, благодаря чему появилась возможность отказаться от использования регуляризующей поправки к функционалу невязки на границе слоев 1 и 2 и уменьшить вес указанной поправки на границе слоев 3 и 4. Последнее обстоятельство является особенно важным, поскольку регуляризация не является "бесплатной" и приводит к смещению некоторых параметров восстановленного разреза (Бобачев и др., 2022а, 2022б, 2022в).

Недостаток расчетов на фактической сетке разносов заключается в определенном увеличении времени счета. Этот рост может стать довольно заметным при обработке многослойных профилей ВЭЗ, содержащих большое число пикетов, так как в процессе подбора прямой задачи приходится решать многократно на каждом пикете. Однако быстрый рост вычислительных мощностей в настоящее время позволяет во многих случаях снять это ограничение и делает нецелесообразным пересчет фактических данных на логарифмическую сетку разносов.

В целом полученные результаты показывают, что пересчет данных на логарифмическую шкалу разносов может приводить к существенному смещению параметров для некоторых разрезов. Ошибки могут возрастать в том случае, если разрез содержит один или несколько слоев небольшой мощности (либо это крайние слои разреза), которые имеют максимальную (по сравнению с другими слоями) проявленность лишь на одном разнесе. В такой ситуации интерполяция данных к другому разнесу может приводить не только к смещению параметров решения, но и к резкому росту раскочки сопротивлений. И наоборот, для тех слоев разреза, влияние которых доминирует сразу на нескольких разносах, пересчет сетки разносов вряд ли будет критичным.

Полученные в настоящей работе результаты вносят важный вклад в методические основы интерпретации данных прецизионных режимных ВЭЗ, в том числе выполненных на Гармском полигоне; их физической интерпретации будет посвящена отдельная публикация.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Автоматизированная обработка данных на Гармском геофизическом полигоне / отв. ред. А. Я. Сидорин. М. : Наука, 1991. 216 с.
- Бектемиров А. И., Романов В. П. Режимные электрометрические наблюдения на Фрунзенском прогностическом полигоне // Прогноз землетрясений. 1988. № 9. С. 95–108.
- Бобачев А. А., Децеровский А. В., Сидорин А. Я. Алгоритмы регуляризации для повышения устойчивости решения обратной задачи при прецизионном мониторинге удельных электрических сопротивлений методом ВЭЗ // Сейсмические приборы. 2020б. Т. 56, № 3. С. 61–82. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2020.3-4>. EDN: YMTQFR.

- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Влияние метеорологических и гидрологических факторов на удельное электрическое сопротивление верхних слоев земной коры: анализ корреляций по сезонным и остаточным компонентам рядов // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 1. С. 50–72. DOI: <https://doi.org/10.21455/gpb2023.1-4>. EDN: ELZBFG.
- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Изменения удельного электрического сопротивления горных пород на разных глубинах геоэлектрического разреза и сопоставление их с сейсмичностью // Геофизические процессы и биосфера. 2022в. Т. 21, № 4. С. 215–230. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-15>. EDN: CWWTSN.
- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Особенности неустойчивости решения обратной задачи ВЭЗ при прецизионном мониторинге // Наука и технологические разработки. 2020а. Т. 99, № 1. С. 31–58. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2020.1-4>. EDN: XKQDOX.
- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Оценка погрешности решения обратной задачи ВЭЗ для прецизионных исследований временных вариаций геоэлектрического разреза с сильным сезонным эффектом // Сейсмические приборы. 2022б. Т. 58, № 4. С. 41–61. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2022.4-3>. EDN: YMGXOD.
- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Прецизионное решение обратной задачи ВЭЗ для экспериментальных данных многолетнего мониторинга земной коры // Наука и технологические разработки. 2022г. Т. 101, № 4. С. 48–88. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.4-4>. EDN: YTSZDB.
- Бобачев А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Регуляризация решения обратной задачи ВЭЗ методом стабилизации контраста: тестирование алгоритма на модельных данных // Наука и технологические разработки. 2022а. Т. 101, № 1. С. 5–35. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.1-2>. EDN: THLJGE.
- Богданов М. И., Калинин В. В., Модин И. Н. Применение высокоточных низкочастотных электроразведочных комплексов для ведения длительного мониторинга опасных инженерно-геологических процессов // Инженерные изыскания. 2013. № 10–11. С. 110–115. EDN: RMTVIN.
- Гармский геофизический полигон / отв. ред. А. Я. Сидорин. М. : Гарм : ИФЗ, 1990. 240 с.
- Дещеревский А. В. Фильтрация сезонных компонент вариаций геоэлектрических параметров на Гармском полигоне : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 04.00.22. М. : ИДГ РАН, 1996а. 20 с.
- Дещеревский А. В. Фильтрация сезонных компонент вариаций геоэлектрических параметров на Гармском полигоне : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 04.00.22. М. : ИДГ РАН, 1996б. 175 с.
- Дещеревский А. В. Фрактальная размерность, показатель Херста и угол наклона спектра временного ряда. М. : ОИФЗ РАН, 1997. 36 с.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Лукк А. А., Сидорин А. Я. Признаки фликкер-шумовой структуры во временных реализациях электрометрических параметров // Изучение природы вариаций геофизических полей : сб. ст. М. : ОИФЗ РАН, 1994. С. 5–17. EDN: YQBLZW.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Технологии анализа геофизических рядов. Ч. 1. Требования к программе обработки // Сейсмические приборы. 2016а. Т. 52, № 1. С. 61–82. EDN: VLPCPF.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Технологии анализа геофизических временных рядов. Ч. 2. WinABD – пакет программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. 2016б. Т. 52, № 3. С. 50–80. EDN: WAZANP.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Никольский А. Н., Сидорин А. Я. Проблемы анализа временных рядов с пропусками и методы их решения в программе WinABD // Геофизические процессы и биосфера. 2016в. Т. 15, № 3. С. 5–34. EDN: WLNCZV.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Сидорин А. Я. Линейность спектров несезонных компонент геофизических временных рядов // Доклады Академии наук. 1996. Т. 346, № 6. С. 815–818. EDN: WJKHZL.
- Дещеревский А. В., Журавлев В. И., Сидорин А. Я. Спектрально-временные особенности сезонных изменений кажущегося сопротивления // Физика Земли. 1997а. № 3. С. 53–63. EDN: WJKIBT.
- Дещеревский А. В., Лукк А. А., Сидорин А. Я. Признаки фликкер-шумовой структуры во временных реализациях геофизических полей // Физика Земли. 1997б. № 7. С. 3–19. EDN: WJKICD.
- Дещеревский А. В., Модин И. Н., Сидорин А. Я. Метод построения модели геоэлектрического разреза с учетом сезонных вариаций по данным многолетнего мониторинга методом ВЭЗ для поиска предвестников землетрясений // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 4. С. 61–80. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2017.4-5>. EDN: ZXPEXJ.
- Дещеревский А. В., Модин И. Н., Сидорин А. Я. Построение оптимальной модели геоэлектрического разреза по данным режимных ВЭЗ на примере центральной части Гармского полигона // Геофизические процессы и биосфера. 2018а. Т. 17, № 3. С. 109–140. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-7>. EDN: OVRMMX.
- Дещеревский А. В., Модин И. Н., Сидорин А. Я. Сезонные вариации удельного электрического сопротивления в верхних слоях земной коры // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018б. Т. 45, № 3. С. 68–83. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2018.3-6>. EDN: YSGWZV.

- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Алгоритм адаптивной оценки сезонных колебаний временных рядов и его тестирование на примере вариаций концентрации CO₂ в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2021б. Т. 20, № 4. С. 147–174. EDN: JEDYYP.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Двухкомпонентная модель геофизических процессов: сезонные вариации и фликкер-шум // Доклады Академии наук. 2001. Т. 376, № 1. С. 100–105. EDN: EGVAOU.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Итеративный алгоритм декомпозиции временных рядов на тренд и сезонные колебания и его тестирование на примере вариаций концентрации CO₂ в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2021а. Т. 20, № 1. С. 128–151. DOI: <https://doi.org/10.21455/grb2021.1-11>. EDN: OVZGFN.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Некоторые вопросы методики оценки среднесезонных функций для геофизических данных. М. : ОИФЗ РАН, 1999б. 40 с.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. О зависимости сезонных вариаций кажущегося сопротивления от глубины зондирования // Физика Земли. 2004. № 3. С. 3–20. EDN: OXHZSH.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Проблема фликкер-шума при изучении причинно-следственных связей между природными процессами // Доклады Академии наук. 2003. Т. 392, № 3. С. 392–396. EDN: OPLWIT.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Скрытые периодичности и фликкер-шум в электротеллурическом поле // Физика Земли. 1999в. № 4. С. 56–67. EDN: UDLTXW.
- Дещеревский А. В., Сидорин А. Я. Экспериментальные исследования сезонных вариаций кажущегося сопротивления применительно к задачам сейсмологии // Сейсмические приборы. 1999а. Вып. 32. С. 62–75. EDN: WJKHKV.
- Заборовский А. И. Электроразведка. М. : Гостоптехиздат, 1963. 423 с.
- Колесников В. П. Основы интерпретации электрических зондирований. М. : Научный мир, 2007. 248 с.
- Куфуд О. Зондирование методом сопротивлений. М. : Недра, 1984. 270 с.
- Лукк А. А., Дещеревский А. В., Сидорин А. Я., Сидорин И. А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде / отв. ред. В. Н. Страхов. М. : ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Лукк А. А., Пивоварова Н. Б., Пухначева Т. П. О точности определения координат очагов местных землетрясений // Математические проблемы геофизики. Новосибирск : Наука. 1973. С. 159–167.
- Лукк А. А., Шевченко В. И. Структура сейсмического поля и разрывная тектоника Гармского района в Таджикистане // Известия АН СССР. Физика Земли. 1990. № 1. С. 5–20.
- Осташевский М. Г., Сидорин А. Я. Аппаратура для динамической геоэлектрики. М. : ИФЗ, 1990. 206 с.
- Осташевский М. Г., Сидорин А. Я. Многофункциональная станция электрического зондирования и результаты ее использования // Комплексные исследования по прогнозу землетрясений : сб. науч. тр. / отв. ред. М. А. Садовский. М. : Наука, 1991. С. 182–199.
- Попандопуло Г. А. Определение координат гипоцентров землетрясений на Гармском геофизическом полигоне // Землетрясения и процессы их подготовки : сб. науч. тр. / отв. ред. В. Н. Страхов М. : Наука. 1991. С. 1–23.
- Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. М. : Наука, 1992. 192 с.
- Сидорин А. Я. Результаты прецизионных наблюдений за вариациями кажущегося сопротивления на Гармском полигоне // Доклады АН СССР. 1986. Т. 290, № 1. С. 81–84. EDN: WQIUME.
- Сидорин А. Я., Осташевский М. Г. Методика прецизионного электрического зондирования при поиске предвестников землетрясений // Сейсмические приборы. 1996. Вып. 25–26. С. 189–211.
- Электрическое зондирование геологической среды / под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. В 2 ч. Ч. 1. Прямые задачи и методика работ. М. : МГУ, 1988. 176 с.
- Электрическое зондирование геологической среды / под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. В 2 ч. Ч. 2. Интерпретация и практическое применение. М. : МГУ, 1992. 200 с.
- Электроразведка методом сопротивлений / под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. М. : МГУ, 1994. 160 с.
- Якубовский Ю. В. Электроразведка. М. : Недра, 1980. 384 с.
- Vobachev A. Ipi2win user's guide. Moscow : Moscow State University, 2002.
- Loke M. H., Dahlin T., Rucker D. F. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys // Near Surface Geophysics. 2014. Vol. 12, Iss. 1. P. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013025>.
- Supper R., Ottowitz D., Jochum B., Kim J. H. [et al.]. Geoelectrical monitoring: An innovative method to supplement landslide surveillance and early warning // Near Surface Geophysics. 2014а. Vol. 12, Iss. 1. P. 133–150. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013060>.
- Supper R., Ottowitz D., Jochum B., Römer A. [et al.]. Geoelectrical monitoring of frozen ground and permafrost in alpine areas: field studies and considerations towards an improved measuring technology // Near Surface Geophysics. 2014б. Vol. 12, Iss. 1. P. 93–115. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013057>.

- Voss R. F. Random fractal forgeries // *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*. Vol 17. NATO ASI Series. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985. P. 805–835. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-84574-1_34.
- Voss R. F. Random Fractals: Characterization and measurement // *Scaling Phenomena in Disordered Systems*. Springer Science+Business Media New York, 1991. P. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1402-9_1.
- Wilkinson P., Chambers J., Kuras O., Meldrum P. [et al.]. Long-term time-lapse geoelectrical monitoring // *First Break*. 2011. Vol. 29, Iss. 8. P. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.29.8.52134>.

References

- Automated data processing at Garm geophysical research area. 1991. Ed. Sidorin A. Ya. Moscow. (In Russ.)
- Bektemirov, A. I., Romanov, V. P. 1988. Regular electrometric observations at the Frunzensky forecasting site. *Prognoz Zemletryasenii*, 9, pp. 95–108. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2020б. Regularization algorithms for increasing the stability of the solution to the inverse problem in precision monitoring of electrical resistivity using the VES method. *Seismicheskie Pribory*, 56(3), pp. 61–82. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2020.3-4>. EDN: YMTQFR. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2023. Effect of meteorological and hydrological factors on the electrical resistivity of the upper layers of the Earth's crust: Correlation analysis of seasonal and residual components of the time series. *Geophysical Processes and Biosphere*, 22(1), pp. 50–72. DOI: <https://doi.org/10.21455/gpb2023.1-4>. EDN: ELZBFG. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2022в. Changes in the specific electrical resistivity of rocks at different depths of the geoelectric section and their comparison with seismicity. *Geophysical Processes and Biosphere*, 21(4), pp. 215–230. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-15>. EDN: CWWTSN. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2020a. Features of instability in solving the inverse problem of vertical electrical sounding for precision monitoring. *Science and Technological Developments*, 99(1), pp. 31–58. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2020.1-4>. EDN: XKQDOX. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2022б. Estimating the error of the solution of the inverse VES problem for precision studies of temporal variations in the geoelectric section with a strong seasonal effect. *Seismicheskie Pribory*, 58(4), pp. 41–61. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2022.4-3>. EDN: YMGXOD. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2022г. Precision solution of the VES inverse problem for experimental data of long-term monitoring of the Earth's crust. *Science and Technological Developments*, 101(4), pp. 48–88. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.4-4>. EDN: YTSZDB. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2022a. Regularization of the solution of the inverse VES problem by the contrast stabilization method: Testing the algorithm on model data. *Science and Technological Developments*, 101(1), pp. 5–35. DOI: <https://doi.org/10.21455/std2022.1-2>. EDN: THLJGE. (In Russ.)
- Bogdanov, M. I., Kalinin, V. V., Modin, I. N. 2013. Application of high-precision low-frequency electrical prospecting systems for long-term monitoring of hazardous geotechnical processes. *Engineering Survey*, 10–11, pp. 110–115. EDN: RMTVIH. (In Russ.)
- Garm geophysical test site. 1990. Ed. Sidorin A. Ya. Moscow. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V. 1996a. Filtration of seasonal components of geoelectrical parameters' variations at the Garm test site. Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V. 1996б. Filtration of seasonal components of geoelectrical parameters' variations at the Garm test site. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V. 1997. Fractal dimension, Hurst index and inclination angle of temporal series spectrum. Moscow. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Lukk, A. A., Sidorin, A. Ya. 1994. Signs of flicker-noise structure in temporal realizations of electrometric parameters. In coll. articles *Study of a nature of geophysical fields' variations*. Moscow, pp. 5–17. EDN: YQBLZW. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., Sidorin, A. Ya. 2016a. Technologies for analyzing geophysical time series: Part 1. Software requirements. *Seismicheskie Pribory*, 52(1), pp. 61–82. EDN: VLPCPF. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., Sidorin, A. Ya. 2016б. Technologies for analyzing geophysical time series: Part 2. WinABD – A software package for maintaining and analyzing geophysical monitoring data. *Seismicheskie Pribory*, 52(3), pp. 50–80. EDN: WAZAHP. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Nikolsky, A. N., Sidorin, A. Ya. 2016в. Problems in analyzing time series with gaps and their solution with the WinABD software package. *Geophysical Processes and Biosphere*, 15(3), pp. 5–34. EDN: WLNCZV. (In Russ.)

- Descherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Sidorin, A. Ya. 1996. Linearity of spectra of nonseasonal components of geophysical time series. *Doklady Akademii Nauk*, 346(6), pp. 815–818. EDN: WJKHZL. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Zhuravlev, V. I., Sidorin, A. Ya. 1997a. Spectral-temporal features of seasonal variations in apparent resistivity. *Fizika Zemli*, 3, pp. 53–63. EDN: WJKIBT. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Lukk, A. A., Sidorin, A. Ya. 1997b. Flicker-noise structure in the time realizations of geophysical fields. *Fizika Zemli*, 7, pp. 3–19. EDN: WJKICD. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Modin, I. N., Sidorin, A. Ya. 2017. Method for constructing a model of a geoelectric section taking into account seasonal variations based on data from long-term vertical electric sounding monitoring in search of earthquake precursors. *Seismicheskie Pribory*, 53(4), pp. 61–80. DOI: <https://doi.org/10.21455/si2017.4-5>. EDN: ZXPEXJ. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Modin, I. N., Sidorin, A. Ya. 2018a. Constructing the optimal model of the geoelectric section using vertical electrical sounding data: Case study of the central part of the Garm research area. *Geophysical Processes and Biosphere*, 17(3), pp. 109–140. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-7>. EDN: OVRMMX. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Modin, I. N., Sidorin, A. Ya. 2018b. Seasonal variations in specific resistivity in the upper layers of the Earth crust. *Problems of Engineering Seismology*, 45(3), pp. 68–83. DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2018.3-6>. EDN: YSGWZV. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2021a. Algorithm for adaptive estimation of time series seasonal variations: Testing using the example of CO₂ concentration variation in the atmosphere. *Geophysical Processes and Biosphere*, 20(4), pp. 147–174. EDN: JEDYYP. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2001. A two-component model of geophysical processes: Seasonal variations and flicker noise. *Doklady Akademii Nauk*, 376(1), pp. 100–105. EDN: EGVAOU. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2021b. Iterative algorithm for time series decomposition into trend and seasonality: Testing using the example of CO₂ concentrations in the atmosphere. *Geophysical Processes and Biosphere*, 20(1), pp. 128–151. DOI: <https://doi.org/10.21455/gpb2021.1-11>. EDN: OVZGFN. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 1999c. Some questions of the methodology for assessing the average seasonal functions for geophysical data. Moscow. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2004. Seasonal variations of the apparent resistivity as a function of the sounding depth. *Fizika Zemli*, 3, pp. 3–20. EDN: OXHZSH. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 2003. A flicker-noise problem in the study of cause-and-effect relationships between natural processes. *Doklady Akademii Nauk*, 392(3), pp. 392–396. EDN: OPLWIT. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 1999d. Hidden periodic components and flicker noise in the electrotelluric field. *Fizika Zemli*, 4, pp. 56–67. EDN: UDLTXW. (In Russ.)
- Deshcherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya. 1999e. Experimental investigations of the apparent resistivity seasonal variations in the context of seismology problems. *Seismicheskie Pribory*, Iss. 32, pp. 62–75. EDN: WJKHKV. (In Russ.)
- Zaborovsky, A. I. 1963. Electrical prospecting. Moscow. (In Russ.)
- Kolesnikov, V. P. 2007. Basics of interpreting electrical soundings. Moscow. (In Russ.)
- Koefoed, O. 1984. Sounding using the resistance method. Moscow. (In Russ.)
- Lukk, A. A., Descherevskii, A. V., Sidorin, A. Ya., Sidorin, I. A. 1996. Variations of geophysical fields as a manifestation of deterministic chaos in a fractal environment. Moscow. (In Russ.)
- Lukk, A. A., Pivovarova, N. B., Pukhnacheva, T. P. 1973. On the accuracy of determining the coordinates of local earthquake sources. In *Mathematical problems of geophysics*. Novosibirsk. (In Russ.)
- Lukk, A. A., Shevchenko, V. I. 1990. Seismic field structure and fault tectonics of the Garm region in Tajikistan. *Fizika Zemli*, 1, pp. 5–20. (In Russ.)
- Ostashevskii, M. G., Sidorin, A. Ya. 1990. Equipment for dynamic geoelectrics. Moscow. (In Russ.)
- Ostashevskii, M. G., Sidorin, A. Ya. 1991. Multifunctional electrical sounding station and the results of its use. In coll. articles *Comprehensive research on earthquake prediction*. Moscow. pp. 182–199. (In Russ.)
- Popandopulo, G. A. 1991. Determination of the coordinates of earthquake hypocenters at the Garm geophysical site. In coll. articles *Earthquakes and the processes of their preparation*. Moscow, pp. 1–23. (In Russ.)
- Sidorin, A. Ya. 1992. Precursors of earthquakes. Moscow. (In Russ.)
- Sidorin, A. Ya. 1986. Results of precision observations of variations in apparent resistivity at the Garm test site. *Doklady Akademii Nauk*, 290(1), pp. 81–84. EDN: WQIUME. (In Russ.)
- Sidorin, A. Ya., Ostashevskii, M. G. 1996. The method of precision electric sounding for earthquake precursors detection. *Seismicheskie Pribory*, Iss. 25–26, pp. 189–211. (In Russ.)
- Electrical sounding of the geological environment. 1988. Eds. Khmelevskoy V. K., Shevnin V. A. Part 1. Direct tasks and work methods. Moscow. (In Russ.)
- Electrical sounding of the geological environment. 1992. Eds. Khmelevskoy V. K., Shevnin V. A. Part 2. Interpretation and practical application. Moscow. (In Russ.)
- Electrical prospecting by the electrical resistivity method. 1994. Eds. Khmelevskoy V. K., Shevnin V. A. Moscow. (In Russ.)

- Yakubosky, Yu. V. 1980. Electrical prospecting. Moscow. (In Russ.)
- Bobachev, A. 2002. Ipi2win user's guide. Moscow.
- Loke, M. H., Dahlin, T., Rucker, D. F. 2014. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys. *Near Surface Geophysics*, 12(1), pp. 5–24. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013025>.
- Supper, R., Ottowitz, D., Jochum, B., Kim, J. H. et al. 2014a. Geoelectrical monitoring: An innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. *Near Surface Geophysics*, 12(1), pp. 133–150. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013060>.
- Supper, R., Ottowitz, D., Jochum, B., Römer, A. et al. 2014b. Geoelectrical monitoring of frozen ground and permafrost in alpine areas: Field studies and considerations towards an improved measuring technology. *Near Surface Geophysics*, 12(1), pp. 93–115. DOI: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013057>.
- Voss, R. F. 1985. Random fractal forgeries. In *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*. Vol 17. NATO ASI Series. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 805–835. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-84574-1_34.
- Voss, R. F. 1991. Random fractals: Characterization and measurement. In *Scaling Phenomena in Disordered Systems*. Springer Science+Business Media New York, pp. 1–11. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1402-9_1.
- Wilkinson, P., Chambers, J., Kuras, O., Meldrum, P. et al. 2011. Long-term time-lapse geoelectrical monitoring. *First Break*, 29(8), pp. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.3997/1365-2397.29.8.52134>.

Сведения об авторах

Бобачев Алексей Анатольевич – Ленинские горы, 1, г. Москва, Россия, 119991;
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, доцент;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, канд. физ.-мат наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: bobachev@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0859-8281>

Alexey A. Bobachev – 1 Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991;
Lomonosov Moscow State University, Associate Professor;
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Senior Researcher;
e-mail: bobachev@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0859-8281>

Дещеревский Алексей Владимирович – ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, г. Москва, Россия, 123242;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, канд. физ.-мат наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: adeshere@ifz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9934-0341>

Alexey V. Deshcherevskii – 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow, Russia, 123242; Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher; e-mail: adeshere@ifz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9934-0341>

Сидорин Александр Яковлевич – ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, г. Москва, Россия, 123242;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН; канд. физ.-мат наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: al_sidorin@hotmail.com

Alexander Ya. Sidorin – 10/1 Bolshaya Gruzinskaya Str., Moscow, Russia, 123242; Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Cand. Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher; e-mail: al_sidorin@hotmail.com

УДК 549.6

Нетипичные компоненты в составе нефелина из пород Хибинского массива по данным ИК спектроскопии

О. Ф. Гойчук*, Н. Г. Коноплёва, С. В. Лепеха, Е. Э. Савченко, Т. Л. Паниковровский

*Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;

e-mail: o.goychuk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8756-4084>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
01.02.2024;

получена
после доработки
29.02.2024;

принята
к публикации
07.03.2024

Ключевые слова:

нефелин,
состав нефелина,
вода в нефелине,
структурная вода,
структура нефелина,
ацетилен в нефелине,
Хибинский щелочной
массив,
Арктическая зона
России

Для цитирования

Нефелин является одним из главных породообразующих минералов пород Хибинского щелочного массива. Состав нефелина изменяется в зависимости от температуры кристаллизации, что делает его индикатором условий образования пород. Кроме того, нефелин является одним из главных концентраторов углеводородных газов. Изучение нефелина из разных пород Хибинского щелочного массива локальным методом ИК спектроскопии с преобразованием Фурье (микро-FTIR) позволило выявить в его структуре наличие воды и ацетилена. Содержание воды, оцененное в соответствии с методикой статистического количественного определения воды в номинально безводных минералах, изменяется в диапазоне от 0 до 0,78 мас.%. Наибольшие содержания воды отмечены в высокотемпературном нефелине ранних образований (фойяитов центральной и внешней частей массива), а наименьшие – в относительно низкотемпературном нефелине более поздних пород Главного кольцевого разлома (уртитов, апатит-нефелиновых пород и пойкилитовых (кальсилит)-нефелиновых сиенитов – рисчорритов). Вода входит в структуру нефелина в виде молекул H₂O, которые занимают вакансии в позиции калия. Содержание воды в нефелине контролируется количеством вакансий в его структуре. Наличие ацетилена определено на качественном уровне. Для оценки его количественного содержания требуются дополнительные исследования.

Гойчук О. Ф. и др. Нетипичные компоненты в составе нефелина из пород Хибинского массива по данным ИК спектроскопии. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 24–38. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-24-38>.

Atypical components in the composition of nepheline from rocks of the Khibiny massif according to IR spectroscopy data

Olga F. Goychuk*, Natalia G. Konopleva, Svetlana V. Lepelka,
Yevgeny E. Savchenko, Taras L. Panikorovskii

*Nanomaterials Research Centre KSC RAS, Apatity, Murmansk Region k, Russia;

e-mail: o.goychuk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8756-4084>

Article info

Received
01.02.2024;

received
in revised form
29.02.2024;

accepted
07.03.2024

Key words:

nepheline,
nepheline composition,
water in nepheline,
acetylene in nepheline,
structural water,
nepheline structure,
Khibiny alkaline massif,
Arctic zone of Russia

Abstract

Nepheline is one of the main rock-forming minerals of the rocks of the Khibiny alkaline massif. Nepheline composition changes depending on the crystallization temperature, which makes it an indicator of rock formation conditions. In addition, nepheline is one of the main concentrators of hydrocarbon gases. The study of nepheline from different rocks of the Khibiny massif by local IR spectroscopy with Fourier transformation (micro-FTIR) has revealed the presence of water and acetylene in its structure. The water content estimated according to the method of statistical quantitative determination of water in nominally anhydrous minerals varies in the range from 0 to 0.78 wt.%. The highest water content has been observed in high-temperature nepheline of early formations (foyaite of the central and outer parts of the massif), and the lowest – in relatively low-temperature nepheline of later rocks of the Main Ring Fault (urtite, apatite-nepheline rock and poikilitic (kalsilite)-nepheline syenite – rischorrite). The study reveals that water enters the structure of nepheline in the form of H₂O molecules that occupy vacancies in the potassium sites. The water content in nepheline is controlled by the number of vacancies in its structure. The presence of acetylene has been determined on a qualitative level. Additional studies are required to assess its quantitative content.

For citation

Goychuk, O. F. et al. 2024. Atypical components in the composition of nepheline from rocks of the Khibiny massif according to IR spectroscopy data. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 24–38. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-24-38>.

Введение

Множество минералов содержат в своем составе водные компоненты. Они могут входить в структуру минералов в виде нейтральных молекул H_2O , ионов OH^- , реже H^+ и гидроксония H_3O^+ . Вода также может адсорбироваться на поверхности минералов или содержаться во флюидных включениях. Как правило, наличие воды или водных компонентов в структуре минерала отражено в его формуле. Но существует довольно большое количество номинально безводных минералов (NAMs), которые все-таки содержат водные компоненты в своем составе несмотря на отсутствие таковых в формуле. Ионы OH^- и, реже, молекулы H_2O обнаруживаются во многих безводных минералах в концентрациях от миллионных до десятых долей мас.%. Среди номинально безводных минералов земной коры преобладающая часть водных компонентов находится в полевых шпатах – плагиоклазы содержат в своем составе по большей части OH^- -группы, тогда как калиевые полевые шпаты содержат преимущественно молекулы H_2O (Rossman, 1988; Rossman, 1990). Отмечается наличие воды в пироксенах, гранатах, оливине (Bell et al., 1992; Skogby, 1999; Ingrin et al., 2000; Kovács et al., 2008) и цирконе (Nasdala et al., 2001; Jing et al., 2023). Синтетический кварц также содержит воду, которая гидролизует кремний-кислородные связи (Griggs et al., 1965).

При изучении номинально безводных минералов необходимо отличать воду, входящую в структуру минералов, от воды флюидных включений и продуктов изменения минералов. Инфракрасная (ИК) спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR) является наиболее чувствительным методом обнаружения следов водорода, связанного с кислородом, в структуре различных номинально безводных минералов (Rossman, 1988; Rossman, 1996; Beran, 1999; Skogby, 1999; Ingrin et al., 2000; Beran et al., 2003).

Объектом нашего исследования стал нефелин $Na_3K(Al_4Si_4O_{16})$ – номинально безводный минерал. Он распространен в щелочных магматических породах и связанных с ними пегматитах, а также в их метасоматических и метаморфических эквивалентах (Igneous rocks..., 2002). Нефелин часто содержит избыточное количество кремния в своем составе, вследствие чего описывается в системе Nph (нефелин) – Ks (кальсилит) – SiO_2 (Hamilton, 1961). Идеальный состав нефелина соответствует соотношению нефелинового и кальсилитового компонентов как $Nph_{75}Ks_{25}$ (Tilley, 1954; Hamada et al., 2019). Нефелин относится к группе минералов, химический состав которых может меняться в зависимости от условий формирования пород. Содержание SiO_2 в нефелине контролируется условиями его кристаллизации (Wilkinson et al., 1994; Костылева-Лабунцова и др., 1978; Яковенчук и др., 2010).

Многие исследователи отмечали наличие воды в структуре нефелина. В работах (Beran, 1974; Beran et al., 1989; Balassone et al., 1995) было установлено, что в структуре нефелина, предположительно в позиции калия, присутствует вода в виде молекул H_2O . Концентрация воды по данным авторов составляет от 0,05 до 0,5 мас.% и контролируется количеством вакансий в структуре нефелина.

В работах (Самсонова, 1973; Костылева-Лабунцова и др., 1978 и др.) также определено наличие воды в составе нефелина. Но в этих публикациях приведены результаты анализов монофракций нефелина методом "мокрой химии", что не исключает связи воды с натролитом, часто развивающимся по нефелину, или с газовой-жидкими включениями в нефелине. Более поздние исследования локальными методами ИК спектроскопии (микро-FTIR) природного и выращенного в контролируемых экспериментальных условиях нефелина подтвердили наличие воды в его структуре (Симакин и др., 2008). Однако при структурных уточнениях наличие воды не было обнаружено (Hanh et al., 1954; Sahama, 1962; Dollase, 1970; Foreman et al., 1970; Simmons et al., 1972; Dollase et al., 1978; Tait et al., 2003). Исследования нефелина на предмет структурного положения воды ведутся и по сей день (Mikhailova et al., 2022).

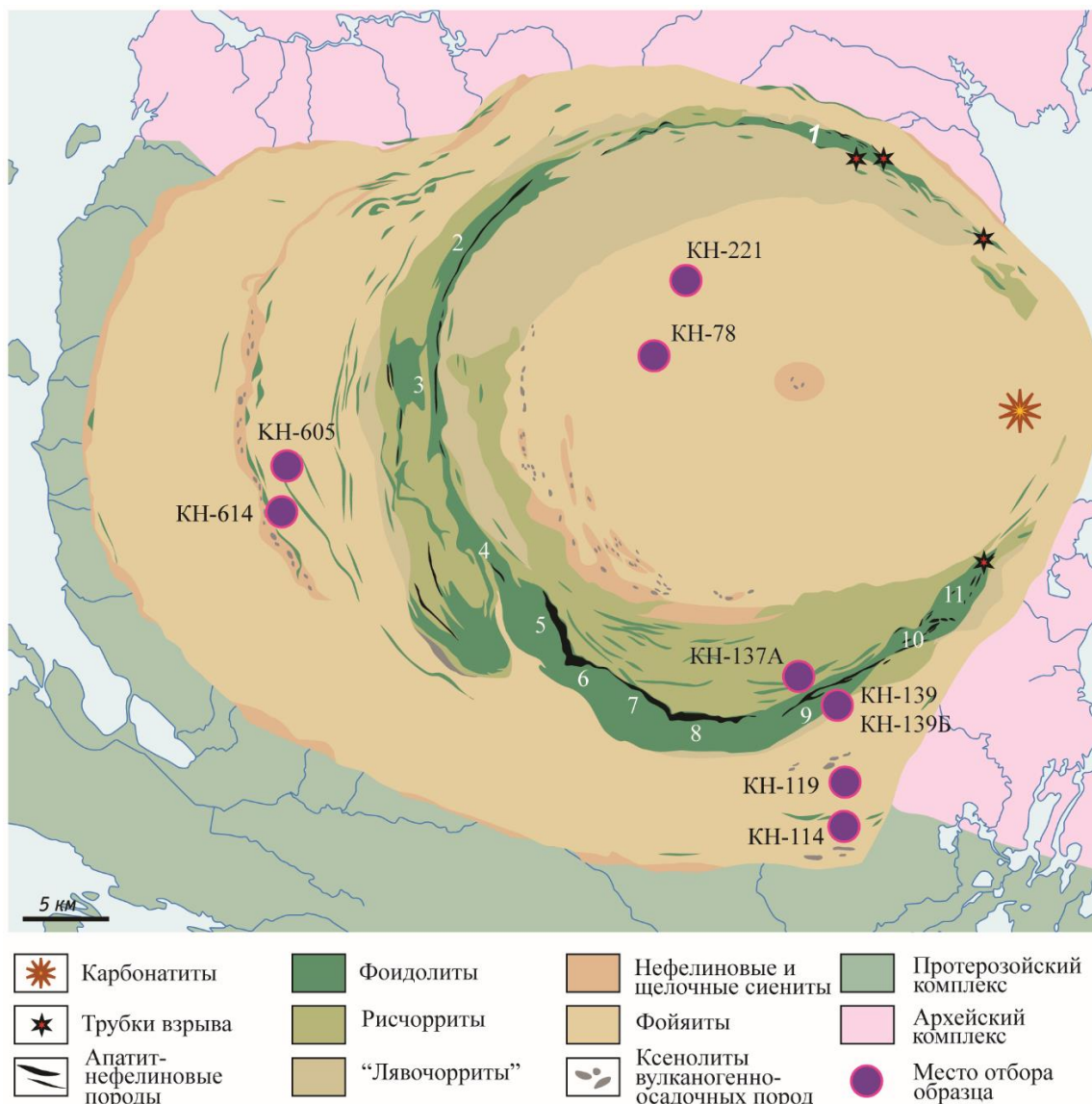
Эффект вхождения воды в нефелин необходимо учитывать в балансовых петрологических вычислениях кристаллизации щелочных расплавов. Он может иметь существенное влияние на термодинамические свойства нефелиновых твердых растворов с кальсилитом. Изучение вхождения воды в формально безводный нефелин, прежде всего, позволяет использовать этот минерал как сенсор летучести воды в различных магматических процессах. Определенный интерес может вызвать и информация об ионообменных свойствах синтезированного гидратированного нефелина $Na_3Al_3Si_3O_{12} \cdot 2H_2O$, который является хорошим ионообменником для катионов Ag^+ и Tl^+ (Barrer et al., 1952) и проявляет частичный ситовый эффект по отношению к катионам Cs^+ (Hansen et al., 1983).

В нашей работе представлены результаты изучения 9 образцов нефелина, отобранных из разных пород Хибинского массива, методом локальной ИК спектроскопии с преобразованием Фурье (микро-FTIR).

Геология и петрография

Хибинский щелочной массив расположен в Арктической зоне России в западной части Кольского полуострова на контакте архейских гранито-гнейсов Кольско-Норвежского блока и протерозойских вулканогенно-осадочных пород зеленокаменного пояса Имандра-Варзуга. В плане массив имеет форму овала размером 45×35 км, в вертикальном разрезе представляет собой сужающееся книзу конусовидное тело (Шаблинский, 1963). Это самый крупный в мире щелочной комплекс площадью около 1327 км². Время образования главных типов пород Хибинского массива по данным Pb–Pb, Rb–Sr и Sm–Nd датирования составляет 380–360 млн лет (Баянова и др., 2002; Арзамасцев и др., 2007).

Массив характеризуется концентрически-зональным строением и кольцевым в плане расположением породных комплексов (рис. 1). Большая часть массива (70 об.%) сложена лейкократовыми нефелиновыми сиенитами – фойяитами. Расширяющееся вблизи поверхности тело фойяитов разделено на две части конически-кольцевым разломом, заполненным фойдолитами (в основном, ийолит-уртитам и, в меньшей степени, мельтейгитами). Граничащие с фойдолитами фойяиты преобразованы процессами кальсилит-ортоклазового пойкилобластеза в высококальциевые пойкилитовые нефелиновые сиениты (рисчорриты) и переходные к ним по составу неравнозернистые нефелиновые сиениты – лявочорриты. Эти породы носят название комплекса Главного кольца и занимают около 27 % площади массива. Доля фойдолитов, рисчорритов и лявочорритов приблизительно равна (8, 9 и 10 % соответственно). Апатит-нефелиновые и титанит-апатит-нефелиновые породы формируют линзово-штоковерковые залежи в апикальных частях фойдолитовой толщи и связаны с ней постепенными переходами. Мелкозернистые щелочные и нефелиновые сиениты (3 % от площади массива) сосредоточены в пределах трех (полу)кольцевых зон: по краю массива в зоне приконтактового разлома, по периферии Главного кольцевого разлома и в пределах Малого полукольца. Последнее располагается западнее Главного кольца и сложено мелкозернистыми щелочными и нефелиновыми сиенитами с ксенолитами вулканогенно-осадочных пород ловозерской свиты, а также телами ийолит-уртитов и малиньитов (Иванюк и др., 2009).



Апатит-нефелиновые месторождения и рудопроявления: 1 – Валепахк; 2 – Партомчорр; 3 – Куэльпорр; 4 – Снежный Цирк; 5 – Кукисвумчорр; 6 – Юкспорр; 7 – Апатитовый Цирк; 8 – Плато Расвумчорр; 9 – Коашва; 10 – Ньоркпахк; 11 – Олений Ручей

Рис. 1. Геологическая карта Хибинского щелочного массива с отмеченными местами отбора проб для исследования (Иванюк и др., 2009).

Fig. 1. Geological map of the Khibiny alkaline massif with marked sampling locations for the study (Ivanjuk et al., 2009)

Краткая петрографическая характеристика наиболее распространенных пород приведена на основе классификации QAPF, рекомендованной Международным союзом геологических наук (IUGS) (*Igneous rocks...*, 2002). Эта классификация учитывает соотношение K–Na полевых шпатов (*A*), фельдшпатоидов (*F*) и темноцветных минералов (*M'*). Согласно этой классификации породы Хибинского массива представлены нефелиновыми сиенитами (фойяитами, малиньитами), фойдолитами (уртиты, ийолиты и мельтейгиты) и щелочными сиенитами (рис. 2).

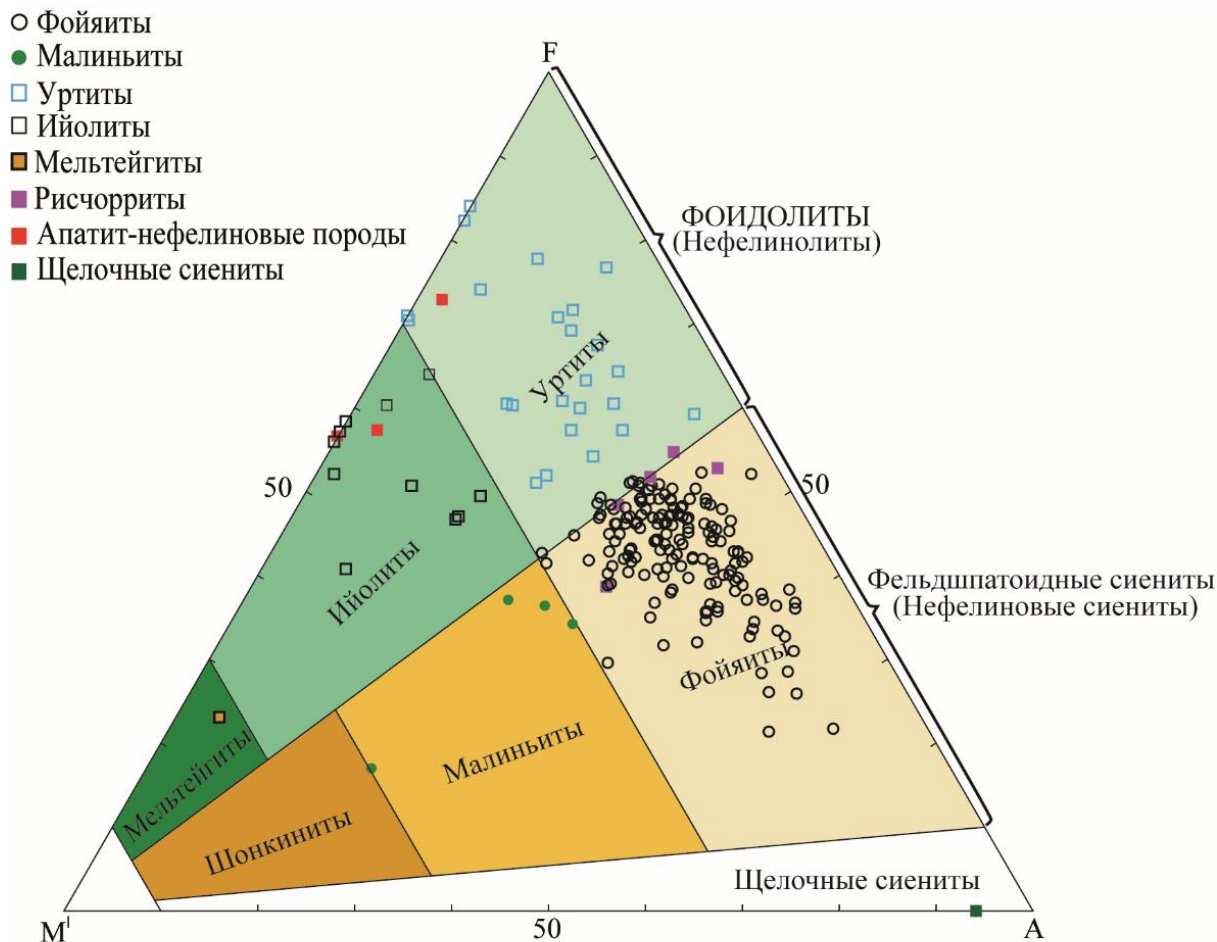


Рис. 2. Модальный состав пород Хибинского щелочного массива: *A* – K–Na-полевые шпаты; *F* – фельдшпатоиды (нефелин, кальсилит, натролит, содалит, канкринит, анальцим); *M'* – темноцветные минералы

Fig. 2. Modal composition of rocks of the Khibiny alkaline massif: *A* – K–Na-feldspars; *F* – feldspathoids (nepheline, kalsilite, natrolite, sodalite, cancrinite); *M'* – dark-colored minerals

Среди нефелиновых сиенитов наибольшее распространение имеют фойяиты. Они представляют собой лейкократовые породы средне-крупнозернистой, гипидиоморфнозернистой структуры и массивной, либо трахитоидной текстуры. Эти породы, в основном, сложены таблитчатыми до изометричными кристаллами микроклин-(пертита)/ортоклаз-(пертита) (до 3 см в поперечнике) и идиоморфными кристаллами нефелина (до 3 см в поперечнике) (рис. 3, *a*). Нефелин часто содержит включения эгирина, калиевого полевого шпата и альбита. В измененных фойяитах нефелин резорбируется микроклин-(пертитом)/ортоклаз-(пертитом) или образует симплектитоподобные агрегаты с эгирином, эгирин-авгитом, амфиболами, а также нередко замещается натролитом, реже содалитом. Интерстиции заполнены темноцветными минералами (эгирин, эгирин-авгит, арфведсонит-магнезиоарфведсонит, рихтерит-феррорихтерит, катофорит-магнезиокатофорит).

Малиньиты – меланократовые породы мелко- и среднезернистой структуры и массивной либо гнейсовидной текстуры. Гнейсовидная текстура обусловлена ориентированным положением отдельных кристаллов или скоплений темноцветных минералов. Менее типична для малиньитов трахитоидная текстура, выраженная планарным распределением полевых шпатов. Главными породообразующими минералами являются нефелин, ортоклаз-(пертит), эгирин, эгирин-авгит, энigmatит и железистые Na–Ca- и щелочные

амфиболы (феррозкерманнит, феррорихтерит, магнезиоарфведсонит, арфведсонит, рихтерит и др.). Малиньиты имеют в массиве весьма ограниченное распространение.

Рисчорриты, преимущественно развитые вдоль верхнего контакта с мельтейгит-уртитам, представляют собой непрерывный ряд гибридных пород от фойяитов до уртитов, генетически связанных между собой процессами ортоклазового пойкилобластеза (*Иванюк и др., 2009*). Это средне- и крупнозернистые породы массивной текстуры с характерной пойкилитовой структурой, которая обусловлена наличием крупных (до 15–20 см в поперечнике) пойкилокристаллов ортоклаза с включениями зерен нефелина, кальсилита (реже) и темноцветных минералов (рис. 3, б). Метакристаллы ортоклаза расположены в мелко-среднезернистой массе идиоморфных зерен нефелина с темноцветными минералами (в основном, с эгирином и калийарфведсонитом) в интерстициях. Нефелин в рисчорритах нередко образует симплектитовые сростания с эгирином. Характерной особенностью нефелина является то, что он в разной степени замещен кальсилитом. К пороодообразующим минералам относятся также содалит, арфведсонит, магнезиоарфведсонит, аннит, энigmatит.

Совместно с рисчорритами к комплексу пород Главного кольца можно отнести и неравнозернистые нефелиновые сиениты (лявочорриты), ввиду аналогичной с рисчорритами природы и сопряженной геологической позиции. По сути, это – фойяиты, лишь слегка затронутые процессами калиевого метасоматоза (*Иванюк и др., 2009*). Они развиты в тех частях массива, где фойидолитовая интрузия имеет незначительную мощность или крутые углы падения. Лявочорриты представляют собой лейкократовые средне-крупнозернистые породы, сложенные изометричными кристаллами ортоклаз-/микроклин-пертита, интерстиции которых заполнены идиоморфными зернами нефелина, эгирин-авгитом и амфиболами (в основном, рихтеритом и феррорихтеритом). В лявочорритах наряду с таблитчатыми кристаллами ортоклаз-пертита/микроклин-пертита изредка встречаются и пойкилокристаллы ортоклаза.

Фойидолиты (мельтейгиты, ийолиты, уртиты) – это породы, содержащие более 60 % нефелина относительно суммы нефелина и щелочных полевых шпатов. По содержанию темноцветных минералов они делятся на уртиты (10–30 % темноцветных минералов), ийолиты (30–70 %) и мельтейгиты (70–90 %). Ийолит-уртиты сложены, в основном, нефелином, ортоклазом и темноцветными минералами – эгирином, эгирин-авгитом, авгитом, диопсидом, калийрихтеритом, калийферрорихтеритом. В мельтейгит-уртитах гипидиоморфные зерна нефелина (до 2 см в поперечнике) образуют агрегат, интерстиции в котором заполнены темноцветными минералами – клинопироксенами, амфиболами, слюдами ряда аннит-флогопит, титанитом, магнетитом, ильменитом и минералами группы эвдиалита. Нередко кристаллы нефелина пойкилитово включены в крупные метакристаллы ортоклаза, эгирин-авгита, калийрихтерита и титанита. Содержание пойкилобластов ортоклаза в уртитах изменяется от нуля до порогового значения перехода уртитов в рисчорриты. Иногда присутствует поздний альбит в ассоциации с натролитом и эгирином. Ийолит-уртиты имеют массивную или гнейсовидную текстуру. Гнейсовидная текстура обусловлена ориентированным положением отдельных кристаллов или скоплений темноцветных минералов (рис. 3, в). В целом, в породах мельтейгит-уртитового ряда присутствует несколько морфологических разновидностей нефелина: 1) идиоморфные кристаллы нефелина, которые насыщены включениями игольчатых и призматических кристаллов эгирина; 2) округлые и "чистые" зерна нефелина, которые образуют грануломорфные агрегаты; 3) выделения в составе симплектитоподобных агрегатов с эгирином, эгирин-авгитом и амфиболами; 4) пойкилитовые включения в метакристаллы ортоклаза, эгирин-авгита, калийрихтерита и титанита. Мельтейгиты состоят преимущественно из темноцветных минералов и имеют подчиненное распространение. Обычно они сложены мелкозернистым агрегатом диопсида или эгирин-авгита, флогопита, титанита, магнетита и фторапатита, в котором отдельными скоплениями распределены короткопризматические кристаллы нефелина.

Апатит-нефелиновые породы представляют собой мелко- и среднезернистые фойидолиты, существенно обогащенные фторапатитом (рис. 3, з). В качестве пороодообразующих минералов выступают нефелин, фторапатит, диопсид, эгирин-авгит, калийрихтерит, ортоклаз, титанит, магнетит и ильменит. Кроме того, существуют разновидности, существенно обогащенные титанитом – титанит-апатитовые и титанит-нефелиновые породы. В мощных апатитовых жилах встречаются хорошо сформированные призматические кристаллы позднего нефелина диаметром до 2 см, который находится в ассоциации с метакристаллами титанита, минералов группы эвдиалита, астрофиллита и энigmatита. Нефелин нередко образует сростки со фторапатитом.

Ксенолиты ороговикованных вулканогенно-осадочных пород (включая фениты) представляют собой тонко-мелкозернистые породы, окраска которых варьирует от белой, светло-серой, бледно-фиолетовой, голубой, коричневой до черной. Текстура этих пород изменяется от массивной и неясно-полосчатой до контрастно-полосчатой, линзовидно-полосчатой, такситовой и порфиоровидной. Роговики и фениты характеризуются широкими вариациями минерального состава как в объеме отдельного ксенолита, так и в пределах отдельного образца (*Yakovenchuk et al., 2005; Korchak et al., 2011*). В этих породах нефелин является одним из наиболее поздних минералов, который сначала образует выделения согласно с общей слоистостью пород в ассоциации с эгирином, содалитом, натролитом, арфведсонитом, лоренценитом,

лопаритом-(Се), эвдиалитом и минералами группы пироклора, а затем, при дальнейшей фенитизации, нефелин образует крупные порфиробласты до 8 см в поперечнике (Яковенчук и др., 2010).

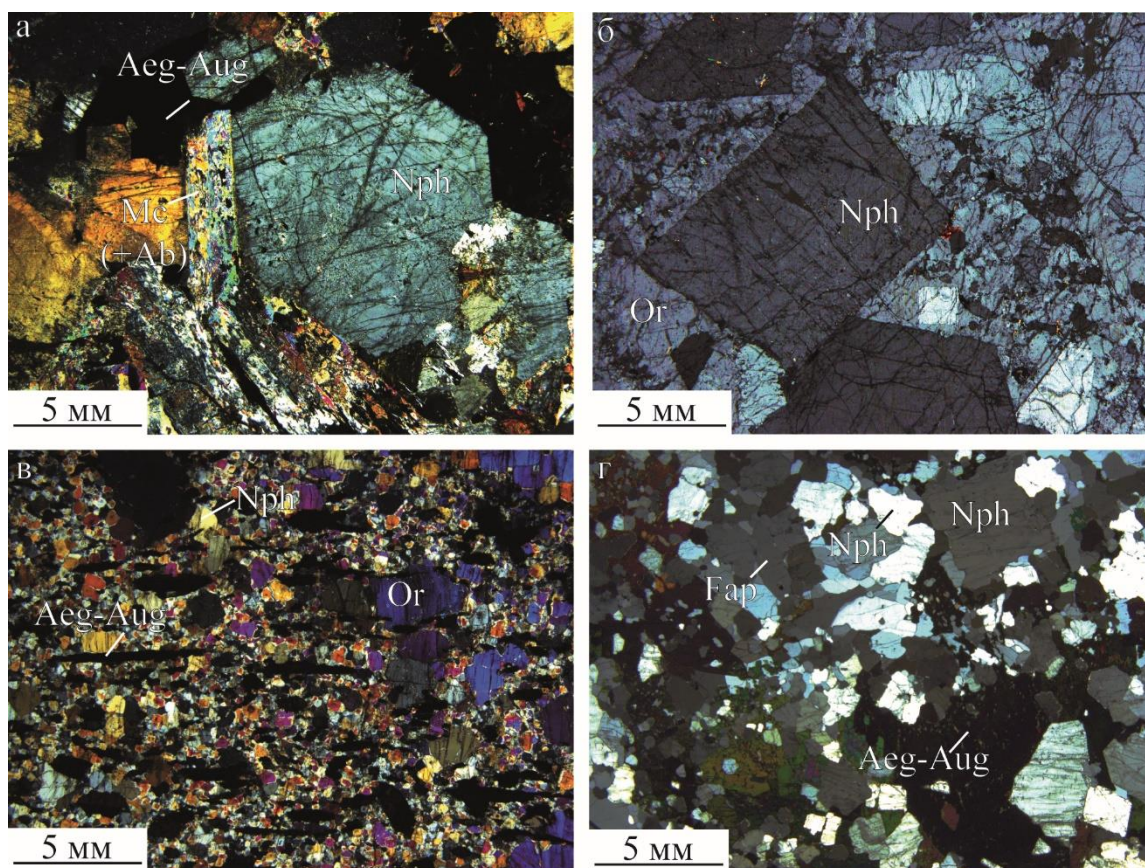


Рис. 3. Фото комбинированных шлифов в поляризованном свете. Нефелин в породах Хибинского щелочного массива: *а* – фойяит (образец КН-119); *б* – рисчоррит (образец КН-139Б); *в* – гнейсовидный уртит (основная масса сложена нефелином) (образец КН-139); *г* – апатит-нефелиновая порода (образец КН-137А). Ab – альбит, Aeg – эгирин, Aug – авгит, Fap – фторапатит; Mc – микроклин, Nph – нефелин, Or – ортоклаз, Ttn – титанит

Fig. 3. Photo of the combined thin sections in polarized light. Nepheline in rocks of the Khibiny alkaline massif: *a* – foyaite (sample KN-119); *б* – rischorrite (sample KN-139B); *в* – gneissoid urtite (the main mass is composed of nepheline) (sample KN-139); *г* – apatite-nepheline rock (sample KN-137A). Ab – albite, Aeg – aegirine, Aug – augite, Fap – fluorapatite, Mc – microcline, Nph – nepheline, Or – orthoclase, Ttn – titanite

В пределах Хибинского массива широко распространены пегматиты, изучению минералогии которых посвящено множество работ (Тихоненков, 1963; Yakovenchuk et al., 2005). Пегматиты, в основном, сложены нефелином, микроклин-(пертитом), эгирином, альбитом, минералами группы эвдиалита, содалитом, натролитом, виллиомитом, ферсманитом, лампрофиллитом, ильменитом и др.

Материалы и методы

Зерна нефелина были отобраны из девяти образцов различных пород Хибинского щелочного массива: КН-78, КН-114, КН-119, КН-137А, КН-139, КН-139В, КН-221, КН-601/2, КН-605. Расположение точек опробования показано на рис. 2.

Образцы КН-78 и КН-221 отобраны из фойяитов центральной части Хибинского массива, образцы КН-114 и КН-119 – из фойяитов внешней части массива. Образцы КН-137А (apatite-нефелиновая порода), КН-139 (гнейсовидный уртит) и КН-139Б (рисчоррит) отобраны из рудной зоны Коашвинского месторождения. Образцы КН-601/2 и КН-605 были отобраны в пределах Малого полукольца из уррита (по сути – обогащенного нефелином фойяита), брекчирующего ксенолит роговика.

Для анализа зерна нефелина (10–15 штук) из каждого образца были залиты в эпоксидную смолу в произвольном положении относительно кристаллографических осей и отполированы с двух сторон до получения плоскопараллельных пластин толщиной около 300 мкм.

Инфракрасные спектры поглощения с пластинок нефелина записаны на ИК-Фурье микроскопе Multiscope, совмещенном со спектрометром Spectrume One фирмы Perkin Elmer. Регистрация ИК спектров проводилась

в неполяризованном ИК излучении с локальным разрешением 50 мкм в диапазоне валентных колебаний O–H связи 2500–4000 см⁻¹.

Количественная оценка содержания водных компонентов выполнена в соответствии с методикой статистического количественного определения содержания "воды" в номинально безводных минералах. Методический подход предложен в работе (Kovács *et al.*, 2008).

Химический состав исследуемых зерен нефелина определен на микроанализаторе (EPMA) Cameca MS-46 (Gennevilliers, France) в Геологическом институте КНЦ РАН. Ускоряющее напряжение 22 кВ, ток зонда 20–30 nA и диаметр электронного пучка 5 мкм. Использованные стандарты: лоренцит (Na), ортоклаз (K), Y₃Al₅O₁₂ (Al), волластонит (Si, Ca), гематит (Fe).

Расчет кристаллохимических формул нефелина (в атомах на формульную единицу, apfu) выполнен с помощью программы MINAL Д. В. Доливо-Добровольского.

Статистический анализ проводили с помощью программы STATISTICA 13.0 (Statsoft company, Dell, Round Rock, TX, USA).

Результаты

Химический состав 9 детально изученных образцов приведен в табл. 1. Во всех образцах отмечен избыток кремния, превышающий стехиометрическое значение (более 4 apfu). Наиболее существенный избыток кремния отмечается в нефелине из фойяитов, а также из уррита, брекчирующего ксенолит роговика в зоне Малой дуги (от 4,27 до 4,44 apfu). Для этих же образцов характерны сравнительно низкие содержания калия (0,64–0,72 apfu).

Нефелин из пород комплекса Главного кольца (рисчоррита, уррита, апатит-нефелиновой породы) отличается наибольшими содержаниями калия в своем составе (от 0,82 до 0,99 apfu) и относительно низкими по сравнению с нефелином фойяитов содержаниями кремния (4,10–4,27 apfu).

Таблица 1. Результаты микрозондового анализа нефелина (мас.%)
Table 1. Results of microprobe analysis of nepheline (wt.%)

Проба	КН-78	КН-114	КН-119	КН-221	КН-137А	КН-139	КН-139В	КН-601/2	КН-605
Na ₂ O	14,95	14,70	14,95	15,29	14,56	15,68	14,40	15,27	15,36
K ₂ O	5,32	5,30	5,14	5,56	7,23	6,58	7,93	5,52	5,74
Al ₂ O ₃	30,63	30,83	30,63	31,86	32,53	30,82	32,05	31,13	31,60
Fe ₂ O ₃	1,29	1,63	1,29	1,02	1,80	2,19	2,18	1,34	1,27
SiO ₂	45,72	45,97	45,72	44,60	41,17	43,17	42,32	44,55	43,41
Сумма	97,78	98,26	97,78	98,22	97,14	98,23	98,66	97,68	97,25
Коэффициенты в формуле O = 16									
Na	2,81	2,75	2,81	2,87	2,81	2,99	2,74	2,89	2,93
K	0,66	0,65	0,64	0,69	0,92	0,82	0,99	0,69	0,72
Al	3,50	3,50	3,50	3,64	3,82	3,57	3,71	3,58	3,66
Fe ³⁺	0,09	0,12	0,09	0,07	0,13	0,16	0,16	0,10	0,09
Si	4,44	4,43	4,44	4,32	4,10	4,25	4,16	4,35	4,27
Сумма	11,50	11,46	11,49	11,60	11,79	11,79	11,77	11,60	11,68

Для каждой пластинки нефелина было записано по три ИК спектра в произвольных областях, максимально свободных от крупных трещин и микровключений. На инфракрасных спектрах всех зерен наблюдаются полосы поглощения в области 3000–3600 см⁻¹ (за исключением кристаллов нефелина образца КН-139В). При сопоставлении ИК спектров поглощения для одной пластинки выявлена неоднородность общей интенсивности (рис. 4), при этом общий вид спектра сохраняется. При сравнении ИК спектров для разных пластинок одного образца наблюдается изменение формы спектров, которое может быть связано с различной ориентировкой зерен.

Полученные нами ИК спектры в области 2500–4000 см⁻¹ представляют собой суперпозицию нескольких полос поглощения (рис. 5). Как правило, для разрешения таких спектров используют математические методы обработки. Мы применили метод двойного дифференцирования с алгоритмом сглаживания Савицкого – Голея, что позволило оценить количество полос в спектре и их положение. Затем спектры раскладывали на Гауссовы компоненты.

Помимо полос поглощения в области 3400–3600 см⁻¹, связанных с валентными колебаниями O–H связи в структуре нефелина (Balassone *et al.*, 1995; Beran *et al.*, 1989; Симакин и др., 2008), почти все наши спектры имеют в своем составе пики, смещенные в сторону снижения частоты 3330, 3217 и 3065 см⁻¹ (рис. 5, а). Самые интенсивные линии 3217 и 3330 см⁻¹ предположительно относятся к колебаниям C–H связи в ацетиле. На спектрах образцов КН-139В и КН-605 данные линии значительно снижены либо совсем отсутствуют (рис. 5, б). Еще одной особенностью ИК спектров этих двух образцов является присутствие в спектре полос при 2957 и 2878 см⁻¹, которые обычно соответствуют валентным колебаниям C–H связи

в метильных и метиленовых группах. Пики, не связанные с "водой", свидетельствуют о захвате непредельных углеводов в решетку нефелина, и поэтому математически исключался их вклад в интенсивность спектра при расчете концентрации воды.

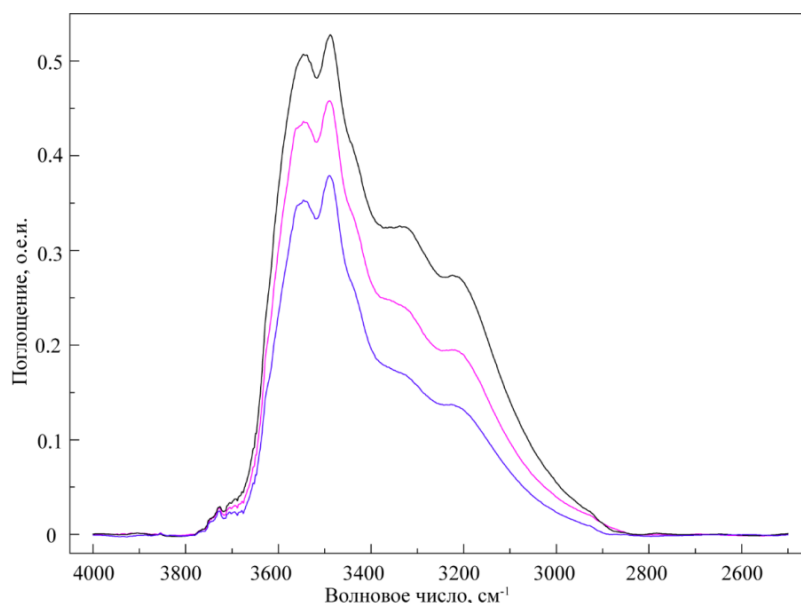


Рис. 4. Серия ИК спектров поглощения в "водной" области для трех разных точек одной пластинки (образец КН-601/2)
 Fig. 4. A series of infrared absorption spectra in the "water" field for three different points of the same slide (sample KH-601/2)

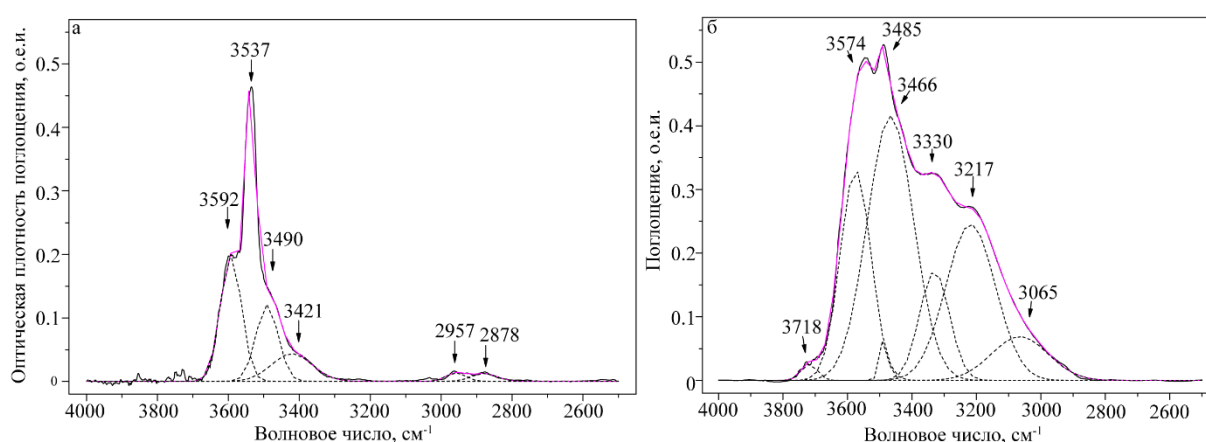


Рис. 5. Экспериментальные инфракрасные спектры поглощения воды в нефелине (черные линии) с моделируемыми из Гауссовых компонентов (розовые линии):
 а – образец КН-601-2; б – образец КН-605

Fig. 5. Experimental infrared absorption spectrum of water in nepheline (black lines) with that simulated from Gaussian components (pink lines): a – sample KH-601-2; б – sample KH-605

Оценку содержания воды в образцах нефелина провели в соответствии с методикой, изложенной в работе (Kovács *et al.*, 2008), с помощью уравнения

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,8}{\rho} \times \frac{A_{\text{int}}}{\varepsilon t},$$

где $C_{\text{H}_2\text{O}}$ (мас.%) – концентрация воды в нефелине; $\rho = 2,635 \text{ г/см}^3$ – средняя плотность нефелина хибинских пород (Атлас..., 1975); A_{int} (см^{-1}) – общее среднее интегральное поглощение; ε ($\text{л/моль}\cdot\text{см}^2$) – коэффициент интегрального поглощения; t (см) – толщина пластинок. Значение коэффициента интегрального поглощения $\varepsilon = 4515 \text{ л/моль}\cdot\text{см}^2$ взято из работы (Beran *et al.*, 1989). Результаты расчетов содержания воды в образцах нефелина и толщина пластинок приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание воды в нефелине из пород Хибинского щелочного массива
Table 2. Water content in nepheline from rocks of the Khibiny alkaline massif

Образец	Тип породы	Содержание воды (мас.%)	Общее среднее интегральное поглощение, A_{int} (см ⁻¹)	Толщина пластинки, t (см)
КН-78	Фойяит	0,78	159	0,031
КН-221	Фойяит	0,60	106	0,027
КН-114	Фойяит	0,61	114	0,028
КН-119	Фойяит	0,73	116	0,024
КН-137А	Апатит-нефелиновая порода	0,10	20	0,031
КН-139	Уртит	0,11	21	0,029
КН-139Б	Рисчоррит	–	–	0,027
КН-601-2	Уртит	0,50	100	0,030
КН-605	Уртит	0,34	63	0,028

Примечание. "–" – ниже предела обнаружения.

На ИК спектре образца КН-139Б в области валентных колебаний Н–О–Н не наблюдается полос поглощения, характерных для "воды" в нефелине. Однако полностью исключить наличие воды в образце КН-139Б нельзя, поскольку ее концентрация может быть ниже предела обнаружения.

Корреляционный анализ данных по составу нефелина и содержанию в нем воды выявил значимую (при $p < 0,05$) корреляционную зависимость между этими параметрами (рис. 6). Отмечается положительная корреляция количества воды в нефелине от содержания в нем Si^{4+} и отрицательная – от K^+ и суммы $Al^{3+}+Fe^{3+}$ (с каждым из этих катионов содержание H_2O также имеет значимую корреляцию: с Al^{3+} $r = -0,76$, с Fe^{3+} $r = -0,81$). В целом, выявленная зависимость соответствует формуле

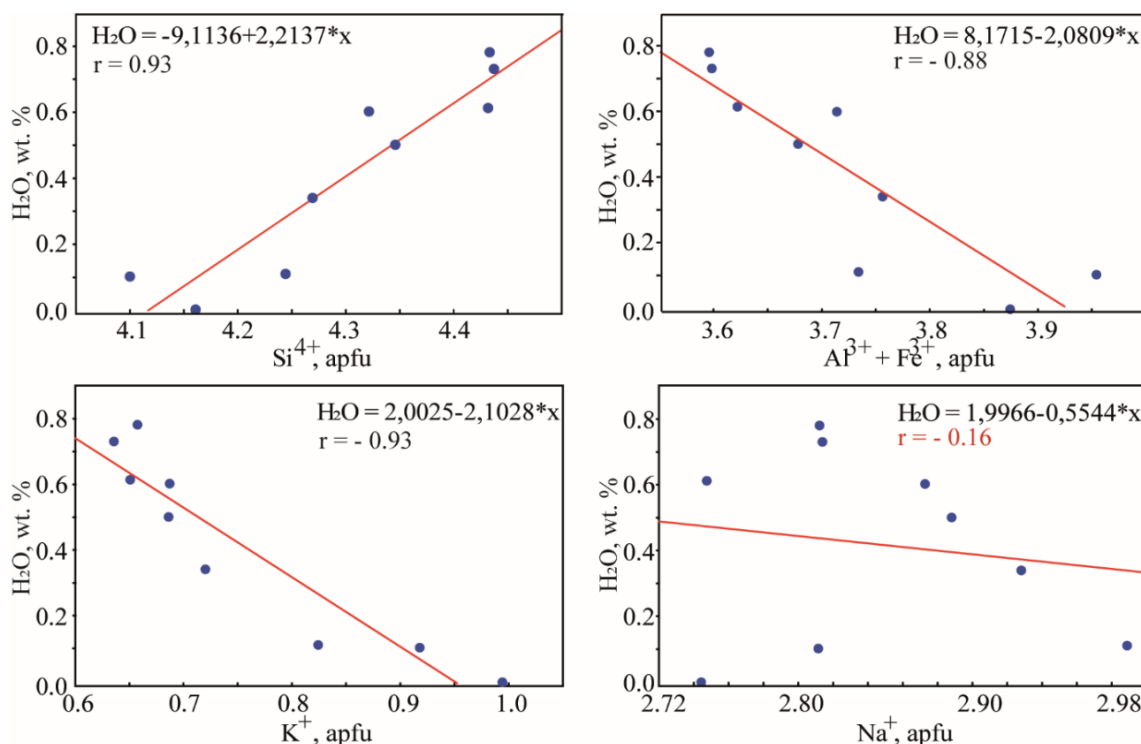
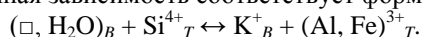


Рис. 6. Зависимость содержания воды в нефелине (мас.%) от его состава
Fig. 6. Dependence of water content in nepheline (wt.%) on its composition

От содержания Na⁺ количество воды в нефелине не зависит.

Обсуждение

Структура нефелина $Na_3K(Al_4Si_4O_{16})$ представляет собой каркас, состоящий из искаженных 6-членных колец кремне- и алюмокислородных тетраэдров, которые связаны друг с другом своими вершинами. В этом каркасе присутствуют две топологически разные полости A и B, занимаемые катионами Na и K соответственно (рис. 7) (Hanh et al., 1954; Sahama, 1962; Dollase, 1970; Dollase et al., 1978; Tait et al., 2003).

При наличии избыточного кремния (больше 4 ару) и недостатке алюминия (меньше 4 ару) общий заряд алюмокремнекислородного каркаса уменьшается, и для его компенсации требуется меньшее количество катионов. Избыточный кремний в составе нефелина компенсируется наличием вакансий в позиции B по схеме $\square_B + \text{Si}^{4+}_T \leftrightarrow \text{K}^+_B + (\text{Al}, \text{Fe})^{3+}_T$ (Hayward et al., 2000; Dollase et al., 1978). Размер полостей A , занимаемых катионами Na, составляет $3,20 \times 6,80 \text{ \AA}$, а размер полостей B , занимаемых катионами K, составляет $5,17 \times 5,17 \text{ \AA}$. Размер их свободных кристаллографических диаметров соответственно равен $0,5 \times 4,10 \text{ \AA}$ и $2,47 \times 2,47 \text{ \AA}$.

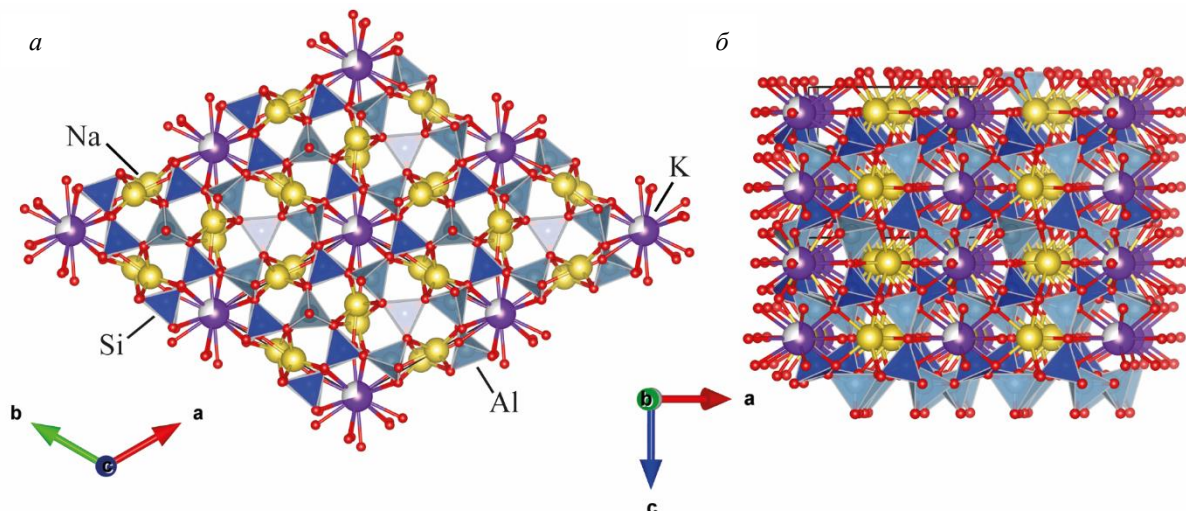


Рис. 7. Проекция кристаллической структуры нефелина вдоль направления $[001]$ (а) и общая проекция (б)

Fig. 7. Projection of the crystal structure of nepheline along direction $[001]$ (a) and the general projection (b)

Размер молекулы воды, составляющий $2,75 \text{ \AA}$, больше свободных кристаллографических диаметров обоих полостей. В связи с этим вхождение воды в нефелин маловероятно в твердофазном состоянии и, скорее всего, происходило в процессе его кристаллизации.

По данным (Beran, 1974; Beran et al., 1989; Balassone et al., 1995), вода в виде молекул H_2O занимает вакансии в позиции калия. Она присутствует в трех кристаллографических ориентациях (третья ориентация достигается при нагревании до $350 \text{ }^\circ\text{C}$). Абсолютная концентрация воды, по данным авторов, составляет от 0,05 до 0,5 мас. % и контролируется количеством вакансий в структуре нефелина.

В наших исследованиях для определения водных компонентов мы использовали произвольно ориентированные зерна нефелина и неполяризованное ИК излучение, поэтому охарактеризовать образцы по спектральным типам и преимущественной координации молекулы воды, как в работах (Beran et al., 1989; Balassone et al., 1995), не представляется возможным. Однако выявленная нами высоко значимая ($r = -0,93$, $R^2 = 0,86$) отрицательная корреляция количества воды с содержанием калия в нефелине свидетельствует в пользу того, что в структуре нефелина вода занимает вакансии в позиции калия.

Обобщенные данные, приведенные в работе (Костылева-Лабунцова и др., 1978), показывают, что по химическому составу нефелины из пород и пегматитов Хибинского массива отчетливо делятся на две группы: (1) нефелин нефелиновых сиенитов и (2) нефелин мельтейгит-уртитов, апатит-нефелиновых пород и рисчорритов. В составе нефелина при переходе от фойяитов к фойдолитам, апатит-нефелиновым породам, рисчорритам и пегматито-гидротермальным жилам наблюдается обогащение калием и алюминием (в случае фойдолитов и Fe^{3+}) за счет кремния вследствие изоморфизма по схеме $\square_B + \text{Si}^{4+}_T \leftrightarrow \text{K}^+_B + (\text{Al}, \text{Fe})^{3+}_T$.

Аналогичный тренд изменения состава наблюдается в зональных кристаллах нефелина, в которых краевые зоны нефелина отличаются от ядер более высоким содержанием алюминия и калия (Яковенчук и др., 2010).

Отмеченные различия в составе нефелина позволяют на основании имеющихся экспериментальных данных судить о температуре его кристаллизации, поскольку количество избыточного кремнезема в нефелине увеличивается по мере роста температуры его образования. Высокотемпературный нефелин обычно содержит повышенное относительно стехиометрии количество кремния и, соответственно, пониженное количество калия (Hamilthon, 1961). Для хибинских нефелинов в работе (Яковенчук и др., 2010) приведено уравнение, аппроксимирующее график зависимости температуры кристаллизации пород массива (по оценке различных исследователей) от среднего содержания кремния в слагающем их нефелине. Оцененная по этому уравнению температура кристаллизации нефелина в фенитизированных вулканогенно-осадочных породах соответствует

913 °С, в фойяитах – 884 °С, в фойдолитах – 512 °С, в рисчорритах – 455 °С, в апатит-нефелиновых породах – 426 °С, в пегматитах – 197 °С.

В нашем исследовании наибольшие содержания воды отмечены в нефелинах из фойяитов краевой и центральной частей массива и уррита (по сути – обогащенного нефелином фойяита), брекчирующего ксенолит роговика в зоне Малой дуги. Нефелины из этих пород отличаются наименьшими содержаниями калия и, соответственно, большим количеством вакансий в его позиции. В нефелине из уррита, рисчоррита и апатит-нефелиновой породы содержание воды в несколько раз меньше вследствие почти полной заселенности позиции калия.

Заключение

Таким образом, полученные нами данные подтверждают наличие воды в структуре нефелина, которая, вероятно, входит в позицию калия (В). Содержание воды колеблется от 0 до 0,78 мас.%. Наибольшие содержания воды отмечены в высокотемпературном нефелине ранних образований – фойяитов, в то время как наименьшие содержания воды отмечены в низкотемпературном нефелине из более поздних образований – фойдолитов Главного кольца (уррита, апатит-нефелиновой породы) и из покрывающих их рисчорритов, которые претерпели постмагматические изменения под воздействием флюидизированного фойдолитового расплава.

В ходе исследования выявлены дополнительные пики в ИК спектрах изученных образцов нефелина в области 3330 и 3217, которые свидетельствуют о возможном вхождении в структуру нефелина молекул непредельного углеводорода ацетилена. Ацетилен представляет собой плоскую молекулу $\text{HC} \equiv \text{CH}$ размером $0,4 \times 3,42 \text{ \AA}$, который теоретически позволяет ей входить как в полости А, так и в полости В. Однако из-за практически полной заселенности позиции натрия (А), свободной для ацетилена остается вакантная позиция калия (В).

Помимо ацетилена в структуре нефелина возможно присутствие метильных (CH_3) и метиленовых (CH_2) групп, о чем свидетельствуют слабые полосы поглощения в области 2957 и 2878 см^{-1} , которые обычно соответствуют валентным колебаниям С–Н связи в соответствующих группах.

Для количественного определения входящих в структуру нефелина углеводородов необходимы дополнительные исследования.

Благодарности

Благодарим сотрудников лаборатории № 48 Геологического института КНЦ РАН за предоставленные для исследований образцы, а также Людмилу Михайловну Лялину за помощь в подготовке препаратов.

Выражаем искреннюю благодарность рецензенту за ценные замечания и комментарии.

Работа выполнена в рамках тем НИР FMEZ-2022-0019 и FMEZ-2024-0008. ИК спектры поглощения записаны и обработаны в ЦКП УрО РАН "Геоаналитик" в рамках темы № 123011800012-9 государственного задания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2021-680.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Арзамасцев А. А., Арзамасцева Л. В., Травин А. В., Беляцкий Б. В. [и др.]. Длительность формирования палеозойской магматической системы в центральной части Кольского полуострова: U–Pb-, Rb–Sr-, Ag–Ag-данные // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413, № 5. С. 666–670. EDN: IAANTJ.
- Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений / отв. ред. И. А. Турчанинов. Л. : Наука, 1975. 71 с.
- Иванюк Г. Ю., Горяинов П. М., Пахомовский Я. А., Коноплева Н. Г. [и др.]. Самоорганизация рудных комплексов. Синергетические принципы прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых. М. : Геокарт-Геос, 2009. 392 с.
- Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита : приложение № 3 к монографии Геология рудных районов Мурманской области / Т. Б. Баянова, В. И. Пожиленко, В. Ф. Смолькин [и др.]. Апатиты : Российская акад. наук, Кольский науч. центр им. С. М. Кирова, 2002. 53 с.
- Костылева-Лабунцова Е. Е., Боруцкий Б. Е., Соколова М. Н., Шлюкова З. В. [и др.]. Минералогия Хибинского массива / отв. ред. Ф. В. Чухров : в 2 т. М. : Наука, 1978. Т. 2. Минералы. 586 с.
- Самсонова Н. С. Минералы группы нефелина. М. : Наука, 1973. 151 с.
- Симакин А. Г., Салова Т. П., Завельский В. О. Вхождение воды в структуру нефелина по данным ЯМР и ИК спектроскопии // Геохимия. 2008. № 6. С. 674–678. EDN: IЛАНРХ.

- Тихоненков И. П. Нефелиновые сиениты и пегматиты северо-восточной части Хибинского массива и роль постмагматических явлений в их формировании. М. : Изд. АН СССР, 1963. 247 с.
- Шаблинский Г. Н. К вопросу о глубинном строении Хибинского и Ловозерского плутонов // Труды Ленинградского общества естествоиспытателей / под ред. Е. Н. Дьяконовой-Савельевой. 1963. Т. 74. С. 41–43.
- Яковенчук В. Н., Иванюк Г. Ю., Коноплева Н. Г., Корчак Ю. А. [и др.]. Нефелин Хибинского щелочного массива (Кольский полуостров) // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139, № 2. С. 80–91. EDN: OJBAZP.
- Balassone G., Beran A., Lueger-Ring K. Variable water content of nepheline from Somma-Vesuvio, Italy // *Mineralogy and Petrology*. 1995. Vol. 52. P. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01163127>.
- Barrer R. M., White E. A. D. The hydrothermal chemistry of silicates. Part II. Synthetic crystalline sodium aluminosilicates // *Journal of the Chemical Society (Resumed)*. 1952. Vol. 286. P. 1561–1571.
- Bell D. R., Rossman G. R. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals // *Science*. 1992. Vol. 255, Iss. 5050. P. 1391–1397. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.255.5050.1391>.
- Beran A. Preface-23. Contribution of IR spectroscopy to the problem of water in the Earth's mantle // NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences. Advanced Study Institute. 1999. Vol. 543. P. 523–538.
- Beran A. UR-spektroskopischer Nachweis von H₂O in Nephelin // *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*. 1974. Vol. 21. P. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01081038>.
- Beran A., Libowitzky E. IR spectroscopic characterization of OH defects in mineral phases // *Phase Transitions*. 2003. Vol. 76, Iss. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1080/0141159031000076002>.
- Beran A., Rossman G. R. The water content of nepheline // *Mineralogy and Petrology*. 1989. Vol. 40. P. 235–240. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01164492>.
- Dollase W. A. Least-squares refinement of the structure of a plutonic nepheline // *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*. 1970. Vol. 132, Iss. 1–6. P. 27–44. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1970.132.16.27>.
- Dollase W. A., Thomas W. M. The crystal chemistry of silica-rich, alkali-deficient nepheline // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1978. Vol. 66. P. 311–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00373415>.
- Foreman N., Peacor D. R. Refinement of the nepheline structure at several temperatures // *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*. 1970. Vol. 132. P. 45–70.
- Griggs D. T., Blacic J. D. Quartz: Anomalous weakness of synthetic crystals // *Science*. 1965. Vol. 147, N 3655. P. 292–295. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.147.3655.292>.
- Hahn T., Buerger M. J. The detailed structure of nepheline, KNa₃Al₄Si₄O₁₆ // *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*. 1954. Vol. 106, N 1–6. P. 308–338. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1954.106.16.308>.
- Hamada M., Akasaka M., Ohfuji H. Crystal chemistry of K-rich nepheline in nephelinite from Hamada, Shimane Prefecture, Japan // *Mineralogical Magazine*. 2019. Vol. 83, Iss. 2. P. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.133>.
- Hamilton D. L. Nephelines as crystallization temperature indicators // *The Journal of Geology*. 1961. Vol. 69, N 3. P. 321–329.
- Hansen S., Fälth L. The average structure of partially cesium exchanged nepheline hydrate I // *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*. 1983. Vol. 164, Iss. 1–2. P. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1983.164.1-2.79>.
- Hayward S. A., Pryde A. K. A., de Dombal R. F., Carpenter M. A. [et al.]. Rigid unit modes in disordered nepheline: A study of a displacive incommensurate phase transition // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2000. Vol. 27. P. 285–290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002690050257>.
- Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks / eds.: R. W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas [et al.]. Cambridge University Press, 2002.
- Ingrin J., Skogby H. Hydrogen in nominally anhydrous upper-mantle minerals: Concentration levels and implications // *European Journal of Mineralogy*. 2000. Vol. 12, N 3. P. 543–570. DOI: <https://doi.org/10.1127/ejm/12/3/0543>.
- Korchak Y. A., Men'shikov Y. P., Pakhomovsky Y. A., Yakovenchuk V. N. [et al.]. Trap formation of the Kola Peninsula // *Petrology*. 2011. Vol. 19. P. 87–101. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869591111010036>.
- Kovács I., Hermann J., O'Neill H. S. C., Gerald J. F. [et al.]. Quantitative absorbance spectroscopy with unpolarized light: Part II. Experimental evaluation and development of a protocol for quantitative analysis of mineral IR spectra // *American Mineralogist*. 2008. Vol. 93, Iss. 5–6. P. 765–778. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2008.2656>.
- Mikhailova J. A., Aksenov S. M., Pakhomovsky Y. A., Moine B. N. [et al.]. Iron in nepheline: Crystal chemical features and petrological applications // *Minerals*. 2022. Vol. 12, Iss. 10. Article number: 1257. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12101257>.

- Mo J., Xia X.-P., Li P.-F., Spencer C. J. [et al.]. Water-in-zircon: A discriminant between S- and I-type granitoid // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2023. Vol. 178. Article number: 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01986-7>.
- Nasdala L., Beran A., Libowitzky E., Wolf D. The incorporation of hydroxyl groups and molecular water in natural zircon (ZrSiO₄) // American Journal of Science. 2001. Vol. 301, Iss. 10. P. 831–857. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.301.10.831>.
- Rossmann G. R. Hydrogen in "anhydrous" minerals // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1990. Vol. 45, Iss. 1–4. P. 41–44. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(90\)90780-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(90)90780-X).
- Rossmann G. R. Studies of OH in nominally anhydrous minerals // Physics and Chemistry of Minerals. 1996. Vol. 23. P. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00207777>.
- Rossmann G. R. Vibrational spectroscopy of hydrous components // Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology / ed. : F. C. Hawthorne. Washington, DC : Mineralogical Society of America, 1988. P. 193–206.
- Sahama Th. G. Order-disorder in natural nepheline solid solutions // Journal of Petrology. 1962. Vol. 3, Iss. 1. P. 65–81. DOI: 10.1093/petrology/3.1.65.
- Simmons W. B., Jr., Peacor D. R. Refinement of the crystal structure of a volcanic nepheline // American Mineralogist. 1972. Vol. 57, Iss. 11–12. P. 1711–1719. URL: http://www.minsocam.org/ammin/AM57/AM57_1711.pdf.
- Skogby H. Preface-22. Water in nominally anhydrous minerals. NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences. Advanced Study Institute. 1999. Vol. 543. P. 509–522.
- Tait K. T., Sokolova E., Hawthorne F. C., Khomyakov A. P. The crystal chemistry of nepheline // The Canadian Mineralogist. 2003. Vol. 41, Iss. 1. P. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.1.61>.
- Tilley C. E. Nepheline-alkali feldspar parageneses // American Journal of Science. 1954. Vol. 252, Iss. 2. P. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.252.2.65>.
- Wilkinson J. F. G., Hensel H. D. Nephelines and analcimes in some alkaline igneous rocks // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1994. Vol. 118. P. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00310612>.
- Yakovenchuk V. N., Ivanyuk G. Yu., Pakhomovsky Ya. A., Men'shikov Yu. P. Khibiny / ed. : F. Wall. Laplandia Minerals, Apatity, 2005. 472 p.

References

- Arzamastsev, A. A., Arzamastseva, L. V., Travin, A. V., Belyatsky, B. V. et al. 2007. Duration of formation of the Paleozoic magmatic system of the central part of the Kola Peninsula: U–Pb-, Rb–Sr-, Ar–Ar data. *Doklady Akademii nauk*, 413(5), pp. 666–670. EDN: IAANTJ. (In Russ.)
- Atlas of physical properties of minerals and rocks of the Khibiny deposits. 1975. Ed. Turchaninov I. A. Leningrad. (In Russ.)
- Ivanyuk, G. Yu., Goryainov, P. M., Pakhomovsky, Y. A., Konopleva, N. G. et al. 2009. Self-organization of ore complexes. Synergetic principles of forecasting and prospecting of mineral deposits. Moscow. (In Russ.)
- Catalogue of geochronological data on northeastern part of the Baltic Shield. Appendix N 3 to monograph *Geology of ore districts of the Murmansk region*. 2002. Bayanova T. B., Pozhilenko V. I., Smolkin V. F., Kudryashov N. M. et al. Apatity. (In Russ.)
- Kostyleva-Labuntsov, E. E., Borutsky, B. E., Sokolova, M. N., Shlyukova, Z. V. 1978. Mineralogy of the Khibiny massif. Ed. F. V. Chukhrov. In 2 vol. Vol. 2. Minerals. Moscow. (In Russ.)
- Samsonova, N. S. 1973. Minerals of the nepheline group. Moscow. (In Russ.)
- Simakin, A. G., Salova, T. P., Zavel'sky, V. O. 2008. Water incorporation into nepheline structure from NMR and IR spectroscopy data. *Geochemistry International*, 6, pp. 674–678. EDN: ILAHPX. (In Russ.)
- Tikhonenkov, I. P. 1963. Nepheline syenites and pegmatites of the northeastern part of the Khibiny massif and the role of postmagmatic phenomena in their formation. Moscow. (In Russ.)
- Shablinsky, G. N. 1963. On problem of deep structure of the Khibiny and Lovozero plutons. *Trudy Leningradskogo Obshchestva Estestvoispytateley*, 74, pp. 41–43. (In Russ.)
- Yakovenchuk, V. N., Ivanyuk, G. Yu., Konopleva, N. G., Mikhailova, Y. A. 2010. Nepheline of the Khibiny alkaline massif (Kola Peninsula). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 139(2), pp. 80–91. EDN: OJBASP. (In Russ.)
- Balassone, G., Beran, A., Lueger-Ring, K. 1995. Variable water content of nepheline from Somma-Vesuvio, Italy. *Mineralogy and Petrology*, 52, pp. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01163127>.
- Barrer, R. M., White, E. A. D. 1952. The hydrothermal chemistry of silicates. Part II. Synthetic crystalline sodium aluminosilicates. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, 286, pp. 1561–1571.
- Bell, D. R., Rossmann, G. R. 1992. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals. *Science*, 255(5050), pp. 1391–1397. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.255.5050.1391>.
- Beran, A. 1999. Preface-23. Contribution of IR spectroscopy to the problem of water in the Earth's mantle. *NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences. Advanced Study Institute*, 543, pp. 523–538.

- Beran, A. 1974. UR-spektroskopischer Nachweis von H₂O in Nephelin. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 21, pp. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01081038>.
- Beran, A., Libowitzky, E. 2003. IR spectroscopic characterization of OH defects in mineral phases. *Phase Transitions*, 76(1–2). DOI: <https://doi.org/10.1080/0141159031000076002>.
- Beran, A., Rossman, G. R. 1989. The water content of nepheline. *Mineralogy and Petrology*, 40, pp. 235–240. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01164492>.
- Dollase, W. A. 1970. Least-squares refinement of the structure of a plutonic nepheline. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 132(1–6), pp. 27–44. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1970.132.16.27>.
- Dollase, W. A., Thomas, W. M. 1978. The crystal chemistry of silica-rich, alkali-deficient nepheline. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66, pp. 311–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00373415>.
- Foreman, N., Peacor, D. R. 1970. Refinement of the nepheline structure at several temperatures. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 132, pp. 45–70.
- Griggs, D. T., Blacic, J. D. 1965. Quartz: Anomalous weakness of synthetic crystals. *Science*, 147(3655), pp. 292–295. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.147.3655.292>.
- Hahn, T., Buerger, M. J. 1954. The detailed structure of nepheline, KNa₃Al₄Si₄O₁₆. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 106(1–6), pp. 308–338. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1954.106.16.308>.
- Hamada, M., Akasaka, M., Ohfuji, H. 2019. Crystal chemistry of K-rich nepheline in nephelinite from Hamada, Shimane Prefecture, Japan. *Mineralogical Magazine*, 83(2), pp. 239–247. DOI: <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.133>.
- Hamilton, D. L. 1961. Nephelines as crystallization temperature indicators. *The Journal of Geology*, 69(3), pp. 321–329.
- Hansen, S., Fälth, L. 1983. The average structure of partially cesium exchanged nepheline hydrate I. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 164(1–2), pp. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.1524/zkri.1983.164.1-2.79>.
- Hayward, S. A., Pryde, A. K. A., de Dombal, R. F., Carpenter, M. A. et al. 2000. Rigid unit modes in disordered nepheline: A study of a displacive incommensurate phase transition. *Physics and Chemistry of Minerals*, 27, pp. 285–290. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002690050257>.
- Igneous rocks: A classification and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. 2002. Eds.: R. W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, M. J. Le Bas et al. Cambridge.
- Ingrin, J., Skogby, H. 2000. Hydrogen in nominally anhydrous upper-mantle minerals: Concentration levels and implications. *European Journal of Mineralogy*, 12(3), pp. 543–570. DOI: <https://doi.org/10.1127/ejm/12/3/0543>.
- Korchak, Y. A., Men'shikov, Y. P., Pakhomovsky, Y. A., Yakovenchuk, V. N. et al. 2011. Trap formation of the Kola Peninsula. *Petrology*, 19, pp. 87–101. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869591111010036>.
- Kovács, I., Hermann, J., O'Neill, H. S. C., Gerald, J. F. et al. 2008. Quantitative absorbance spectroscopy with unpolarized light: Part II. Experimental evaluation and development of a protocol for quantitative analysis of mineral IR spectra. *American Mineralogist*, 93(5–6), pp. 765–778. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2008.2656>.
- Mikhailova, J. A., Aksenov, S. M., Pakhomovsky, Y. A., Moine, B. N. et al. 2022. Iron in nepheline: Crystal chemical features and petrological applications. *Minerals*, 12(10). Article number: 1257. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12101257>.
- Mo, J., Xia, X.-P., Li, P.-F., Spencer, C. J. et al. 2023. Water-in-zircon: A discriminant between S- and I-type granitoid. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 178. Article number: 5. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01986-7>.
- Nasdala, L., Beran, A., Libowitzky, E., Wolf, D. 2001. The incorporation of hydroxyl groups and molecular water in natural zircon (ZrSiO₄). *American Journal of Science*, 301(10), pp. 831–857. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.301.10.831>.
- Rossman, G. R. 1990. Hydrogen in "anhydrous" minerals. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 45(1–4), pp. 41–44. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(90\)90780-X](https://doi.org/10.1016/0168-583X(90)90780-X).
- Rossman, G. R. 1996. Studies of OH in nominally anhydrous minerals. *Physics and Chemistry of Minerals*, 23, pp. 299–304. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00207777>.
- Rossman, G. R. 1988. Vibrational spectroscopy of hydrous components. In *Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology*. Ed. F. C. Hawthorne. Washington, pp. 193–206.
- Sahama, Th. G. 1962. Order-disorder in natural nepheline solid solutions. *Journal of Petrology*, 3(1), pp. 65–81. DOI: [10.1093/petrology/3.1.65](https://doi.org/10.1093/petrology/3.1.65).
- Simmons, W. B., Jr., Peacor, D. R. 1972. Refinement of the crystal structure of a volcanic nepheline. *American Mineralogist*, 57(11–12), pp. 1711–1719. URL: http://www.minsocam.org/ammin/AM57/AM57_1711.pdf.
- Skogby, H. 1999. Preface-22. Water in nominally anhydrous minerals. *NATO ASI Series C, Mathematical and Physical Sciences. Advanced Study Institute*, 543, pp. 509–522.

- Tait, K. T., Sokolova, E., Hawthorne, F. C., Khomyakov, A. P. 2003. The crystal chemistry of nepheline. *The Canadian Mineralogist*, 41(1), pp. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.1.61>.
- Tilley, C. E. 1954. Nepheline-alkali feldspar parageneses. *American Journal of Science*, 252(2), pp. 65–75. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.252.2.65>.
- Wilkinson, J. F. G., Hensel, H. D. 1994. Nephelines and analcimes in some alkaline igneous rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118, pp. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00310612>.
- Yakovenchuk, V. N., Ivanyuk, G. Yu., Pakhomovsky, Ya. A., Men'shikov, Yu. P. 2005. Khibiny. Ed. F. Wall. Apatity.

Сведения об авторах

Гойчук Ольга Федоровна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: o.goychuk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8756-4084>

Olga F. Goychuk – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Nanomaterials Research Centre KSC RAS, Junior Research Assistant; e-mail: o.goychuk@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8756-4084>

Коноплева Наталья Геннадьевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: n.konopleva@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2695-4166>

Natalia G. Konopleva – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Research Officer; e-mail: n.konopleva@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2695-4166>

Лепеха Светлана Васильевна – ул. Академика Вонсовского, 15, г. Екатеринбург, 620016; Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН, инженер-исследователь; e-mail: lepekha@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0667-9576>

Svetlana V. Lepekha – 15 Akademika Vonsovskogo, Ekaterinburg, 620016; Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of RAS, Research Engineer; e-mail: lepekha@igg.uran.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0667-9576>

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

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

Паникоровский Тарас Леонидович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр наноматериаловедения КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: t.panikorovskii@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2323-1413>

Taras L. Panikorovskii – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Nanomaterials Research Centre KSC RAS, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Research Officer; e-mail: t.panikorovskii@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2323-1413>

УДК 551.345.2

Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара

А. Г. Гравис, Е. В. Устинова*, О. Е. Пономарева, Д. С. Дроздов,
Н. М. Бердников, Я. А. Голубкова

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия;
e-mail: ustelena71@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1656-3576>

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.06.2023;
получена после доработки 25.08.2023;
принята к публикации 28.09.2023

Ключевые слова:

Западная Сибирь, многолетнемерзлые породы, деятельный слой, понижение кровли мерзлоты, мерзлота несливающегося типа, изменение климата

Для цитирования

Реферат

Мониторинг мощности деятельного слоя в пределах озерно-болотного типа местности в северной тайге выполнялся на трех площадках, организованных в 1997, 2013 и 2022 гг. На этих участках выделяются два типа урочищ: мерзлые торфяники и заболоченные ложбины стока с опущенной кровлей многолетнемерзлых пород (разрез площадок однотипный, различия только в мощности торфа). Методика работ соответствовала единому протоколу международной программы CALM; дополнительно оценивалась осадка поверхности (по нивелировке от местного репера), проводились геофизические исследования и измерялась температура пород деятельного слоя на разных глубинах. В заболоченных ложбинах стока, мочажинах с открытой водой и на специфических минеральных пятнах в пределах торфяников глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород составляет 3–10 м. На границах торфяников и в заболоченных ложбинах стока глубина протаивания превышает 2 м, а на торфяниках она изменяется от 0,8 до 1,6 м в зависимости от мощности органического слоя и состояния напочвенного покрова. На торфяниках, имеющих органогенный слой мощностью более 1 м и сплошной напочвенный покров, глубина слоя сезонного оттаивания местами не превышает 0,4 м; такие торфяники слабо реагируют на изменение климата. Глубина залегания кровли мерзлоты в пределах маломощных торфяников (менее 0,5 м торфа) с угнетенным растительным покровом в настоящее время составляет более 2 м, маркируя начало замещения сезонноталого слоя сезонномерзлым и формирование участков с опущенной кровлей мерзлоты. Мониторинг температуры грунтов на таких участках показал, что случайное сочетание климатических факторов в отдельные годы может привести к кратковременному (два года) новообразованию мерзлоты или слиянию сезонной мерзлоты с многолетней. Таким образом, формирование мерзлоты несливающегося типа носит возвратно-поступательный характер.

Гравис А. Г. и др. Основные результаты мониторинга мощности деятельного слоя на площадках CALM Надымского стационара. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 39–51. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-39-51>.

The main results of monitoring the power of the active layer at CALM sites of the Nadymsky object

Andrey G. Gravis, Elena V. Ustinova*, Olga E. Ponomareva, Dmitry S. Drozdov,
Nikolai M. Berdnikov, Yana A. Golubkova

*Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Tyumen, Russia;
e-mail: ustelena71@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1656-3576>

Article info

Received 26.06.2023;
received in revised 25.08.2023;
accepted 28.09.2023

Key words:

Western Siberia, permafrost rocks, active layer, lowering of the permafrost roof, permafrost of non-merging type, changing of the climate

Abstract

Monitoring of the thickness of the active layer within the lake-marsh type of terrain in the northern taiga was carried out at three sites organized in 1997, 2013 and 2022. In these areas, two types of tracts are distinguished: frozen peat bogs and swampy runoff hollows with a lowered roof of permafrost (the cross-section of the sites is the same type, the only difference is in the thickness of the peat). The work methodology complied with the unified protocol of the international CALM program. Additionally, the surface settlement was assessed (based on leveling from a local benchmark), geophysical studies were carried out and the temperature of the active layer rocks was measured at different gullies. In swampy runoff hollows, hollows with open water and on specific mineral spots within peat bogs, the depth of the permafrost roof is 3–10 m. At the boundaries of peat bogs and in swampy runoff hollows, the thawing depth exceeds 2 m, and on peat bogs it varies from 0.8 to 1.6 m depending on the thickness of the organic layer and the condition of the ground cover. On peatlands with an organic layer more than 1 m thick and a continuous ground cover, the depth of the seasonal thawing layer in some places does not exceed 0.4 m. These peatlands respond poorly to climate change. The depth of the permafrost roof within thin peat bogs (less than 0.5 m of peat) with oppressed vegetation cover is currently more than 2 m, marking the beginning of the replacement of the seasonally thawed layer with seasonally frozen and the formation of areas with a lowered permafrost roof. Monitoring of soil temperatures in such areas has showed that a random combination of climatic factors in individual years can lead to short-term (two years) new formation of permafrost or the merging of seasonal permafrost with permafrost. Thus, the formation of non-merging permafrost is of a reciprocating nature.

For citation

Gravis, A. G. et al. 2024. The main results of monitoring the power of the active layer at CALM sites of the Nadymsky object. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 39–51. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-39-51>.

Введение

Инфраструктура ЯНАО, созданная в 1970–1990 гг., находится в зоне риска из-за потепления климата (Осокин и др., 2021) и повышения температуры многолетнемерзлых пород (ММП), так как несущая способность грунтов, как оснований сооружений, значительно уменьшилась. Активное хозяйственное освоение этой территории в XXI в. требует разработки новых подходов к управлению мерзлотным процессом и, возможно, перехода на второй принцип строительства, заключающийся в допущении протаивания грунта под зданиями.

Наблюдения за изменением мощности деятельного слоя были начаты в северной тайге Западной Сибири в 1970-е гг. и выполнялись на ключевых участках ВСЕГИНГЕО¹ в ходе геокриологической съемки (масштаб 1:100 000) (Ландшафты..., 1983; Геокриологические..., 1983), а позже осуществлялись в рамках проекта определения скорости восстановления растительного покрова, нарушенного при строительстве газопровода Надым – Пунга. При выполнении этого проекта сотрудниками отдела геокриологии ВСЕГИНГЕО на III озерно-аллювиальной равнине (в 30 км к югу от г. Надым) были организованы парные наблюдательные площадки (с естественным и нарушенным растительным покровом), организованы профили для фиксации изменений растительного покрова и глубины сезонного протаивания, пробурены и оборудованы термометрические скважины, заложено начало Надымского геокриологического стационара. В период 1972–1983 гг. в летнее время выполнялись микроклиматические наблюдения за температурой и влажностью воздуха, скоростью ветра, осадками, суммарной и отраженной радиацией, температурой и влажностью почвы, раз в месяц измерялась температура пород в инженерно-геокриологических скважинах. На площадках изучался растительный покров, в конце теплого периода измерялась глубина сезонного протаивания грунтов по постоянной сети марок. В отдельные годы зимой проводилась снегомерная съемка.

В 1995 г. наблюдения на Надымском стационаре принял на себя Институт криосферы Земли (ИКЗ ТюмНЦ СО РАН). К сожалению, многие ранее накопленные по стационару данные стали недоступны после сокращения деятельности, а затем и ликвидации ВСЕГИНГЕО. Тем не менее часть наблюдаемых объектов и результаты длительных наблюдений по ним были сохранены, благодаря чему с 1997 г. Надымский стационар включен в международные проекты криосферного мониторинга CALM (циркумполярная сеть мониторинга сезонноталого слоя) и TSP (термическое состояние мерзлоты). В рамках этого проекта CALM на стационаре сначала была организована площадка 1 (CALM R1A), в 2013 г. к ней добавилась площадка 2 (CALM R1B), а в 2022 г. была организована еще одна наблюдательная площадка 3 по стандарту CALM.

На открытый сайт проекта CALM ежегодно загружаются данные измерения глубин протаивания в каждой точке измерения (среднее, максимальное и минимальное значения), что позволяет сравнивать наблюдательные площадки, расположенные в разных регионах мира, для корректировки собственных аналитических выводов.

С 2007 г. сотрудники ИКЗ ТюмНЦ СО РАН постепенно оборудовали скважины стационара логгерами с круглогодичной записью данных, продлили геокриологические профили, пробурили и оборудовали для круглогодичного мониторинга температуры пород новые скважины, выполнили дендрохронологические исследования и повторно измерили высоту поверхности площадок, что позволило оценить динамику экзогенных процессов.

Материал, полученный на Надымском стационаре, был обобщен в двух монографиях, статьях, многочисленных отчетах и не раз обсуждался на научных конференциях (Москаленко, 1999, 2009; Антропогенные..., 2006; Пономарева и др., 2015). Продолжающиеся наблюдения открывают возможность уточнения старых и установления новых закономерностей.

Материалы и методы

Объекты наблюдений

В работе обобщены данные по торфяникам трех упомянутых наблюдательных площадок, организованных на III озерно-аллювиальной террасе. В строении разреза принимают участие верхнеплейстоценовые разнородные пески с прослоями и линзами суглинков ермаковской свиты, мощностью 4–15 м, которые подстилаются среднеплейстоценовыми салехардскими суглинками. Минеральные грунты перекрыты органогенным слоем, мощность которого варьирует от 0,1 до 1 м и более. Все объекты наблюдений находятся вне зоны непосредственного теплового влияния газопровода.

¹ Всесоюзный научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО, образован в 1939 г.) – уникальное геологическое научно-производственное предприятие, создавшее системную научную и нормативно-методическую основу проведения на территории страны гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических геологоразведочных работ и исследований. Правопреемником в настоящее время (с 2018 г.) является АО "Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии".

Площадки расположены на плоских мерзлых торфяниках, частично захватывают заболоченные ложбины стока и замкнутые обводненные понижения микрорельефа – мочажины. Поскольку в геокриологическом отношении эти заболоченные ложбины стока и мочажины изучены недостаточно из-за сложности опробования, анализ со статистическим обоснованием выполнялся только по точкам, расположенным на торфяниках. Рельеф площадок в целом плоский, кочковатый. Площадки 1 и 3 в значительной степени преобразованы противоположно направленными процессами термокарста и пучения, в результате чего поверхность площадок оказалась сильно дифференцирована – образовались высокие кочки и понижения, перепад высот между которыми достигает 0,1–1,5 м. Часть понижений лишена растительного покрова, и под тонким (2–4 мм) органическим слоем залегают песок. Две другие площадки имеют мощный растительный покров (площадь покрытия 100 %, высота моховой подушки и слабо разложившегося торфа 30–50 см, мощность торфа на второй площадке – около 1 м, на третьей – 30 см).

Полевые исследования

Наблюдательные площадки Надымского стационара организованы единообразно, и наблюдения ведутся в соответствии с единым международным протоколом CALM. Они посещаются ежегодно, измерение глубины сезонного протаивания выполняется по стационарной сети марок в конце теплого периода. Площадки размером 100 × 100 м оборудованы марками, которые размещены по сетке с шагом 10 м – 121 марка на площадке. Глубина протаивания определяется у каждой марки металлическим щупом длиной 2 м. Если кровля мерзлоты не обнаруживается щупом, то выдвигается предположение, что в этой точке кровля опущена и сформировалась мерзлота несливающегося типа.

Кроме того, на площадках 1 и 2 оценивается деформация поверхности посредством ежегодного измерения высоты марок относительно геодезического репера. Для проверки данных о глубине протаивания и верификации предположения о формировании мерзлоты несливающегося типа в 2016 г. были оборудованы три специальные точки термометрических наблюдений в деятельном слое: одна непосредственно на площадке 1, две других – в сходных условиях. На каждой точке ластиковый штырь-зонд со встроенными через 0,5 м логгерами конструкции iButton погружался на глубину 1,5–2,0 м с обеспечением полного контакта с вмещающим грунтом. Замеры температуры выполнялись каждые 6 ч.

В 2018–2022 гг. по краю площадки 1 были проведены геофизические исследования для уточнения положения кровли мерзлоты и выявления возможных мерзлых перелетков. В 2019 г. были выполнены измерения высоты снежного покрова по профилям на площадке 1.

Обработка данных полевых исследований

Корректная обработка данных замерзания/протаивания грунтов требует пересчета полевых измерений глубины сезонного протаивания на максимальные значения. Это тем более важно, поскольку площадки расположены на удалении друг от друга, измерения на них проводятся не одновременно, а осенний переход температуры воздуха через 0 °С в настоящее время часто задерживается. Соответствующий пересчет выполняется по формуле В. А. Кудрявцева (*Общие...*, 1978).

Для сопоставления данных о протаивании грунтов с температурами воздуха и количеством выпадающих атмосферных осадков использовались данные ближайшей метеостанции Надым. Данные о температуре воздуха дополнительно несколько раз сопоставлялись с показаниями логгеров, установленных на площадке 1, и они оказались близкими.

Однако выполненный пересчет не всегда совпадает с натурными термометрическими измерениями в контрольных точках и верифицирующими геофизическими наблюдениями. В настоящее время остаются нерешенными следующие задачи: (1) оценка глубин сезонного протаивания на участках, где периодически сезоннотальный слой (СТС) переходит в сезонномерзлый (СМС) и обратно; (2) выявление корреляции глубины протаивания с фациальным составом ландшафтной структуры для дифференциации фаций по их устойчивости к изменению климата с выявлением причин неустойчивости.

Результаты и обсуждение

Измерение глубины протаивания

Все площадки расположены на III озерно-аллювиальной равнине, абсолютные отметки которой изменяются от 25 до 45 м. Поверхность равнины плоская, местами заболоченная (заозеренность 30–40 %). Широкое распространение имеют криогенные формы рельефа: бугры пучения, термокарстовые понижения. На равнине выделяются два типа местности: озерно-болотный и приречный, которые имеют различное ландшафтное, в том числе геологическое и геокриологическое строение (рис. 1) (*Антропогенные...*, 2006). На водораздельных пространствах, занятых озерно-болотной местностью, собственные песчаные и песчано-суглинистые ермаковские отложения имеют мощность от первых метров до 10 м, иногда больше, и подстилаются салехардскими суглинками; мерзлота здесь прерывистая и островная. Приречная местность отличается небольшой внутренней расчлененностью и мощными (более 10 м), преимущественно песчаными, ермаковскими отложениями в основании. Мерзлота с поверхности имеет либо редкоостровное распространение, либо вообще отсутствует.

На рис. 1 представлены фации:

- лесные: березово-сосновые бруснично-зеленомошно-лишайниковые (4); березово-сосновые багульниково-зеленомошно-лишайниковые (16); лиственничные багульниково-сфагновые (19); лиственничные багульниково-лишайниково-сфагновые (20); бугры пучения с багульниково-лишайниковым покровом и единичными кедром (23);
- болотные: топяные травяно-моховые (45); осоково-сфагновые (46); осоково-сфагновые с фрагментами торфяника (48); кустарничково-осоково-сфагновые (49); андромедово-осоково-моховые (50);
- на торфянике: плоские торфяники морошково-багульниково-сфагновые (60); плоские торфяники морошково-багульниково-сфагново-лишайниковые (61); торфяной бугор морошково-багульниково-лишайниково-моховой (72); мелкобугристый торфяник ерниково-багульниково-мохово-лишайниковый (100) (Устинова, 2007).

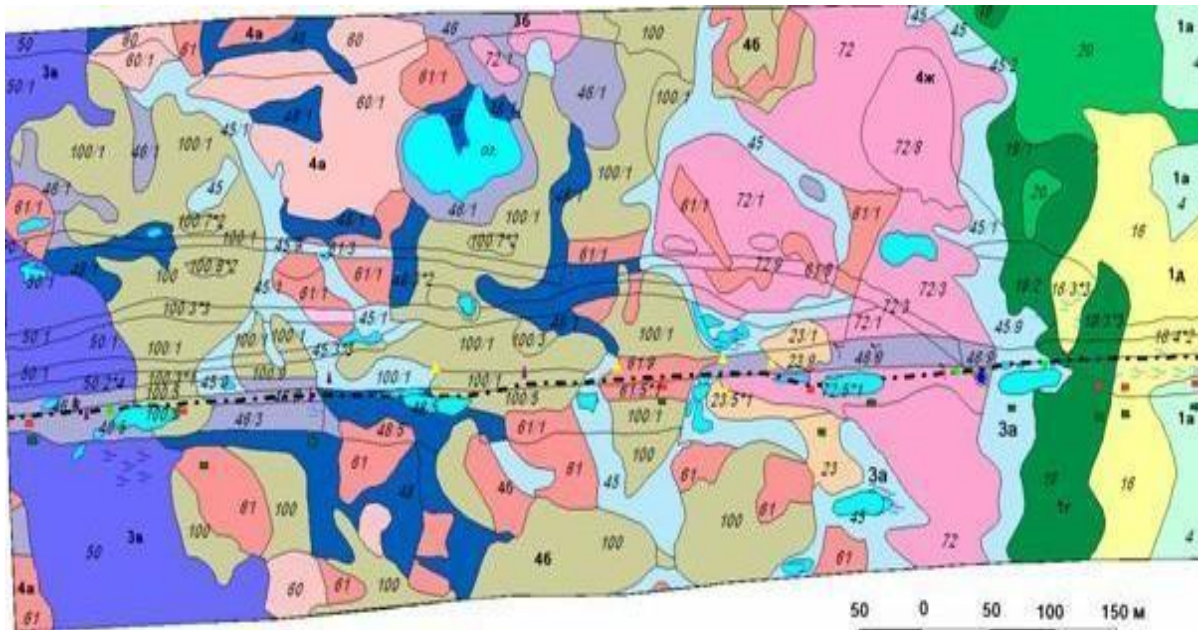


Рис. 1. Ландшафтная карта Надымского стационара
Fig. 1. Landscape map of the Nadym site

В пределах площадок встречаются 5 фаций, доминирует фация морошково-багульниково-сфагново-лишайникового торфяника (61) (рис. 2). На остальных площадках процент встречаемости может немного отличаться.

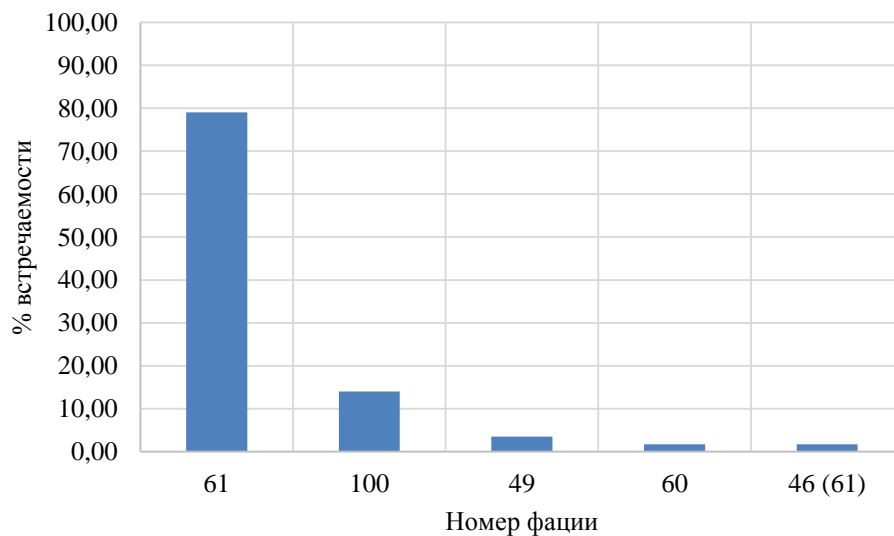


Рис. 2. Встречаемость фаций на торфянике (площадка 1)
Fig. 2. Occurrence of facies in the peatland of site 1

Существуют большие различия геокриологических условий между озерно-болотным и приречным типами местности. В пределах приречного типа местности криогенные толщи практически отсутствуют. В пределах озерно-болотного типа местности мерзлота приурочена к торфяникам и буграм пучения. Высокольдистыми являются только мерзлый торф, грунты в ядре бугров пучения и суглинки салехардской свиты. Температуры ММП изменяются в настоящее время от $-0,03$ до $-1,0$ °С (Пономарева и др., 2022а, 2022б).

Как показывают архивные данные по плоским торфяникам стационара, соответствующие фации являются наиболее устойчивыми к изменению климата, что проявляется в чрезвычайно медленном увеличении глубины сезонного протаивания грунтов (рис. 3). В пределах этого ландшафта средняя глубина протаивания в 2000–2013 гг. составляла согласно архивным данным в среднем 76–78 см, при этом отмечалась достаточно высокая ее межгодовая изменчивость.

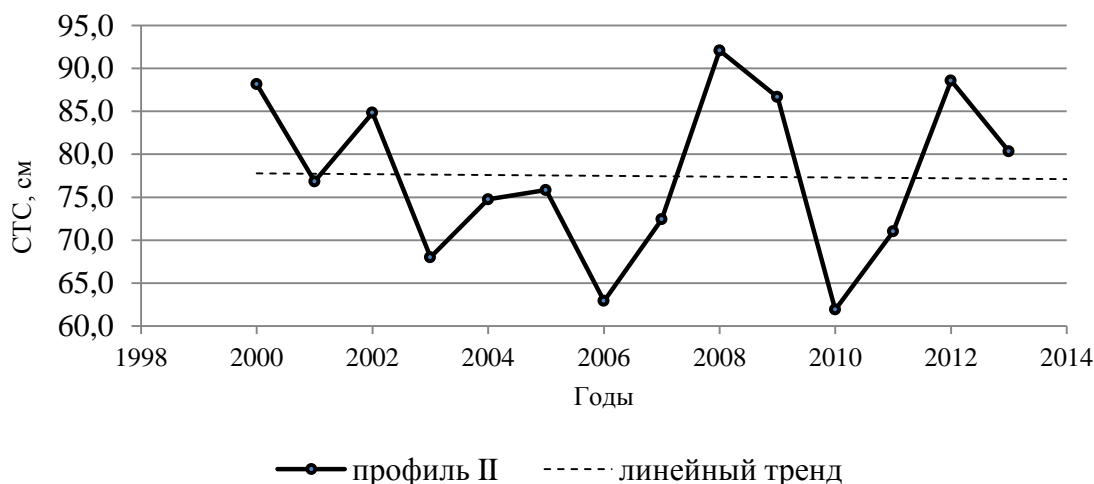


Рис. 3. Глубина СТС на плоском торфянике
Fig. 3. ALT depth on a flat peat bog

Актуальные данные по площадке 1

Площадка организована в 1997 г.; мощность торфа составляет менее 0,5 м; напочвенный покров угнетен.

Анализ результатов выполнялся по 57 точкам, расположенным на торфянике. Точки, находящиеся в заболоченной ложбине стока, не принимались во внимание (как указывалось выше, данные о глубинах протаивания в этих фациях ненадежные).

Под влиянием потепления климата средняя мощность СТС на торфянике площадки 1 постепенно увеличивалась с 0,73 м в год организации площадки до 1,63 м в 2022 г. (рис. 4).

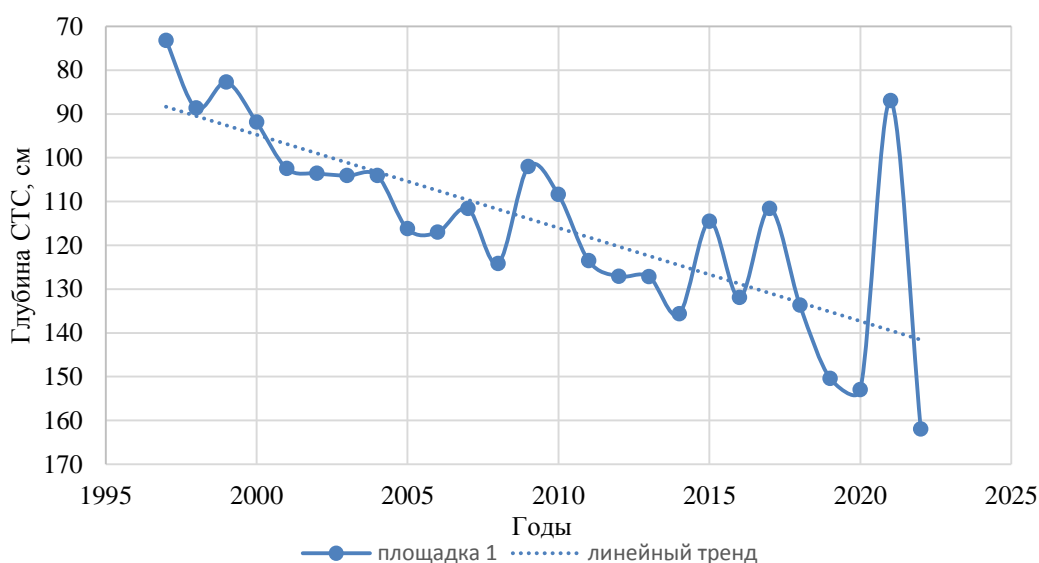


Рис. 4. Увеличение мощности СТС на площадке 1 в период 1997–2022 гг.
Fig. 4. Increase in the thickness of the active layer at site 1, 1997–2022

В год организации площадки глубина залегания кровли ММП превышала 2 м в 11 точках, т. е. деятельный слой на этих участках следовало считать сезонномерзлым. Большая часть эти точки была расположена на границе с заболоченными ложбинами стока и на участках без растительного покрова (рис. 5).

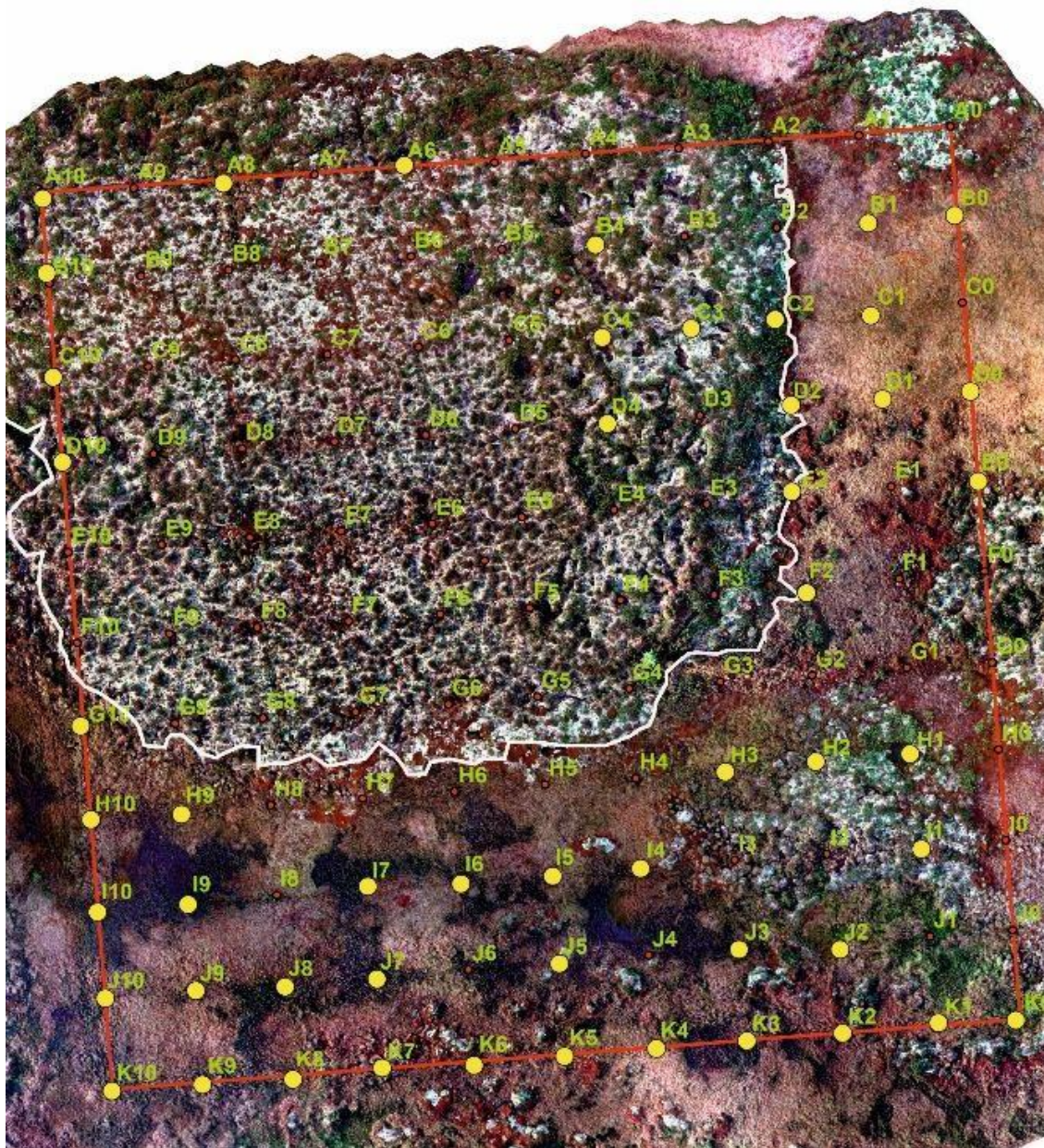


Рис. 5. Схема площадки 1. Желтым цветом отмечены точки, в которых мощность деятельного слоя на торфянике (внутри белого контура) превышала 2 м в год организации площадки.

Расстояние между точками по сетке составляет 10 м

Fig. 5. Scheme of site 1. Yellow dots indicate points where the thickness of the active layer on the peatland (within the white contour) exceeded 2 m in the year of the site's organization.

The distance between the dots on the grid is 10 m

Для построения графиков, иллюстрирующих темпы процесса отступления кровли мерзлоты, число точек с СМС за каждый год на фации морошково-багульниково-сфагново-лишайниковых плоских торфяников (61) было рассчитано в процентах от общего числа точек в пределах этой территории. Оказалось, что до 2010–2013 гг. мерзлота несливающегося типа присутствовала в 10 % точек (рис. 6). Позднее ареал мерзлоты несливающегося типа стал стремительно расширяться и в настоящее время занимает приблизительно 98 % торфяника.

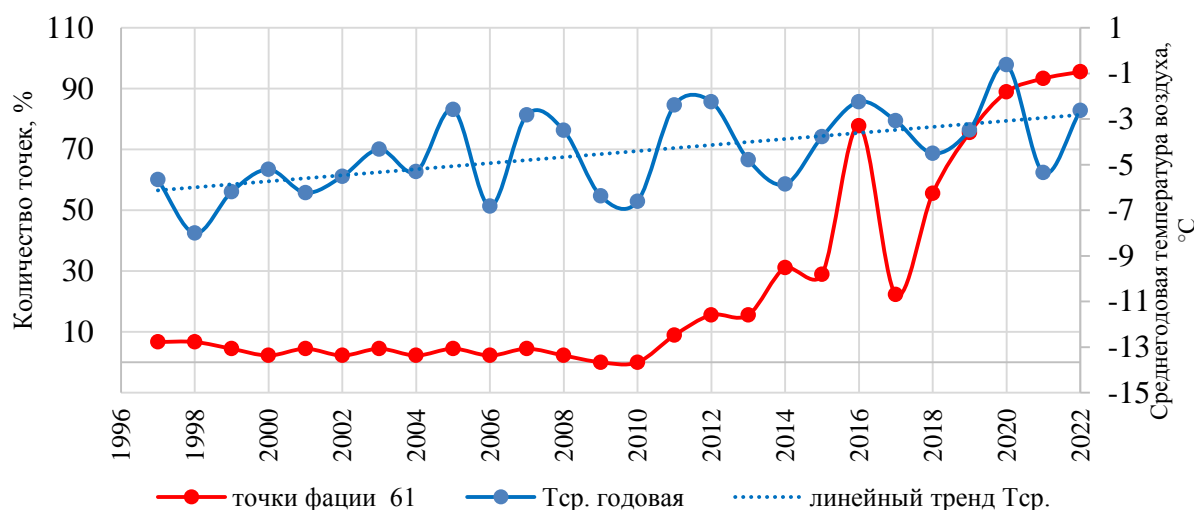


Рис. 6. Изменение количества точек с мерзлотой несливающегося типа в пределах площадки 1 за период 1997–2022 гг. и рост среднегодовой температуры воздуха за тот же период (по данным метеостанции Надым)

Fig. 6. Changes in the number of points with non-merging permafrost within site 1, 1997–2022, and the increase in the mean annual air temperature during the same period according to the Nadym meteorological station data

Попытки найти связь между точками, попавшими в этот ареал, с особенностями их литологического состава, высотой поверхности, высотой снежного покрова, растительными ассоциациями для наблюдательной площадки 1 оказались несостоятельными. Так, точки с наибольшей для площадки мощностью торфа оказывались на участках с мерзлотой несливающегося типа; и наоборот, у точек с минимальной мощностью торфа шупом четко удавалось зафиксировать кровлю ММП на глубинах менее 2 м. Этот результат по началу казался неожиданным, поскольку на площадках, расположенных в южной лесотундре, корреляция между глубиной протаивания и мощностью торфа устанавливалась убедительно.

Связь между растительным покровом (точнее, его отсутствием) и глубиной протаивания (более 2 м) существовала только на участках специфических минеральных пятен, напоминающих пятна-медальоны (рис. 7). Однако морфологически эти минеральные пятна от классических пятен-медальонов (например, Мудров, 2007; *Общее...*, 1978) сильно отличаются: имеют произвольную, часто причудливую форму в плане, опущены на десятки сантиметров относительно разделяющей их поверхности, нередко обводнены в отличие от окружающей поверхности, подстилаются немерзлыми на значительную глубину грунтами. Кое-где имеются признаки, что это результат давнего полного выгорания участков ранее сплошного торфяного покрова при пожаре.



Рис. 7. Минеральные пятна на площадке 1 (CALM R1A) (коричневый цвет поверхности связан с наличием органического слоя мощностью 1–3 мм)

Fig. 7. Mineral spots on site 1 (CALM R1A) (brown color of the surface is associated with the presence of an organic layer with a thickness of 1–3 mm)

Наличие этих специфических минеральных пятен на торфяниках зафиксировано в литературе (Тагунова, 1973; Тыртиков 1969) еще в прошлом веке, но до сих пор генезис данных образований и их влияние на изменение деятельного слоя не изучены. По данным рекогносцировки в северной тайге, пятна встречаются на участках с глубоким протаиванием и маломощным органическим слоем и интерпретируются как признак наличия опущенной кровли мерзлоты или приближающейся деградации ММП с поверхности. На площадке 1 минеральные пятна занимают значительную площадь (площадь их в настоящее время уточняется). Мощность деятельного слоя в пятнах превышает 2 м.

Данные о глубине залегания кровли ММП на площадке 1, полученные по замерам шупом, заверялись бурением и замерами температуры в трех специально оборудованных наблюдательных пунктах (в скважинах малого диаметра, обеспечивающих непосредственный контакт термодатчиков с грунтом), а также повторными геофизическими исследованиями методами малоглубинной сейсморазведки. Наблюдения в течение нескольких сезонов подтвердили в среднем постепенное опускание кровли мерзлоты и доказали возвратно-поступательный характер процесса. Так, было установлено, что под влиянием кратковременного случайного сочетания климатических условий 2016–2017 гг. (холодная зима и позднее выпадение снега) в некоторых точках произошло слияние сезонной и многолетней мерзлоты, что привело к временному сокращению количества точек с мерзлотой несливающегося типа (зафиксировано осенью 2017 г. и отразилось на графике, представленном на рис. 4). Таким образом, формирование мерзлоты сливающегося типа носило кратковременный характер (Пономарева и др., 2022а, 2022б). Продолжившиеся в 2018 г. термометрические наблюдения в указанных трех скважинах зафиксировали обратный процесс отрыва сезонной мерзлоты от многолетней, который, однако, произошел не сразу. По замерам температуры в 1-й точке, СМС восстановился на следующий год после своего исчезновения, а в двух других точках – на второй. Таким образом, импульсное влияние кратковременного похолодания наблюдалось максимум 2 года.

Актуальные данные по площадке 2

Площадка 2 была организована в 2013 г. в 10 км от первой; мощность торфа и сильно оторфованного суглинка составляет более 1 м; напочвенный покров сплошной. Глубина протаивания за время мониторинга увеличилась с 0,57 до 0,9 м (рис. 8), что в 2 раза меньше, чем на площадке 1.

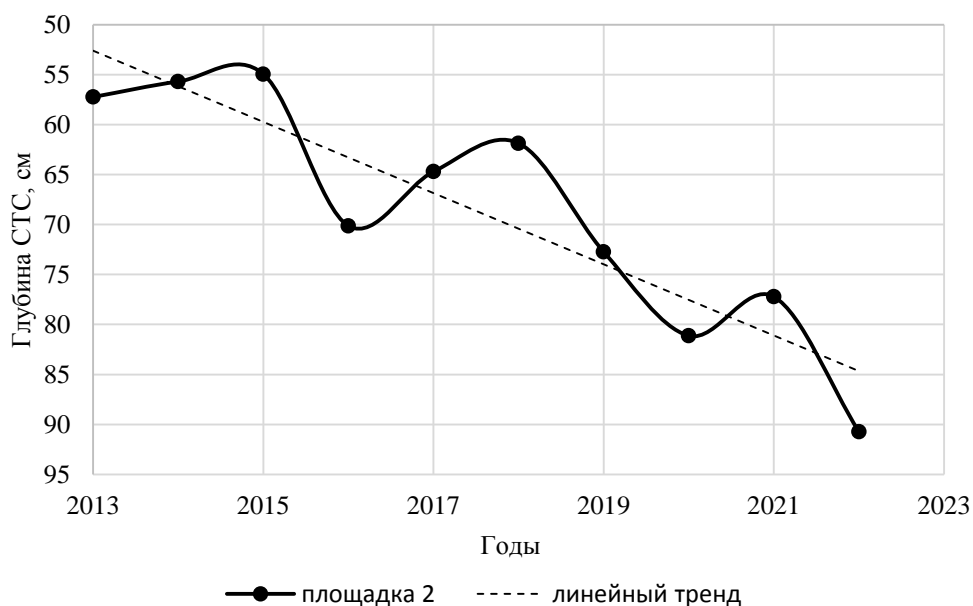


Рис. 8. Увеличение мощности СТС на площадке 2 за период 2013–2022 гг.

Fig. 8. Increase in the thickness of the active layer at site 2, 2013–2022

На основной площади торфяника протаивание не вышло за пределы органогенного и сильно оторфованного слоя. Следовательно, в северной тайге органогенный слой мощностью более 1 м надежно сохраняет мерзлоту при потеплении климата.

На момент организации площадки 2 мерзлота несливающегося типа была развита только в мочажинах и заболоченных ложбинах стока, а также установлена в точках, расположенных в редколесье. На плоскобугристом торфянике над ММП в летнее время наблюдался только сезонноталый слой (рис. 9).

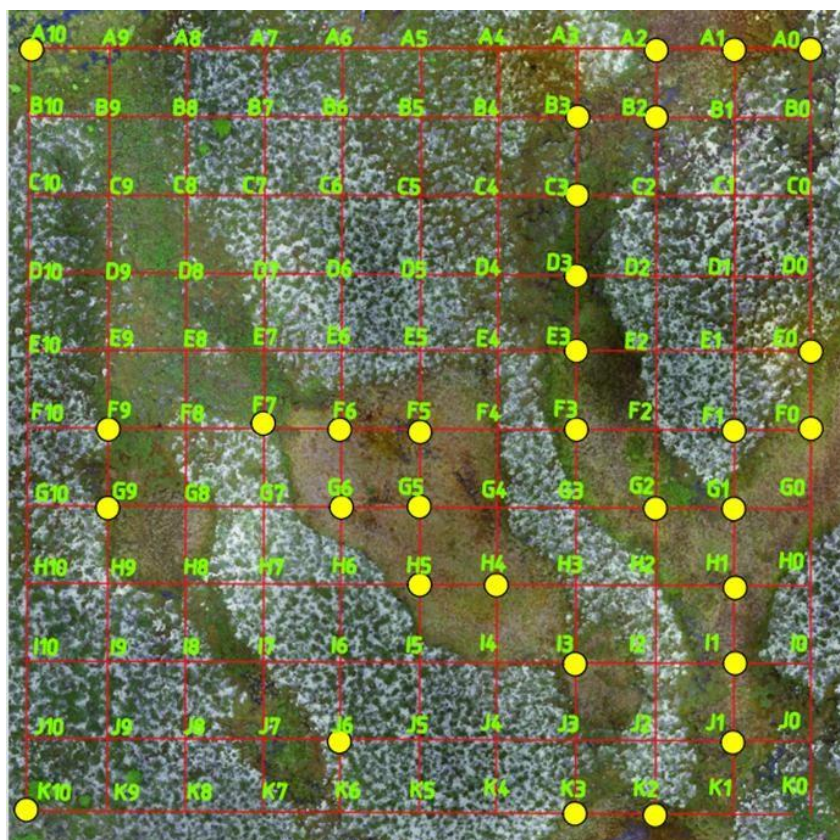


Рис. 9. Схема площадки 2. Желтым цветом отмечены точки, в которых мощность деятельного слоя на торфянике превышала 2 м в год организации площадки. Расстояние между точками по сетке 10 м
 Fig. 9. Scheme of site 2. Yellow dots indicate points where the thickness of the active layer on the peatland exceeded 2 m per year the site was established. The distance between the dots on the grid is 10 m

Расширение на площадке 2 площадей с мерзлотой несливающегося типа происходит значительно медленнее (рис. 10). В 2022 г. общая площадь таких участков составляла 30 % от площади торфяника (в отличие от 98 % на площадке 1).

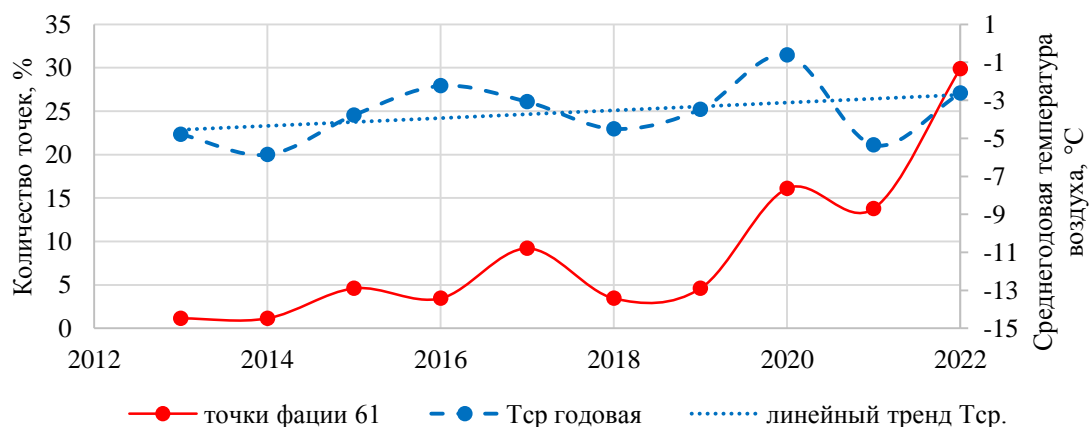


Рис. 10. Количество точек с мерзлотой несливающегося типа на площадке 2
 Fig. 10. The number of points with permafrost of non-spilling type on site 2

Актуальные данные по площадке 3

Площадка 3 была организована в 2022 г. в 0,5 км от первой как дублирующая. Наблюдения на площадке 1 пришлось прекратить, так как СТС щупом можно замерить только в 2 точках, в остальных точках глубина залегания кровли превысила 2 м. Мощность торфа на площадке 3 составляет около 1 м; напочвенный покров почти сплошной. Глубина протаивания в 2022 г. составила в среднем 141 см. Максимальные значения отмечаются на границе торфяника с заболоченными ложбинами стока, минимальные значения (0,40 м) характерны для центральных частей торфяника.

Точки с глубоким положением кровли ММП на этой площадке выявлены в заболоченных ложбинах стока, а на торфянике – преимущественно в минеральных пятнах (рис. 11).

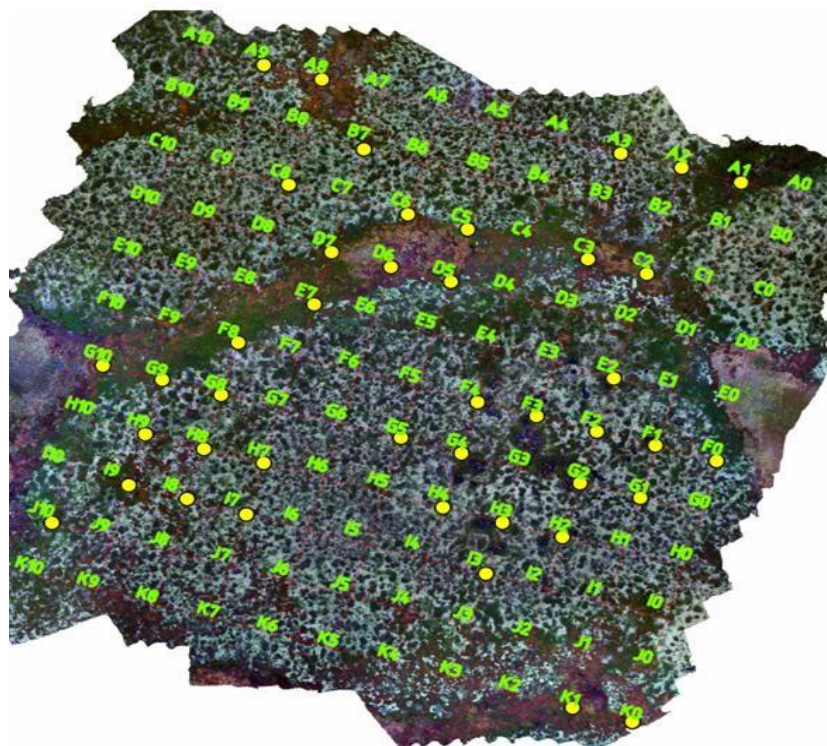


Рис. 11. Схема площадки 3. Желтым цветом отмечены точки, в которых мощность деятельного слоя на торфянике превышала 2 м в год организации площадки.

Расстояние между точками по сетке составляет 10 м

Fig. 11. Scheme of site 3. Yellow dots indicate points where the thickness of the active layer on the peatland exceeded 2 m per year the site was established. The distance between the dots on the grid is 10 m

В условиях северной тайги до сих пор могут существовать торфяники с мерзлотой сливающегося типа и незначительной мерзлотой сезонного протаивания (мощностью СТС около 0,4 м).

Отсутствие связи между мощностью торфа и глубиной протаивания на площадке 1 обусловлено небольшой мощностью торфа (менее 0,5 м). Сезонное протаивание на таких торфяниках в середине теплого периода распространяется в подстилающие грунты песчаного состава, где и формируется мерзлота несливающегося типа. Торфяники мощностью более 1 м и сплошным напочвенным покровом относительно устойчивы к потеплению климата. Здесь сезонная мерзлота в зимнее время сливается с многолетней.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена связь между мощностью деятельного слоя, толщиной слоя торфа, состоянием напочвенного покрова, гидрологическими условиями озерно-болотных ландшафтов северной тайги Западной Сибири.

Торфяники мощностью более метра со сплошным напочвенным покровом относительно устойчивы к потеплению климата; в их пределах сезонная мерзлота повсеместно сливается с многолетней; на торфяниках мощностью менее 0,5 м кровля мерзлоты опущена до глубины 3–7 м.

На участках торфяников с угнетенным напочвенным покровом и его отсутствием развита мерзлота несливающегося типа на минеральных пятнах.

В заболоченных ложбинах стока (мочажинах) деятельный слой имеет мощность более 2 м; с поверхности развит сезонномерзлый слой.

Благодарности

Работа выполнена по госзаданию ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № 1021061810416-7 при финансовой и логистической поддержке Государственного автономного учреждения Ямало-Ненецкого автономного округа "Научный центр изучения Арктики".

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / отв. ред. Н. Г. Москаленко. М. : Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2006. 358 с.
- Геокриологические условия Западно-Сибирской газоносной провинции / отв. ред. Е. С. Мельников. Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1983. 199 с.
- Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / отв. ред. Е. С. Мельников. Новосибирск : Наука : Сиб. отд-ние, 1983. 165 с.
- Москаленко Н. Г. Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России / отв. ред. Е. С. Мельников. Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1999. 280 с.
- Москаленко Н. Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 4. С. 18–23. EDN: KYRZFX.
- Мудров Ю. В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения. Иллюстрированный энциклопедический справочник. М. : Научный мир, 2007. 316 с.
- Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В. А. Кудрявцева. М. : Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
- Осокин А. Б., Бомкин С. В. Проблемы устойчивости объектов гражданского строительства в сложных геокриологических условиях ЯНАО // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике : Междунар. науч.-практ. конф., Салехард, 8–12 ноября 2021 г. : сб. тр. Салехард, 2021. С. 331–333. DOI: <https://doi.org/10.7868/9785604610848089>. EDN: LJWWKT.
- Пономарева О. Е., Губарьков А. А., Гравис А. Г., Дроздов Д. С. [и др.]. Результаты геокриологического мониторинга по региональной трансекте от северной тайги до южной тундры (Западная Сибирь) // Мониторинг в криолитозоне : сб. докладов Шестой конф. геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 г. М. : КДУ ; Добросвет, 2022а. С. 310–317. DOI: <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>. EDN: BCZYLE.
- Пономарева О. Е., Бердников Н. М., Гравис А. Г., Мельников В. П. [и др.]. Результаты мониторинга мощности деятельного слоя на торфяниках в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород // Молодые – наукам о Земле : тез. докл. X Междунар. науч. конф. молодых ученых, Москва, 31 марта – 1 апреля 2022 г. В 7 т. Т. 5. Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле: поиски, разведка и подсчет запасов месторождений углеводородов, инженерная геология. М. : Изд-во РГГУ им. Серго Орджоникидзе, 2022б. С. 175–179.
- Пономарева О. Е., Гравис А. Г., Устинова Е. В., Бляхарчук Т. А. [и др.]. Реакция криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири на изменение климата // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы : междунар. конф., Тюмень, 2–5 июля 2015 г. : сб. тр. Тюмень : Эпоха, 2015. С. 300–303. EDN: UOAIDT.
- Тагунова Л. Н. Этапы зарастания спущенных озер (хасыреев) в связи с мерзлотно-геологическими условиями // Труды ВСЕГИНГЕО. 1973. Вып. 62. С. 114–123.
- Тыртиков А. П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М. : Изд-во МГУ, 1969. 192 с.
- Устинова Е. В. Картографический метод исследования участка полосы трассы газопровода Надым – Пунга // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 2. С. 27–31. EDN: IAWFQN.

References

- Anthropogenic changes in ecosystems of the West Siberian gas-bearing province. 2006. Ed. N. G. Moskalenko. Moscow. (In Russ.)
- Geocryological conditions of the West Siberian gas-bearing province. 1983. Ed. E. S. Melnikov. Novosibirsk. (In Russ.)
- Landscapes of the cryolithozone of the West Siberian gas-bearing province. 1983. Ed. E. S. Melnikov. Novosibirsk. (In Russ.)
- Moskalenko, N. G. 1999. The anthropogenic dynamics of vegetation growing on the plains of the Russian permafrost zone. Ed. E. S. Melnikov. Novosibirsk. (In Russ.)
- Moskalenko, N. G. 2009. Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis. *Kriosfera Zemli*, XIII(4), pp. 18–23. EDN: KYRZFX. (In Russ.)
- Mudrov, Yu. V. 2007. Permafrost phenomena in the cryolithozone of plains and mountains. Basic concepts and definitions. Illustrated encyclopedic reference. Moscow. (In Russ.)
- General permafrost science (geocryology). 1978. Ed. V. A. Kudryavtsev. Moscow. (In Russ.)
- Osokin, A. B., Bomkin, S. V. 2021. Problems of stability of civil construction objects in complex geocryological conditions of the Yamalo-Nenets Autonomous District. In coll. articles of Intern. scientific-practical conf. *Modern studies of cryosphere transformation and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic.* :

- Salekhard, 8–12 November, 2021. Salekhard, pp. 331–333. DOI: <https://doi.org/10.7868/9785604610848089>. EDN: LJWWKT. (In Russ.)
- Ponomareva, O. E., Gubarkov, A. A., Gravis, A. G., Drozdov, D. S. et al. 2022a. Results of geocryological monitoring on the regional transect from the northern taiga to the southern tundra (Western Siberia). Coll. of reports of the Sixth conf. of Geocryologists of Russia with the participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists *Monitoring in the cryolithozone*. Moscow, 14–17 June, 2022. Moscow, pp. 310–317. DOI: <https://doi.org/10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130>. EDN: BCZYLE. (In Russ.)
- Ponomareva, O. E., Berdnikov, N. M., Gravis, A. G., Melnikov, V. P. et al. 2022b. The results of monitoring the power of the active layer on peat bogs in the zone of island distribution of permafrost rocks. In coll. articles of Intern. conf. *Young to the Earth Sciences*. Moscow, 31 March – 1 April, 2022. In 7 vol. Vol. 5. Development of new ideas and trends in Earth sciences: Prospecting, exploration and calculation of reserves of hydrocarbon deposits, engineering geology. Moscow, pp. 175–179. (In Russ.)
- Ponomareva, O. E., Gravis, A. G., Ustinova, E. V., Blyakharchuk, T. A. et al. 2015. The response of cryogenic landscapes of the northern taiga of Western Siberia to climate changes. In coll. articles of Intern. conf. *Arctic, Subarctic: the mosaic, contrast and variable character of the cryosphere*. Tyumen, 2–5 July, 2015. Tyumen, pp. 300–303. EDN: UOAIDT. (In Russ.)
- Tagunova, L. N. 1973. Stages of overgrowth of the lowered lakes (khasyreev) in connection with permafrost-geological conditions. Proceedings of VSEGINGEO, 62, pp. 114–123. (In Russ.)
- Tyrtikov, A. P. 1969. The influence of vegetation cover on the freezing and thawing of soils. Moscow. (In Russ.)
- Ustinova, E. V. 2007. Cartographic method of investigation of the section of the Nadym – Punga gas pipeline route. *Kriosfera Zemli*, XI(2), pp. 27–31. EDN: IAWFQN. (In Russ.)

Сведения об авторах

Гравис Андрей Гунарович – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026; Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, мл. науч. сотрудник; Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), ст. преподаватель; e-mail: ag.gravis@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1087-9867>

Andrey G. Gravis – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026; Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Jr. Scientific Researcher; Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Senior Lecturer; e-mail: ag.gravis@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1087-9867>

Устинова Елена Валерьевна – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026; Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, канд. геол.-минерал. наук, ученый секретарь; Тюменский индустриальный университет; Институт геологии и нефтегазодобычи; Тюменский государственный университет; Институт наук о Земле, доцент; e-mail: ustelena71@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1656-3576>

Elena V. Ustinova – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026; Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.); Tyumen Industrial University; Institute of Geology and Oil and Gas Production; Tyumen State University; Institute of Earth Sciences, Associate Professor; e-mail: ustelena71@rambler.ru, sciensec@ikz.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1656-3576>

Пономарева Ольга Евгеньевна – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026; Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, ст. науч. сотрудник; Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), доцент; e-mail: o-ponomareva@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8678-0228>

Olga E. Ponomareva – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026; Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Senior Scientific Researcher; Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Associate Professor; e-mail: o-ponomareva@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8678-0228>

Дроздов Дмитрий Степанович – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026; Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, гл. науч. сотрудник; Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), профессор; e-mail: ds_drozdov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8864-3657>

Dmitry S. Drozdov – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026; Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Main Scientific Researcher;
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Professor;
e-mail: ds_drozdov@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8864-3657>

Бердников Николай Михайлович – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026;
Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: nikolaj-berdnikov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9858-2472>

Nikolay M. Berdnikov – 86 Malygina Str., Tyumen, Russia, 625026; Institute of the Cryosphere of the Earth TSC SB RAS, Jr. Scientific Researcher;
e-mail: nikolaj-berdnikov@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9858-2472>

Голубкова Яна Андреевна – ул. Миклухо-Маклая, 23, г. Москва, 117485;
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (МГРИ), студент; e-mail: yana.golubkova.00@inbox.ru

Yana A. Golubkova – 23 Miklukho-Maklaya Str., Moscow, 117485; Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Student; e-mail: yana.golubkova.00@inbox.ru

УДК 550.3

Геоэлектрическая модель выхода пород фундамента на дневную поверхность в Уймонской впадине Горного Алтая на основе численного трехмерного моделирования

З. Я. Кузина, Н. Н. Неведрова, А. М. Санчаа*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
22.12.2023;

получена
после доработки
12.02.2024;

принята к публикации
15.02.2024

Ключевые слова:

Уймонская впадина,
электротомография,
геоэлектрические
разрезы,
численное
моделирование
2D-инверсия,
3D-инверсия

Для цитирования

В западной части Уймонской впадины Горного Алтая в полевой сезон 2023 г. проведены измерения методом электротомографии по трем профилям для уточнения строения участка с выходами пород фундамента на дневную поверхность. В ходе исследования получены результаты трехмерной инверсии с учетом новых данных электротомографии, построена уточненная геоэлектрическая модель участка исследования. Для верификации полученной модели выполнено численное 2D- и 3D-моделирование, с помощью которого обоснованы геометрические размеры и удельные электрические сопротивления выходов коренных пород; показано влияние рельефа дневной поверхности на геоэлектрические разрезы в условиях горных районов со значительными перепадами высот на поверхности земли. Определение строения впадин необходимо для понимания этапов неотектонического формирования Уймонской впадины и всего региона, а также для оценки сейсмической опасности территории Горного Алтая. В ходе дальнейших исследований можно проследить объект на большую глубину (~100 м) с использованием трехэлектродной установки электротомографии или альтернативной аппаратуры с увеличенным размером измерительно-генераторного кабеля.

Кузина З. Я. и др. Геоэлектрическая модель выхода пород фундамента на дневную поверхность в Уймонской впадине Горного Алтая на основе численного трехмерного моделирования. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-52-60>.

Geoelectric model of the exposure of basement rocks to the surface in the Uimon depression of Gorny Altay based on three-dimensional numerical modeling

Zoia Ya. Kuzina, Nina N. Nevedrova, Aydisa M. Sanchaa*

*The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia;
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Article info

Received
22.12.2023;

received
in revised
12.02.2024;

accepted
15.02.2024

Key words:

Gorny Altai,
Uimon depression,
electrotomography,
geoelectrical sections,
2D inversion,
3D inversion

Abstract

In the western part of the Uimon depression of the Altai Mountains, during the 2023 field season, additional measurements were carried out using electrical tomography along three profiles to clarify the structure of the area with basement rocks exposed to the surface. During the study, the results of three-dimensional inversion were obtained taking into account new electrical tomography data, and a refined geoelectric model of the study area was constructed. To verify the resulting model, 2D and 3D numerical modeling was performed with the help of which the geometric dimensions and electrical resistivity of bedrock outcrops were justified. The influence of the daytime surface topography on geoelectric sections in mountainous regions with significant differences in elevation on the earth's surface has been shown. Determining the structure of the depressions is necessary to understand the stages of neotectonic formation of the Uimon depression and the entire region, as well as to assess the seismic hazard of the Altai Mountains. In the course of further research, it is possible to trace the object to a greater depth (~100 m) using a three-electrode electrical tomography installation or alternative equipment with an increased size of the measuring-generator cable.

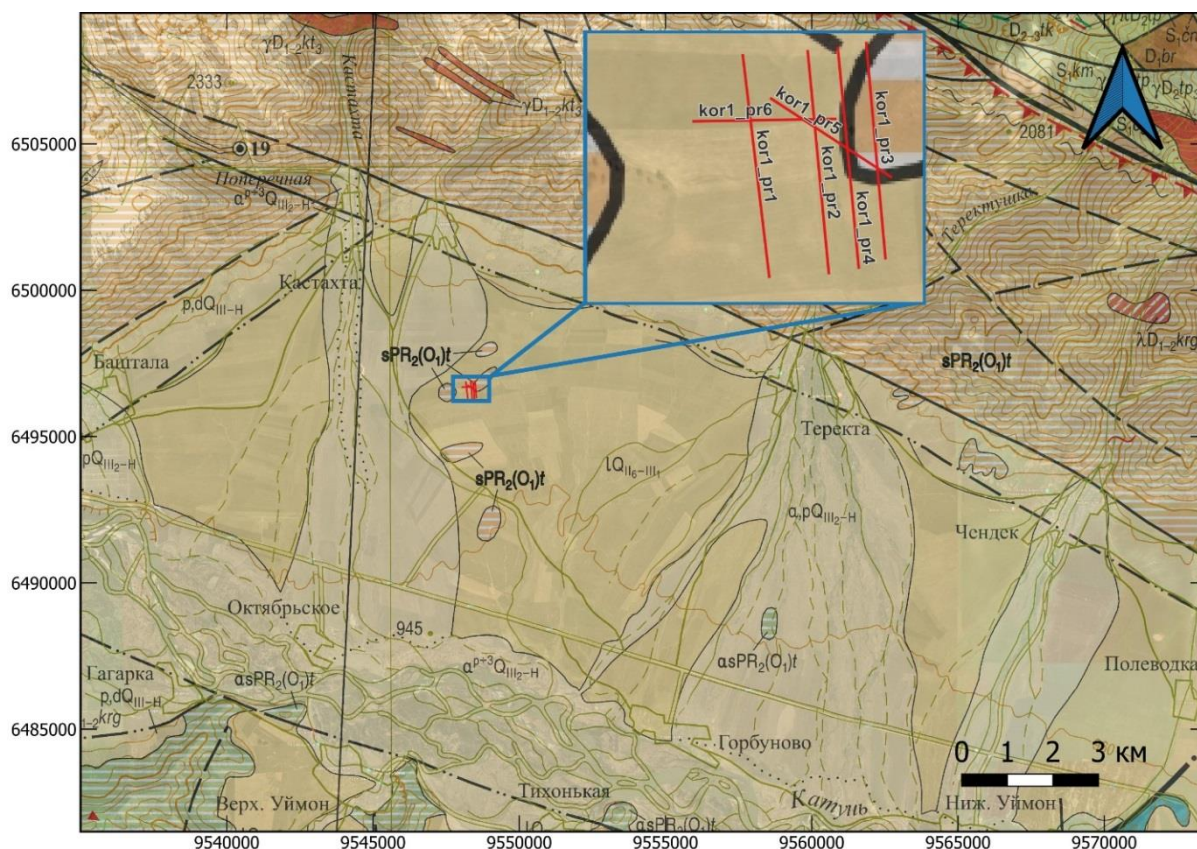
For citation

Kuzina, Z. Ya. et al. 2024. Geoelectric model of the exposure of basement rocks to the surface in the Uimon depression of Gorny Altay based on three-dimensional numerical modeling. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 52–60. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-52-60>.

Введение

Уймонская впадина является одним из крупнейших кайнозойских осадочных бассейнов Горного Алтая; ее размер составляет 35×15 км. По данным наземной электроразведки, Уймонская впадина имеет сложное разломно-блоковое строение. Глубина до фундамента впадины, по результатам интерпретации зондирований становлением электромагнитного поля, превышает 1 км (Деев и др., 2012; Санчаа и др., 2020). При этом на дневной поверхности в Уймонской впадине обнаружено несколько выходов коренных пород, соотнесенных с породами фундамента, представленных метаморфическим комплексом отложений ордовикского возраста. Представление о строении таких выходов было получено в 2020 г. методом электротомографии (ЭТ), однако остается открытым вопрос о том, как они образовались, поэтому необходимы дополнительные полевые данные.

Настоящая статья является продолжением исследований, результаты которых опубликованы в работе (Кузина и др., 2022), где представлены геоэлектрические модели участка с выходами пород фундамента на дневную поверхность в западной части Уймонской впадины по результатам двух- и трехмерной инверсии полевых данных электротомографии, полученных по параллельным профилям 1–3. Уймонская впадина является заселенной территорией (присутствуют фермерские хозяйства, многочисленные поля сельхозугодий, в том числе в районе объектов исследования), поэтому не всегда есть возможность проложить необходимое число профилей измерений в намеченных местах. В полевой сезон 2023 г. удалось добавить измерения еще по трем по профилям (4–6). На рис. 1 представлено местонахождение участка исследования и схема размещения профилей электротомографии за два года наблюдений на подложке геологической карты масштабом 1:200 000.



Условные обозначения:

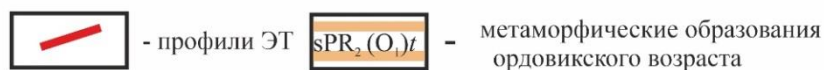


Рис. 1. Обзорная карта района работ в Уймонской впадине на подложке геологической карты и космоснимка (1 : 200 000) впадины, созданная с использованием программных комплексов QGis и CoralDraw. Выделен участок исследования; на врезке показано размещение профилей электротомографии

Fig. 1. An overview map on the substrate of the geological map (1 : 200,000) and of the Uimon depression satellite image created in QGis and CoralDraw. The study area is highlighted and the inset shows the placement of electrical tomography profiles

В вертикальных срезах трехмерной геоэлектрической модели, по данным электротомографии предшествующих работ 2020 г., выделяется высокоомное образование, соответствующее выходам коренных пород, во вмещающих (более низкоомных) осадочных отложениях, что хорошо согласуется с априорными материалами. По геологическим данным, метаморфические породы ордовикского возраста характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). Но, как известно, обратная задача электроразведки некорректна и может иметь несколько решений, поэтому в 2023 г. был выполнен следующий этап исследования.

Цель представленной работы включает уточнение геоэлектрического строения в зоне выхода отложений коренных пород на основе дополнительных измерений и верификацию геоэлектрической модели, полученной в результате трехмерной инверсии и с помощью численного трехмерного моделирования.

В немногих научных работах используется численное трехмерное моделирование с применением данных электротомографии в связи с трудоемкостью этого метода. Следует отметить, например, работу (Павлова, 2014), в которой представлены результаты трехмерного моделирования при сравнении эффектов высокоомной неоднородности на основе данных двух- и трехмерной систем измерения, а также оценивается влияние трехмерных продольных неоднородностей на данные двумерной профильной электротомографии. В зарубежной литературе особое внимание уделяется вопросам влияния рельефа на данные электротомографии (Lu et al., 2015; Penz et al., 2013).

Материалы и методы

Фактическим материалом для исследования являлись данные электротомографии, полученные по системе профилей в 2020 и 2023 гг. На участке исследования проложено 4 параллельных и 2 секущих профиля, местоположение которых выбрано исходя из особенностей местности, размещения сельхозугодий. Измерения были выполнены с помощью аппаратуры "Скала-48", разработанной в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (Панин, 2009). В ходе измерений применялась установка Шлюмберже с шагом между электродами 5 м, что обеспечило необходимую детальность. В 2023 г. длина профилей 5 и 6 составляла 235 м, профиля 4 (нагоняющего) – 355 м. Первичная обработка полевых данных производилась с использованием программы RiPPP; инверсия осуществлялась с помощью программы DiInSo (Мариненко, 2020; DiInSo..., 2021).

На первом этапе интерпретации получена геоэлектрическая модель участка с выходом коренных пород в результате трехмерной инверсии комплекса измерений, проведенных в течение 2 лет. Трехмерная модель, а также разрез 2D-инверсии по профилю 3 представлены на рис. 2. В полученной трехмерной модели выделяется высокоомное образование, соответствующее кореннику, а по двумерному разрезу можно определить углы наклона его боковых границ.

По геологическим данным, породы фундамента впадины, соответствующие метаморфическим отложениям ордовикского возраста¹, характеризуются повышенными значениями удельного сопротивления в интервале 900–3 000 Ом·м по сравнению с неоднородными вмещающими породами осадочного заполнения, значения УЭС которых достигают 500–700 Ом·м; согласно скважинным данным породы осадочного заполнения представлены озерно-ледниковыми и ледниковыми отложениями: валунным галечником, гравием, валунником, песком (Русанов и др., 2017).

Полученная 3D-модель, включающая высокоомный объект, расположенный во вмещающей среде более низкого УЭС, взята в качестве основы трехмерного моделирования. Общая геометрия объекта оценивалась по результатам 3D-инверсии полевых данных (рис. 2, а), геологической карты и космоснимка.

¹ Государственная геологическая карта Российской Федерации масштабом 1:200 000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45–XIV (Усть-Кокса). Объяснительная записка [Электронный ресурс] / А. М. Попова, В. И. Крупчатников, А. Л. Пономарев и др. ; Минприроды России, Роснедра, Сибнедра, АО "Горно-Алтайская экспедиция". М. : Московский филиал "ВСЕГЕИ", 2019. 271 с.

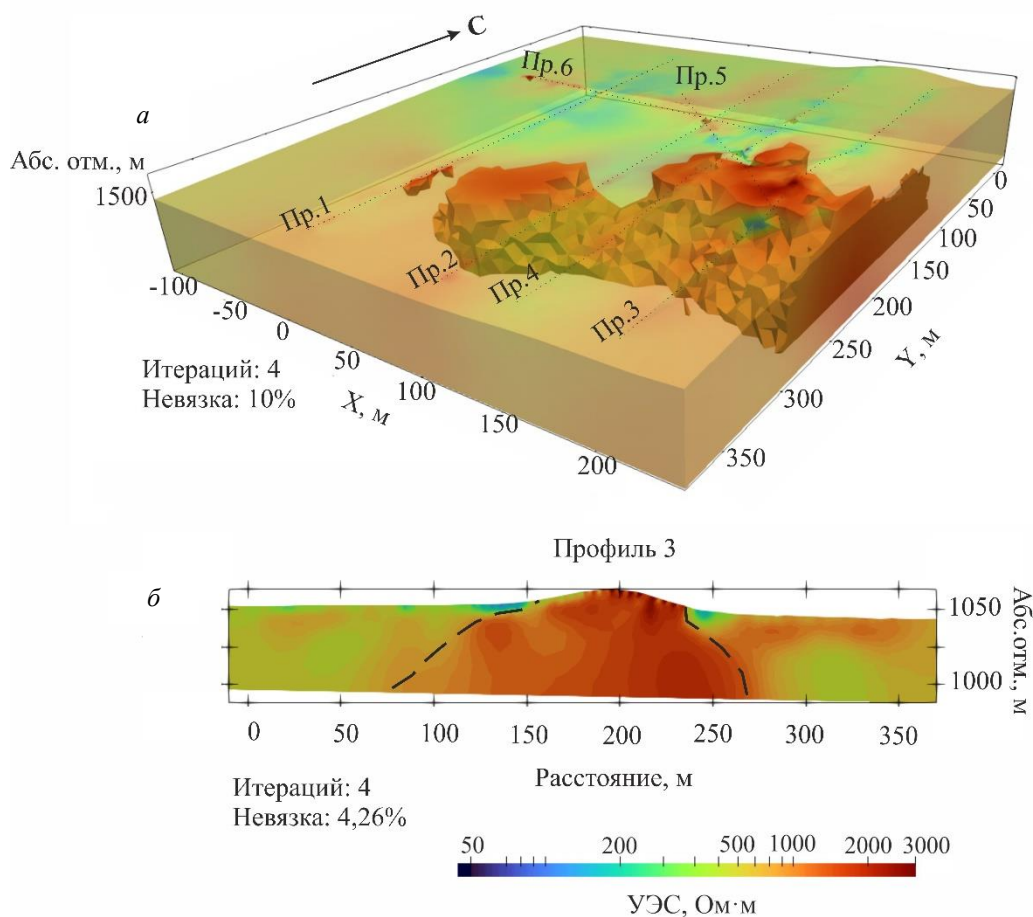


Рис. 2. Результат 3D-инверсии полевых данных; выделен объем среды, УЭС которой составляет 925–3 000 Ом·м (а) и разрез 2D-инверсии по профилю 3 (б)
 Fig. 2. The result of 3D inversion of field data; *a* – the volume of the medium is highlighted with electrical resistivity range of 925–3 000 ohm·m; *b* – geoelectric sections along profile 3 according to the results of 2D inversion

Для трехмерного моделирования также использована программа DiInSo (версия 2.5 от 25.04.2023)², а для построения сеток – программа GiD. Математическое моделирование осуществлялось в трехмерной области, которая задана с помощью тетраэдральной сетки. Для геометрического построения модели с последующей генерацией конечно-элементной сетки необходимо использовать "стороннюю" программу (применена программа GiD). Изначально определен тип задачи, заданный двумя файлами (характеристики материалов и граничные условия). Область моделирования определена границами, которые отнесены на такое расстояние от источников тока, при котором значения электрического поля будут малы: выбрана область со сторонами 1 400×1 400×350 м. На границах области, за исключением границы воздух – земля, заданы нулевые граничные условия Дирихле. Материалам присвоены объемы двух объектов: вмещающим отложениям и коренным породам (рис. 3, а). Геометрическое построение модели осуществлено последующим составлением фигур из точек, линий, поверхностей и затем объемов. Также в модель включены узлы, соответствующие положению электродов. Для уменьшения вычислительных мощностей прямая задача решена для каждого профиля. Конечным этапом работы программы GiD являлась генерация тетраэдральной сетки с заданной ранее мелкостью разбиения. Различным объектам сетки (линиям, поверхностям и объемам) можно присвоить разную мелкость разбиения, т. е. разный размер. Это означает, что вблизи этих объектов сгенерированные элементы (тетраэдры) будут примерно такого размера. Размер здесь понимается как средняя длина ребра соответствующего элемента сетки.

В настоящей работе мелкость разбиения задавалась в двух вариантах:

- 1) на линии электродов – 2; поверхностях и объеме объекта – 10; в среде – 50;
- 2) на линии электродов – 2; поверхностях и объеме объекта – 5; в среде – 10.

² Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>.

Пример сетки (мелкость разбиения 10) для объекта исследования представлен на рис. 3, б.

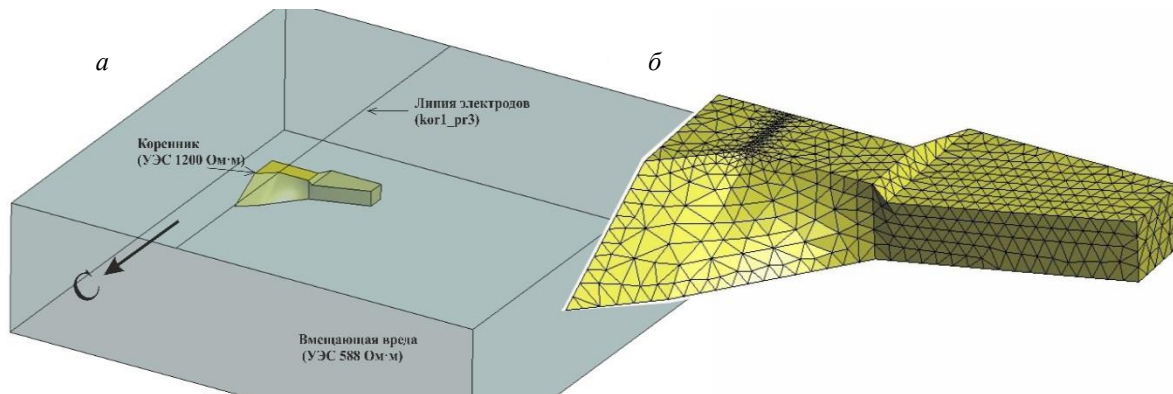


Рис. 3. Объект исследования в заданной области: а – построенная модель и линия электродов профиля 3; б – сгенерированная сетка (мелкость разбиения 10) для объекта исследования

Fig. 3. The object of study in the given area: а – the constructed model; б – the generated grid with a fineness of division 10 for the object

Перед началом решения прямой задачи для программы DiInSo указаны входные данные (УЭС вмещающей среды и коренника), а также сгенерированный файл, который содержит координаты множества положений электродов установок по профилю измерений посредством электротомографии. Затем подгружена сетка и сгенерирована матрица для решения прямых задач. В результате решения прямой задачи в папке с сеткой сформированы файлы для проведения 2D- и 3D-инверсий; подобраны параметры инверсий (мелкость разбиения, контрастность, параметр регуляризации). Файл для трехмерной инверсии собран по результатам трехмерного моделирования всех профилей. Разрезы 2- и 3-мерной инверсий модельных данных сопоставлены с результатами двумерной и трехмерной инверсий полевых данных электротомографии.

Результаты и обсуждение

В ходе расчетов рассмотрены две модели. Модель 1 выбрана для верификации углов наклона боковых границ коренника.

Модель 1. УЭС объекта (выхода коренных пород) составляет 2 000 Ом·м, УЭС вмещающей среды – 588 Ом·м; размеры области моделирования: 1 400×1 400×350 м. Вертикальный размер объекта без учета рельефа равен 50 м, что соответствует глубинности исследования методом ЭТ в геоэлектрических условиях Уймонской впадины. Расположение и углы наклона границ вблизи профилей 1–3 подбирались на основе результатов 2D-инверсии полевых данных; положение верхней кромки объекта в области профилей 1 и 2 – на глубине 10 м, субвертикальный наклон границ прослеживается как с северного, так и с южного направлений. Для профиля 3 рассматривались три варианта положения южной боковой границы объекта: наклонная граница – под углами 50 и 70° от дневной поверхности; вертикальная – под углом 90°. На севере участка граница на профиле 3 погружается под более пологим углом от дневной поверхности (25°), а для южной боковой границы угол примерно равен 50°. Модельные расчеты выполнены по данным, полученным на профилях 1–3.

На предыдущем этапе интерпретации подобраны оптимальные параметры инверсии для решения поставленной задачи: ограничение максимального размера ячейки составляло 100, ограничение глубины исследования – 45 м, использовалась функция усиления контрастности. В полученных геоэлектрических моделях выделяется высокоомный объект в более проводящей вмещающей среде. УЭС высокоомного объекта находится в диапазоне 850–3 200 Ом·м. Результаты трехмерной инверсии модельных данных представлены в виде срезов по линиям профилей на рис. 4.

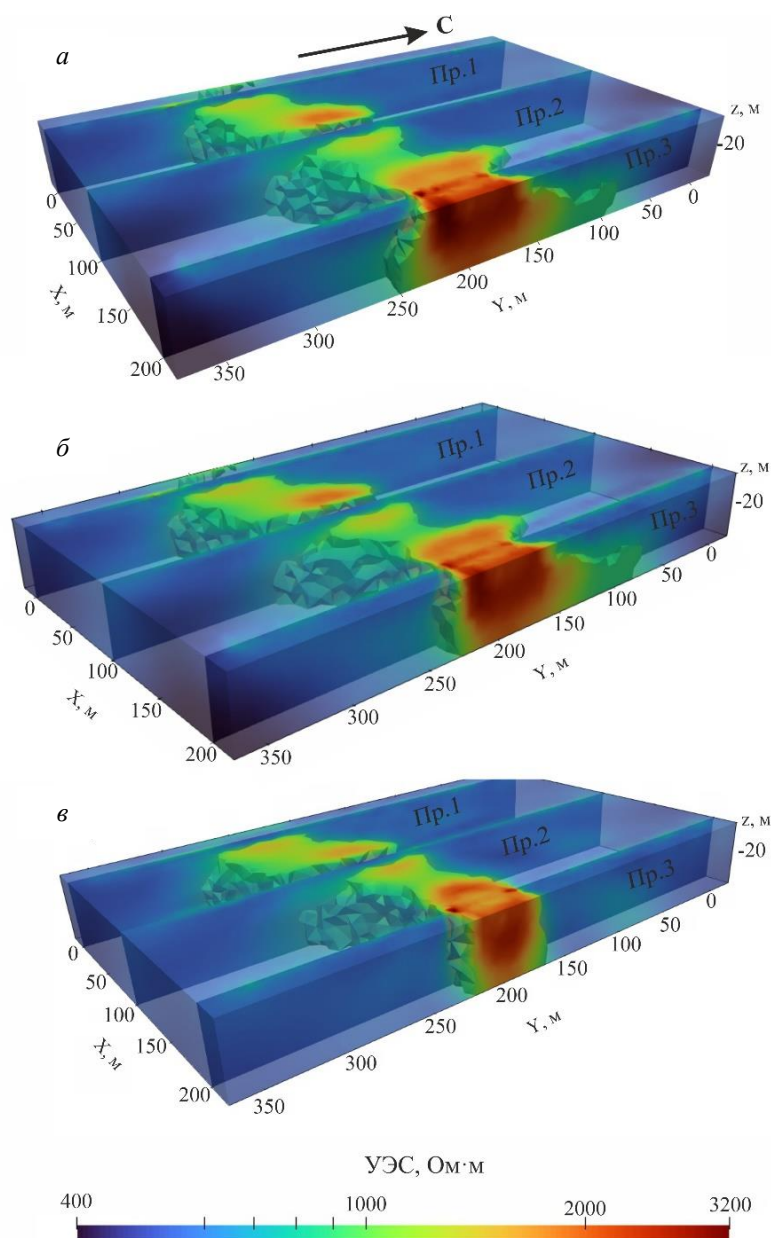


Рис. 4. Результаты 3D-инверсии модельных данных; выделены вертикальные 2D-срезы трехмерной модели по линии профилей, УЭС высокоомного объекта в диапазоне 850–3 200 Ом·м: *a* – наклон южной границы 50°; *б* – наклон южной границы 70°; *в* – вертикальный наклон границ
Fig. 4. Results of 3D inversion of the model data: vertical 2D sections along the profiles are highlighted (distance along the profiles, $m = 0, 100, 200$ m), the volume of the medium is highlighted, with electrical resistivity range of 850–3 200 ohm·m: *a* – the slope of the southern border is 50°; *б* – the slope of the southern border is 70°; *в* – the vertical slope of the borders

В результирующей модели отражается изменение углов наклона боковых границ коренника. Исходя из данных, полученных в ходе моделирования, и их сопоставления с 3D-инверсией полевых данных (рис. 2), сделан вывод о том, что наклон боковых южных границ объекта близок к 50°.

Последующие модели выбраны для верификации вертикального размера коренника и учета рельефа дневной поверхности, который может влиять на результаты. Выраженный рельеф наблюдается на профиле 3, поэтому выполнено двумерное моделирование с учетом высотных отметок (модель 2).

Модель 2. УЭС объекта (коренника) составляет 2 000 Ом·м, УЭС вмещающей среды – 588 Ом·м. Угол наклона границы коренника от дневной поверхности на разрезе по профилю 3 на севере более пологий (~25°), угол наклона южной боковой границы соответствует ~50°. С указанными параметрами модели расчеты выполнены для двух вариантов вертикального размера коренника: до глубины 50 и 100 м. Параметры инверсии модельных данных включали ограничения максимального размера ячейки (50 м) и глубинности исследования (45 м).

Результаты двумерной инверсии модельных и полевых данных по профилю 3 представлены на рис. 5. Разрезы 2D-инверсии полевых данных получены с невязкой в 4 %.

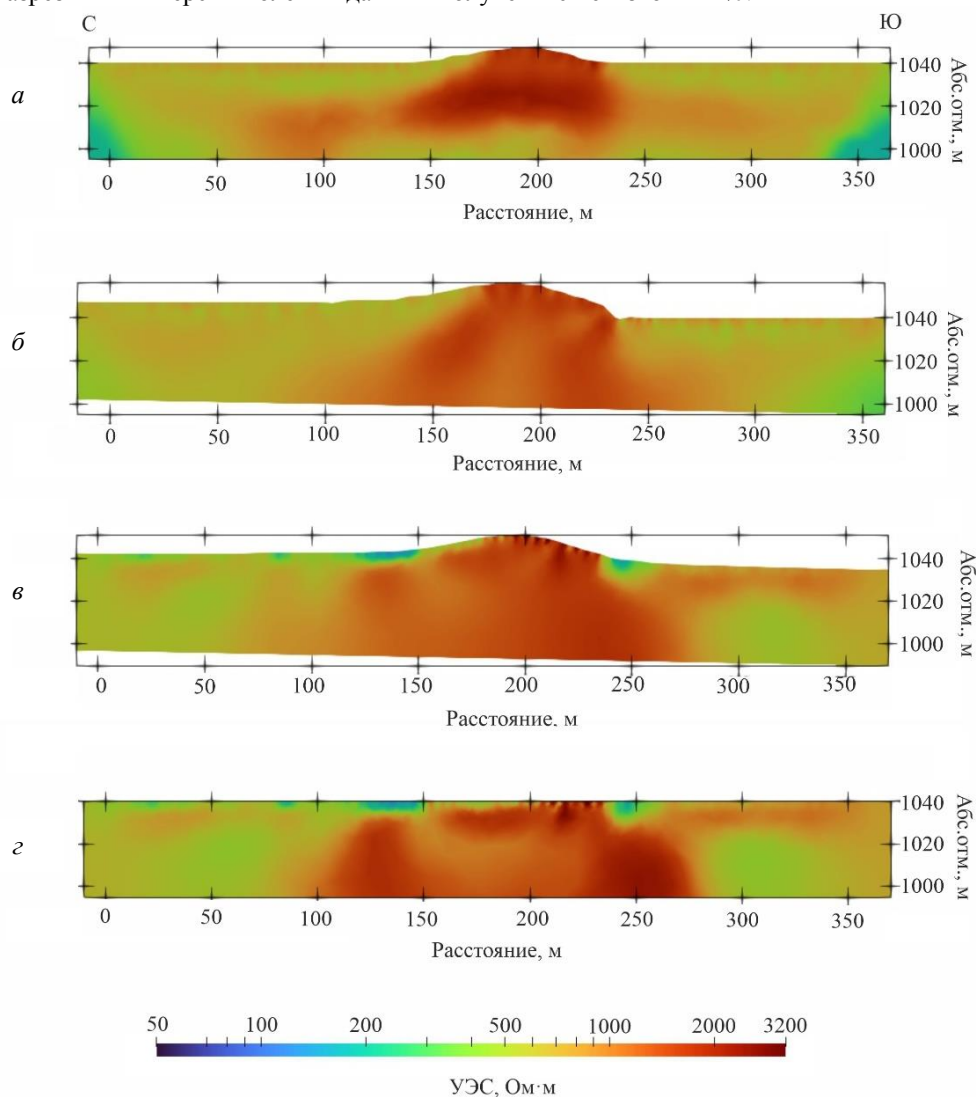


Рис. 5. Результаты 2D-инверсии модельных данных по профилю 3 объекта, имеющего вертикальный размер до 50 (а) и 100 м (б);

разрез 2D-инверсии полевых данных с учетом рельефа (в), без учета рельефа (г)

Fig. 5. Results of 2D inversion of model data for profile 3 of the object with a vertical size of up to 50 (a) and 100 m (б); section of 2D inversion of field data taking into account the relief (в), without taking into account the relief (г)

При сопоставлении разрезов двумерной инверсии модельных и полевых данных следует отметить, что высокоомная аномалия от объекта, вертикальный размер которого составляет 50 м, прослеживается лишь до глубины 30 м, что не соответствует результатам инверсии полевых данных (рис. 5, в). Таким образом, заданного вертикального размера коренника, равного 50 м, недостаточно; исследуемый объект не является подповерхностной неоднородностью, имеющей небольшие вертикальные размеры: это объект, уходящий на глубину более 50 м.

Кроме того, можно сделать выводы о возможном влиянии рельефа. На полученных разрезах его влияние наблюдается в появлении зоны пониженных значений УЭС коренника (менее 1 000 Ом·м), что согласуется с публикацией (Баранчук и др., 2018), в которой идет речь о существенном влиянии рельефа на данные электротомографии. В статье (Lu et al., 2015) также оценивается влияние рельефа в зависимости от угла наклона; в статье (Penz et al., 2013) показано, как потенциал зависит от формы рельефа и положения электродов. Без учета рельефа на геоэлектрическом разрезе (рис. 5, г) описанная выше зона становится более явной, она пролеживается с севера на юг от точки перегиба в рельефе к центру объекта. Следует отметить, что в центральной части разреза объем данных ограничен в связи с использованием нагоняющей установки, что может приводить к появлению ложных аномалий. Вместе с тем на разрезах, полученных при инверсии полевых данных с учетом рельефа, также видны низкоомные

приповерхностные аномалии у основания возвышенности, которые отсутствуют на разрезах инверсии модельных данных. Этот факт может указывать на то, что небольшие по размеру приповерхностные низкоомные аномалии не связаны с влиянием рельефа, а обусловлены геологическим строением (наличием в разрезе локальных зон проводящих и/либо обводненных осадков), что не было учтено в рассмотренных моделях.

Заключение

В 2023 г. получены новые полевые данные электротомографии на участке исследования в Уймонской впадине. В результате трехмерной инверсии объема данных ЭТ за 2020 и 2023 гг. по шести профилям построена уточненная геоэлектрическая 3D-модель участка с выходами коренных пород на дневную поверхность. Трехмерное численное моделирование, 3D-инверсия модельных и полевых данных, их сопоставление были выполнены для верификации полученной трехмерной модели. В результате уточнены и обоснованы геометрические размеры, интервалы значений УЭС коренника и вмещающих неоднородных осадочных отложений. Кроме того, с помощью модельных расчетов обоснованы углы наклона боковых границ объекта. На профиле 3 угол боковой границы на севере пологий и составляет 25° , а на юге – 50° . На профилях 1 и 2 наблюдаются боковые границы, близкие к вертикальным.

С помощью численного 2D-моделирования оценен вертикальный размер коренника, который составляет более 50 м, а также определено влияние рельефа дневной поверхности на измерения электротомографии. Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- выходы на земную поверхность коренных пород фундамента не являются приповерхностной неоднородностью, их вертикальный размер превышает 50 м;
- влияние рельефа дневной поверхности проявляется на разрезах электротомографии в виде артефакта (зоны пониженных значений УЭС в кореннике), которая отсутствует при исследовании с учетом рельефа. В данном случае аномальное понижение сопротивлений высокоомного объекта небольшое, но в случае значительных перепадов высот этот эффект может привести к ложным выводам о строении указанного объекта.

В ходе дальнейших исследований можно проследить объект на большую глубину (~100 м) с использованием трехэлектродной установки электротомографии или альтернативной аппаратуры с увеличенным размером измерительно-генераторного кабеля.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FWZZ-2022-0025 Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Баранчук К. И., Модин И. Н., Муканова Б. Г., Миргаликызы Т. М. Влияние рельефа на данные электрической томографии // Инженерные изыскания в строительстве : материалы 2-й общерос. науч.-практ. конф. молодых специалистов, Москва, 27 апреля 2018 г. М. : Геомаркетинг, 2018. С. 89–95. EDN: VSZGQK.
- Деев Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М. [и др.]. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № 1. С. 15–23. EDN: OWCSOJ.
- Мариненко А. В. Программный комплекс DiInSo для решения прямых и обратных задач электротомографии в нестандартных постановках // Инженерная и рудная геофизика. 2020 : тез докл. 16-й науч.-практ. конф., Пермь, 14–18 сентября 2020 г. Пермь, 2020. С. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. EDN: ZGRXQY.
- Павлова А. М. Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред : дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 128 с.
- Панин Г. Л. Многоэлектродная аппаратура методов сопротивлений "Скала-48" // Инженерная и рудная геофизика 2009 : тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Геленджик, 26–30 апреля 2008 г. Геленджик, 2009.
- Русанов Г. Г., Деев Е. В., Зольников И. Д., Хазин Л. Б. [и др.]. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 8. С. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV.
- Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. Строение Уймонской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2020. № 3(43). С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG.
- DiInSo : св-во рег. программ для ЭВМ / А. В. Мариненко, № 2021662035; заявл. 13.07.2021; опубл. 21.07.2021. ; зарег. 21.07.2021.

Lu De-B., Zhou Qi-Y., Junejo S. A., Xiao An-L. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion // *Pure and Applied Geophysics*. 2015. Vol. 172. P. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.

Penz S., Chauris H., Donno D., Mehl C. Resistivity modelling with topography // *Geophysical Journal International*. 2013. Vol. 194, Iss. 3. P. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.

References

Baranchuk, K. I., Modin, I. N., Mukanova, B. G., Mirgalikyzy, T. M. 2018. The influence of relief on electrical tomography data. Proceedings of the 2 All-Russian scientific and practical conference of young specialists *Engineering surveys in construction*, Moscow, 27 April, 2018. Moscow, pp. 89–95. EDN: VSZGQK. (In Russ.)

Deev, E. V., Nevedrova, N. N., Rusanov, G. G., Sanchaa, A. M. et al. 2012. New data on the structure of the Uymon depression (Gorny Altai). *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 1, pp. 15–23. EDN: OWCSOJ. (In Russ.)

Marinenko, A. V. 2020. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-standard formulations. Abstracts of the 16 Scientific and Practical Conference and Exhibition *Engineering and Ore Geophysics 2020*, Perm, 14–18 September, 2020, Perm, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. EDN: ZGRXQY. (In Russ.)

Pavlova, A. M. 2014. Application of shallow electrical prospecting to study three-dimensionally heterogeneous environments. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)

Panin, G. L. 2009. Multielectrode equipment for resistance methods "Syber-48". Proceedings of 5 Intern. conf. *Engineering and Ore Geophysics*, Gelendzhik, 26–30 April, 2008. Gelendzhik. (In Russ.)

Rusanov, G. G., Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Khazin, L. B. et al. 2017. Reference section of Neogene-quaternary deposits in the Uimon depression (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 58(8), pp. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV. (In Russ.)

Sanchaa, A. M., Nevedrova, N. N., Babushkin, S. M. 2020. The structure of the Uymon depression according to nonstationary electromagnetic sounding data. *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 3(43), pp. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG. (In Russ.)

DiInSo: Certificate of state registration of a computer program. A. V. Marinenko N 2021662035; application 13.07.2021; publ. 21.07.2021. Byul. N 8. (In Russ.)

Lu, De-B., Zhou, Qi-Y., Junejo, S. A., Xiao, An-L. 2015. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 172, pp. 1531–1546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1015-4>.

Penz, S., Chauris, H., Donno, D., Mehl, C. 2013. Resistivity modelling with topography. *Geophysical Journal International*, 194(3), pp. 1486–1497. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt169>.

Сведения об авторах

Кузина Зоя Ярославовна – пр. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, инженер; e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Zoia Ya. Kuzina – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Engineer; e-mail: z.kuzina@g.nsu.ru

Неведрова Нина Николаевна – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, д-р геол.-мин. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Nina N. Nevedrova – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Dr Sci. (Geology & Miner.), Chief Researcher; e-mail: NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

Санчаа Айдиса Михайловна – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотрудник, зав. лабораторией; e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Aydisa M. Sanchaa – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Leading Researcher; e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

Высокая теплопроводность ядра Земли и геодинамо

М. Ю. Решетняк

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
20.07.2023;

получена
после доработки
13.09.2023;

принята к публикации
20.09.2023

Ключевые слова:
эволюция Земли,
тепловая и
композиционная
конвекция,
геомагнитное поле,
ядро Земли,
граница ядро – мантия

Для цитирования

Реферат

Геомагнитное поле генерируется механизмом динамо в ядре Земли, поддерживаемым в процессе остывания планеты и роста твердого ядра. Магнитное поле существовало задолго до появления твердого ядра, но по имеющимся оценкам и расчетам, этого не могло быть. Согласно некоторым моделям остывания ядра Земли теплопроводность в нем выше общепринятых значений в три раза; величина конвективного теплового потока уменьшается, генерация магнитного поля прекращается. В этих моделях величина теплового потока на границе ядро – мантия за все время существования Земли линейно уменьшилась лишь на 15–20 %, что является грубым предположением. Значительные изменения теплового потока предсказывают модели остывания мантии, в которых рост конвективного теплового потока в древности происходит за счет уменьшения вязкости мантии при увеличении температуры вещества. При рассмотрении модели остывания Земли с трехкратным значением теплопроводности ядра показано, что использование комбинированной модели остывания ядра и мантии позволяет значительно увеличить в древности тепловой поток на границе ядро – мантия. Для замедления роста твердого ядра в модель включен субадиабатический слой; в результате размер твердого ядра удовлетворяет сейсмологическим наблюдениям. Модель позволяет получить достаточное количество энергии для генерации геомагнитного поля с момента появления жидкого ядра и по настоящее время. Появление твердого ядра 2,4 млрд лет назад, не приводящее в модели к резким изменениям теплового потока, согласуется с палеомагнитными наблюдениями, не фиксирующими изменений в поведении магнитного поля. Модель не исключает существование мультипольного магнитного поля на начальном этапе.

Решетняк М. Ю. Высокая теплопроводность ядра Земли и геодинамо. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-61-66>.

High thermal conductivity of the Earth's core and geodynamo

Maxim Yu. Reshetnyak

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Article info

Received
20.07.2023;

received
in revised
13.09.2023;

accepted
20.09.2023

Key words:
Earth evolution,
thermal and
compositional
convections,
geomagnetic field,
Earth's core,
core – mantle boundary

Abstract

The geomagnetic field is generated by dynamo processes in the Earth's core. This process is supported by the cooling of the planet and the growth of the solid core. It is known that the magnetic field existed long before the appearance of the solid core, although according to available estimates and calculations, this could not have happened. Moreover, according to some models, thermal conductivity in the Earth's core may be three times higher than generally accepted values. In this case, the magnitude of the convective heat flow decreases and the generation of the magnetic field stops. In the above-mentioned models it was assumed that the magnitude of the heat flow at the core – mantle boundary over the entire existence of the Earth linearly decreased by only 15–20 %. The latter is a rough guess. Significantly large changes in heat flow are predicted by models of mantle cooling, in which the growth of convective heat flow in ancient times occurs due to a decrease in the viscosity of the mantle with an increase in the temperature of the substance. Below we consider a model of the cooling of the Earth with a threefold value of the thermal conductivity of the core. It is shown that the use of a combined model of core and mantle cooling makes it possible to significantly increase the heat flow at the core – mantle boundary in ancient times. To slow down the growth of the solid core, a subadiabatic layer is included in the model. As a result, the size of the solid core in the model satisfies seismological observations. The model allows us to obtain a sufficient amount of energy to generate a geomagnetic field, starting from the moment the liquid core appeared and to the present. The appearance of a solid core 2.4 billion years ago, which does not lead to sharp changes in heat flow in the model, is consistent with paleomagnetic observations that do not record changes in the behavior of the magnetic field. The model does not exclude the existence of a multipole magnetic field at the initial stage.

For citation

Reshetnyak, M. Yu. 2024. High thermal conductivity of the Earth's core and geodynamo. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 61–66. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-61-66>.

Введение

Геомагнитное поле существует 4,2 млрд лет (*Tarduno et al., 2020*), что сравнимо с возрастом Земли (4,5 млрд лет). Магнитное поле Земли генерируется в проводящем жидком ядре механизмом динамо (*Wicht et al., 2019*). Конвекция, приводящая в действие динамо, поддерживается посредством охлаждения ядра и дифференциации вещества, связанной с ростом твердого ядра. При моделировании геомагнитных процессов удастся получить реалистичные оценки современного радиуса твердого ядра, тепловых потоков, а также энергии, необходимой для генерации магнитного поля (*Aubert et al., 2009*). Для объяснения существования геомагнитного поля до появления твердого ядра анализируются модели совместного остывания ядра и мантии, предсказывающие появление повышенных тепловых потоков на границе ядро – мантия на ранних стадиях эволюции Земли (*Reshetnyak, 2022*) вследствие низких значений вязкости вещества мантии при высоких температурах.

Скорость остывания ядра зависит от величины теплопроводности жидкого металла k . Традиционно в моделях использовались небольшие значения $k \approx 45$ Вт/(м·К). Согласно данным, полученным в работах (*Gubbins et al., 2015; de Koker et al., 2012*), k может быть в три раза больше, достигая значений $k \approx 150$ Вт/(м·К). В этом случае для поддержания конвекции в ядре Земли требуется большой поток тепла на границе ядро – мантия, соответственно, генерация магнитного поля может быть затруднена или полностью отсутствовать. В то же время изменение теплового режима в ядре Земли в силу его небольшого размера и малости теплового потока на границе ядро – мантия $Q_{\text{СМВ}}$ (сравнительно с полным тепловым потоком на поверхности Земли Q_S во внешнее пространство) не оказывает существенного влияния на эволюцию мантии. Таким образом, посредством вариации параметров модели мантии можно найти удовлетворительное решение и с более высоким значением k .

Сложность моделирования при больших значениях k заключается также в появлении ускоренного роста твердого ядра, приводящего к радиусу твердого ядра, большему наблюдаемого сейсмологами. Для решения этой проблемы в модель введена возможность возникновения субадиабатического слоя на границе ядро – мантия (*Gubbins et al., 1982*). Субадиабатический слой, в котором тепловая конвекция отсутствует, замедляет как охлаждение жидкого ядра, так и скорость роста твердого ядра.

В ходе настоящего исследования рассмотрена модель совместного остывания мантии и ядра Земли (*Stevenson et al., 1983; Schubert et al., 2001; Решетняк, 2021; Reshetnyak, 2022*), дополненная возможностью появления субадиабатического слоя на границе ядро – мантия при больших значениях теплопроводности ядра k . Подбор параметров осуществлен методом Монте-Карло в допустимых диапазонах значений.

Краткое описание модели остывания Земли

Детальное описание модели, зависящей от одной радиальной координаты r , содержится в работах (*Решетняк, 2021; Reshetnyak, 2022*). Рассмотрим совместное остывание мантии и ядра за счет теплового потока на поверхности Земли Q_S начиная с момента времени $t = 0$ – времени окончания процесса аккреции и разделения Земли на ядро ($0 \leq r < r_b$) и мантию ($r_b \leq r \leq r_s$). Предполагается, что первоначальное распределение физических полей в ядре подчиняется адиабатическому распределению. По мере охлаждения в центре ядра начинает формироваться твердое ядро $0 \leq r < c$, радиус c которого растет со временем t . Теплообмен в этой области происходит за счет теплопроводности твердого ядра, а решение удовлетворяет условию непрерывности теплового потока Q_{ICB} на границе $r = c$. Процесс охлаждения ядра определяется заданными начальными условиями и тепловым потоком $Q_{\text{СМВ}}$ на границе ядро – мантия.

Процесс охлаждения мантии задается начальными условиями, концентрацией радиоактивных источников в мантии и потоками $Q_{\text{СМВ}}$, Q_S . Предполагается, что температура в мантии постоянна по радиусу r и меняется скачком в пограничных слоях при $r = r_b$ и $r = r_s$. Для нахождения потоков $Q_{\text{СМВ}}$ и Q_S используется эмпирическая зависимость числа Нуссельта от числа Рэлея, используемая в теории турбулентности. Решение комбинированной задачи совместного охлаждения ядра и мантии с учетом непрерывности тепловых потоков Q_{ICB} , $Q_{\text{СМВ}}$ дает полное решение задачи охлаждения планеты. Дополнительно в модель введена возможность появления субадиабатического слоя. Если градиент температуры в ядре становится меньше адиабатического, то появляется слой (*Gubbins et al., 1982; Reshetnyak, 2019*), в котором нет тепловой конвекции, а тепло переносится за счет процесса теплопроводности. В силу убывания плотности теплового потока с радиусом $\sim r^{-2}$ формирование слоя начинается на границе r_b , нижняя граница r_1 слоя движется со временем вниз в направлении к центру Земли, толщина субадиабатического слоя $r_b - r_1$ увеличивается.

Как показано в работе (*Reshetnyak, 2019*), при использовании метода Монте-Карло удастся подобрать параметры модели остывания системы ядро – мантия, позволяющие применить значения возраста твердого ядра размером, совпадающим с современным с точностью до 10 %, порядка 2,6 млрд лет. В модели решение удовлетворяло трем условиям: равенство радиуса твердого ядра современному $\hat{c} = 1,22 \cdot 10^6$ м; равенство

теплового потока на поверхности Земли современному $\hat{Q}_s = 44$ ТВт (Schubert et al., 2001); средние по времени значения джоулевой диссипации магнитного поля Q_J^1 до и после появления твердого ядра – более 0,5 ТВт. Последнее условие следует из оценок омической диссипации для современного магнитного поля и трехмерных моделей динамо (Roberts et al., 2003). Точные значения используемых параметров модели можно найти в цитируемых работах; вычисления проводились для значений теплопроводности $k = 7 \cdot 10^{-7}$ Вт/(м·К).

Результаты численного моделирования

Численные эксперименты с утроенным значением $k = 2,1 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м·К) при тех же значениях остальных параметров приводят к решению либо $Q_J = 0$, что соответствует отсутствию динамо, либо даже к $Q_J < 0$. Последнее означает, что энергии в системе недостаточно не только для генерации магнитного поля, но и для поддержания конвекции, т. е. указывает на необходимость введения субадиабатического слоя. Поведение $c(t)$ в рассматриваемом случае слабо зависит от значения k . Поиск решения при тех же перечисленных выше критериях отбора и большом k приводит к решению с приемлемым Q_J , но с радиусом твердого ядра c порядка 2 000 км. Другими словами, удовлетворить всем перечисленным критериям в данной постановке задачи не удается.

Далее в работе была рассмотрена возможность появления субадиабатической области (Gubbins et al., 1982; Reshetnyak, 2019), в которой тепловая конвекция отсутствует. Обратим внимание, что это не исключает существования композиционной конвекции, связанной с ростом твердого ядра. С учетом перечисленных выше критериев отбора, также как и в работе (Reshetnyak, 2022), варьируя начальную температуру в центре Земли T_0 (6 879 К), температуру кристаллизации ядра T_s^0 (5 317 К), параметры v_0 ($1,317 \cdot 10^7$ м²/с) и A (82 463 К) в зависимости кинематической вязкости мантии от температуры T ($v = v_0 e^{\frac{A}{T}}$), а также параметр, связанный с концентрацией радиоактивных источников в мантии C_e^m ($1,34 \cdot 10^{-14}$ К/с) (Решетняк, 2021), методом Монте-Карло было получено решение, удовлетворяющее заданным критериям. В скобках приведены полученные значения параметров. Ориентировочные диапазоны параметров для метода Монте-Карло были взяты из цикла работ Лаброзе для ядра и исследований мантии (Schubert et al., 2001). Более точные оценки диапазонов автору не известны. Зависимость возраста твердого ядра и его размера от некоторых из этих параметров можно найти в работе (Reshetnyak, 2019). Для T_0 диапазон равен [5 600, 7 000] К, T_s^0 – [5 300, 5 400] К, v_0 – [10^7 , $2 \cdot 10^7$] м²/с, A – [$3 \cdot 10^4$, $9 \cdot 10^4$] К, C_e^m – [10^{-14} , 10^{-13}] К/с. Количество расчетов прямой задачи составляло порядка 2 000.

На рисунке (а) показано, как в момент времени $t = 1,1$ млрд лет граница конвективной зоны r_1 начинает изменяться, отодвигаясь от границы ядро – мантия r_b , еще до появления твердого ядра. Появление твердого ядра в момент времени $t = 2,1$ млрд лет приводит к замедлению роста субадиабатической области в связи с возникновением дополнительных источников энергии, связанных с дифференциацией вещества и латентной теплотой кристаллизации твердого ядра. Для современного момента времени $t = 4,5$ млрд лет значения r_1 и c в модели составляют 2 350 и 1 280 км, что соответствует толщине зоны тепловой конвекции $d = r_1 - c = 1 000$ км. Столь небольшая толщина конвективной зоны, близкая по порядку величины к солнечной, может представлять интерес для асимптотических оценок с малым параметром $\varepsilon = d/r_b$.

На рисунке (б) представлено поведение тепловых потоков на границах мантии Q_s , $Q_{СМВ}$, а также джоулевой диссипации Q_J . За исключением небольших деталей, отражающих влияние начальных условий, три указанные величины имеют максимум при малых t и далее убывают с ростом времени. На всем интервале времени значения Q_J положительны, что означает наличие достаточной энергии для генерации магнитного поля. Средние значения Q_J до и после появления твердого ядра соответствуют 0,8 и 0,6 ТВт. Появление твердого ядра не приводит к резкому изменению Q_J , что согласуется с палеомагнитными наблюдениями, которые не показывают резких изменений напряженности магнитного поля, его конфигурации и частоты инверсий. Однако следует отметить, что напряженность магнитного поля пропорциональна $Q_J^{1/2}$, и требуется достаточно большое изменение Q_J , чтобы изменения магнитного поля стали заметны. Модель не исключает, что сразу после разделения Земли на ядро и мантию дипольное магнитное поле могло быть достаточно слабым, поскольку величина Q_J была слишком большой для генерации крупномасштабного магнитного поля [см. подробнее о критерии существования дипольного магнитного поля в работе (Christensen

¹ В модели предполагается, что в течение значительных периодов времени вся энергия магнитного поля переходит в тепло. В этом случае джоулева диссипация может использоваться в качестве оценки величины магнитной энергии по порядку величины (Roberts et al., 2003).

et al., 2006)]. Данный критерий основан на оптимальном соотношении силы плавучести и силы Кориолиса для генерации крупномасштабного магнитного поля. При доминировании силы плавучести над силой вращения (как это предположительно происходит на Венере) генерация крупномасштабного магнитного поля невозможна.

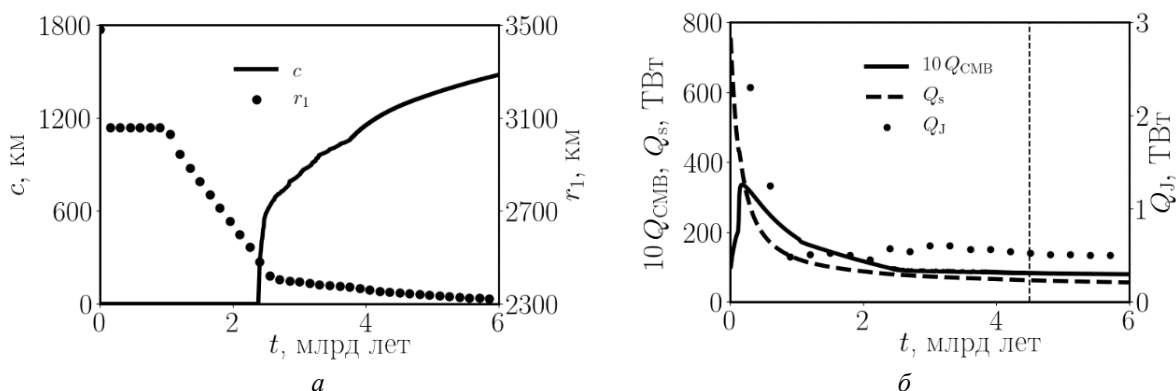


Рисунок. Эволюция во времени: a – радиуса твердого ядра c ; b – теплового потока на границе ядро – мантия Q_{CMB} , на поверхности Земли Q_s , энергии диссипации магнитного поля Q_J с учетом субадиабатического слоя.

Значения Q_{CMB} увеличены на графике в 10 раз

Figure. Evolution in time: a – radius of the solid core c ; b – heat flow at the core – mantle boundary Q_{CMB} , on the Earth's surface Q_s , energy of the magnetic field dissipation taking into account the subadiabatic layer. The values of Q_{CMB} are increased 10 times on the graph

Обратим внимание, что условие появления твердого ядра 2,4 млрд лет назад представляет большой интерес для палеомагнитных исследований, согласно которым за этот период магнитное поле не претерпевало существенных изменений. В противном случае возникли бы трудности при обосновании существования неоднократных суперхронов, сравнимой по величине частоты инверсий и напряженности магнитного поля.

Заключение

В представленной модели Земля состоит из нескольких оболочек: мантии, ядра жидкого, ядра твердого. Возникающие в ней пограничные слои ассоциируются со слоем D'' и литосферой и имеют тепловую природу. Оценки толщин пограничных слоев близки к сейсмологическим оценкам. Поскольку температура в основном объеме мантии считается постоянной, то скачки температуры в слоях несколько больше ожидаемых, в частности, вблизи поверхности Земли. Как уже отмечалось, модель ядра основана на адиабатическом приближении и полностью пренебрегает пограничными слоями. Появление субадиабатического слоя III, связанного с тепловой стратификацией, приводит к ослаблению теплопереноса в ядре. Поскольку при росте твердого ядра происходит выделение легкой примеси на $r = c$, в слое III продолжает существовать композиционная конвекция. Вопрос о том, насколько композиционная конвекция приводит к разрушению субадиабатического слоя, на настоящий момент остается открытым. Следует также отметить, что вклад мелкомасштабного магнитного поля в Q_J может быть велик; этот факт усложняет сравнение модели с палеомагнитными измерениями, основанными на поведении дипольной компоненты. При всех упомянутых недостатках модель в первом приближении позволяет согласовать данные по наблюдаемому тепловому потоку на поверхности Земли, радиусу твердого ядра и эволюции геомагнитного поля в прошлом; больших противоречий в оценках свойств вещества мантии также не наблюдается.

Благодарности

Работа, посвященная разработке модели остывания мантии, выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН. Построение модели остывания ядра Земли осуществлено при поддержке гранта РФФ 23-17-00112.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Решетняк М. Ю. Параметрическая тепловая модель эволюции Земли // Письма в Астрономический журнал. 2021. Т. 47, № 7. С. 525–534. DOI: <https://doi.org/10.31857/s032001082107007x>. EDN: KZFOSQ.
- Aubert J., Labrosse S., Poitou C. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 179, Iss. 3. P. 1414–1428. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04361.x>.

- Christensen U. R., J. Aubert J. Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 166, Iss. 1. P. 97–114. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03009.x>.
- de Koker N., Steinle-Neumann G., Vlček V. Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid *Fe* alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2012. Vol. 109, Iss. 11. P. 4070–4073. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- Gubbins D., Thomson C., Whaler K. Stable regions in the Earth's liquid core // *Geophysical Journal International*. 1982. Vol. 68, Iss. 1. P. 241–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06972.x>.
- Gubbins D., Alfè D., Davies C., Pozzo M. On core convection and the geodynamo: Effects of high electrical and thermal conductivity // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 247. P. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.04.002>.
- Reshetnyak M. Yu. Evolution of the inner core of the Earth: Consequences for geodynamo // *Magnetohydrodynamics*. 2019. Vol. 55. N 1/2. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.21>.
- Reshetnyak M. Yu. Mantle cooling regulation and ancient geomagnetic field // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 22. Article number: ES2006. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022es000797>. EDN: MDPDCD.
- Reshetnyak M. Yu. Parametric thermal model for the evolution of the Earth // *Astronomy Letters*. 2021. Vol. 47, Iss. 7. P. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063773721070070>. EDN: VETPNM.
- Roberts P. H., Jones C. A., Calderwood A. R. Energy fluxes and ohmic dissipation in the Earth's core // *Earth's core and lower mantle*. Ed. Jones C. A. London : CRC Press, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203207611>.
- Schubert G., Turcotte D. L., Olson P. *Mantle convection in the Earth and planets*. Cambridge University Press, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612879>.
- Stevenson D. J., Spohn T., Schubert G. Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets // *Icarus*. 1983. Vol. 54, Iss. 3. P. 466–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90241-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90241-5).
- Tarduno J. A., Cottrell R. D., Bono R. K., Oda H. [et al.]. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2020. Vol. 117, Iss. 5. P. 2309–2318. DOI: [10.1073/pnas.1916553117](https://doi.org/10.1073/pnas.1916553117).
- Wicht J., Sanchez S. Advances in geodynamo modelling // *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*. 2019. Vol. 113, Iss. 1–2. P. 2–50. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2019.1597074>.

References

- Reshetnyak, M. Yu. 2021. Parametric thermal model of the evolution of the Earth. *Pis'ma v Astronomicheskiiy zhurnal*, 47(7), pp. 525–534. DOI: <https://doi.org/10.31857/s032001082107007x>. EDN: KZFOSSQ. (In Russ.)
- Aubert, J., Labrosse, S., Poitou, C. 2009. Modelling the palaeo-evolution of the geodynamo. *Geophysical Journal International*, 179(3), pp. 1414–1428. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04361.x>.
- Christensen, U. R., J. Aubert, J. 2006. Scaling properties of convection-driven dynamos in rotating spherical shells and application to planetary magnetic fields. *Geophysical Journal International*, 166(1), pp. 97–114. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03009.x>.
- de Koker, N., Steinle-Neumann, G., Vlček, V. 2012. Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid *Fe* alloys at high *P* and *T*, and heat flux in Earth's core. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 109(11), pp. 4070–4073. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1111841109>.
- Gubbins, D., Thomson, C., Whaler, K. 1982. Stable regions in the Earth's liquid core. *Geophysical Journal International*, 68(1), pp. 241–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1982.tb06972.x>.
- Gubbins, D., Alfè, D., Davies, C., Pozzo, M. 2015. On core convection and the geodynamo: Effects of high electrical and thermal conductivity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 247, pp. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2015.04.002>.
- Reshetnyak, M. Yu. 2019. Evolution of the inner core of the Earth: Consequences for geodynamo. *Magnetohydrodynamics*, 55(1/2), pp. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.55.1-2.21>.
- Reshetnyak, M. Yu. 2022. Mantle cooling regulation and ancient geomagnetic field. *Russian Journal of Earth Sciences*, 22. Article number: ES2006. DOI: <https://doi.org/10.2205/2022es000797>. EDN: MDPDCD.
- Reshetnyak, M. Yu. 2021. Parametric thermal model for the evolution of the Earth. *Astronomy Letters*, 47(7), pp. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1063773721070070>. EDN: VETPNM.
- Roberts, P. H., Jones, C. A., Calderwood, A. R. 2003. Energy fluxes and ohmic dissipation in the Earth's core. In *Earth's core and lower mantle*. Ed. Jones C. A. London : CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203207611>.
- Schubert, G., Turcotte, D. L., Olson, P. 2001. *Mantle convection in the Earth and planets*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612879>.
- Stevenson, D. J., Spohn, T., Schubert, G. 1983. Magnetism and thermal evolution of the terrestrial planets. *Icarus*, 54(3), pp. 466–489. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(83\)90241-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(83)90241-5).

Tarduno, J. A., Cottrell, R. D., Bono, R. K., Oda, H. et al. 2020. Paleomagnetism indicates that primary magnetite in zircon records a strong Hadean geodynamo. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 117(5), pp. 2309–2318. DOI: 10.1073/pnas.1916553117.

Wicht, J., Sanchez, S. 2019. Advances in geodynamo modelling. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 113(1–2), pp. 2–50. DOI: <https://doi.org/10.1080/03091929.2019.1597074>.

Сведения об авторе

Решетняк Максим Юрьевич – ул. Б. Грузинская, 10, г. Москва, Россия, 123995;
Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН; Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Maxim Yu. Reshetnyak – 10 B. Gruzinskaya, Moscow, Russia, 123995;
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation; Dr Sci. (Phys.&Math.), Leading Researcher;
e-mail: m.reshetnyak@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4909-6336>

Особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов

В. А. Королёв

*Московский государственный университет, г. Москва, Россия;
e-mail: va-korolev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0002-3156-4146>*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
05.06.2023;

принята
к публикации
25.08.2023

Ключевые слова:

эколого-геологическая
система,
крупнообломочный
грунт,
литотоп,
эдафотоп,
микробиоценоз,
фитоценоз,
зооценоз

Эколого-геологические системы, формирующиеся на массивах из крупнообломочных грунтов, обладают рядом характерных особенностей как абиотических компонентов (литотопа, эдафотопа), так и биотических (микробиоценоза, фито- и зооценоза). Выявлено, что структура и функционирование указанных эколого-геологических систем (ЭГС) в значительной степени определяются особенностями их литотопа – сложно построенными массивами крупнообломочных грунтов с определенным генезисом (относящемуся к элювиальному, водному, ледниковому, склоновому или вулканогенно-осадочному ряду), геологическим строением, рельефом и экзогенными геологическими процессами, развитыми в пределах данных массивов. К основным особенностям литотопа ЭГС массива крупнообломочных грунтов относятся следующие: 1) дискретность строения массива, обусловленная обломками пород разной крупности; 2) форма обломков; 3) наличие и особенности порового заполнителя; 4) химико-минеральный состав обломков; 5) засоленность грунта; 6) геохимическая миграция веществ; 7) физико-механические свойства грунта; 8) выветриваемость грунта; 9) его обводненность; 10) выраженность в рельефе; 11) парагенез современных экзогенных геологических процессов (выветривание, эрозия, криогенные процессы, а также склоновые гравитационные процессы: обвалы, осыпи, каменные лавины и др.). Этот абиотический компонент влияет как на формирование почв, так и на формирование микробиоценозов, фито- и зооценозов, развитых в пределах этих систем. Рассмотрены особенности конкретной ЭГС массива крупнообломочных грунтов на примере гор Большой и Малый Ирмель на Южном Урале (Республика Башкортостан), для специфического биоценоза которых характерен бореальный горно-таежный тип. В формировании их фитоценозов большую роль играют лишайники-эпилиты накипного типа.

Для цитирования

Королёв В. А. Особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 67–82. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-67-82>.

Peculiarities of ecological and geological systems of coarse-clastic soil massifs

Vladimir A. Korolev

*Moscow State University, Moscow, Russia;
e-mail: va-korolev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0002-3156-4146>*

Article info

Received
05.06.2023;

accepted
25.08.2023

Key words:

ecological and geological
system,
coarse clastic soil,
lithotope,
edaphotope,
microbial cenosis,
phytocenosis,
zoocenosis

Abstract

Ecological and geological systems formed on massifs of coarse clastic soils have a number of characteristic features of both abiotic components (lithotope, edaphotope) and biotic (microbiocenosis, phyto- and zoocenosis). It has been revealed that the structure and functioning of these ecological and geological systems (EGS) are largely determined by the features of their lithotope – complexly built massifs of coarse clastic soils with a certain genesis (relating to the eluvial, water, glacial, slope or volcanogenic-sedimentary series), geological structure, relief and exogenous geological processes developed within these massifs. The main features of the EGS lithotope of the coarse-grained soil massif include the following: 1) discrete structure of the massif due to rock fragments of different sizes; 2) the shape of the debris; 3) the presence and features of the porous filler; 4) chemical and mineral composition of fragments; 5) soil salinity; 6) geochemical migration of substances; 7) physical and mechanical properties of the soil; 8) soil weathering; 9) its water cut; 10) expressiveness in relief; 11) paragenesis of modern exogenous geological processes (weathering, erosion, cryogenic processes, as well as slope gravitational processes: landslides, screes, stone avalanches, etc.). This abiotic component affects both the formation of soils and the formation of microbiocenoses, phyto- and zoocenoses developed within these systems. The features of a specific ecological-geological system of a coarse-clastic soil massif are considered on the example of the Big and Small Iremel mountains in the Southern Urals (Republic of Bashkortostan), whose specific biocenosis is characterized by a boreal mountain-taiga type. Scale-type epilithic lichens play an important role in the formation of their phytocenoses.

For citation

Korolev, V. A. 2024. Peculiarities of ecological and geological systems of coarse-clastic soil massifs. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 67–82. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-67-82>.

Введение

Важнейшим объектом исследований экологической геологии и геоэкологии является эколого-геологическая система (ЭГС), структура и систематика которой была предложена В. Т. Трофимовым (Трофимов, 2009). Природная ЭГС состоит из абиотических компонентов (литотопа – массива грунтов как литогенной основы эколого-геологической системы и эдафотопа – почв) и биотических компонентов (микробоценоза, фитоценоза и зооценоза), взаимосвязанных и взаимообусловленных между собой (Трофимов, 2009). Однако к настоящему времени особенности многих эколого-геологических систем и их систематика изучены недостаточно. В частности, слабо охарактеризованы особенности ЭГС массивов крупнообломочных грунтов (Королёв, 2021; Королёв и др., 2022).

Целью работы является выявление общих особенностей эколого-геологической системы массива крупнообломочных грунтов, а также их характеристика на примере ЭГС массива Иремель.

Материалы и методы

В работе использованы результаты полевых наблюдений в пределах эколого-геологической системы массивов крупнообломочных грунтов гор Малый и Большой Иремель на Южном Урале, накопленные за разные годы, обобщены опубликованные данные по природным условиям изучаемого региона, свойствам различных крупнообломочных грунтов, а также по особенностям биоценозов, формирующимся на массивах крупнообломочных грунтов.

Горный массив Иремель входит в полосу центральных, наиболее высоких возвышенностей Южного Урала. Здесь выделяют Большой и Малый Иремель, которые поднимаются на общем основании горного массива (рис. 1).



Рис. 1. Космоснимок расположения района исследований
Fig. 1. The satellite image of the location of the area under study

Большой Ирмель (рис. 1) венчается платообразной вершиной, называемой "Кабан" и достигающей высоты 1 586 м. От центральной части Б. Ирмеля отходят два отрога: один на северо-запад под названием "Жеребчик", другой на юго-запад, заканчивающийся скалами "Синяк". На северо-восток от "Кабана" идет длинная седловина, являющаяся продолжением основной оси Ирмельского массива и связывающая Большой Ирмель с Малым. Малый Ирмель (рис. 1) несет на себе 5 сопковидных каменистых вершин со стенообразными скалистыми останцами. Малый Ирмель к востоку понижается крутыми террасированными склонами. В целом, вся горная группа Ирмеля имеет форму овала, вытянутого по главной оси с северо-востока на юго-запад на 20 км (Халитов, 2018).

В качестве анализируемого материала привлекались данные полевых маршрутных наблюдений, геологических, ботанических, энтомологических и иных коллекций, собранных на этой территории. Методологическая основа исследования – системный анализ, с помощью которого были выявлены системные признаки изучаемого объекта и его главные особенности.

Результаты и обсуждение

Эколого-геологические системы, формирующиеся на массивах из крупнообломочных грунтов, обладают особой структурой и рядом характерных особенностей как абиотических, так и биотических компонентов.

Структура природной эколого-геологической системы массива крупнообломочных грунтов показана на рис. 2. Биотоп этой ЭГС, состоящий из литотопа, гидротопа и эдафотопа, отличается по своим характеристикам от такового для ЭГС массивов других грунтов как скальных, так и дисперсных. При этом ее литотоп характеризуется специфическим рельефом (преимущественно предгорным и горным), составом грунтов (крупнообломочные грунты), специфическим парагенезом экзогенных геологических процессов, формирующих геодинамическое поле (*ГДП*) этой ЭГС, в составе которых преобладают гравитационные склоновые процессы, а также – специфическим геохимическим полем (*ГХП*), отличительными чертами которого являются его транзитный характер и способность к активной миграции различных веществ. Последнее обусловлено низкой сорбционной (поглотительной) способностью крупнообломочных грунтов по сравнению с другими дисперсными грунтами.

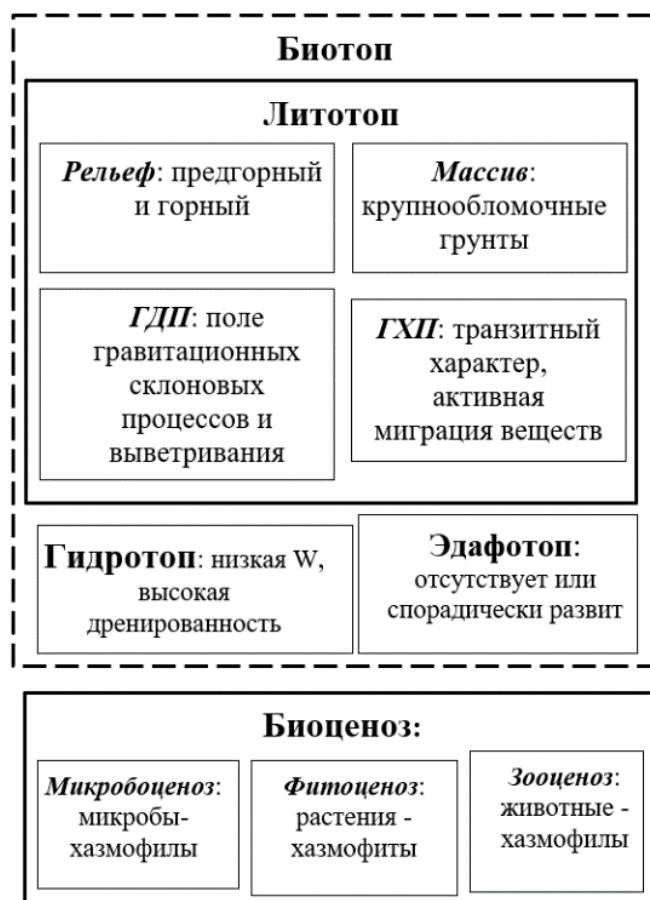


Рис. 2. Структура природной эколого-геологической системы массива крупнообломочных грунтов.

ГДП – геодинамическое поле; *ГХП* – геохимическое поле

Fig. 2. The structure of the natural ecological-geological system of coarse clastic soils massif.

GDF – geodynamic field; *GChF* – geochemical field

Гидротоп данной ЭГС также имеет существенные отличия от ЭГС массивов других грунтов. Они заключаются в том, что грунты, формирующие этот гидротоп, преимущественно маловлажные и их отличает высокая дренированность, обусловленная высокими коэффициентами фильтрации крупнообломочных грунтов, достигающими 200 и более м/сут.

Эдафотоп в структуре данной ЭГС имеет подчиненное значение, так как он может или совсем отсутствовать (в этом случае ЭГС будет неполной), или быть представленным только спорадически развитыми почвами.

Биоценоз в структуре ЭГС массива крупнообломочных грунтов всегда представлен тремя обязательными компонентами: микробиоценозом, фитоценозом и зооценозом, хотя все эти компоненты также отличаются по своим характеристикам от ЭГС массивов других грунтов, о чем будет сказано ниже.

Рассмотрим подробнее характерные особенности абиотических и биотических компонентов ЭГС.

Общие особенности абиотических компонентов ЭГС массивов крупнообломочных грунтов

К абиотическим компонентам ЭГС массивов крупнообломочных грунтов относится их литотоп, характеризуемый составляющими его грунтами (массивом или грунтовой толщей), рельефом и существующими в массиве геохимическими, геодинамическими и геофизическими полями, а также гидротопом.

Литотопы ЭГС массивов крупнообломочных грунтов могут быть представлены различными гранулометрическими разностями, указанными в табл. 1. Гранулометрический состав этих грунтов определяется согласно классификации ГОСТ 25100-2020¹.

Таблица 1. Литотопы природных однородных эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов

Table 1. Lithotopes of natural homogeneous ecological-geological systems of large clastic soil massifs

Генезис	Литотоп	Эколого-геологическая система		
		аккумулятивная	транзитно-аккумулятивная	транзитная
	Крупнообломочный окатанный*			
Осадочный, вулканогенно-осадочный	валунный	–	ледниковая	ледниковая
	галечниковый	морская	ледниковая, морская	ледниковая, морская, аллювиальная
	гравийный	морская	ледниковая, морская, деляпсивная	ледниковая, морская, аллювиальная
	Крупнообломочный неокатанный*			
	глыбовый	элювиальная	коллювиальная, деляпсивная	аллювиальная, вулканогенно-осадочная
	щебнистый	элювиальная	коллювиальная, деляпсивная	аллювиальная, вулканогенно-осадочная
	дресвяный	элювиальная	коллювиальная, деляпсивная	аллювиальная, вулканогенно-осадочная

Примечание. * С дисперсным заполнителем или без него, соответственно.

По генезису массивы крупнообломочных грунтов могут относиться к элювиальному, водному, ледниковому, склоновому и вулканогенно-осадочному ряду. Элювиальные крупнообломочные грунты образуются в основном в результате процессов физического, в том числе криогенного, выветривания и представлены неокатанными глыбами (камнями), щебнем и дресвой. К грунтам водного ряда относятся генетические типы крупнообломочных грунтов, образующихся в результате морской абразии и речной эрозии и представленные хорошо окатанными валунами, галькой и гравием. Крупнообломочные грунты ледникового генезиса формируются в результате деятельности ледников и представлены валунниками и моренными отложениями с тем или иным содержанием валунов, гальки и гравия разной степени окатанности. К крупнообломочным грунтам склонового ряда относятся грунты, образовавшиеся в результате гравитационных процессов и представленные такими генетическими типами, как коллювий (обвальный – дерупций и сейсмодерупций, осыпной – десерпций), деляпсий (каменные лавины), десерпций (криодесерпций, термодесерпций и гидродесерпций). Крупнообломочные грунты склонового ряда состоят из неокатанных обломков пород, как правило, не подверженных сортировке. Крупнообломочные грунты вулканогенно-осадочного генезиса также состоят из неокатанных остроугольных обломков.

К основным особенностям литотопа ЭГС массива крупнообломочных грунтов относятся следующие (табл. 2).

¹ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., 2020. 38 с.

Таблица 2. Общие особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов
 Table 2. General features of ecological-geological systems of large clastic soil massifs

Особенности абиотических компонентов ЭГС	Особенности эдафотопы и биотических компонентов ЭГС			
Литотоп	Эдафотоп	Микробоценоз	Фитоценоз	Зооценоз
– дискретность строения массива и высокая открытая пористость; – различная форма обломков; – высокая роль порового заполнителя; – зависимость минерального состава, засоленности, проницаемости и физико-механических свойств от состава материнских пород и заполнителя; – низкая влажность в зоне аэрации и высокая выветриваемость; – характерный рельеф; – специфический парагенез экзогенных геологических процессов	– меньшее* разнообразие генетических типов почв вплоть до их отсутствия (очаговое распространение); – развитие почв только на грунтах с заполнителем; – меньшая мощность почв; – меньшее видовое разнообразие почвенных микро- и макроорганизмов; – меньшая биомасса почвенных организмов; – приуроченность к корам выветривания	– преобладание микробов-хазмофилов; – меньшее видовое разнообразие и плотность популяций микробов; – меньшая биомасса микробов; – приуроченность микробных сообществ к заполнителю	– преобладание растений-хазмофилов; – меньшее видовое разнообразие растений; – большая роль лишайников-эпилитов; – большая фитомасса на грунтах с заполнителем; – меньшая биомасса растений; – подчинение фитоценозов широтной и высотной зональности (поясности)	– преобладание животных-хазмофилов; – меньшее видовое разнообразие животных; – отсутствие подземных роющих животных; – меньшая общая биомасса животных; – преобладание беспозвоночных животных; – приуроченность животных к стабилизированным участкам массивов

Примечание. * Меньшее – здесь и далее имеется ввиду по сравнению с ЭГС массивов других дисперсных грунтов.

1. *Дискретность строения* массива, обусловленная обломками пород разной крупности, формирует специфическое поровое (пустотное) пространство с весьма крупными межобломочными порами, соизмеримыми с размером самих обломков и лежащими в пределах от 2 мм до 20–50 см и более. Объем и структура порового пространства этих грунтов зависят от степени однородности гранулометрического состава и формы обломков. Наибольшая пористость характерна для однородных (монодисперсных) по гранулометрическому составу крупнообломочных грунтов. С увеличением неоднородности пористость уменьшается.

2. *Форма обломков* отражает генезис породы и влияет на многие свойства крупнообломочных грунтов. Округлая форма крупных обломков, обусловленная окатыванием в ходе транспортировки грунтов аллювиального, морского или ледникового генезиса, формирует большую проницаемость грунтов по сравнению с неокатанными обломками, образующимися в результате выветривания, эоловых или гравитационных процессов – обвалов, осыпей и т. п. Окатанность крупных обломков аллювия в русловом потоке осуществляется в основном за счет обтирания обломков переносимым с большой скоростью гравийным и песчаным материалом. Поэтому она быстро увеличивается на первых километрах течения, а затем медленно растет, приближаясь к некоторому пределу. Морская галька характеризуется лучшей окатанностью и почти симметричной формой (шарообразной, дискообразной, эллипсоид вращения), а речная – худшей и часто асимметрична. Окатанность крупных обломков ледниковых моренных отложений зависит от дальности транзита и состава пород. Обломки водно-ледниковых отложений лучше окатаны, чем моренные. Неправильную, угловатую и неокатанную форму имеют ветрогранники, образующиеся на поверхности за счет обтачивания крупных обломков песчинками, переносимыми ветром (*Воскресенский, 1980; Борсук и др., 2015*).

3. Существенную роль играет наличие или отсутствие *порового заполнителя и его вид*: при наличии в крупнообломочных грунтах песчаного заполнителя более 40 % (по массе) или глинистого заполнителя более 30 % свойства грунта резко меняются и в наименовании такого грунта должны приводиться и содержание заполнителя, и его состояние. Количество и вид порового заполнителя во многом определяют транзитные свойства массива (проницаемость) и объем его геологического пространства, доступного для биоты в качестве среды обитания и убежища. Крупнообломочные грунты без заполнителя обладают самыми высокими коэффициентами фильтрации среди всех грунтов, достигающими 200 м/сут и более (в отдельных случаях может превышать тысячу метров в сутки).

4. *Химико-минеральный состав* крупнообломочных грунтов, особенно без заполнителя, полностью зависит от петрографического состава обломков материнской породы и может быть представлен различными грунтами магматического, метаморфического или осадочного генезиса. Вместе с тем крупнообломочные грунты без заполнителя являются незасоленными, тогда как грунты с заполнителем могут быть в той или иной степени засоленными, что сказывается на формировании биоценоза.

5. *Засоленность* крупнообломочных грунтов определяется согласно ГОСТ 25100-2020² и в целом (особенно для грунтов с заполнителем) увеличивается в соответствии с климатической зональностью с севера на юг.

6. *Геохимическая миграция* элементов в массивах крупнообломочных грунтов без заполнителя отвечает промывному режиму, при наличии песчано-глинистого заполнителя может иметь сложный характер.

7. Для крупнообломочных грунтов характерен большой диапазон изменения *прочностных и деформационных характеристик*. Такие грунты без заполнителя обладают большей прочностью и меньшей деформируемостью, чем с заполнителем.

8. Для многих крупнообломочных грунтов характерна высокая *выветриваемость*, которая обусловлена их химико-минеральным составом и климатическими факторами. Такие грунты при содержании песчано-глинистого заполнителя более 10 % необходимо характеризовать и по степени выветрелости согласно ГОСТ 25100-2020³.

9. Крупнообломочные грунты не удерживают воду. Поэтому их *влажность* обычно не велика и зависит от условий обводненности и положения в разрезе относительно уровня подземных вод. Для них характерна низкая и средняя обводненность на равнинных гумидных территориях и низкая в горах и аридных районах, включая пустыни.

10. Для массивов крупнообломочных грунтов характерны определенные *формы рельефа*. Денудационно-эрозионный и денудационно-аккумулятивный рельефы характерны для горных и предгорных регионов, где крупнообломочные грунты образуются в результате процессов выветривания. На равнинных территориях крупнообломочные грунты формируют эрозионно-аккумулятивный и аккумулятивный рельефы в результате процессов речной и ледниковой эрозии.

11. В пределах массивов крупнообломочных грунтов формируются специфические парагенезисы современных *геологических процессов*, таких как выветривание, гравитационные склоновые процессы (обвалы, осыпи, каменные лавины), курумы, эрозия и др.

² ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., 2020. 38 с.

³ Там же.

Общие особенности биокосных и биотических компонентов ЭГС массивов крупнообломочных грунтов

Своими характерными особенностями отличаются и биокосные (эдафотоп) и биотические компоненты ЭГС крупнообломочных грунтов – микробоценоз, фито- и зооценоз, что отражено в табл. 2.

Особенности эдафотона. Почвы, формирующиеся на массивах крупнообломочных грунтов, имеют очаговое (не сплошное) распространение или вообще отсутствуют. Например, на активных осыпных склонах почвы не образуются. Они также не формируются на активных курумах, хотя на стабилизированных курумниках, особенно вне криолитозоны, на них могут возникать очаговые эдафотопы.

Другим фактором, обуславливающим образование эдафотона на массивах крупнообломочных грунтов, является гранулометрический состав обломков: на массивах валунных и глыбовых грунтов, состоящих из наиболее крупных обломков, почвы не образуются; лишь на дресвяных и гравийных грунтах иногда создаются условия для образования почв.

Важное значение имеет также наличие или отсутствие заполнителя в крупнообломочных грунтах: при его наличии, особенно глинистого состава, эдафотоп формируется гораздо быстрее, чем при отсутствии заполнителя.

Мощность почв, образующихся на массивах крупнообломочных грунтов, обычно не велика и зависит от состава материнских пород, тепло- и влагообеспеченности (климатической зональности), активности элювиальных процессов, приводящих к разрушению крупных обломков.

Особенности микробоценоза ЭГС массивов крупнообломочных грунтов плохо изучены. Однако можно уверенно заключить, что микробоценозы на крупнообломочных грунтах более бедны и в видовом, и в популяционном отношении, по сравнению с микробоценозами, образующимися на массивах иных дисперсных или скальных грунтов ввиду отсутствия благоприятной для микробов среды обитания в таких грунтах. Отмечается большее количество микроорганизмов в крупнообломочных грунтах с заполнителем, по сравнению с таковыми без заполнителя. Кроме того, на очагах почв, а также на лишайниках и редкой растительности можно отметить увеличение численности микроорганизмов в массивах крупнообломочных грунтов.

Особенности фитоценоза. Для массивов крупнообломочных грунтов огромную роль в формировании фитоценоза играют эпилитные лишайники – они первыми заселяют поверхности обломков пород, обуславливая развитие процесса биологического выветривания. Многими авторами отмечается ведущая роль эпилитных лишайников в этом процессе (Плюснин, 2009; Королёв, 2023).

При этом наибольшее развитие популяций эпилитных лишайников отмечается на стабилизированных осыпях, стабилизированных каменных развалах, стабилизированных курумниках и т. п., по сравнению с активными массивами крупнообломочных грунтов.

Что же касается высших растений, то на массивах крупнообломочных грунтов доминируют растения-хазмофиты, многие из которых относятся к облигатным видам. Ряд из них приспосабливается к жизни даже на активных осыпях. В целом же видовое разнообразие высших растений на крупнообломочных грунтах невелико по сравнению с другими дисперсными грунтами. Наибольшая фитомасса формируется на грунтах с заполнителем. Древесные растения на таких грунтах почти отсутствуют, за редким исключением некоторых стелящихся форм.

Особенности зооценоза. В составе зооценозов ЭГС массивов крупнообломочных грунтов преобладают беспозвоночные организмы, особенно членистоногие. Они находят условия для устройства гнезд и убежищ в полостях крупнообломочных грунтов. Многие из них ведут ночной образ жизни, скрываясь днем в пустотах между крупными обломками и выходя ночью за пропитанием. Для многих насекомых характерно развитие в личиночных стадиях именно в пустотах между камнями. При этом они предпочитают стабилизированные толщи крупнообломочных грунтов.

В таких грунтах практически не встречаются роющие млекопитающие – кроты, землеройки и др. Лишь некоторые виды мелких млекопитающих находят себе условия для создания нор и убежищ в крупнообломочных грунтах. Большинство же крупных млекопитающих посещает массивы крупнообломочных грунтов лишь эпизодически. То же самое относится и к птицам.

Таким образом, вышеперечисленные особенности абиотических и биотических компонентов обуславливают и специфические ЭГС массивов крупнообломочных грунтов в целом. Рассмотрим эти особенности на примере ЭГС массива крупнообломочных грунтов хребта Ирмель.

ЭГС массивов крупнообломочных грунтов гор Ирмель

Эколого-геологические системы массивов крупнообломочных грунтов широко распространены во многих горных регионах, в том числе в горных районах Урала. Один из них – горный массив Ирмель, который входит в полосу центральных, наиболее высоких возвышенностей Южного Урала. Различают Большой и Малый Ирмель, которые поднимаются на общем основании горного массива (см. рис. 1).

Литомон эколого-геологической системы массива крупнообломочных грунтов массива Ирмель представлен многочисленными каменными развалами и курумниками (рис. 3 и 4).

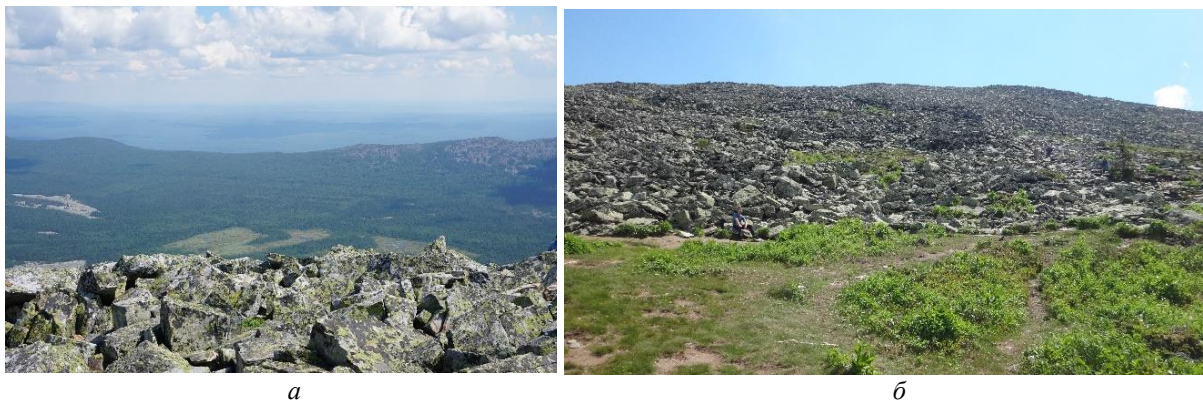


Рис. 3. Каменные развалы на вершине горы Большой Ирмель (фото С. В. Королёва, 2022)
 Fig. 3. Stone collapses on the top of Mount Big Iremel (photo by S. V. Korolev, 2022)

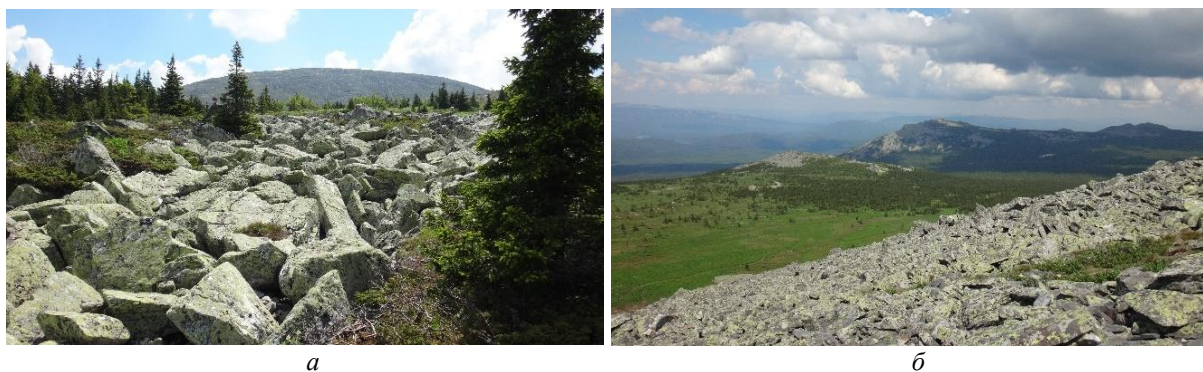


Рис. 4. Шлейфы крупнообломочных грунтов на склонах горы Большой Ирмель
 (фото С. В. Королёва, 2022)
 Fig. 4. Plumes of coarse-grained soils on the slopes of Mount Big Iremel (photo by S. V. Korolev, 2022)

В геологическом отношении массив горы Ирмель представляет собой крупное антиклинальное поднятие, в ядре которого на дневной поверхности отмечаются терригенные образования зигальгинской свиты среднего рифея, состоящие преимущественно из кварцитовидных песчаников и кварцитов с подчиненными прослоями углесодержащих сланцев.

Наиболее распространенный грунт горного массива Ирмель представлен сланцами мусковит-хлорит-кварцевого состава (табл. 3). Этот грунт характеризуется относительно высоким содержанием кремния, алюминия, железа и калия, что связано с главными породообразующими минералами: кварцем и минералами группы хлорита.

Таблица 3. Химический состав пород каменных развалов массива Ирмель, % (Халитов, 2018)
 Table 3. Chemical composition of the rocks of the stone ruins of the massif of Iremel, % (Khalitov, 2018)

ппп	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O	S _{общ}
2,35	76,07	0,55	12,89	4,50	0,13	0,67	0,11	0,53	2,05	0,02	0,01

На поверхности массива Ирмель развиты курумники, каменные россыпи и осыпи из крупнообломочных грунтов (рис. 3–5). Каменистые россыпи (каменные развалы) представляют собой элювиально-делювиальные образования крупнообломочных продуктов распада коренных пород: глыб кварцевого песчаника величиной от нескольких кубических дециметров до 2–3 м³, а также сланцами хлорит-иллит-кварцевого состава. Происхождение и развитие их связано с неровностями – поверхностями, выступающими в виде боковых хребтов, невысоких гребней, валов, не прикрытых почвенно-растительным покровом (Цветаев, 1960).

Самыми характерными чертами в геоморфологическом облике горного массива Ирмель являются плоские поверхности на вершинах и ступенчатые склоны (нагорные террасы), которые распространены соответственно в гольцовом и подгольцовом поясах. Эти формы представлены водораздельными поверхностями в виде горизонтальных или слабо наклоненных площадок и нагорных террас, плоскими горными вершинами

и усеченными сопками с возвышающимися стенообразными скалистыми останцами, ступенчатыми склонами, которые покрыты подвижными каменными россыпями – курумами.



Рис. 5. Развалы крупнообломочных грунтов на вершине горы Большой Иремель
(фото С. В. Королёва, 2022)

Fig. 5. Collapses of coarse-grained soils at the top of Mount Big Iremel (photo by S. V. Korolev, 2022)

Особенности эдафотона. На горном массиве Иремель было изучено и описано пять почвенных разрезов, от подножия до вершины (Халитов, 2018). Их морфометрические характеристики приведены в табл. 4.

Таблица 4. Морфометрическая характеристика почв горного массива Иремель (Халитов, 2018)
Table 4. Morphometric characteristics of the soils of the Iremel massif (Khalitov, 2018)

Высота над уровнем моря почвенного разреза, м	Профиль (мощность, см)	Название почвы
600	O(0-5)–EL(5-10)–BEL(10-41)–BT(41-80)–BC(80-90)	Торфянисто-подзолистая легкосуглинистая почва на суглинистом делювии
1 300	O(0-5)–AU(5-22)–AC(22-29)	Перегнойно-темногумусовый литозем легкосуглинистый с обломками на элювии коренных пород
1 330	АН (0-12)–АС (12-32)	Перегнойно-темногумусовый литозем легкосуглинистый с обломками на элювии коренных пород
1 350	T(0-16)	Торфяно-литозем с обломками коренных пород
1 400	O(0-3)–AU(3-18)–AC(18-32)–C(32-65)	Перегнойно-темногумусовая легкосуглинистая с обломками на элювии коренных пород

Все почвы на курумниках распространены фрагментарно: они отсутствуют на вершине массива и появляются лишь в нижних частях склонов (рис. 6). В распространении почв горного массива Иремель прослеживается вертикальная зональность. В горном поясе елово-пихтовых лесов распространены подзолистые почвы. Подгольцовый пояс (1 150–1 300 м) представлен литоземами перегнойно-темногумусовыми. В гольцовом поясе в понижениях развиты темногумусовые почвы (рис. 6).

В разрезе перегнойно-темногумусовой почвы на элювии коренных пород, описанном на пологом платообразном склоне горного массива Иремель на высоте около 1 400 м, выделяются следующие горизонты: O (мощностью 0–3 см) – дернина, состоящая из слаборазложившихся растительных остатков мха, злаков; горизонт AU – (3–18 см) – темно-серый, влажный, рыхлый, мелкокомковатый, легкий суглинок, с корнями трав, редкими мелкими обломками материнской породы. Переход к горизонту замечен по цвету, граница

слабоволнистая; горизонт АС – (18–32 см) – серо-буроватый, плотнее вышележащего, влажный, охристые пятна и полосы по ходу корней, крупнокомковатый, средний суглинок, с корнями растительности, мелкими обломками материнской породы. Переход к горизонту постепенный: горизонт С (32–65 см) – бурый, сырой, мелкокомковатый, средний суглинок с многочисленными обломками коренной породы. Переход к горизонту резкий, граница слабоволнистая (Халитов, 2018).

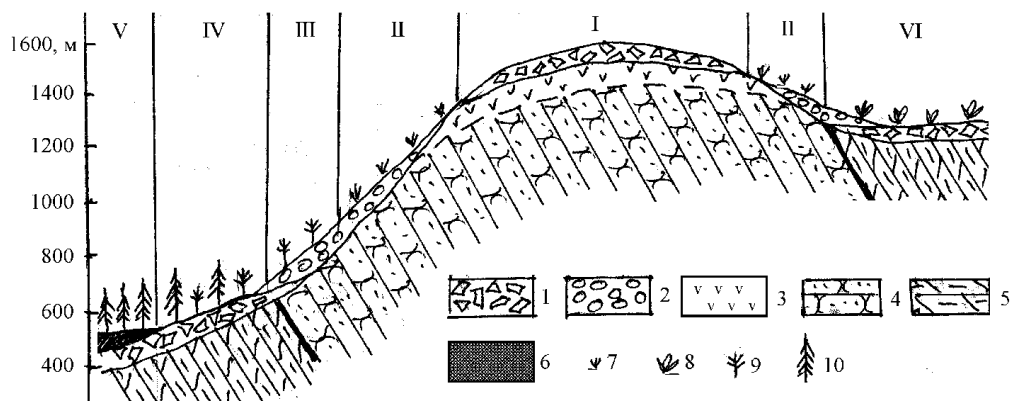


Рис. 6. Схема литотопа и почвенных катен на горном массиве Иремель (составил В. А. Королёв):

I – каменные развалы с эпилитными лишайниками; II – курумники с редкими очагами темногумусовых почв; III – курумники с очагами перегнойно-темногумусовых почв; IV – каменные развалы на плато с очагами подзолистых почв; V – подзолистые и болотные почвы; VI – каменные развалы на плато с очагами темногумусовых почв; 1 – каменные развалы; 2 – курумники; 3 – блочный элювий коренных пород; 4 – песчаники и кварциты среднего рифея; 5 – сланцы среднего рифея; 6 – торфяно-подзолистая почва; 7 – редкие очаги горно-тундровой растительности; 8 – очаги горно-луговой растительности; 9 – подгольцовая растительность; 10 – ель сибирская с пихтой

Fig. 6. Scheme of the lithotope and soil catenas on the Iremel massif (compiled by V. A. Korolev):

I – stone ruins with epilithic lichens; II – kurumniks with rare foci of dark humus soils; III – kurumniks with foci of humus-dark-humus soils; IV – stone ruins on a plateau with pockets of podzolic soils; V – podzolic and marsh soils; VI – stone ruins on a plateau with pockets of dark humus soils; 1 – stone ruins; 2 – kurumniks; 3 – block eluvium of bedrocks; 4 – sandstones and quartzites of the Middle Riphean; 5 – Middle Riphean shales; 6 – peat-podzolic soil; 7 – rare foci of mountain-tundra vegetation; 8 – pockets of mountain-meadow vegetation; 9 – subalpine vegetation; 10 – Siberian spruce with fir

Горно-тундровые почвы встречаются локально на вершинах горного массива Иремель в пределах плоских мелкоземистых участков, окруженных каменными россыпями – курумниками. Эти почвы развиваются под травянисто-моховыми и лишайниковыми тундрами. Они не имеют развитого генетического профиля и залегают непосредственно на коренных породах.

В целом географическое распределение почв на массиве Иремель связано с физико-географическими условиями почвообразования. На горном массиве Иремель происходит вертикальная смена природных зон в последовательности: лесостепная – таежная – горно-луговая – тундровая. Почвы горно-луговой и тундровой зон являются уникальными для территории Республики Башкортостан и Южного Урала. Выявлено, что западный склон Южного Урала в плане почвенного покрова представляет контрастную смену почвенных разностей, отличающуюся от равномерных смен в пределах предгорных экотонів Предуралья и Сыртовых возвышенностей юга Башкирии. Это выражается в быстрой и контрастной смене почв типов, отличающихся друг от друга в высотном градиенте, что подтверждается выводами классификационной таксономической идентификации почв по субстантивно-морфологическим признакам (Халитов, 2018).

Особенности микробиоценоза. Природный микробиоценоз ЭГС массива Иремель сформировался под влиянием геологических, климатических и биологических факторов. Однако в целом, микробные сообщества здесь не столь многочисленны, как в более южных регионах Урала. Наибольшее видовое разнообразие микроорганизмов (бактерий, низших водорослей и грибов) отмечается в почвах этого массива. Но поскольку в верхних частях массива Иремель почвы почти не развиты и встречаются очагово в понижениях, то и микрофауна развита слабо. Большинство отмеченных здесь микроорганизмов, в основном азотфиксирующих бактерий, являются симбиотическими, чья жизнедеятельность связана с лишайниками, растениями и животными.

Собственно поверхностные крупнообломочные грунты (курумники) массива Иремель бедны микроорганизмами и плохо изучены.

Особенности фитоценоза. Растительный покров горного массива Иремель характеризуется проявлением закономерностей высотной поясности континентального типа умеренных широт в средневысотной горной

стране. Пояса изменяются от лесостепей предгорных равнин, представленных на высотах от 300–350 до 650–700 м, поясом широколиственных и смешанных лесов на западных склонах и сосново-березовых лесов во внутренних долинах и на восточных склонах, а на высотах от 650–700 до 1100–1200 м – поясом горной елово-пихтовой тайги, развитым на более высоких хребтах центральной возвышенной полосы. Растительность подгольцового и гольцового поясов представлена мелколесьем, стланиковыми кустарниками, горными лугами и тундрами (Цветаев, 1960).

На высоте 1 300–1 400 м начинается гольцовый пояс горного массива Иремель. Все растения здесь приспособлены к переживанию суровых малоснежных зим, а генетическое большинство из них связано с кустарниковыми и лесными формациями.

Главное место в растительном сообществе принадлежит мхам и лишайникам, которые покрывают большую часть поверхности нагорных террас, образуя горные тундры. Из мхов наиболее распространен кукушкин лен. Из лишайников – накипные и листоватые на камнях, кустистые и различные виды кладонии (олений мох) между камнями и на почвах (Цветаев, 1960).

В горно-тундровом поясе ЭГС массива Иремель насчитывается около 106 видов лишайников, из них 59 видов относятся к эпигейным, т. е. развивающимся на почве, а доля эпилитных и эпифитных примерно одинакова (рис. 7) (Плюснин, 2009).



Рис. 7. Таллом эпилитного лишайника рода ризокарпон (*Rhizocarpon*) на камнях курумника г. Большой Иремель, высота 1 500 м (фото С. В. Королёва, 2022)
Fig. 7. Thallus of epilithic lichen (*Rhizocarpon*) on the stones of the kurumnik of Mt. Big Iremel, height 1 500 m (photo by S. V. Korolev, 2022)

В таксономической структуре лишенофлоры ведущее положение по видовому разнообразию занимают семейства *Cladoniaceae* (43 вида) и *Parmeliaceae* (35). Несколько видов насчитывают семейства *Umbilicariaceae* (8) и *Alectoriaceae* (6). Лишенофлора хребта отличается от таковой в горных тундрах Северного и Приполярного Урала существенно меньшим разнообразием лишайников семейств *Peltigeraceae* и *Stereocaulaceae*.

Растительность каменных россыпей и скал представлена накипными лишайниками желтовато-зеленого и темно-серого цвета и листоватыми лишайниками темно-серого цвета. Их доля в составе ЭГС массива Иремель составляет 22 % относительно общего числа распространенных здесь видов. Между камнями и в понижениях, где накапливается мелкозем, растут кустистые лишайники (Цветаев, 1960).

Состав лишайниковых группировок определяется в первую очередь субстратными условиями. Лихеносинузии по субстратной приуроченности распадаются на три типа: эпилитные, эпигейные и эпифитные. На скалах и каменистых россыпях формируются пионерные группировки, в которых ключевую роль играют именно лишайники. Первоначально каменистые субстраты занимают накипные (эпилитные) лишайники, среди которых наибольшим разнообразием, обилием и встречаемостью характеризуются рода *Pertusaria*, *Lecanora*, *Lecidea*, *Porpidia* и *Rhizocarpon* (рис. 7). На более поздних стадиях сукцессии ведущую роль играют листоватые лишайники семейств пармелиевые и умбиликариевые. Из пармелиевых наиболее характерные виды – *Arctoparmelia centrifuga*, *Brodiaea intestiniformis*, *Melanelia hepaticum*, *M. stygia*, *Parmelia omphalodes* и *P. saxatilis*. Умбиликариевые преимущественно представлены *Lasallia rossica* и четырьмя видами рода *Umbilicaria* – *U. cylindrica*, *U. deusta*, *U. hyperborean* и *U. proboscidea*. Стереокаулоновые эпилитные группировки, очень характерные для горных тундр Северного и Приполярного Урала, на хребте Малый Иремель встречаются крайне редко (Плюснин, 2009).

В эпигейных лихеносинузиях (т. е. развитых на почвах между камнями) также прослеживается постепенная смена группировок. На начальных стадиях сукцессий обнаженный минеральный грунт зарастает криптогамными корочками, в которых немаловажная роль принадлежит накипным лишайникам. Затем в состав лихеносинузий включаются чешуйчатые, бокальчатые и палочковидные кладонии (*Cladonia*).

На стадии формирования сплошного лишайникового покрова доминирующая роль переходит к кустистым кладониям.

Эпифитные лишайниковые группировки (т. е. развитые на растениях) горы Малый Иремель несколько богаче, чем на Приполярном и Северном Урале.

Таким образом, сравнительный анализ изученной лишайнобиоты горно-тундрового рефугиума показывает выраженные признаки ее обеднения арктомонтанными видами и активного внедрения в ее состав лесных видов. Чувствительными к трансформации ценологических условий оказались представители родов *Nephroma*, *Peltigera*, *Stereocaulon*, *Sphaerophorus*. В то же время многие виды сохраняют свое присутствие в составе лишайниковых группировок, несмотря на происходящие изменения окружающей среды. К их числу относятся виды родов *Cladonia* и *Cetraria*. Стабильный видовой состав на протяжении всего Уральского хребта показывают комплексы эпилитных видов и эпигейных лишайников, заселяющих обнаженные скальные и крупнообломочные породы (Плюснин, 2009).

Для высших растений курумников ЭГС горы Большой Иремель характерны хазмофиты (рис. 8, 9).



Рис. 8. Качим уральский (*Gypsophila uralensis*) (а) и ясколка енисейская (*Cerastium jenisejense*) (б) среди каменистых развалов на г. Большой Иремель, высота 1 500 м (фото М. Скотниковой, 2019)

Fig. 8. Ural kachim (*Gypsophila uralensis*) (a) and Yenisei chickweed (*Cerastium jenisejense*) (b) among the stony ruins on Mt. Big Iremel, height 1 500 m (photo by M. Skotnikova, 2019)



Рис. 9. Стланик можжевельника сибирского (*Juniperus sibirica*), высота 1 400 м (а) и граница нижней части курумника со смешанным лесом и сибирской елью (*Picea obovata*) (б) на курумнике г. Большой Иремель (фото С. В. Королёва, 2022)

Fig. 9. Siberian juniper dwarf (*Juniperus sibirica*), height 1 400 m (a) and the border of the lower part of the kurum with mixed forest and Siberian spruce (*Picea obovata*) (b) on the kurum of Mt. Big Iremel (photo by S. V. Korolev, 2022)

Экологические типы *травянистых растений* гольцового пояса здесь следующие (Цветаев, 1960).

- Опушенные психрофилы – растения, имеющие особые приспособления к обитанию во влажных и холодных условиях. Они имеют войлочное опушение листьев с обеих или одной стороны: ива пушистая (*Salix cordata*), лапчатка снежная (*Potentilla nivea*), дриада (*Dryas* sp.).

- Неопушенные психрофилы имеют для защиты от охлаждения воздухоносные полости в стеблях и листьях: сверция (*Swertia* sp.), лаготис уральский (*Lagotis uralensis*), козлец голый (*Scorzonera glabra*). К ним также относятся высококорные суккуленты: радиола иремельская (*Rhodiola iremelica*) и др.

• Психрофильная группа узколистных злаков с плотными жесткими листьями и стеблями: осоки (*Carex* sp.), овсяница каменистая (*Festuca rupicola*), пушица (*Eriophorum* sp.).

Выделяются следующие типы Ирмельских тундр:

• Травяно-моховая тундра (на высотах 1 300–1 400 м). Здесь мхи составляют основу растительного покрова и придают буровато-зеленую окраску ландшафту. Преобладает кукушкин лен (*Polytrichum juniperinum*), образующий мощную подушку до 10–15 см. Из трав наиболее характерны овсяницы (*Festuca* sp.), осоки (*Carex* sp.), анемоны (*Anemone* sp.), чемерицы (*Veratrum* sp.), раковая шейка (*Bistorta officinalis*), колокольчики (*Campanula* sp.). Из кустарников больше ивы пушистой (*Salix cordata*).

• Овсянице-лишайниково-моховая тундра. В ее составе преобладает овсяница (*Festuca* sp.), образующая плотную дерновину, осоки (*Carex* sp.), анемоны (*Anemone* sp.), лаготис уральский (*Lagotis uralensis*), келерия алтайская (*Festuca altaica*). Из кустарников много ивы пушистой (*Salix cordata*), которая образует куртины заросли. Лишайниково-моховой покров представлен кладониями (*Cladonia*).

• Пятнисто-осоково-ритидиевая тундра. Она по своему виду и флористическому составу схожа с предыдущим типом в связи с суровыми климатическими условиями и развитием каменных россыпей; покрытие растительностью составляет не более 0,6 поверхности.

Травянисто-кустарниковый ярус на задернованных участках довольно густой. В нем преобладают осоки (*Carex* sp.) и анемоны (*Anemone* sp.), меньше – овсяницы (*Festuca altaica*) и дриады (*Dryas* sp.). Из кустарников – ива пушистая (*Salix cordata*).

Особенности зооценоза. В составе зооценоза ЭГС массива Ирмель наиболее многочисленны беспозвоночные, в том числе – членистоногие, относящиеся к бореально-таежной фауне. Из класса паукообразных на массиве Ирмель отмечено два вида гнафозид (*Gnaphosidae*), восемь видов пауков-балдахинников (*Linyphiidae*), семь видов пауков-волков (*Lycosidae*), три вида пауков-крабов (*Thomisidae*) и один вид сенокосцев – *Mitopus morio* (Мухайлов и др., 2016).

Кроме того, из класса губоногих (*Chilopoda*) найдены два вида костянок (*Lithobiidae*) и один вид геофил – *Strigamia pusilla*. Из цикадовых на массиве Ирмель обнаружен один вид – *Mongolojassus bicuspidatus*. Из фауны перепончатокрылых (*Hymenoptera*) встречаются муравьи *Formica aquilonia*. Из клопов (*Heteroptera*) на массиве Ирмель отмечено три вида (Мухайлов и др., 2016).

Весьма разнообразны различные жуки (*Coleoptera*), в том числе жужелицы (*Carabidae*), что неудивительно, так как они относятся к одному из двух ведущих семейств арктической фауны (наряду с сем. *Staphylinidae*), активно осваивающих условия горно-тундровой зоны, в том числе на вершинах массива Ирмель. Из жуков, занесенных в Красную книгу РФ, на массиве Ирмель отмечена жужелица Карпинского (*Carabus karpinskii*) (Захаров и др., 2000). Кроме того, тут обнаружено 16 видов прочих жужелиц, среди них: *Nebria uralensis*, *Bembidion (Metallina) properan*, *Harpalus (Pseudoophonus) rufipes*, *Dicheirotrichus (Oreoxenus) mannerheimi ponojensis*, *Microlestes minutulus*, *Pterostichus (Cryobius) kaninensis*, *Pt. (Petrophilus) kokeili archangelicus*, *Pt. (Petrophilus) urengaicus*, *Byrrhus fasciatus*; 1 вид шелкунов – тундровый шелкун (*Hypnoidus rivularius*) – особенно много встречается на горе Малый Ирмель; 2 вида пилольщиков, характерных для горных тундр: *Byrrhus fasciatus*, *B. pilula*; 3 вида листоедов: *Chrysolina (Pleurosticha) lagunovi*, *Ch. (Arctolina) poretskyi* и *Ch. (Anopachys) relucens*, являющийся эндемиком горы Большой Ирмель, а на Малом Ирмеле отсутствует; 5 видов долгоносиков: *Otiorhynchus (Phalantorrhynchus) politus*, *O. (Postaremus) nodosus*, *Boreohypera diversipunctata*, *Trichalophus biguttatus*, *Tr. biguttatus* (Мухайлов и др., 2016). Многие из отмеченных здесь видов жужелиц являются эндемиками Южного Урала.

Спектры широтных (широтнo-высотных) элементов в сообществах герпетобионтных членистоногих обследованных двух вершин массива Ирмель почти совпадают друг с другом и включают альпийские⁴ (здесь с ними объединены монтанно-альпийские, монтанные и альпийско-предгорные), арктоальпийские, бореомонтанные (включая аркто-борео-монтанные и гипоаркто-бореомонтанные), бореальные (и аркто-бореальные), температурные (включая суббореальные) и полизональные виды (рис. 10).

Фауна булавоусых чешуекрылых (*Lepidoptera*) на массиве Ирмель исследовалась А. Ш. Габидуллиным (Габидуллин, 1987), М. Г. Миграновым (Мигранов, 1991) и к настоящему времени довольно хорошо изучена. Из чешуекрылых, занесенных в Красную книгу РФ, здесь обитают парусники (*Papilionidae*): эндемичный подвид парнассуса Аполлона (*Parnassius apollo limicola*), мнемозина (*Parnassius mnemosyne*) и махаон (*Papilio machaon*); из семейства нимфалид (*Nymphalidae*) встречается адмирал (*Vanessa atalanta*) (Горбунов и др., 1992).

Кроме того, на массиве Ирмель отмечены толстоголовки *Ochlodes venatus* и *Mushampia tessellum*; белянки *Leptidea sinapis*, *Aporia crataegi*, *Pontia daplidice*, *P. chloridice*, *Anthocharis cardamines*, *Euchloe simplonia*, *Pieris napi*, *P. brassicae*, *P. rapae*; желтушки *Colias palaeno*, *C. hyale*; бархатницы *Lopinga achine*, *Lasiommata maera*, *Hyponephele lycaon*, *Aphantopus hyperanthus*, *Hipparchia autonoe* (рис. 11, а), *Satyrus dryas*, *Melanargia russiae*, *Erebia cyclopius*, *E. aethiops*, *E. ligea*, *E. euryale*, *Coenonympha arcania*, *C. glycerion*,

⁴ Альпийскими тут названы виды, обитающие выше границы леса независимо от ее абсолютной высоты, как это принято в рамках программы GLORIA (Pauli et al., 2015).

Oeneis jutta; нимфалиды: *Nymphalis urticae*, *Polygonia vau-album*, *P. c-album*, *Apatura ilia*, *Melitaea didyma*, *M. cinxia*, *M. diamina*, *M. aurelia*, *M. athalia*, *Argynnis lathonia*, *A. paphia*, *A. aglaja*, *A. niobe*, *A. adippe*, *A. ino*, *Clossiana euphrosyne*, *Boloria aquilonaris*, *Clossiana selene*, *C. titania*, *C. Thore*, а также многочисленные голубянки: *Neolycaena rhymnus*, *Nordmannia spini*, *Fixsenia pruni*, *Lycaena helle*, *L. virgaureae*, *L. dispar*, *L. hippothoe*, *Polyommatus icarus*, *P. semiargus*, *P. amanda*, *P. artaxerxes*, *P. atys*, *P. damon*, *P. eumedon*, *P. nicias*, *P. optilete*, *Plebejus argus*, *P. argyrognomon*, *P. idas*, *Maculinea alcon*, *M. teleius*, *Celastrina argiolus*. Таким образом, всего в составе ЭГС на массиве Иремель отмечено семьдесят три вида булавоусых чешуекрылых (*Lepidoptera*, *Rhopalocera*), большинство из которых относится к альпийским, аркто-альпийским и бореально-таежным видам.

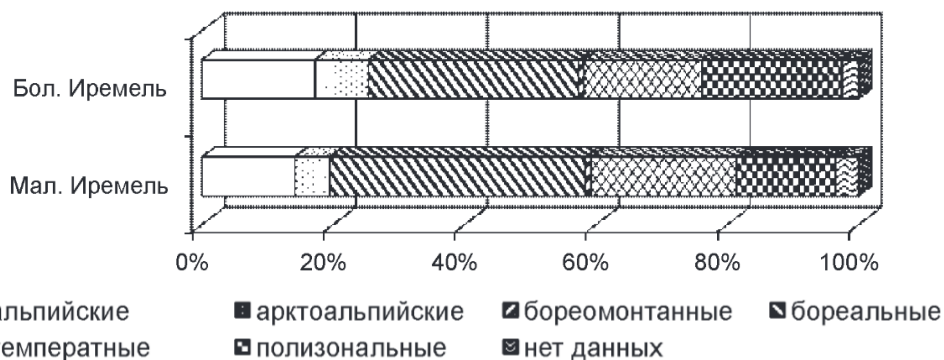


Рис. 10. Спектры зональных (широтно-высотных) элементов в сообществах герпетобионтных членистоногих горных вершин массива Иремель (Мухайлов и др., 2016)

Fig. 10. Spectra of zonal (latitudinal-altitude) elements in communities of herpetobiont arthropod mountain peaks of the Iremel massif (Mikhailov et al., 2016)

Из пресмыкающихся тут встречается живородящая ящерица (*Lacerta vivipara*) (рис. 11, б) и некоторые змеи, находящие и устраивающие укрытия в пустотах между камнями.

Орнитофауна довольно многочисленна и разнообразна. Из птиц здесь обычны представители бореальной орнитофауны – лесной конек (*Anthus trivialis*), зяблик (*Fringilla coelebs*), кукушка (*Perisoreus infaustus*) и многие др. В районе массива Иремель отмечены виды птиц, связанные с горными тундрами, криволесьями и подгольцовым поясом темнохвойных лесов Урала. Имеются достаточно стабильные гнездовые группировки кукушки (*Perisoreus infaustus*), черногорлой завирушки (*Prunella atrogularis*), пятнистого сверчка (*Locustella lanceolata*), соловья-красношейки (*Luscinia calliope*), синехвостки (*Luscinia cyanurus*) и ряда других видов. Установлено гнездование номинального подвида дербника, ястребиной совы (*Surnia ulula*), бородатой неясыти (*Strix nebulosa*), беркута (*Aquila chrysaetos*), филина (*Bubo bubo*) и др.



Рис. 11. Сатир автоноя (*Hipparchia autonoe*) (а) и ящерица живородящая (*Lacerta vivipara*) (б) на каменных развалах г. Большой Иремель (фото С. В. Королёва, 2022)

Fig. 11. Autonomous satyr (*Hipparchia autonoe*) (a) and viviparous lizard (*Lacerta vivipara*) (b) on the stone ruins of Mt. Big Iremel (photo by S. V. Korolev, 2022)

Из млекопитающих в составе зооценоза ЭГС массива Иремель отмечены полевки обыкновенная (*Microtus arvalis*) и рыжая (*Myodes glareolus*), еж европейский (*Erinaceus europaeus*), бурозубка обыкновенная (*Sorex araneus*). Иногда на склонах появляется лисица (*Vulpes vulpes*), барсук обыкновенный (*Meles meles*) и заходит северный олень (*Rangifer tarandus*). На массиве Иремель был также обнаружен лемминг лесной

(*Myopus schisticolor*) – вид достаточно редкий на Урале. Необходимо добавить, что в окрестности массива Ирмель наблюдается сезонная миграция многих животных, особенно птиц, обилие животных наблюдается летом.

Таким образом, для ЭГС массива крупнообломочных грунтов хребта Ирмель характерен специфический биоценоз бореально-горно-таежного типа.

Заключение

Обоснована структура эколого-геологической системы массивов крупнообломочных грунтов, учитывающая особенности ее абиотических и биотических компонентов.

Охарактеризованы основные общие особенности эколого-геологических систем массивов крупнообломочных грунтов, которые обусловлены их литотопами. Геолого-геоморфологические особенности литотопа крупнообломочных грунтов оказывают определяющее влияние на формирование своеобразных почвенных условий, а также сообществ микроорганизмов, растений и животных в пределах данных эколого-геологических систем.

Эколого-геологическая система массивов крупнообломочных грунтов гор Ирмель является уникальным природным образованием, в котором сформировалось специфическое сообщество растений-хазмофитов и животных-хазмофилов.

Практическое значение работы связано с возможностью использования ее результатов для обоснования эколого-геологических изысканий на массивах крупнообломочных грунтов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова "Эколого-геологические системы: структура, многообразие, систематика и их анализ" (раздел 0110 (для тем по госзаданию), номер 5-4-2021, номер ЦИТИС 121042200089-3). Автор благодарит С. В. Королёва за предоставленные фотографии и материалы полевых исследований на массиве Ирмель.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Борсук О. А., Воскресенский И. С. Морфометрия щебня и галек как показатель условий формирования четвертичных осадков // Актуальные проблемы палеогеографии и стратиграфии плейстоцена: материалы Всерос. конф. "Марковские чтения 2015 года". М. : Географический факультет МГУ, 2015. С. 41–43.
- Воскресенский И. С. Анализ щебнисто-галечных отложений для целей определения генезиса рыхлых осадков // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1980. № 4. С. 75–79.
- Габидуллин А. Ш. Реликтовые булавоусые на Южном Урале в составе природного комплекса Ирмель // Булавоусые чешуекрылые СССР. Тез. докл. к семинару "Систематика, фаунистика, экология, охрана булавоусых чешуекрылых", Новосибирск, 2–5 октября 1987 г. Новосибирск, 1987. С. 20–21.
- Горбунов П. Ю., Ольшванг В. Н., Лагунов А. В., Мигранов М. Г. [и др.]. Дневные бабочки Южного Урала. Екатеринбург : УрО РАН, 1992. 132 с.
- Захаров В. Д., Лагунов А. В. Редкие и исчезающие животные Челябинской области // 6 лекций по экологии Челябинской области. Челябинск : ФМЛ № 31, 2000. С. 24–45.
- Королёв В. А., Трофимов В. Т. К построению общей классификации континентальных эколого-геологических систем // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2022. № 1. С. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-1-54-61>. EDN: FLVQMX.
- Королёв В. А. Взаимосвязь литолого-петрографического состава грунтов и видового разнообразия лишайников-эпилитов в эколого-геологических системах // Ломоносовские чтения. Секция геологии. Подсекция инженерной и экологической геологии : науч. конф. : сб. тез. докладов. М., 2023. С. 2–3.
- Королёв В. А. К разработке общей классификации эколого-геологических систем // Географические аспекты устойчивого развития регионов : IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 27–29 мая 2021 г. : сб. материалов. Гомель, 2021. С. 381–384.
- Мигранов М. Г. Булавоусые чешуекрылые Башкирии (определитель). Уфа : БНЦ УрО АН СССР, 1991. 132 с.
- Михайлов Ю. Е., Ермаков А. И. Состав и структура сообществ герпетобионтных членистоногих горных вершин Южного Урала // Фауна Урала и Сибири. 2016, № 1. С. 61–74. EDN: WYPCIN.
- Плюснин С. Н. Лихенобиота горно-тундрового рефугиума на Южном Урале (хребет Малый Ирмель) // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Киров, 1–2 декабря 2009 г. : в 2 ч. Киров, 2009. Вып. 7, ч. 2. С. 216–219.
- Трофимов В. Т. Эколого-геологическая система, ее типы и положение в структуре экосистемы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 48–52. EDN: KXRTUF.

- Халитов Р. М. Характеристика почв горно-лесной зоны Южного Урала (на примере хребтов Кибиз, Олотау и горного массива Иремель) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2018. 24 с.
- Цветаев А. А. Горы Иремель (Южный Урал). Физико-географический очерк. Уфа : Типография РУ, 1960. 82 с.
- Pauli H., Gottfried M., Lamprecht A., Niessner S. [et al.]. The GLORIA field manual. Standard Multi-Summit approach, supplementary methods and extra approaches. Vienna : GLORIA-Coordination, Austrian Academy of Sciences & University of Natural Resources and Life Sciences, 2015. 138 p.

References

- Borsuk, O. A., Voskresensky, I. S. 2015. Morphometry of crushed stone and pebbles as an indicator of the conditions for the formation of Quaternary sediments. Proceedings of All-Russian conf. "Markov readings of 2015" *Actual problems of paleogeography and stratigraphy of the Pleistocene*. Moscow, pp. 41–43. (In Russ.)
- Voskresensky, I. S. 1980. Analysis of rubble-pebble deposits for the purpose of determining the genesis of loose. *Lomonosov Geography Journal*, 4, pp. 75–79. (In Russ.)
- Gabidullin, A. Sh. 1987. Relic mace in the Southern Urals as part of the natural complex Iremel. In *Mace lepidoptera of the USSR*. Abstract of reports *Systematics, faunistics, ecology, protection of lepidoptera*. Novosibirsk, pp. 20–21. (In Russ.)
- Gorbunov, P. Yu., Ol'shvang, V. N., Lagunov, A. V., Migranov, M. G. et al. 1992. Diurnal butterflies of the Southern Urals. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Zakharov, V. D., Lagunov, A. V. 2000. Rare and endangered animals of the Chelyabinsk region. In *6 lectures on the ecology of the Chelyabinsk region*. Chelyabinsk, pp. 24–45. (In Russ.)
- Korolev, V. A., Trofimov, V. T. 2022. On the construction of a general classification of continental ecological-geological systems. *Moscow University Geology Bulletin*, 1, pp. 54–61. DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-1-54-61>. EDN: FLVQMX. (In Russ.)
- Korolev, V. A. 2023. Relationship between the lithological and petrographic composition of soils and the species diversity of epilithic lichens in ecological and geological systems. In coll. articles *Lomonosov Readings. Geology Section, Engineering and Environmental Geology Subsection*. Moscow, pp. 2–3. (In Russ.)
- Korolev, V. A. 2021. On the development of a general classification of ecological and geological systems. In coll. articles *Geographical aspects of sustainable development of regions: IV Intern. scientific and practical conference (Gomel, May 27–29, 2021)*. Gomel, pp. 381–384. (In Russ.)
- Migranov, M. G. 1991. Mace-winged Lepidoptera of Bashkiria (key). Ufa. (In Russ.)
- Mikhailov, Yu. E., Ermakov, A. I. 2016. Composition and structure of communities of herpetobiont arthropods in mountain peaks of the Southern Urals. *Fauna of the Urals and Siberia*, 1, pp. 61–74. EDN: WYPCIN. (In Russ.)
- Plyusnin, S. N. 2009. Lichenobiota of the mountain-tundra refugium in the Southern Urals (Maly Iremel ridge). Proceedings of All-Russian scientific-practical conf. *Problems of regional ecology in conditions of sustainable development*, Kirov, 1–2 December, 2009. In 2 parts. Kirov, Iss. 7, part 2, pp. 216–219. (In Russ.)
- Trofimov, V. T. 2009. Ecological and geological system, its types and position in the ecosystem structure. *Moscow University Geology Bulletin*, 2, pp. 48–52. EDN: KXRTUF. (In Russ.)
- Khalitov, R. M. 2018. Characteristics of soils in the mountain forest zone of the Southern Urals (on the example of the Kibiz, Olotau and Iremel mountain ranges). Abstract of Ph.D. dissertation. Ufa. (In Russ.)
- Tsvetaev, A. A. 1960. Iremel Mountains (Southern Urals). Physico-geographical essay. Ufa. (In Russ.)
- Pauli, H., Gottfried, M., Lamprecht, A., Niessner, S. et al. 2015. The GLORIA field manual. Standard Multi-Summit approach, supplementary methods and extra approaches. Vienna, GLORIA-Coordination, Austrian Academy of Sciences & University of Natural Resources and Life Sciences.

Сведения об авторе

Королёв Владимир Александрович – Ленинские горы, д. 1, г. Москва, Россия, 119991;
Московский государственный университет, д-р геол.-минерал. наук, профессор;
e-mail: va-korolev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0002-3156-4146>

Vladimir A. Korolev – 1 Leninskiye Gory, Moscow, Russia, 119991;
Moscow State University, Dr Sci. (Geol. & Miner.), Professor;
e-mail: va-korolev@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0002-3156-4146>

УДК 504.064.2

Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск)

Ж. Ю. Кочетова*, И. С. Лазарев, Н. В. Зиброва, О. В. Базарский

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", г. Воронеж, Россия;
e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
25.08.2023;

получена
после доработки
27.10.2023;

принята
к публикации
30.10.2023

Ключевые слова:

загрязнение почв,
военный аэродром,
фоновые концентрации
металлов,
класс опасности,
приоритетные
загрязнители,
кларки

Экологические проблемы на масштабных территориях (полигоны различного назначения, военные базы, аэродромы) обострились в связи с интенсификацией военной деятельности. Создание перечней приоритетных загрязнителей объектов окружающей среды, обязательных для контроля на таких территориях, является первоочередной задачей. В статье приводятся данные развернутого геохимического анализа почв территории аэродрома государственной авиации, на основании которого выявлены приоритетные контаминанты с учетом их валового содержания, классов опасности и повторяемости превышения опасных концентраций относительно фона. В Краснодарском крае (г. Крымск) за 4 года исследований проанализировано 32 пробы с территории аэродрома государственной авиации, а также установлены фоновые концентрации 22 металлов, нефтепродуктов, формальдегида и нитратного азота. Для определения классов опасности металлов с неустановленными предельно допустимыми концентрациями проведен корреляционный анализ, сопоставляющий классы опасности веществ и их кларки. По результатам исследования составлен рекомендуемый к контролю список загрязнителей, в который входят цезий, мышьяк, скандий, ниобий, свинец (I класс опасности); сурьма, формальдегид, нитратный азот (II); нефтепродукты (III). Вариабельность распределения концентраций загрязнителей на территории аэродрома зависит от особенности эксплуатации воздушных судов и специальной техники для обеспечения полетов. Во всех точках пробоотбора (начало – конец и периметр взлетно-посадочной полосы; рулежные дорожки; под глиссадой) головным загрязнителем почв является мышьяк, концентрации которого превышают фоновые в 16–36 раз. Установлено опасно высокое содержание в почвах аэродрома нефтепродуктов, формальдегида, нитратного азота, в некоторых точках – скандия и цезия.

Для цитирования

Кочетова Ж. Ю. и др. Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск). Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 83–90. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-83-90>.

Detailed chemical analysis of soils and identification of priority pollutants on the territory of the state aviation airfield (Krymsk)

Zhanna Yu. Kochetova*, Il'ya S. Lazarev, Nadezhda V. Zibrova, Oleg V. Bazarsky

*Military Educational and Scientific Center Air Force

"N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Voronezh, Russia;
e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Article info

Received
25.08.2023;

received
in revised form
27.10.2023;

accepted
30.10.2023

Key words:

soil pollution,
military airfield,
background
concentrations of metals,
hazard class,
priority pollutants,
clarks

Abstract

In connection with the intensification of military activities, environmental problems have worsened in large-scale territories. The primary task is to create lists of priority pollutants of environmental objects that are mandatory for control at landfills for various purposes, military bases, airfields. The paper presents the data of a detailed geochemical analysis of the soils of the state aviation airfield territory, on the basis of which priority contaminants were identified taking into account their gross content, hazard classes and the frequency of exceeding dangerous concentrations relative to the background. In the Krasnodar Territory (Krymsk), 32 samples from the territory of the state aviation airfield were analyzed over 4 years of research, and background concentrations of 22 metals, petroleum products, formaldehyde and nitrate nitrogen were also established. To determine the hazard classes of metals with unspecified maximum permissible concentrations, a correlation analysis was carried out comparing the hazard classes of substances and their clarks. Based on the results of the study, a list of pollutants recommended for control has been compiled including cesium, arsenic, scandium, niobium, lead (hazard class I); antimony, formaldehyde, nitrate nitrogen (II); petroleum products (III). The variability of the distribution of concentrations of pollutants on the airfield territory depends on the specifics of the operation of aircraft and special equipment for flight support. But at all sampling points (beginning – end, runway perimeter; taxiways; under the glide path), the main soil pollutant is arsenic, which concentrations exceed background concentrations by 16–36 times. The dangerously high content of petroleum products, formaldehyde, nitrate nitrogen, and scandium and caesium in some points in the airfield soils has been also found.

For citation

Kochetova, Zh. Yu. et al. 2024. Detailed chemical analysis of soils and identification of priority pollutants on the territory of the state aviation airfield (Krymsk). *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 83–90. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-83-90>.

Введение

Экологические проблемы, вызванные военной деятельностью, с каждым годом приобретают все большую актуальность. Это связано с ростом политической напряженности в мире, увеличением числа военных конфликтов и, как следствие, с активизацией эксплуатации существующих военных объектов и строительством новых, разработкой и испытанием различных видов техники, оружия, боеприпасов. Площадь территорий, принадлежащих военным ведомствам, по разным данным оценивается в 750–1,5 млн км². Во многих случаях это лесные массивы, плодородные земли, пастбища, изъятие которых из сферы промышленного и сельскохозяйственного производства негативно сказывается на общем экономическом потенциале государства и жизненном уровне населения (Кочетова и др., 2023). Экологическая ситуация на объектах военной деятельности и территориях ведения вооруженных конфликтов во всем мире близка к катастрофической. Наибольшей техногенной трансформации (по масштабам, глубине и необратимости) подвергается литосфера (Трофимов и др., 2019). Нарушение рельефа, химическое загрязнение почв и подземных вод сохраняется на высоком уровне даже через десятилетия после консервации военных баз, полигонов, аэродромов, складов с оружием и боеприпасами (Кочетова, 2019; Харькина, 2004; Hussain et al., 2008).

В западных странах (США, Канада, ЕС) с 1990-х годов составляются реестры деградации земель, относящихся к военным ведомствам или выкупленных частными лицами для строительства жилых комплексов, парков и для других гражданских нужд (Кочетова и др., 2023). Целью таких масштабных и дорогостоящих исследований является оценка экологического ущерба и разработка эффективных комплексных мероприятий по реабилитации почв. Надо отметить, что сравнение нескольких десятков отчетов о проведении этих работ показали отсутствие единой методики для интегральной оценки загрязнения почв и подземных вод даже в пределах одного штата или страны. К настоящему времени так и не определен перечень обязательных к контролю загрязняющих веществ почв объектов военной деятельности различного назначения. В разных работах для идентичных полигонов и аэродромов исследуют содержание в почвах от 2 до 6 металлов, причем без обоснования выбора именно этих элементов. В основном к ним относятся свинец и медь, реже кадмий, никель, цинк, барий, ртуть, марганец, олово, ванадий, мышьяк, хром. Нормативы содержания токсикантов в почвах могут отличаться на несколько порядков в пределах одной страны, при этом применяются различные методики оценки суммарного загрязнения почв, часто не имеющие научного обоснования (Tomic et al., 2018; Okkenhaug et al., 2016; Tandy et al., 2017; Knechtenhofer et al., 2003; Lafond et al., 2014; Bausinger et al., 2007; Meerschman et al., 2011).

Этой проблеме начинают уделять внимание в нашей стране (Смурыгин и др., 2019). В открытых источниках приводятся разрозненные данные о загрязнении почв аэродромов и аэропортов металлами (в основном, свинцом, кадмием, цинком, медью, никелем, хромом), нефтепродуктами, нитратным азотом, формальдегидом (Базарский и др., 2019; Геворгян и др., 2013; Кочетова, 2019; Kochetova et al., 2018). По мнению многих специалистов, к недостаткам существующей в России стандартной методики интегральной оценки загрязнения почв относятся: отсутствие нормативов для многих металлов с доказанной опасностью для окружающей среды и человека; необъективность расчета суммарного показателя загрязнения почв относительно только предельно допустимых или только фоновых концентраций токсикантов в почвах; отсутствие подхода к выбору приоритетных загрязнителей почв и, как следствие, необъективность оценки экологической ситуации¹ (Дабахов и др., 2005; Экологическое..., 2013).

Цель работы – установление приоритетных загрязнителей почв аэродромов с учетом класса опасности токсикантов, их валового содержания и повторяемости превышения фактической концентрации нормативов, апробация предложенного подхода на аэродроме государственной авиации и прилегающей к нему рекреационной зоне. Для достижения цели проведен многолетний мониторинг загрязнения почв в г. Крымск (Краснодарский край); проанализированы данные развернутого геохимического анализа почв на аэродроме и в прилегающем к нему поселке (под глиссадой); установлены фоновые концентрации загрязнителей в почвах; с учетом кларка определены классы опасности токсикантов с неустановленными предельно (ориентировочно) допустимыми концентрациями (П(О)ДК); рассчитаны коэффициенты концентрации элементов с учетом их валового содержания в почвах и токсичности.

Материалы и методы

Объект исследования – загрязнение почв металлами, мышьяком, нефтепродуктами, нитратным азотом и формальдегидом на территории аэродрома государственной авиации и прилегающей к нему

¹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

территории в г. Крымск. Характерной особенностью преобладающих на исследуемых территориях луговых почв является мощный перегнойный слой (до 100 см) темно-серого цвета с прочной зерновой структурой. Луговая почва по гранулометрическому составу тяжелосуглинистая. Содержание гумуса – 3,2–3,8 %, реакция почвенного раствора – слабокислая.

Пробы почв глубиной до 10 см отбирали методом конверта со сторонами 10 м в период с 2019 по 2022 гг. 4 раза в год в восьми точках с потенциально опасным содержанием загрязнителей. К таким участкам относятся: начало и конец взлетно-посадочной полосы (ВПП); перпендикулярное направление от ВПП на расстоянии 5–10 м; рулежные дорожки; под глиссадой на расстоянии 800 м от начала ВПП. Для установления фоновых концентраций загрязняющих веществ ($C_{фон}$) исследовали пробы такого же типа почв на расстоянии ~11 км от аэродрома.

Анализ проб проводили в аттестованной лаборатории комплексных исследований Научно-исследовательского института геологии на базе Воронежского государственного университета. Металлы и мышьяк в почве определяли методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии (РФА S8 TIGER, Bruker, Германия); нитратный азот – потенциметрически, нефтепродукты – гравиметрическим методом, формальдегид – фотометрическим методом с хромотроповой кислотой. Результаты исследований приведены на абсолютно сухой пробу. Погрешность определений соответствует нормам погрешности при определении химического минерального состава сырья по III категории точности в соответствии с ОСТ 41-08-212-04².

Для определения класса опасности металлов (с неустановленным П(О)ДК) рассчитывали ранговый коэффициент корреляции Спирмена K_s (Гмурман, 2004). Теснота связи между средним содержанием исследуемых элементов в земной коре (кларк Q , мг/кг) и известными классами опасности веществ характеризуется как высокая ($K_s = 0,85$ при уровне значимости 0,05). Это позволяет прогнозировать класс опасности металлов на основании их кларков с высокой надежностью (Виноградов, 1962; Касимов и др., 2015). Надо отметить, что такой высокий коэффициент корреляции возможно получить только в том случае, если цинк отнести ко II классу опасности, а не к I, как принято на сегодняшний день в нормативных документах³. Отметим, что в большинстве западных стран цинк относят ко II классу опасности (Кочетова и др., 2023).

При расчете повторяемости повышенного содержания загрязнителей в почвах P учитывали те вещества, фактические концентрации которых наиболее часто превышают фоновые концентрации в 2 и более раз. Это значение при $n \leq 14$ следует из общепринятого выражения для расчета суммарного показателя загрязнения почв Z_c ⁴

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_{фактi}}{C_{фонi}} - (n - 1), \quad (1)$$

где $C_{фактi}$ и $C_{фонi}$ – фактическая и фоновая концентрация i -го загрязнителя; $C_{фактi} / C_{фонi} = K_{ki}$ – коэффициент концентрации i -го загрязнителя; n – количество учитываемых загрязнителей с $K_{ki} \geq 1$.

При $Z_c < 16$ категория загрязнения почв считается допустимой (наиболее низкий уровень заболеваемости детей и минимум функциональных отклонений). В соответствии с известной методикой⁵ повторяемость загрязнения среды i -м компонентом считали устойчивой при $P_i \geq 30$ %, характерной – при $P_i \geq 50$ %.

Результаты и обсуждение

Предельно (ориентировочно) допустимые концентрации и кларки исследуемых загрязнителей представлены в табл. 1⁶ (Виноградов, 1962; Касимов, 2015). Металлы в таблице расположены по мере возрастания их кларков, жирным шрифтом выделены установленные методом подбора классы опасности элементов с неизвестным на сегодняшний день П(О)ДК, при этом K_s для всей выборки составляет 0,95. Фоновые концентрации загрязнителей за исследуемый период времени изменялись незначительно, их средние значения с относительным отклонением не более ± 15 % также представлены в табл. 1.

² Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293733/4293733706.pdf?ysclid=lrqkrb6g8514543684>.

³ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

⁴ Там же.

⁵ РД 52.24.643. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов н/Д. : Росгидромет, 2002. 55 с.

⁶ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

Повторяемость превышения фоновых концентраций загрязнителей в 2 раза и среднее соотношение $C_{\text{факт}} / C_{\text{фон}}$ в восьми точках контроля за исследуемый период представлены в табл. 2.

Таблица 1. Некоторые характеристики исследуемых загрязнителей почв
Table 1. Some characteristics of the studied soil pollutants

Загрязнитель	$C_{\text{фон}}$, мг/кг	П(О)ДК, мг/кг	Q , мг/кг	Класс опасности	Загрязнитель	$C_{\text{фон}}$, мг/кг	П(О)ДК, мг/кг	Q , мг/кг	Класс опасности
Олово (Sn)	0,28	–	3,5	1	Хром (Cr)	84,2	100	92	2
Цезий (Cs)	3,8	–	5,5	1	Ванадий (V)	58,4	150	121	3
Мышьяк (As)	0,22	10	5,6	1	Цирконий (Zr)	93,2	–	200	3
Скандий (Sc)	1,7	–	6,0	1	Стронций (Sr)	58,4	–	270	3
Ниобий (Nb)	2,9	–	10	1	Рубидий (Rb)	52,0	–	300	3
Галлий (Ga)	8,7	–	15	1	Барий (Ba)	396	–	510	3
Свинец (Pb)	10,2	130	17	1	Марганец (Mn)	644	1 500	710	3
Кобальт (Co)	6,7	5,0	17	2	Титан (Ti)	2 117	–	3 900	4
Сурьма (Sb)	0,48	4,5	18	2	Железо (Fe)	30 114	–	40 600	4
Иттрий (Y)	23,9	–	28	2	Формальдегид	1,8	7,0	–	2
Медь (Cu)	26,7	132	39	2	Нитраты (NO_3^-)	3,4	130	–	2
Никель (Ni)	22,8	80	50	2	Нефтепродукты	38,6	100*	–	3
Цинк (Zn)	39,3	220	75	1(2)					

Примечание. * ПДК нефтепродуктов, установленная по наиболее значимым критериям вредности (Рубин и др., 2013).

Таблица 2. Результаты исследования загрязнения почв аэродрома и приаэродромной территории
Table 2. Results of the study of soil pollution of the airfield and the aerodrome territory

Загрязнитель	Sn	Cs	As	Sc	Nb	Ga	Pb	Co	Sb	Y	Cu	Ni	Zn
P , %	16	100	100	31	77	0	54	16	54	0	25	21	27
K_{ki}	2,6	5,3	27	6,2	4,2	1,7	4,0	1,7	4,2	1,1	2,1	1,8	2,8
Загрязнитель	Cr	V	Zr	Sr	Rb	Ba	Mn	Ti	Fe	ФА	NO_3^-	НП	–
P , %	0	0	13	9	19	16	0	27	0	100	100	100	–
K_{ki}	1,8	1,7	2,2	2,1	2,7	2,9	1,2	3,7	1,6	8,9	7,6	19	–

Примечание. Выделены загрязнители с устойчивой и характерной повторяемостью превышения фоновых концентраций в 4 раза.

Наиболее часто встречающиеся превышения опасного уровня загрязнения почв на аэродроме государственной авиации характерны для элементов I класса опасности – цезия, мышьяка, скандия, ниобия и свинца; II класса опасности – сурьмы, формальдегида и нитратного азота. Нефтепродукты, относящиеся к III классу опасности, содержатся в каждой исследуемой пробе, причем их содержание в почвах, отобранных в начале и конце ВПП, а также под глиссадой достигает 11 ПДК. Таким образом, развернутый химический анализ почв показал, что в установленный ранее перечень обязательных к контролю соединений в почвах аэродромов (Геворгян, 2013; Голубев, 2007; Кочетова, 2019), необходимо включить такие элементы, как цезий, скандий, ниобий, сурьма.

Повышенное содержание цезия на территориях аэродромов государственной авиации возможно объяснить тем, что этот металл применяют в составе присадок к топливу для уменьшения радиолокационной заметности шлейфов выхлопных газов; карбонат цезия добавляют в стекло для повышения стабильности и долговечности волоконной оптики и приборов ночного видения. Скандий широко используется для получения прочных, жаростойких и легких алюминий-скандиевых сплавов, применяемых в самолетостроении; компонентов микроэлектроники и флуоресцирующих красок для разметки ВПП; для производства осветительных приборов высокой интенсивности, используемых на аэродромах. Из чистого ниобия или его сплавов изготавливают детали летательных аппаратов. Сурьма все больше применяется в полупроводниковой промышленности при производстве диодов и инфракрасных детекторов, а также в качестве присадки к смазочным материалам подшипников скольжения.

Ниже перечислены убывающие по кратности фону ряды приоритетных загрязнителей в разных точках пробоотбора почв на аэродроме и суммарные показатели загрязнения почв (1):

- начало и конец ВПП: $\text{НП}_{29} > \text{As}_{23} > \text{ФА}_{22} > \text{Cs}_{6,6} > \text{Sb}_{6,3} > (\text{NO}_3^-)_{5,3} > \text{Nb}_{4,8} > \text{Pb}_{2,7} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 93$;
 перпендикулярно ВПП: $\text{As}_{16} > \text{НП}_{14} > \text{Pb}_{5,0} > \text{ФА}_{4,4} > (\text{NO}_3^-)_{4,3} > \text{Cs}_{3,4} > \text{Sb}_{2,2} > \text{Nb}_{2,4} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 45$;
 рулежные дорожки: $\text{As}_{36} > \text{НП}_{21} > (\text{NO}_3^-)_{11} > \text{Cs}_{7,1} > \text{Nb}_{4,7} > \text{Pb}_{4,2} > \text{ФА}_{2,8} > \text{Sb}_{2,1} > \text{Sc}_{\text{H/O}}$; $Z_c = 85$;
 под глиссадой: $\text{As}_{32} > \text{НП}_{9,8} > (\text{NO}_3^-)_{9,7} > \text{Sc}_{7,6} > \text{ФА}_{6,3} > \text{Sb}_{6,0} > \text{Nb}_{4,8} > \text{Pb}_{3,6} > \text{Cs}_{2,8}$; $Z_c = 75$.

Основными загрязнителями территории аэродрома в г. Крымск во всех точках пробоотбора являются мышьяк и нефтепродукты. Суммарный уровень загрязнения проб почв характеризуется как "опасный" ($Z_c = 32 - 128$). Если оценивать уровень загрязнения почв индивидуальными неорганическими веществами с учетом их класса опасности, то почвы классифицируются как слабозагрязненные (концентрация мышьяка – элемента первого класса опасности – не превышает или равна 1 ПДК⁷). По нефтепродуктам почвы считаются сильно загрязненными, так как их концентрация превышает 5 ПДК⁷. Высокие значения Z_c получены и за счет введения цезия и скандия в перечень контролируемых соединений, которые ранее никогда не учитывались при оценке экологической ситуации на территориях аэродромов и аэропортов. Обычно считается, что штатный режим эксплуатации аэродромов влияет на загрязнение почв на допустимом уровне (*Лазарев и др., 2022*).

Вариабельность концентраций загрязняющих веществ в точках пробоотбора обусловлена, прежде всего, особенностью эксплуатации летательных аппаратов и средств авиационно-технического обеспечения полетов. Так, наибольшее количество загрязнителей (в том числе формальдегида, несгоревшего топлива и металлосодержащих присадок, входящих в его состав) выбрасывается в атмосферный воздух и осажается на поверхность почв в радиусе до нескольких километров от ВПП при работе двигателя самолета в форсажном режиме (при взлете – посадке). Этим объясняется высокое содержание загрязнителей в почвах в начале и конце ВПП и под глиссадой на расстоянии 800 м от ВПП.

При расчете суммарного показателя загрязнения почв относительно фоновых концентраций (1) не учитываются классы опасности элементов. Содержание в почвах головных компонентов – мышьяка и нефтепродуктов – оценивается как эквивалентное по токсичности воздействия на окружающую среду. За счет того что нефтепродукты на подобных объектах исследования всегда превышают концентрации остальных загрязнителей в десятки раз, происходит "разбавление" высокотоксичных соединений менее опасными, при этом суммарная оценка загрязнения почв занижена и не является объективной.

Для устранения этого недостатка использована стандартная методика определения комплексного индекса загрязнения атмосферы⁸. Единичный индекс загрязнения для i -го вещества рассчитывается по формуле

$$\left(\frac{C_{\text{факт}i}}{C_{\text{фон}i}}\right)^q = (K_{Ki})^q, \quad (2)$$

где $q = 1,5; 1,3; 1,0$ – показатели степени для элементов I, II, III класса опасности соответственно, используемые для приведения всех классов к изоэффективной концентрации веществ III класса опасности.

Тогда с учетом валового содержания и токсичности ряды приоритетных загрязнителей почв аэродрома имеют вид:

начало и конец ВПП: $As_{110} > \Phi A_{66} > \text{НП}_{29} > Cs_{17} > Sb_{11} > Nb_{11} > (NO_3)^-_{8,7} > Pb_{4,4} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 250$;
перпендикулярно ВПП: $As_{64} > \text{НП}_{14} > Pb_{11} > \Phi A_{6,9} > (NO_3)^-_{6,7} > Cs_{6,3} > Nb_{3,7} > Sb_{2,8} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 108$;
рулежные дорожки: $As_{216} > (NO_3)^-_{23} > \text{НП}_{21} > Cs_{19} > Nb_{10} > Pb_{8,6} > \Phi A_{3,8} > Sb_{2,6} > Sc_{\text{H/O}}$; $Z_{c^*} = 297$;
под глиссадой: $As_{181} > Sc_{21} > (NO_3)^-_{19} > \text{НП}_{9,8} > Nb_{11} > \Phi A_{11} > Sb_{10} > Pb_{6,8} > Cs_{4,7}$; $Z_{c^*} = 266$.

В этом случае наиболее опасными загрязнителями почв аэродромов выступают мышьяк, нитратный азот, скандий, формальдегид, нефтепродукты. Опасная экологическая ситуация по величине интегрального показателя загрязнения почв Z_{c^*} , полученного суммированием $(K_{Ki})^q$, складывается в зоне рулежных дорожек и под глиссадой.

Заключение

Общепринятый перечень металлов, контролируемых на территориях авиационных комплексов (мышьяк, свинец, медь, никель, цинк, марганец и др.), необходимо дополнить такими элементами, как цезий, скандий, ниобий, сурьма. Развернутый химический анализ почв показал их устойчивое и характерно высокое содержание в почвах как на территории аэродрома, так и под глиссадой в рекреационной зоне. Во всех точках пробоотбора концентрации этих элементов за четырехлетний период наблюдения превышали фоновые в 4 и более раз. Проведенный корреляционный анализ между классами опасности металлов и их кларками позволил отнести цезий, скандий, ниобий к элементам I класса опасности, сурьму – ко II классу.

Максимальное загрязнение почв аэродрома в г. Крымск характерно для зон взлетно-посадочной полосы и рулежных дорожек, что согласуется с ранее проведенными исследованиями. Во всех точках пробоотбора установлено преобладающее содержание мышьяка и нефтепродуктов; в почвах под

⁷ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021. 635 с.

⁸ РД 52.04.667-2005. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006. 60 с.

траекторией взлета – посадки самолетов отмечается также характерное повышение содержания продуктов неполного сгорания топлива (нитратного азота, формальдегида).

Наиболее опасными соединениями с точки зрения их валового содержания в почвах и токсичности являются мышьяк, нитратный азот, формальдегид и скандий. Это необходимо учитывать при проведении экологического мониторинга на аэродромах государственной авиации и прилегающих к ним территориях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Базарский О. В., Кочетова Ж. Ю. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнение грунтов приаэродромной территории // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 1. С. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-71>. EDN: GISEOE.
- Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571. EDN: SIZCQF.
- Геворгян В. М., Пономарева О. И., Кемер О. В. Экологические особенности почвенного покрова аэродромных комплексов гражданской авиации // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 4(4). С. 795–798. EDN: RGZYRP.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. 479 с.
- Голубев С. В. Загрязнение почв округа Домодедово тяжелыми металлами: дис. ... канд. геогр. наук: 03.00.27. М., 2007. 128 с.
- Дабахов М. В., Дабахова Е. В., Титова В. И. Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2005. 165 с.
- Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17. EDN: UCGNHL.
- Кочетова Ж. Ю. Авиационно-ракетный кластер как новый класс объектов геоэкологического мониторинга // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-3-79-91>. EDN: DGBOBJ.
- Кочетова Ж. Ю., Базарский О. В., Пантелеев Д. А. Экология почв военных полигонов. Воронеж: Научная книга, 2023. 184 с.
- Лазарев И. С., Кочетова Ж. Ю., Маслова Н. В., Терентьев В. В. Интегральная оценка загрязнения почв при реконструкции аэродрома // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46, № 3. С. 448–462. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-448-462>. EDN: XABGQV.
- Рубин В. М., Ильюкова И. И., Кремко Л. М., Присмотров Ю. А. [и др.]. Гигиеническое обоснование нормативов ПДК нефтепродуктов в почвах Республики Беларусь // Гигиена и санитария. 2013. № 92(2). С. 99–101. EDN: PZMPQB.
- Смурыгин А. В., Бакин Э. Н., Асеев В. А. Особенности экологического обеспечения в Вооруженных силах Российской Федерации // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2019. № 1(10). С. 393–395. EDN: PKLSBQ.
- Трофимов В. Т., Харьковина М. А., Жигалин А. Д., Барабошкина Т. А. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 3–13. EDN: XUPFWG.
- Харьковина М. А. Экологические последствия военных действий // Энергия: экономика, техника, экология. 2004. № 7. С. 56–59. EDN: OWWJQV.
- Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель / под общ. ред. С. А. Шобы, А. С. Яковлева, Н. Г. Рыбальского. М.: НИИ-Природа, 2013. 309 с.
- Bausinger T., Bonnaire E., Preuss J. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun // Science of the Total Environment. 2007. Vol. 382, Iss. 1–2. P. 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.
- Hussain T., Gondal M. A. Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. Vol. 136. P. 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
- Knechtenhofer L. A., Xifra I. O., Scheinost A. C., Flühler H. [et al.]. Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: Small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2003. Vol. 166, Iss. 1. P. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200390017>.
- Kochetova Z. Yu., Bazarskii O. V., Maslova N. V. Filtration of heavy metals in soils with different degrees of urbanization and technogenic load // Russian Journal of General Chemistry. 2018. Vol. 88, Iss. 13. P. 2990–2996. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070363218130261>. EDN: NKOHNE.

- Lafond S., Blais J. F., Mercier G., Martel R. A counter-current acid leaching process for the remediation of contaminated soils from a small-arms shooting range // *Soil and Sediment Contamination*. 2014. Vol. 23, Iss. 2. P. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.808171>.
- Meerschman E., Cockx L., Islam M. M., Meeuws F. [et al.]. Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals // *Ambio*. 2011. Vol. 40. P. 417–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6>.
- Okkenhaug G., Gebhardt K.-A. G., Amstaetter K., Bue H. L. [et al.]. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils: Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study // *Journal of Hazardous Materials*. 2016. Vol. 307. P. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.005>.
- Tandy S., Meier N., Schulin R. Use of soil amendments to immobilize antimony and lead in moderately contaminated shooting range soils // *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 324, Part B. P. 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.034>.
- Tomić N. T., Smiljanić S., Jović M., Gligorić M. [et al.]. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – pseudo-total concentration // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2018. Vol. 229. Article number: 301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.

References

- Bazarskij, O. V., Kochetova, Zh. Yu. 2019. Model of evaporation of kerosene droplets in the atmosphere and soil pollution of the aerodrome territory. *Vestnik of MSTU*, 22(1), pp. 64–71. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-1-64-71>. EDN: GISEOE. (In Russ.)
- Vinogradov, A. P. 1962. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the Earth's crust. *Geochemistry International*, 7, pp. 555–571. EDN: SIZCQF. (In Russ.)
- Gevorgyan, V. M., Ponomareva, O. I., Kemer, O. V. 2013. Ecological features of the soil cover of aerodrome complexes of civil aviation. *Izvestia RAS SamSC*, 15(4–4), pp. 795–798. EDN: RGZYRP. (In Russ.)
- Gmurman, V. E. 2004. Probability theory and mathematical statistics. Moscow. (In Russ.)
- Golubev, S. V. 2007. Soil pollution of the Domodedovo district with heavy metals. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Dabakhov, M. V., Dabakhova, E. V., Titova, V. I. 2005. Heavy metals: Ecotoxicology and problems of rationing. N. Novgorod. (In Russ.)
- Kasimov, N. S., Vlasov, D. V. 2015. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Lomonosov Geography Journal*, 2, pp. 7–17. EDN: UCGNHL. (In Russ.)
- Kochetova, Zh. Yu. 2019. Aviation-rocket cluster as a new class of objects of geocological monitoring. *Geographical Bulletin*, 3(50), pp. 79–91. DOI: <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-3-79-91>. EDN: DGBOBJ. (In Russ.)
- Kochetova, Zh. Yu., Bazarskij, O. V., Panteleev, D. A. 2023. Soil ecology of military ranges. Voronezh. (In Russ.)
- Lazarev, I. S., Kochetova, Zh. Yu., Maslova, N. V., Terent'ev, V. V. 2022. Integral assessment of soil pollution during airfield reconstruction. *Regional Geosystems*, 46(3), pp. 448–462. DOI: <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2022-46-3-448-462>. EDN: XABGQV. (In Russ.)
- Rubin, V. M., Il'yukova, I. I., Kremko, L. M. et al. 2013. Hygienic justification of the MPC standards of petroleum products in the soils of the Republic of Belarus. *Hygiene and Sanitation, Russian Journal*, 92(2), pp. 99–101. EDN: PZMPQB. (In Russ.)
- Smurygin, A. V., Bakin, E. N., Aseev, V. A. 2019. Features of environmental support in the Armed Forces of the Russian Federation. *Pozharnaya Bezopasnost': Problemy i Perspektivy*, 1(10), pp. 393–395. (In Russ.)
- Trofimov, V. T., Har'kina, M. A., Zhigalin, A. D., Baraboshkina, T. A. 2019. Technogenic transformation of ecological functions of abiotic spheres of the Earth under the influence of military activity. *Moscow University Geology Bulletin*, 1, pp. 3–13. EDN: XUPFWG. (In Russ.)
- Har'kina, M. A. 2004. Ecological consequences of military actions. *Energiia: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*, 7, pp. 56–59. EDN: OWWJQV. (In Russ.)
- Ecological rationing and quality management of soils and lands. 2013. Eds. Shoba S. A., Yakovlev A. S., Rybalsky N. G. Moscow. (In Russ.)
- Bausinger, T., Bonnaire, E., Preuss, J. 2007. Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Science of the Total Environment*, 382(1–2), pp. 259–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029>.
- Hussain, T., Gondal, M. A. 2008. Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, pp. 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
- Knechtenhofer, L. A., Xifra, I. O., Scheinost, A. C., Flühler, H. et al. 2003. Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: Small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(1), pp. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200390017>.

- Kochetova, Z. Yu., Bazarskii, O. V., Maslova, N. V. 2018. Filtration of heavy metals in soils with different degrees of urbanization and technogenic load. *Russian Journal of General Chemistry*, 88(13), pp. 2990–2996. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1070363218130261>. EDN: NKOHNE.
- Lafond, S., Blais, J. F., Mercier, G., Martel, R. 2014. A counter-current acid leaching process for the remediation of contaminated soils from a small-arms shooting range. *Soil and Sediment Contamination*, 23(2), pp. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.808171>.
- Meerschman, E., Cockx, L., Islam, M. M., Meeuws, F. et al. 2011. Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals. *Ambio*, 40, pp. 417–424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6>.
- Okkenhaug, G., Gebhardt, K.-A. G., Amstaetter, K., Bue, H. L. et al. 2016. Antimony (Sb) and lead (Pb) in contaminated shooting range soils: Sb and Pb mobility and immobilization by iron based sorbents, a field study. *Journal of Hazardous Materials*, 307, pp. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.005>.
- Tandy, S., Meier, N., Schulin, R. 2017. Use of soil amendments to immobilize antimony and lead in moderately contaminated shooting range soils. *Journal of Hazardous Materials*, 324, Part B, pp. 617–625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.034>.
- Tomić, N. T., Smiljanić, S., Jović, M., Gligorić, M. et al. 2018. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: Part 1 – pseudo-total concentration. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229. Article number: 301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3957-0>.

Сведения об авторах

Кочетова Жанна Юрьевна – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", д-р геогр. наук, доцент; e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Zhanna Yu. Kochetova – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Dr Sci. (Geography), Associate Professor; e-mail: zk_vva@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8838-9548>

Лазарев Илья Сергеевич – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-Воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", помощник начальника отдела Центра (организации научной работы и подготовки научно-педагогических кадров); e-mail: lazarev-ilya@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>

Илья С. Lazarev – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Assistant to the head of the Department of the Center (organization of scientific work and training of scientific and pedagogical personnel); e-mail: lazarev-ilya@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7461-1651>

Зиброва Надежда Владимировна – Петровско-Разумовская ал., д. 12А, г. Москва, Россия, 127083; "Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил" Министерства обороны Российской Федерации, канд. геогр. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; e-mail: vaiu@mil.ru

Nadezhda V. Zibrova – 12A Petrovsko-Razumovsky Ave., Moscow, Russia, 127083; "The Central Scientific Research Institute of Military-air Forces" the Ministry of Defence of the Russian Federation, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Senior Research Assistant; e-mail: vaiu@mil.ru

Базарский Олег Владимирович – ул. Старых Большевиков, д. 54А, г. Воронеж, Россия, 394064; Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", д-р физ.-мат. наук, профессор; e-mail: z_vaiu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2851-716X>

Oleg V. Bazarskiy – 54A Sarykh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Scientific Center Air Force "N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy", Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor; e-mail: z_vaiu@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2851-716X>

УДК 504.062.4

Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы

В. А. Мязин*, Д. А. Шушков, Н. В. Фокина, А. А. Чапоргина,
А. В. Канивец, А. В. Брянцев

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия;
e-mail: v.myazin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
09.11.2023;

принята к публикации
12.01.2024

Ключевые слова:

нефтяные углеводороды,
загрязненные почвы,
биогеосорбенты,
биоремедиация,
иммобилизованные
бактерии

Для цитирования

Реферат

Методы очистки нефтезагрязненных территорий включают применение сорбентов, повышению эффективности которых способствует иммобилизация на их поверхности углеводородокисляющих микроорганизмов. Биогеосорбенты получены на основе минерального сырья (анальдим- и глауконитсодержащих пород и термоактивированного вермикулита) и углеводородокисляющих бактерий родов *Pseudomonas* и *Microbacterium*, выделенных из загрязненных почв Мурманской области. Численность иммобилизованных бактерий на исследуемых носителях остается высокой на протяжении 9 месяцев хранения, а бактериальная пленка на поверхности минеральных носителей сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии. При хранении биогеосорбентов не требуются создание специальных условий и дополнительная подготовка перед использованием. Минеральные носители оказывают стимулирующее влияние на высоту проростков и длину корней тест-растений. При внесении биогеосорбентов увеличивается численность бактерий, способных к микробиологической трансформации нефтепродуктов, и повышается степень очистки почвы от углеводородов нефти на начальном этапе (в течение первых 30 суток). Наиболее эффективным является внесение термоактивированного вермикулита и глауконитсодержащей породы с иммобилизованными углеводородокисляющими бактериями. Применение биогеосорбента на основе термоактивированного вермикулита позволяет сократить время очистки до 20–22 месяцев, а на основе глауконитсодержащей породы – до 17 месяцев (без очистки этот период составляет 29 месяцев).

Мязин В. А. и др. Оценка эффективности биогеосорбентов на основе минеральных носителей для очистки нефтезагрязненной почвы. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 91–102. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102>.

Effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for treatment oil-contaminated soil

Vladimir A. Myazin*, Dmitry A. Shushkov, Nadezhda V. Fokina,
Aleksandra A. Chaporgina, Anastasiya V. Kanivets, Aleksandr V. Bryantsev

*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia;
e-mail: v.myazin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

Article info

Received
09.11.2023;

accepted
12.01.2024

Key words:

petroleum
hydrocarbons,
contaminated soils,
biogeosorbents,
biodegradation,
immobilized bacteria

For citation

Abstract

Methods for cleaning oil-contaminated areas include the use of sorbents, the effectiveness of which is enhanced by the immobilization of hydrocarbon-oxidizing microorganisms on their surface. Biogeosorbents are obtained on the basis of mineral raw materials (analcime- and glauconite-containing rocks and thermally activated vermiculite) and hydrocarbon-oxidizing bacteria of the genera *Pseudomonas* and *Microbacterium* extracted from contaminated soils of the Murmansk region. The number of immobilized bacteria on the studied carriers remains high throughout 9 months of storage, and the bacterial film on the surface of mineral carriers persists for 12 months of storage in an air-dry state. When storing biogeosorbents, no special conditions or additional preparation are required before use. Mineral carriers have a stimulating effect on the height of seedlings and the length of roots of test plants. When biogeosorbents are added, the number of bacteria capable of microbiological transformation of petroleum products increases, and the degree of soil purification from petroleum hydrocarbons at the initial stage (during the first 30 days) increases. The most effective is the introduction of thermally activated vermiculite and glauconite-containing rock with immobilized hydrocarbon-oxidizing bacteria. The use of a biogeosorbent based on thermally activated vermiculite can reduce the cleaning time to 20–22 months, and based on glauconite-containing rock – up to 17 months, while without treatment this period will be at least 29 months.

Myazin, V. A. et al. 2024. Effectiveness of biogeosorbents based on mineral carriers for treatment oil-contaminated soil. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 91–102. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-91-102>.

Введение

В настоящее время в мире широко применяются методы очистки почвы и воды от углеводов с использованием сорбентов (*Pabis-Mazgaj et al., 2022; Guirado et al., 2021; Алексанян и др., 2020; Zhang et al., 2019; Vidal et al., 2019; Bandura et al., 2017*), которые подразделяются на неорганические, органические, органоминеральные и синтетические. Глины и диатомиты используются в качестве сорбентов в силу своей доступности и низкой стоимости (*Al-Jammal et al., 2019; Алексеева и др., 2017; Vuzimov et al., 2018; Shchemelinina et al., 2017*). Многие сорбенты малоэффективны, имеют низкую сорбционную емкость и не способны удерживать легкие углеводороды. Результаты исследования эффективности сорбентов в отношении нефти и нефтепродуктов, полученные при стандартных условиях, отличаются от данных, касающихся поведения сорбентов в реальных условиях, из-за ряда факторов природного и антропогенного характера, которые не учитываются производителями сорбционных материалов (*Васильева и др., 2023*). Повысить эффективность сорбентов может иммобилизация на их поверхности углеводородоксилирующих микроорганизмов (*Costa et al., 2014; Lin et al., 2014*). Сорбенты с иммобилизованными клетками микроорганизмов являются центрами деструкции углеводов, где субстрат находится в непосредственной близости к микробному сообществу. Сорбция углеводов на сорбенте также способствует снижению токсичности среды и предотвращает распространение загрязнения (*Vasilyeva et al., 2020*). Сорбенты на основе минерального сырья положительно влияют на газовоздушный и тепловой режим почвы, способствуют сохранению высокой численности микроорганизмов, что усиливает активность ферментов и протекание биохимических процессов (*Vasilyeva et al., 2022; Myazin et al., 2021; Мязин и др., 2020*).

В ходе исследований (*Щемелинина и др., 2018*) смоделированы биогеосорбенты на основе глинистых и цеолитовых пород с иммобилизованными на них микроорганизмами, обладающими углеводородоксилирующей активностью. Полученные биогеосорбенты позволили снизить содержание нефтепродуктов в модельной воде в 2,5–5 раз, а биодеструкция нефтепродуктов за 4 сут составила 12–77 %.

Целью настоящей работы стала оценка эффективности биогеосорбентов с иммобилизованными углеводородоксилирующими бактериями, выделенными из почв Мурманской области, для очистки нефтезагрязненной почвы в лабораторных условиях и определения перспективы их дальнейшего использования при очистке территорий в условиях Севера.

Материалы и методы

В качестве сорбентов для углеводородоксилирующих бактерий (УОБ) использовали минеральные носители на основе аналцитсодержащих пород Веслянской группы проявлений, глауконитсодержащих пород Чим-Лоптюгского месторождения горючих сланцев (Республика Коми) (*Щемелинина и др., 2018; Shchemelinina et al., 2019; Симакова, 2016; Shushkov et al., 2023*) и термоактивированного вермикулита Ковдорского месторождения (Мурманская область).

Для иммобилизации минеральные сорбенты заливали бактериальной суспензией (соотношение сорбентов и суспензии составляло 1:6, титр клеток – 10^9 кл./г), содержащей штаммы углеводородоксилирующих бактерий, относящихся к родам *Pseudomonas* и *Microbacterium*, и перемешивали в течение 1 ч с помощью верхнеприводной мешалки. Используемые штаммы были выделены из загрязненных почв Мурманской области (данные штаммы находятся в коллекции микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты). После перемешивания сорбент отфильтровывали с применением фильтра "Белая лента" и высушивали в сушильном шкафу при температуре 35 °С. Высушенные сорбенты хранили при комнатной температуре в герметичной упаковке.

Определение численности бактериальных клеток на биогеосорбентах проводили методом посева на мясопептонный агар через 1 сут после иммобилизации, а также через 3 и 9 месяцев хранения.

Исследование поверхности биогеосорбентов и элементный анализ проводили через 15 сут после иммобилизации, через 6 и 12 месяцев хранения в центре коллективного пользования "Геонаука" на базе Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) с помощью сканирующего электронного микроскопа Axia ChemiSEM, оборудованного энергодисперсионной приставкой при ускоряющем напряжении 5 кВ и токе 0,18–0,49 нА. Предварительно образцы покрывали углеродной или золотой пленкой.

Для исключения вероятности токсического воздействия на растения при очистке почвы с использованием сорбентов был проведен тест на фитотоксичность. Почву просеивали через сито с ячейками диаметром 5 мм и увлажняли до 60–70 % от полной влагоемкости. Увлажненную почву помещали в пластиковые контейнеры объемом 400 мл (масса почвы 200 г). Используемые сорбенты добавляли к почве в количестве 2 % от массы почвы и тщательно перемешивали. После внесения сорбентов в каждый контейнер с почвой было посеяно 15 семян пшеницы, которые предварительно проращивались в течение 24 ч в чашке Петри при температуре 27 °С. Тест проводили при комнатной температуре в течение 7 сут, после чего измеряли высоту побегов и длину корней.

Для оценки эффективности биогеосорбентов при очистке нефтезагрязненных почв был проведен лабораторный опыт продолжительностью 3 месяца. Почву просеивали через сито (диаметр ячеек 5 мм) и увлажняли до 60–70 % от полной влагоемкости. В качестве загрязняющего вещества использовали образец тяжелой нефти Приразломного месторождения в количестве 1 % от массы почвы. Нефть вносили в почву и тщательно перемешивали, после чего загрязненную почву раскладывали в пластиковые контейнеры объемом 400 мл (масса почвы 200 г). Подготовленные биогеосорбенты добавляли к почве в количестве 2 % от массы почвы и тщательно перемешивали. Схема лабораторного опыта и используемые биогеосорбенты представлены в табл. 1. В течение эксперимента почву увлажняли и перемешивали 2 раза в неделю.

Таблица 1. Схема лабораторного эксперимента по оценке эффективности иммобилизованных минеральных сорбентов

Table 1. Scheme of the laboratory experiment to assess the effectiveness of immobilized mineral sorbents

Вариант	Сорбент-носитель	Наличие УОБ	Наличие нефти
BG (контроль)	Нет	Нет	Нет
CS	Нет	Нет	Есть
A	Анальцимсодержащая порода, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
AC	Анальцимсодержащая порода с карбонатами, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
G	Глауконитсодержащая порода, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
GC	Глауконитсодержащая порода с карбонатами, крупность –0,25 ... +0,1 мм	Есть	Есть
VER1	Термоактивированный вермикулит, крупность –2 ... +0,45 мм	Есть	Есть
VER2	Термоактивированный вермикулит, крупность –5 ... +2 мм	Есть	Есть

Отбор и анализ образцов почвы проводили через 15, 30 и 90 сут после начала лабораторного эксперимента. Суммарное содержание углеводов в почве определяли методом ИК-спектроскопии, основанном на экстракции углеводов четыреххлористым углеродом, очисткой экстракта на колонке с окисью алюминия и последующим определением концентрации углеводов в элюате на анализаторе нефтепродуктов АН-2 согласно методике ПНД Ф 16.1:2.2.22-98¹. Величину pH водной вытяжки почв определяли потенциометрическим методом на pH-метре Radelkis OP-300. Активность почвенной дегидрогеназы оценивали колориметрическим методом, основанным на восстановлении бесцветной соли 2,3,5-трифенилтетразолия хлористого до красного трифенилформазана (Мунеев, 2001).

Статистический анализ данных проводился с использованием прикладных программ Statistica 6.0 и Microsoft Excel 2007. Для определения достоверности различий между выборками использовали *t*-критерий Стьюдента. Для расчета коэффициента корреляции *r* использовался метод Пирсона (уровень значимости 0,05).

Результаты и обсуждение

Динамика численности иммобилизованных бактерий на сорбентах-носителях

Численность бактерий на биогеосорбентах через 1 сут после их иммобилизации и высушивания находилась в диапазоне 10^9 – 20^9 кл./г. Через три месяца хранения количество бактерий на минеральных носителях достоверно не изменилось, за исключением термоактивированного вермикулита. Через 9 месяцев хранения численность углеводородокисляющих бактерий снизилась на всех биогеосорбентах, кроме глауконитсодержащей породы и термоактивированного вермикулита (рис. 1). Однако количество бактерий на сорбентах все еще оставалось достаточно высоким (10^7 – 10^8 кл./г). Это позволяет хранить биогеосорбенты без значительного снижения численности иммобилизованных микроорганизмов до момента их использования.

¹ ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. Введен 10 ноября 1998 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293831/4293831615.htm>.

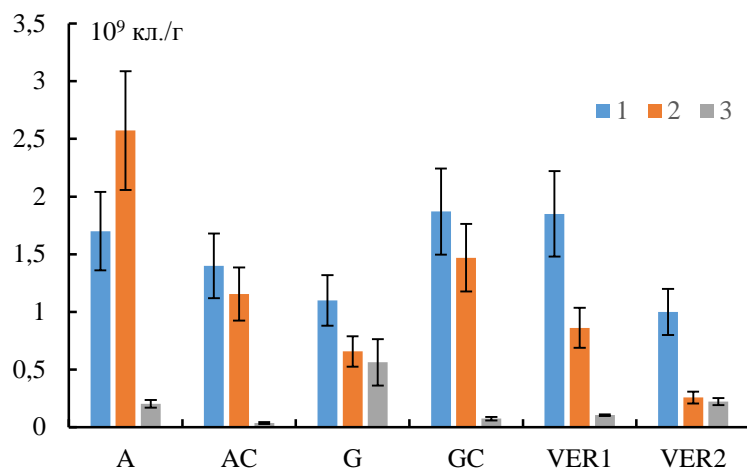


Рис. 1. Численность бактериальных клеток (10^9 кл./г) на поверхности биогеосорбентов через сутки после иммобилизации (1), через 3 месяца (2) и 9 месяцев хранения (3)
 Fig. 1. The number of bacterial cells (10^9 cells/g) on the surface of biogeosorbents one day after immobilization (1), after 3 months (2), and 9 months of storage (3)

Исследование биогеосорбентов с использованием сканирующего электронного микроскопа, выполненное через 15 сут после иммобилизации, показало наличие бактериальной пленки на поверхности минеральных носителей (рис. 2).

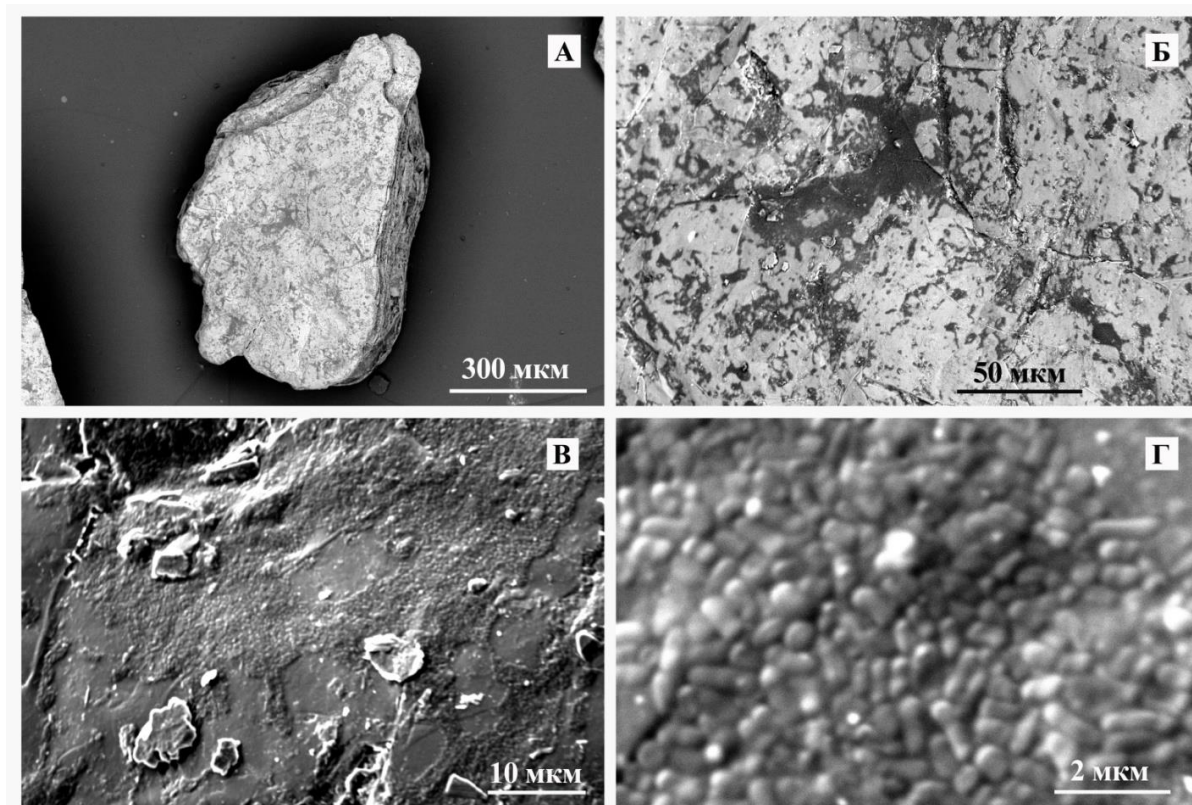


Рис. 2. Бактериальная пленка на поверхности зерен термоактивированного вермикулита через 15 сут после иммобилизации. СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов
 Fig. 2. Bacterial film on the surface of grains of thermally activated vermiculite in 15 days after immobilization. SEM images, backscattered electron mode

Через 6 и 12 месяцев хранения биогеосорбентов бактериальная пленка на их поверхности сохранилась, что подтверждается результатами проведенной сканирующей электронной микроскопии (рис. 3).

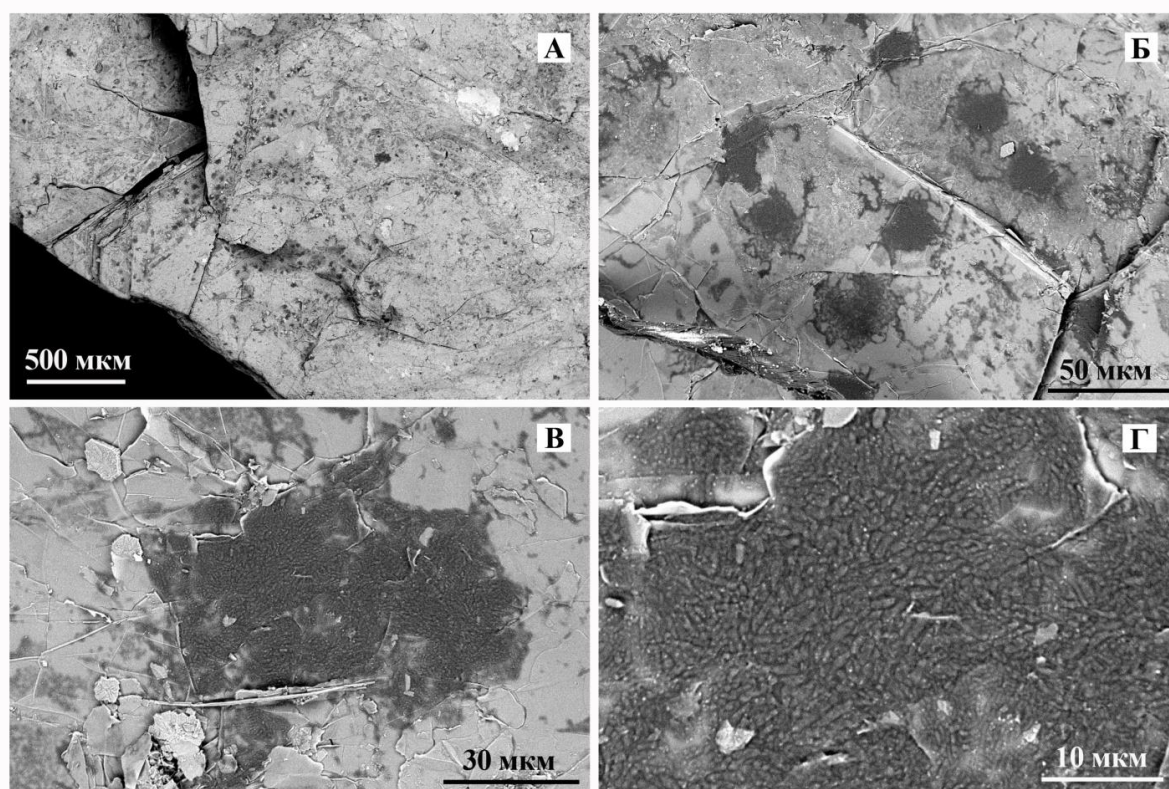
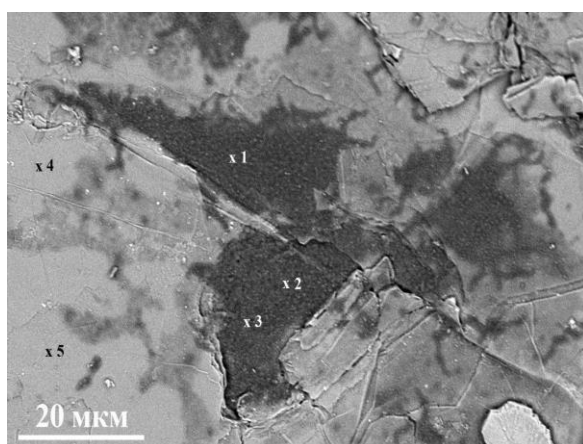


Рис. 3. Бактериальная пленка на поверхности зерен термоактивированного вермикулита через 12 месяцев после иммобилизации. СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов
 Fig. 3. Bacterial film on the surface of grains of thermally activated vermiculite in 12 months after immobilization. SEM images, backscattered electron mode

На основании рентгеноспектрального микроанализа через 12 месяцев хранения биогеосорбентов подтверждено наличие бактериальной пленки, представленной органическими соединениями (рис. 4).



Элемент	Мас.%				
	1	2	3	4	5
C	27,4	23,7	29,4	–	–
N	13,5	10,9	14,9	–	–
O	59,1	65,4	55,6	43,3	45,8
Na	–	–	–	0,8	0,8
Mg	–	–	–	18,3	17,9
Al	–	–	–	8,8	8,6
Si	–	–	–	22,6	21,4
K	–	–	–	0,2	0,0
Ca	–	–	–	0,2	0,2
Ti	–	–	–	0,6	0,5
Fe	–	–	–	5,2	4,8

Рис. 4. Точки рентгеноспектрального микроанализа бактериальной пленки (1–3) и поверхности вермикулита (4, 5). СЭМ-изображения, режим обратно-рассеянных электронов
 Fig. 4. EDS points of bacterial film (1–3) and vermiculite surface (4, 5). SEM images, backscattered electron mode

Таким образом, в ходе исследования было показано, что бактериальная пленка, образующаяся на поверхности минеральных сорбентов после иммобилизации, сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии. Численность бактерий, определенная методом посева, снижается незначительно, что позволяет использовать предлагаемые минеральные сорбенты для закрепления углеводородоксилирующих микроорганизмов и последующего их применения при очистке и восстановлении нефтезагрязненных почв и грунтов.

Фитотоксичность сорбентов

Внесение в чистую почву минеральных сорбентов стимулирует рост пшеницы, не оказывая негативного влияния на растения. Высота побегов и длина корней проростков в вариантах с добавлением минеральных сорбентов через 7 дней была достоверно выше, чем в контрольном варианте, в среднем на 70 % ($t = 3,12-8,82$ и $t = 3,22-7,57$ соответственно; $df = 13$; $p = 0,95$) (табл. 2).

Таблица 2. Высота побегов и длина корней проростков пшеницы через 7 сут после посева
Table 2. Shoot height and root length of wheat seedlings in 7 days after sowing

Вариант	Высота побега, см	Длина корня, см
BG	9,0 ± 0,9	6,7 ± 0,8
A	13,2 ± 1,0	10,5 ± 0,4
AC	16,1 ± 0,9	11,6 ± 0,5
G	15,4 ± 0,7	10,6 ± 0,4
GC	17,3 ± 0,2	10,8 ± 0,5
VER1	13,8 ± 1,0	10,5 ± 0,7
VER2	15,3 ± 0,8	12,1 ± 0,6

Максимальная высота проростков пшеницы была отмечена для вариантов с внесением анальцимсодержащей породы с карбонатами и глауконитсодержащей породы с карбонатами, а максимальная длина корней – для варианта с внесением термоактивированного вермикулита (крупность зерен –5 ... +2 мм) и анальцимсодержащей породы с карбонатами.

Стимуляция роста побегов и корней пшеницы обусловлена улучшением структуры почвы, увеличением влагоемкости, а также смещением величины pH из слабокислого в нейтральный диапазон, что ярче всего проявилось при использовании сорбентов на основе карбонатсодержащих пород. Положительное влияние исследуемых сорбентов на рост и развитие растений может быть одним из факторов их успешного применения для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв.

Влияние биогеосорбентов на численность бактерий в загрязненной почве

Численность бактерий в загрязненной почве через 1 сут после начала эксперимента не превышала 1,5 млн кл./г, а через 15 сут достигла 50 млн кл./г, что связано с активизацией аборигенных УОБ, для которых углеводороды являются источником углерода, а также с улучшением аэрации и водного режима. Внесение биогеосорбентов резко увеличило численность бактерий. Наиболее сильный рост был отмечен при использовании сорбентов на основе анальцимсодержащей породы с карбонатами (518 млн кл./г), глауконитсодержащей породы (481 млн кл./г) и глауконитсодержащей породы с карбонатами (432 млн кл./г). Наименьшая численность бактерий была характерна для почвы с добавлением сорбента на основе анальцимсодержащей породы (126 млн кл./г). Через месяц наблюдалась схожая тенденция с некоторым снижением численности почвенных бактерий в вариантах с внесением сорбентов на основе глауконитсодержащей породы (рис. 5).

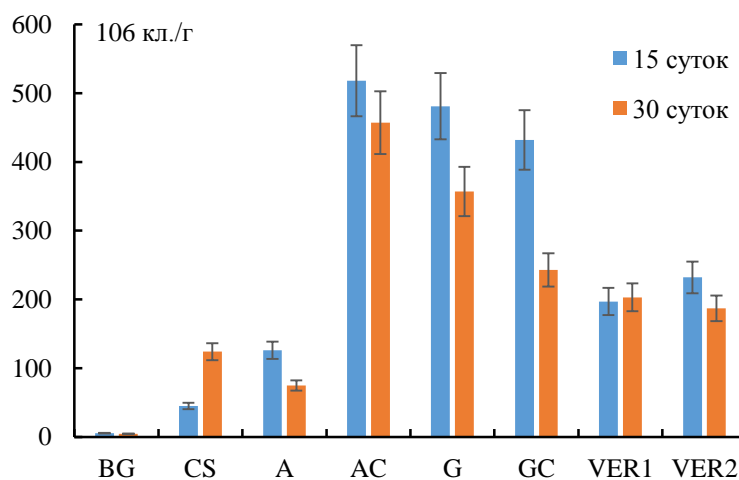


Рис. 5. Динамика численности бактерий в почве при ее очистке от нефтепродуктов с использованием биогеосорбентов

Fig. 5. Dynamics of the number of bacteria in the soil during its treatment from oil products using biogeosorbents

Влияние биогеосорбентов на активность дегидрогеназы в загрязненной почве

Активность дегидрогеназы – почвенного фермента из класса оксидоредуктаз – является показателем жизнедеятельности микроорганизмов. Эти ферменты катализируют дегидрирование органических веществ, в том числе углеводов в загрязненной почве. Дегидрогеназа – это внеклеточный фермент преимущественно бактериального происхождения, поэтому его высокая активность является следствием деятельности бактерий.

Дегидрогеназная активность в чистой почве составляла 0,49 мг·ТФФ/10 г, что характеризует ее как слабую (Гапонюк и др., 1985), а почву – как очень бедную по степени обогащенности дегидрогеназой (Звягинцев, 1978). В загрязненной почве в результате развития аборигенных УОБ активность дегидрогеназы возросла до среднего уровня (0,69 мг·ТФФ/10 г). Использование биогеосорбентов достоверно увеличило активность фермента в 1,8–2,7 раз до высокого и очень высокого уровня за исключением вариантов с термоактивированным вермикулитом. В то же время по степени обогащенности дегидрогеназой почва осталась бедной (рис. 6).

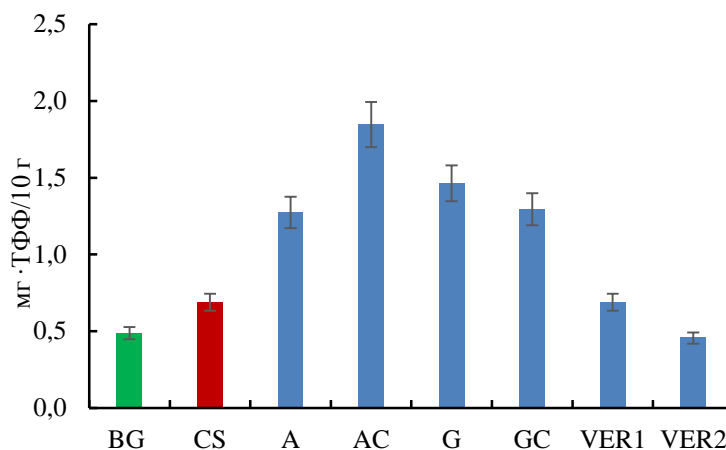


Рис. 6. Активность дегидрогеназы в почве через 3 месяца после начала эксперимента
Fig. 6. Dehydrogenase activity in soil 3 months after the start of the experiment

В ходе исследования установлено, что дегидрогеназная активность положительно коррелирует с численностью бактерий в почве ($r = 0,75–0,93$; $t = 4,46–10,26$; $df = 14,0$; $p = 0,05$).

Влияние биогеосорбентов на содержание углеводов в загрязненной почве

Исходное содержание углеводов в почве через 1 сут после внесения нефти составляло $4\,527 \pm 860$ мг/кг, что соответствует высокой степени загрязнения² (Пиковский, 1993; Московченко, 1998).

Содержание углеводов в загрязненной почве без использования биогеосорбентов в течение 15 сут снизилось лишь на 4 %. Внесение биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов на 25 %, а скорость деструкции углеводов достигала 100 мг/сут (среднее значение 75 ± 8 мг/сут). Наиболее эффективными биогеосорбентами на данном этапе были анальцимсодержащая порода с карбонатами и термоактивированный вермикулит (–5 ... +2 мм).

Через 30 сут за счет самоочистки почвы количество углеводов сократилось на 26 %, а использование биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов в среднем на 31 %. Скорость деструкции углеводов при этом снизилась до 20–55 мг/сут. Наиболее эффективными биогеосорбентами через 1 месяц были глауконитсодержащая порода с карбонатами и термоактивированный вермикулит. При этом достоверной разницы между сорбентами в эффективности деструкции углеводов не обнаружено.

В дальнейшем скорость деструкции углеводов заметно снизилась во всех вариантах. Через 90 сут за счет самоочистки количество углеводов уменьшилось на 28 % от исходного значения. Использование биогеосорбентов привело к снижению содержания углеводов в среднем на 36 %. Наиболее эффективными биогеосорбентами через 3 месяца были глауконитсодержащая порода и термоактивированный вермикулит (рис. 7).

² См.: Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Письмо Комитета Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 27 марта 1995 г. № 3-15/582; Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. Письмо Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации от 27 декабря 1993 г. № 04-25/61-5678.

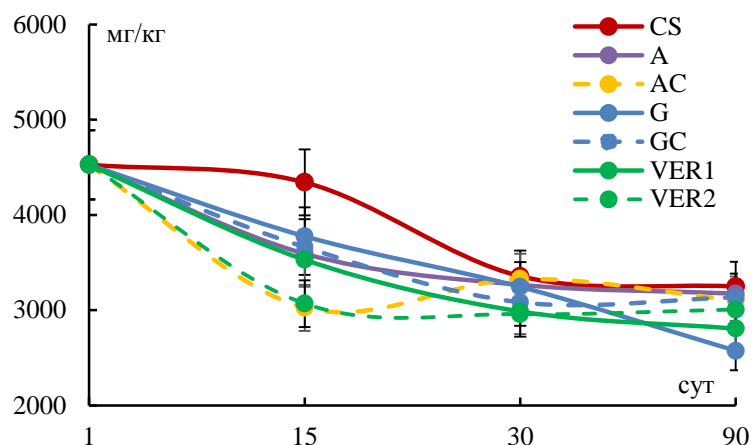


Рис. 7. Динамика содержания углеводородов при очистке почвы от нефтепродуктов с использованием биогеосорбентов
 Fig. 7. Dynamics of hydrocarbon content in the soil during its treatment from oil products using biogeosorbents

Внесение биогеосорбентов позволило на первом этапе (15 сут) в 3–8 раз ускорить трансформацию углеводородов. К концу первого месяца этот эффект ослаб и скорость деструкции углеводородов снизилась, что может быть вызвано трансформацией большей части доступных для микробиологической деструкции углеводородов. Оставшиеся высокомолекулярные соединения в меньшей степени подвержены биоокислению или требуют более продолжительного времени для этого процесса.

Наиболее эффективным оказалось внесение биогеосорбентов на основе термоактивированного вермикулита и глауконитсодержащей породы, что увеличило степень деструкции до 38 и 43 % соответственно. Расчетный период (*Bashkin et al., 2019*) самоочистки загрязненной почвы до фоновых значений содержания углеводородов составит не менее 29 месяцев, в то время как внесение биогеосорбента на основе термоактивированного вермикулита позволит сократить его до 20 месяцев, а на основе глауконитсодержащей породы – до 17 месяцев.

Заключение

Проведенные исследования показали, что численность иммобилизованных бактерий на исследуемых биогеосорбентах оставалась высокой на протяжении 9 месяцев хранения, а бактериальная пленка, образующаяся на поверхности минеральных сорбентов после иммобилизации, сохраняется в течение 12 месяцев хранения в воздушно-сухом состоянии, что позволяет использовать их для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв.

Используемые минеральные сорбенты не оказали негативного влияния на растения, напротив, отмечено увеличение высоты проростков и длины корней тест-растений.

Внесение биогеосорбентов в загрязненную почву резко увеличило численность бактерий, способных к микробиологической трансформации нефтепродуктов, особенно на начальных этапах очистки, когда аборигенная микробиота еще не адаптировалась к изменившимся условиям.

Использование биогеосорбентов повысило степень очистки почвы от углеводородов нефти в течение первых 15 сут. Среди исследованных биогеосорбентов наиболее эффективными были термоактивированный вермикулит (крупность зерен $-2 \dots +0,45$ мм) и глауконитсодержащая порода, внесение которых позволило трансформировать до 38–43 % углеводородов. Биогеосорбент на основе глауконитсодержащей породы также способствовал значительному увеличению активности дегидрогеназы и численности бактерий в загрязненной почве. Биогеосорбенты на основе анальцимсодержащей породы оказались менее эффективными, но также способствовали росту численности углеводородокисляющих бактерий и активности дегидрогеназы в почве.

Биогеосорбенты на основе минерального сырья могут применяться для очистки и восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, способствуя более интенсивной деградации углеводородов на начальных этапах, что в конечном счете приведет к сокращению времени очистки. Высокая устойчивость бактериальной пленки на поверхности минеральных носителей позволяет хранить их в течение длительного времени без значительной потери своих свойств; при этом для биогеосорбентов не требуется специальных условий хранения и дополнительной подготовки перед использованием. Более полная информация о способах применения биогеосорбентов в различных условиях, в том числе в Арктическом регионе, будет получена в ходе проведения дополнительных лабораторных и натурных полевых исследований.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР 122022400109-7 "Микробиота природных сред Арктической зоны и разработка способов охраны и реабилитации окружающей среды с использованием биотехнологического потенциала микроорганизмов" и на основе договора о научном сотрудничестве между Институтом геологии им. Н.П. Юшкина КомиНЦ УрО РАН и Институтом проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Александрян К. Г., Киялкова А. Ю., Еремин И. С., Стоколос О. А. [и др.]. Нефтяные сорбенты на основе природных материалов // Нефтегазохимия. 2020. № 1. С. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10110>. EDN: WFELKC.
- Алексеева Т. П., Бурмистрова Т. И., Трунова Н. М., Наумова Л. Б. [и др.]. Оценка эффективности использования цеолита для ускорения деструкции нефти в почве // Биотехнология. 2017. Т. 33, № 4. С. 85–91. DOI: <http://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-4-85-91>. EDN: ZEULXB.
- Васильева Ж. В., Васеха М. В., Тюляев В. С. Оценка эффективности сорбентов для реагирования на аварийные разливы нефти в арктической акватории // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 856–864. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.14>. EDN: NVFPPM.
- Гапонюк Э. И., Малахов С. В. Комплексная система показателей экологического мониторинга почв // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах : тр. IV Всесоюзного совещания. Обнинск, июнь 1983 г. Л. : Гидрометеиздат, 1985. С. 3–10.
- Звягинцев Д. Г. Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. 1978. № 6. С. 48–55.
- Московченко Д. В. Нефтегазодобыча и окружающая среда. Эколого-геохимический анализ Тюменской области. Новосибирск : Наука, 1998. 110 с.
- Мязин В. А., Исакова Е. А., Васильева Г. К. Влияние гранулированного активированного угля на скорость биоремедиации почв Мурманской области, исторически загрязненных нефтепродуктами // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12020>. EDN: OFUBVP.
- Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М. : Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
- Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. М. : Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
- Симакова Ю. С. Особенности глобулярных слоистых силикатов Чим-Лоптюгского месторождения горючих сланцев // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 9–10 (261–262). С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-52-57>. EDN: XBFBJZ.
- Щемелинина Т. Н., Котова О. Б., Анчугова Е. М., Шушков Д. А. [и др.]. Цеолитовое и глинистое сырье: экспериментальное моделирование биогеосорбентов // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2018. № 9(285). С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-50-57>. EDN: YRIVPV.
- Al-Jammal N., Juzsakova T., Zsirka B., Sebestyen V. [et al.]. Modified Jordanian zeolitic tuff in hydrocarbon removal from surface water // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 239. P. 333–341. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.079>.
- Bandura L., Wozzuk A., Kolodynska D., Franus W. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review // Minerals. 2017. Vol. 7, Iss. 3. Article number: 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/min7030037>.
- Bashkin V. N., Galiulin R. V. Geoecological risk management in polar areas. Switzerland : Springer Verlag, 2019. 156 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
- Buzimov A. Y., Eckl W., Gömze L. A., Kocserha I. [et al.]. Effect of mechanical treatment on properties of Si-Al-O zeolites // Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials. 2018. Vol. 70, N 1. P. 23–26. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.5>.
- Costa S. P., Angelim A. L., de Fatima Vieira de Queiroz Sousa M., Melo V. M. M. Vegetative cells of *Bacillus pumilus* entrapped in chitosan beads as a product for hydrocarbon biodegradation // International Biodeterioration and Biodegradation. 2014. Vol. 87. P. 122–127. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.011>.
- Guirado M., Garrido-Sanz D., Pindado O., Rodríguez-Rastrero M. [et al.]. Effectiveness of biochar application and bioaugmentation techniques for the remediation of freshly and aged diesel-polluted soils // International Biodeterioration and Biodegradation. 2021. Vol. 163. Article number: 105259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105259>.

- Lin M., Liu Y., Chen W., Wang H. [et al.]. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil // *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2014. Vol. 88. P. 8–12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.015>.
- Myazin V. A., Korneykova M. V., Chaporgina A. A., Fokina N. V. [et al.]. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, Iss. 8. Article number: 1722. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
- Pabis-Mazgaj E., Pichniarczyk P., Stempkowska A., Gawenda T. Possibility of using natural zeolite waste granules obtained by pressure agglomeration as a sorbent for petroleum substances from paved surfaces // *Materials*. 2022. Vol. 15, Iss. 19. Article number: 6871. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196871>.
- Shchemelinina T. N., Gömze L. A., Kotova O. B., Ibrahim J. E. F. M. [et al.]. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: Modelling and properties // *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71, N 4. P. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>.
- Shchemelinina T. N., Kotova O. B., Harja M., Anchugova E. M. [et al.]. New trends in the mechanisms of increasing productivity of mineral-based materials // *Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН*. 2017. № 6 (270), С. 40–42. DOI: <http://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-6-40-42>. EDN: ZCRBPJ.
- Shushkov D. A., Kotova O. B., Sun S., Harja M. Physico-chemical properties of analcime-bearing rocks of Timan // XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. GMRMS 2021. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham., 2023. P. 514–522. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6_65.
- Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 706. Article number: 135739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
- Vasilyeva G., Mikhedova E., Zinnatshina L., Strijakova E. [et al.]. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 850. Article number: 157952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>.
- Vidal R. R. L., Moraes J. S. Removal of organic pollutants from wastewater using chitosan: A literature review // *International Journal Environmental Science Technology*. 2019. Vol. 16. P. 1741–1754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2061-8>.
- Zhang T., Li Z., Lü Y., Liu Y. [et al.]. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2019. Vol. 27, Iss. 6. P. 1282–1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.001>.

References

- Aleksanyan, K. G., Kilyakova, A. Yu., Eremin, I. S., Stokolos, O. A. et al. 2020. Oil sorbents based on natural materials. *Oil & Gas Chemistry*, 1, pp. 57–60. DOI: <https://doi.org/10.24411/2310-8266-2020-10110>. EDN: WFELKC. (In Russ.)
- Alekseeva, T. P., Burmistrova, T. I., Trunova, N. M., Naumova, L. B. et al. 2017. Evaluation of the effectiveness of using zeolite to accelerate the destruction of oil in soil. *Biotechnology in Russia*, 33(4), pp. 85–91. DOI: <http://doi.org/10.21519/0234-2758-2017-33-4-85-91>. EDN: ZEULXB. (In Russ.)
- Vasilyeva, Zh. V., Vasekha, M. V., Tyulyaev, V. S. 2023. Evaluation of the efficiency of sorbents for accidental oil spill response in the Arctic waters. *Journal of Mining Institute*, 264, pp. 856–864. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.14>. EDN: NVFPPM. (In Russ.)
- Gaponyuk, E. I., Malakhov, S. V. 1985. Integrated system of indicators for environmental monitoring of soils. In coll. articles *Proceedings of the 4th All-Union Conference*. Leningrad, pp. 3–10. (In Russ.)
- Zvyagintsev, D. G. 1978. Biological activity of soils and scales for assessing some of its indicators. *Soviet Soil Science*, 6, pp. 48–55. (In Russ.)
- Moskovchenko, D. V. 1998. Oil and gas production and the environment: Ecological and geochemical analysis of the Tyumen region. Novosibirsk. (In Russ.)
- Myazin, V. A., Isakova, E. A., Vasilyeva, G. K. 2020. The effect of activated carbon on the bioremediation rate of the soils historically contaminated with oil products in the Murmansk region. *Regional Environmental Issues*, 2, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2020-12020>. EDN: OFUBVP. (In Russ.)
- Pikovskiy, Yu. I. 1993. Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment. Moscow. (In Russ.)
- Workshop on agrochemistry. 2001. Ed. V. G. Mineev. Moscow. (In Russ.)
- Simakova, Yu. S. 2016. Features of globular layered silicates of the Chim-Loptyug oil shale deposit. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 9–10 (261–262), pp. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2016-10-52-57>. EDN: XBFBJZ. (In Russ.)
- Shchemelinina, T. N., Kotova, O. B., Anchugova, E. M., Shushkov, D. A. et al. 2018. Zeolite and clay raw materials: Experimental modeling of biogeosorbents. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center*

- of Ural Branch RAS*, 9(285), pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.19110/2221-1381-2018-9-50-57>. EDN: YRIVPV. (In Russ.)
- Al-Jammal, N., Juzsakova, T., Zsirka, B., Sebestyen, V. et al. 2019. Modified Jordanian zeolitic tuff in hydrocarbon removal from surface water. *Journal of Environmental Management*, 239, pp. 333–341. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.079>.
- Bandura, L., Wozzuk, A., Kolodynska, D., Franus, W. 2017. Application of mineral sorbents for removal of petroleum substances: A review. *Minerals*, 7(3). Article number: 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/min7030037>.
- Bashkin, V. N., Galiulin, R. V. 2019. Geocological risk management in polar areas. Switzerland: Springer Verlag. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>.
- Buzimov, A. Y., Eckl, W., Gömze, L. A., Kocserha, I. et al. 2018. Effect of mechanical treatment on properties of Si-Al-O zeolites. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 70(1), pp. 23–26. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.5>.
- Costa, S. P., Angelim, A. L., de Fatima Vieira de Queiroz Sousa, M., Melo, V. M. M. 2014. Vegetative cells of *Bacillus pumilus* entrapped in chitosan beads as a product for hydrocarbon biodegradation. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 87, pp. 122–127. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.011>.
- Guirado, M., Garrido-Sanz, D., Pindado, O., Rodríguez-Rastrero, M. et al. 2021. Effectiveness of biochar application and bioaugmentation techniques for the remediation of freshly and aged diesel-polluted soils. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 163. Article number: 105259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105259>.
- Lin, M., Liu, Y., Chen, W., Wang, H. et al. 2014. Use of bacteria-immobilized cotton fibers to absorb and degrade crude oil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 88, pp. 8–12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.11.015>.
- Myazin, V. A., Korneykova, M. V., Chaporgina, A. A., Fokina, N. V. et al. 2021. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic. *Microorganisms*, 9(8). Article number: 1722. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
- Pabis-Mazgaj, E., Pichniarczyk, P., Stempkowska, A., Gawenda, T. 2022. Possibility of using natural zeolite waste granules obtained by pressure agglomeration as a sorbent for petroleum substances from paved surfaces. *Materials*, 15(19). Article number: 6871. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15196871>.
- Shchemelinina, T. N., Gömze, L. A., Kotova, O. B., Ibrahim, J. E. F. M. et al. 2019. Clay- and zeolite-based biogeosorbents: Modelling and properties. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 71(4), pp. 131–137. DOI: <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.23>.
- Shchemelinina, T. N., Kotova, O. B., Harja, M., Anchugova, E. M. et al. 2017. New trends in the mechanisms of increasing productivity of mineral-based materials. *Vestnik of Institute of Geology of Komi Science Center of Ural Branch RAS*, 6(270), pp. 40–42. DOI: <http://doi.org/10.19110/2221-1381-2017-6-40-42>. EDN: ZCRBPJ.
- Shushkov, D. A., Kotova, O. B., Sun, S., Harja, M. 2023. Physico-chemical properties of analcime-bearing rocks of Timan. XIII General Meeting of the Russian Mineralogical Society and the Fedorov Session. GMRMS 2021. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham., pp. 514–522. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23390-6_65.
- Vasilyeva, G., Kondrashina, V., Strijakova, E., Ortega-Calvo, J.-J. 2020. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 706. Article number: 135739. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
- Vasilyeva, G., Mikhedova, E., Zinnatshina, L., Strijakova, E. et al. 2022. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil. *Science of the Total Environment*, 850. Article number: 157952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157952>.
- Vidal, R. R. L., Moraes, J. S. 2019. Removal of organic pollutants from wastewater using chitosan: A literature review. *International Journal Environmental Science Technology*, 16, pp. 1741–1754. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2061-8>.
- Zhang, T., Li, Z., Lü, Y., Liu, Y. et al. 2019. Recent progress and future prospects of oil-absorbing materials. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(6), pp. 1282–1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.001>.

Сведения об авторах

Мязин Владимир Александрович – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. биол. наук; e-mail: v.myazin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

Vladimir A. Myazin – 14A, Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Biology); e-mail: v.myazin@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4155-3416>

Шушков Дмитрий Александрович – ул. Первомайская, 54, г. Сыктывкар, Россия, 167982;
Институт геологии им. Н. П. Юшкина КомиНЦ УрО РАН, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: dashushkov@geo.komisc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7856-8080>

Dmitry A. Shushkov – 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar, Russia, 167982; Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch RAS, Cand. Sci. (Geology&Mineralogy), Senior Researcher;
e-mail: dashushkov@geo.komisc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7856-8080>

Фокина Надежда Викторовна – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;
e-mail: n.fokina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

Nadezhda V. Fokina – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;
e-mail: n.fokina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2936-5252>

Чапоргина Александра Александровна – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, вед. инженер;
e-mail: a.chaporgina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-461X>

Aleksandra A. Chaporgina – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Leading Engineer;
e-mail: a.chaporgina@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-461X>

Канивец Анастасия Витальевна – мкр. Академгородок, 14А, г. Апатиты, Россия, 184209;
Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, ст. лаборант;
e-mail: kvi407@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9704-7368>

Anastasiya V. Kanivets – 14A Akademgorodok, Apatity, Russia, 184209;
Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Senior Assistant;
e-mail: kvi407@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9704-7368>

Брянцев Александр Владимирович – ул. Корпусная, 18, г. Санкт-Петербург, Россия, 197110;
Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, вед. инженер;
e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2307-6326>

Aleksandr V. Bryantsev – 18 Korpusnaya Str., St. Petersburg, Russia, 197110;
Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS, Leading Engineer;
e-mail: briantsev@ecosafety-spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2307-6326>

Сравнительный анализ применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для теоретической оценки эффективной теплопроводности горных пород

С. А. Гусак

*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия;
Филиал Мурманского арктического университета, г. Апатиты, Россия;
e-mail: gusaksa@arcticsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-326X>*

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
29.01.2024;

принята
к публикации
12.02.2024

Ключевые слова:

теплопроводность,
горные породы,
теоретическая оценка,
модель,
Лихтенеккер,
Лихтенеккер – Асаад

Выполнен анализ условий и ограничений применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для прогнозной оценки эффективной теплопроводности горных пород. Для сравнительной оценки рассмотрены экспериментальные данные по теплопроводности карбонатных пород (известняк, доломит) из бассейна Molasse на юго-западе Германии, импактной структуры Чиксулуб (полуостров Юкатан, Мексика) и баженовской свиты (Западная Сибирь, Россия). Сопоставительные оценки выполнялись на основе использования корреляционных соотношений, полученных авторами экспериментальных работ в результате регрессионного анализа петрофизических свойств карбонатных пород. Результаты расчетно-аналитической оценки показали, что наиболее высокая точность прогноза теплопроводности с использованием модели Лихтенеккера – Асаада может быть достигнута при наличии экспериментальных данных, обеспечивающих высокоточное определение структурного фактора. Изучены особенности влияния различных параметров модели Лихтенеккера – Асаада на погрешность оценки эффективной теплопроводности породы. Установлено, что на стадии предпроектных исследований для достаточно корректной теоретической оценки теплопроводности водонасыщенных слабопористых горных пород может быть использована модель Лихтенеккера.

Для цитирования

Гусак С. А. Сравнительный анализ применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для теоретической оценки эффективной теплопроводности горных пород. Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 103–112. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-103-112>.

Comparative analysis of the application of the Lichtenecker and Lichtenecker – Asaad models for the theoretical assessment of the rocks effective thermal conductivity

Sergey A. Gusak

*Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia;
Apatity Branch of Murmansk Arctic University, Apatity, Russia;
e-mail: gusaksa@arcticsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-326X>*

Article info

Received
29.01.2024;

accepted
12.02.2024

Key words:

thermal conductivity,
rocks,
theoretical assessment,
model,
Lichtenecker,
Lichtenecker – Asaad

Abstract

The analysis of the conditions and limitations of using the Lichtenecker and Lichtenecker – Asaad models for predictive assessment of the effective thermal conductivity of rocks have been carried out. For a comparative assessment, experimental data on the thermal conductivity of carbonate rocks (limestone, dolomite) from the South-West German Molasse basin, the Chicxulub impact structure (Yucatan Peninsula, Mexico) and the Bazhenov Formation (Western Siberia, Russia) have been considered. Comparative assessments were carried out based on the use of correlation relationships obtained by the authors of experimental works as a result of regression analysis of the petrophysical properties of carbonate rocks. The results of the computational and analytical assessment have shown that the highest accuracy of thermal conductivity prediction using the Lichtenecker – Asaad model can be achieved if experimental data are available that provide a highly accurate determination of the structure factor. The features of the influence of various parameters of the Lichtenecker – Asaad model on the error in estimating the effective thermal conductivity of the rock have been studied. It has been established that at the stage of pre-design research, the Lichtenecker model can be used for a fairly correct theoretical assessment of the thermal conductivity of water-saturated, slightly porous rocks.

For citation

Gusak, S. A. 2024. Comparative analysis of the application of the Lichtenecker and Lichtenecker – Asaad models for the theoretical assessment of the rocks effective thermal conductivity. *Vestnik of MSTU*, 27(1), pp. 103–112. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2024-27-1-103-112>.

Введение

При строительстве и эксплуатации подземных комплексов различного назначения, особенно при их размещении в условиях криолитозоны, неизбежно возникают процессы теплового взаимодействия подземных сооружений с породным массивом. Значение этого фактора подтверждается, в частности, опытом эксплуатации единственной в нашей стране подземной атомной станции на Красноярском горно-химическом комбинате, который показал, что учет теплового фактора даже при нормальной эксплуатации может приводить к ошибкам в прогнозировании напряженно-деформированного состояния породного массива и условий работы ограждающих конструкций (Зверев, 1995).

При всем разнообразии научно-технических задач, связанных с прогнозной оценкой температурного поля породного массива, необходимым условием для количественного определения изменений температуры во времени является знание, в частности, коэффициента теплопроводности (далее – теплопроводность) горных пород. Зачастую в условиях отсутствия измерений теплопроводности при создании теплофизических моделей используются литературные данные по сходным литолого-фаціальным комплексам. Как отмечается в работе (Дучков и др., 2014), интенсивное изучение теплопроводности горных пород началось в середине прошлого столетия в связи с развитием геотермических исследований, ориентированных в основном на оценку плотности теплового потока, который рассчитывается по измерениям геотермического градиента в скважинах и теплопроводности горных пород, вскрытых этими скважинами. Накапливавшиеся со временем результаты измерений в разных лабораториях периодически обобщались, что позволяло при отсутствии необходимой экспериментальной информации пользоваться этими справочными данными для оценки величины теплового потока.

Другой метод определения теплопроводности горных пород базируется на теоретической оценке эффективной теплопроводности пород с использованием различных моделей, связанных с определением теплопроводности на основе данных о содержании и составе порообразующих минералов и пористости, характеризующих многокомпонентную систему. Наиболее широкое применение получила модель среднего геометрического, которая часто называется моделью Лихтенеккера (Lichtenecker K.). В этой модели зависимость эффективной теплопроводности горной породы λ от теплопроводности матрицы (минерального скелета) λ_m , теплопроводности флюида в поровом пространстве λ_f и пористости породы ϕ (отн. ед.) представлена в виде простого математического выражения

$$\lambda = \lambda_m^{1-\phi} \cdot \lambda_f^{\phi} . \quad (1)$$

Формула (1), которая применялась к широкому спектру смесей, включая биологические материалы, горные породы и минералы, а также композиционные материалы на основе пластмасс (Guo et al., 2017; Fuchs et al., 2015; Fuchs et al., 2013; Pechinig et al., 2007; Popov et al., 2003; Zhanga et al., 2018), долгое время считалась полуэмпирической по природе, поскольку, по мнению критиков, не имела какого-либо теоретического обоснования. В дальнейшем был выполнен ряд исследований, направленных на оценку и обоснование более прочной теоретической основы формулы Лихтенеккера (Goncharenko et al., 2000; Leão et al., 2015; Simpkin, 2010; Zakri et al., 1998).

Однако, по мнению ряда российских и зарубежных специалистов, модель Лихтенеккера не может быть использована для достаточно корректной оценки теплопроводности горных пород, поскольку эта модель не учитывает текстурно-структурных особенностей неоднородных сред. Для учета этих особенностей была создана модифицированная теоретическая модель Лихтенеккера – Асаада, которая, по мнению различных специалистов, обеспечивает существенно более точные оценки и отличается от модели Лихтенеккера включением структурного фактора f следующим образом:

$$\lambda = \lambda_m^{1-f\phi} \cdot \lambda_f^{f\phi} . \quad (2)$$

В настоящей работе выполнена расчетно-аналитическая оценка, целью которой является анализ условий и ограничений применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для прогноза теплопроводности горных пород. Для сравнительной оценки рассмотрены результаты экспериментальных исследований теплопроводности водонасыщенных карбонатных пород (известняк, доломит) из бассейна Molasse на юго-западе Германии, импактной структуры Чиксулуб (полуостров Юкатан, Мексика) и баженовской свиты (Западная Сибирь, Россия).

Экспериментальные исследования теплопроводности карбонатных пород

В работе немецких специалистов (Pechinig et al., 2007), посвященной оценке применимости теоретических моделей, было исследовано около 280 образцов горных пород из бассейна Molasse на юго-западе Германии. Керновые образцы изучались с помощью теплового и петрофизического сканирования с высоким разрешением по теплопроводности, плотности, пористости и скорости звука в породах в сухом и водонасыщенном состоянии. Результаты анализа минералогического состава пород позволили

сравнить измеренную теплопроводность с вычисленными значениями теплопроводности на основе различных моделей смешения: среднее арифметическое, среднее геометрическое и среднее гармоническое. При этом было установлено, что для известняков и доломитов модель Лихтенеккера показывает наилучшее согласие с экспериментом независимо от их стратиграфического возраста и генетического происхождения горной породы.

Для учета эффектов геометрии пор и литификации осадочных пород (процесс превращения рыхлых осадков в твердые горные породы) в работе (Pechnig et al., 2007) использована модель Лихтенеккера – Асаада (формула (2)), на основе которой авторы выполнили численное моделирование для извлечения λ_m и f из лабораторных данных. Результаты моделирования для теплопроводности матрицы и f -фактора приведены в таблице.

Таблица. Результаты моделирования методом Монте-Карло, определяющие параметры модели Лихтенеккера – Асаада (f -фактор (среднее \pm стандартное отклонение) и теплопроводность матрицы породы) (Pechnig et al., 2007)

Table. Results of the Monte-Carlo simulations of matrix thermal conductivity and f -factor (mean and standard deviation) according to Lichtenecker – Asaad model (Pechnig et al., 2007)

Тип породы	Теплопроводность матрицы, Вт/(м·К)	f -фактор
Известняк	2,63 \pm 0,13	0,77 \pm 0,26
Доломит	3,71 \pm 0,25	0,95 \pm 0,13

В работе (Popov et al., 2011) приведены экспериментальные данные по теплопроводности доломитов и известняков импактной структуры Чиксулуб (полуостров Юкатан, Мексика). В этой работе описаны результаты измерений тепловых свойств кернов исследовательской скважины Yaхsoroiл-1 (глубина 1511 м), пробуренной в структуре Чиксулуб. На 451 сухом и водонасыщенном керне из интервала глубин 404–1511 м были измерены теплопроводность, температуропроводность, объемная теплоемкость, коэффициент термической анизотропии, коэффициент термической неоднородности и, кроме того, пористость и плотность. Выполненные исследования показали, что осадочные породы, пересеченные скважиной Yaхsoroiл-1, характеризуются значительными вариациями тепловых свойств, которые обусловлены изменчивостью пористости и литологии пород и демонстрируют разделение пласта на предударные и постударные участки по своим тепловым свойствам и пористости.

На основе корреляции между теплопроводностью и пористостью водонасыщенных пород авторами работы (Popov et al., 2011) получены следующие уравнения регрессии:

– для доломита:

$$\lambda(\phi) = 4,87e^{-0,018\phi}; \quad (3)$$

– для известняка:

$$\lambda(\phi) = -0,028\phi + 2,65. \quad (4)$$

На основе полученных уравнений регрессии авторами работы была оценена теплопроводность матрицы пород: 4,7 Вт/(м·К) для доломитов и 2,61 Вт/(м·К) для известняков.

В работе (Попов и др., 2017) приведены результаты теплофизических исследований образцов стандартного керна, целью которых, в частности, являлась оценка адекватности теоретических моделей теплопроводности реальным свойствам пород. На основе результатов изучения коллекции из 73 образцов карбонатных пород баженовской свиты (Западная Сибирь, Россия) получены уравнения регрессии, устанавливающие зависимость между теплопроводностью и пористостью для сухих, нефте- и водонасыщенных пород. При помощи этих уравнений выполнена оценка теплопроводности матрицы пород и подобраны значения структурного фактора f . В частности, для водонасыщенных карбонатных пород баженовской свиты оцененное значение матрицы пород составило 3,1 Вт/(м·К), а подобранная величина фактора f – 0,51.

Как отмечалось ранее, привлекательная простота и возможность применения модели Лихтенеккера для экспрессных инженерных оценок обуславливают ее широкое применение, включая геофизические приложения для горных пород и минералов. Ее использование для теоретической оценки эффективной теплопроводности горных пород различного типа было рекомендовано многими исследователями. Вместе с тем, по мнению ряда специалистов, эта модель не может быть использована для достаточно корректной оценки теплопроводности горных пород. Так, в работе (Попов и др., 2017) отмечается, что причина ограниченности модели Лихтенеккера состоит, в частности, в том, что теплопроводность минеральной матрицы породы зависит не только от ее минерального состава, но и от формы минеральных зерен, межзернового контактного теплового сопротивления, степени тепловой анизотропии пород.

С целью оценки условий и ограничений применения модели Лихтенеккера (формула (1)) для прогнозных расчетов теплопроводности карбонатных пород в настоящей работе использованы результаты рассмотренных ранее экспериментальных исследований, по которым имелась достаточная информация для сравнительного анализа. Сопоставительные оценки выполнялись на основе корреляционных соотношений (в дальнейшем – экспериментальные данные), полученных авторами экспериментальных исследований в результате анализа петрофизических свойств карбонатных пород. При этом рассматривались водонасыщенные породы с теплопроводностью воды в поровом пространстве $\lambda_f = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Так, с учетом данных таблицы, полученных авторами работы (Pechnig et al., 2007), формула Лихтенеккера – Асаада (2) для оценки зависимости теплопроводности пород λ из бассейна Molasse от пористости ϕ и структурного фактора f может быть записана в следующем виде:

– для доломита:

$$\lambda(\phi) = 3,71^{(1-0,95\phi)} \cdot 0,6^{0,95\phi}, \quad (5)$$

– для известняка:

$$\lambda(\phi) = 2,63^{(1-0,77\phi)} \cdot 0,6^{0,77\phi}. \quad (6)$$

Результаты оценки теплопроводности пород по формулам (1), (5) и (6) приведены на рис. 1.

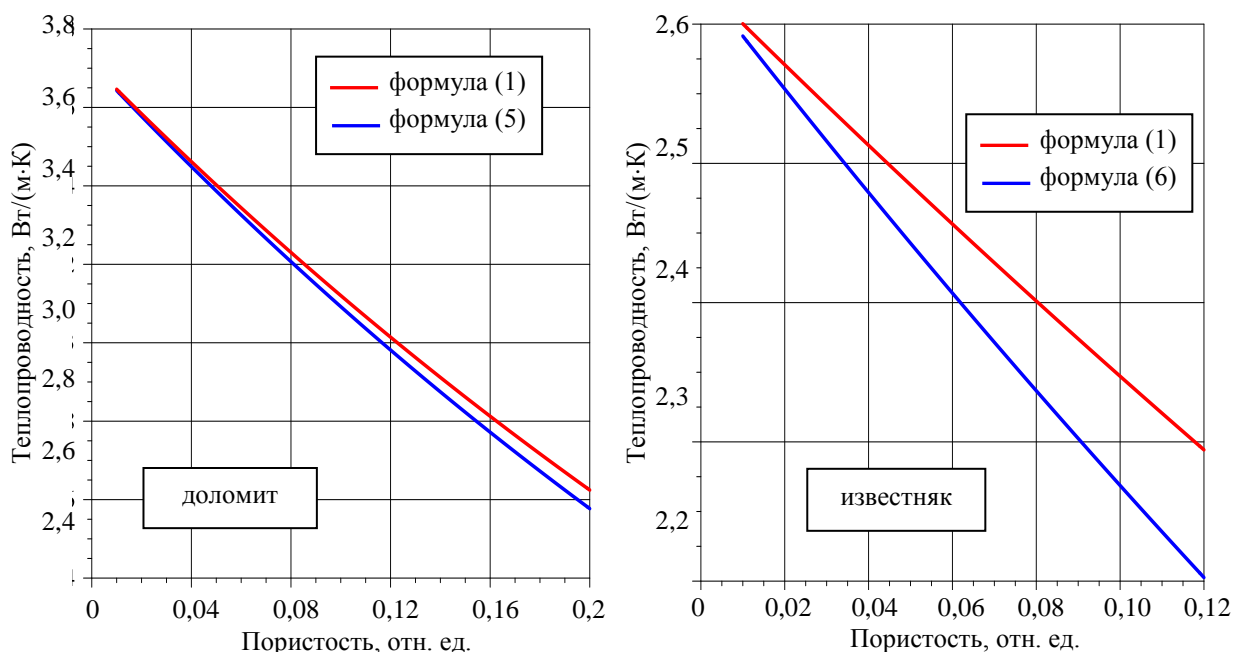


Рис. 1. Зависимость теплопроводности карбонатных пород бассейна Molasse от пористости, вычисленной по модели Лихтенеккера (формула (1)) и по экспериментальным данным (формулы (5) и (6))

Fig. 1. Dependence of thermal conductivity of carbonate rocks of the Molasse basin on porosity calculated using the Lichtenecker model (formula (1)) and experimental data (formulas (5) and (6))

Аналогичные сравнительные оценки были выполнены на примере экспериментальных данных по теплопроводности доломитов и известняков импактной структуры Чиксулуб. Результаты сопоставительных расчетов по уравнениям регрессии (3 и 4) и с помощью модели Лихтенеккера при оцененной авторами работы (Popov et al., 2011) теплопроводности карбонатных пород приведены на рис. 2.

С учетом приведенных ранее значений теплопроводности матрицы пород и структурного фактора f , полученных авторами работы (Попов и др., 2017) на основе регрессионного анализа образцов карбонатных пород баженовской свиты (Западная Сибирь, Россия), формула Лихтенеккера – Асаада для теоретической оценки теплопроводности таких пород в водонасыщенном состоянии может быть записана в следующем виде:

$$\lambda(\phi) = 3,1^{(1-0,51\phi)} \cdot 0,6^{0,51\phi}. \quad (7)$$

Результаты расчетов теплопроводности карбонатных пород баженовской свиты по формулам (1) и (7) приведены на рис. 3.

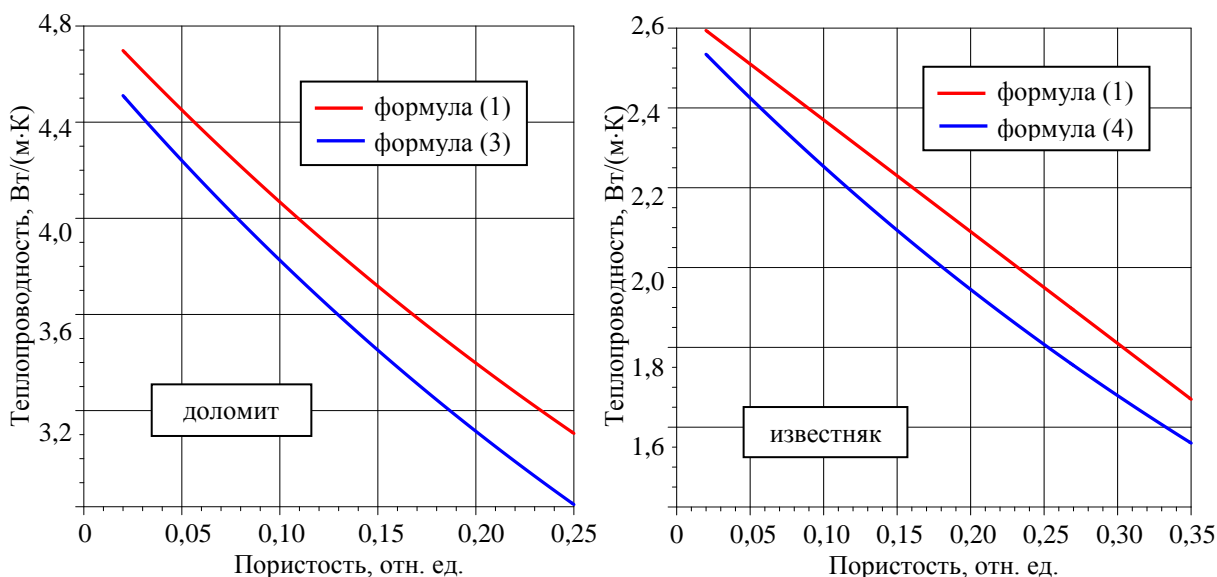


Рис. 2. Зависимость теплопроводности карбонатных пород импактной структуры Чиксулуб от пористости, вычисленной по модели Лихтенеккера (формула (1)) и по экспериментальным данным (формулы (3) и (4))

Fig. 2. Dependence of thermal conductivity of carbonate rocks of the Chicxulub impact structure on porosity calculated using the Lichtenecker model (formula (1)) and experimental data (formulas (3) and (4))

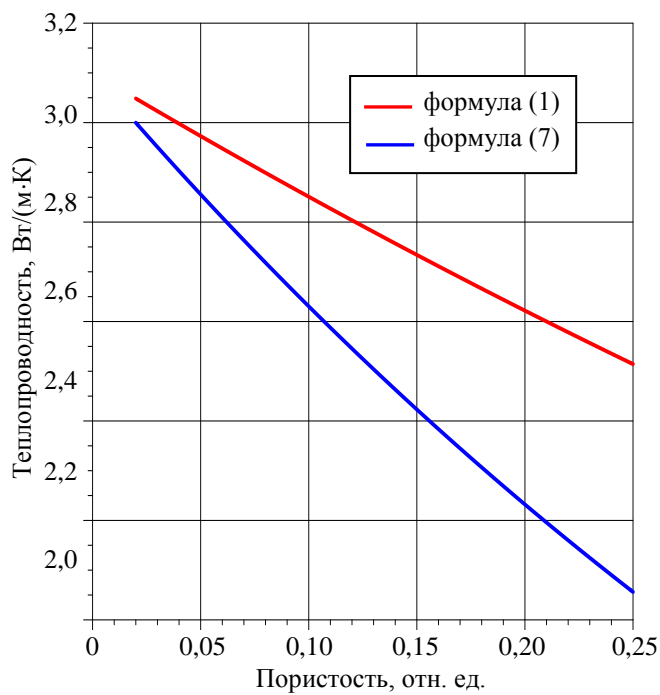


Рис. 3. Зависимость теплопроводности карбонатных пород баженовской свиты от пористости, вычисленной по модели Лихтенеккера (формула (1)) и по экспериментальным данным (формула (7))

Fig. 3. Dependence of thermal conductivity of carbonate rocks of the Bazhenov formation on porosity calculated using the Lichtenecker model (formula (1)) and experimental data (formula (7))

Как видно из рис. 1–3, по мере увеличения пористости возрастают различия в теплопроводности пород, вычисленных по модели Лихтенеккера и экспериментальным данным. Применение формулы Лихтенеккера для сильнопористых пород может приводить к расхождению в расчетных и экспериментальных данных по теплопроводности пород более 14 %. При пористости менее 10 % это расхождение не превышает 8 %. При этом, как и в большинстве других исследований, модель Лихтенеккера прогнозирует более низкие значения эффективной теплопроводности горных пород. По результатам

исследований, выполненных на примере карбонатных пород баженовской свиты, в работе (Попов и др., 2017) делается вывод, что модель Лихтенеккера – Асаада дает существенно более точные оценки по сравнению с моделью Лихтенеккера.

В настоящей работе рассмотрено влияние различных параметров модели Лихтенеккера – Асаада на погрешность теоретической оценки эффективной теплопроводности породы.

Методика оценки

В работе (Попов и др., 2017) отмечается, что для успешного применения модели Лихтенеккера – Асаада необходимы предварительные экспериментальные исследования теплопроводности на представительной выборке изучаемого типа пород с применением прецизионного измерительного оборудования для определения фактора f , соответствующего данному типу пород и конкретному поровому флюиду.

Последнее замечание имеет принципиальное значение для оценки условий и ограничений в применении модели Лихтенеккера. Из формул (1) и (2) со всей очевидностью следует, что различия в прогнозной оценке эффективной теплопроводности пород с помощью моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада определяются надежностью и точностью определения фактора f .

Для анализа влияния различных параметров на погрешность определения фактора f в настоящей работе использован методический подход, предложенный в работах (Новиков, 2009; Столяров и др., 2007). Так, для оценки неопределенности δf в результатах определения фактора f в зависимости от относительной погрешности оценки теплопроводности минерального скелета (матрицы) породы $\delta\lambda_m$ предложена следующая формула:

$$\delta f = K_1 \cdot \delta\lambda_m, \quad (8)$$

где

$$K_1 = \frac{\ln \frac{\lambda}{\lambda_f}}{\ln \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_f}\right) \ln \left(\frac{\lambda_m}{\lambda}\right)}, \quad (9)$$

λ – эффективная теплопроводность породы; λ_m – теплопроводность матрицы породы; λ_f – теплопроводность порового флюида.

Согласно выражению (2), которое формализует модель Лихтенеккера – Асаада, неопределенность в оценке фактора f должна оказывать влияние на погрешность оценки эффективной теплопроводности породы $\delta\lambda$. Для оценки взаимосвязи этих параметров использована зависимость, предложенная в работах (Новиков, 2009; Столяров и др., 2007):

$$\delta\lambda = K_f \cdot \delta f, \quad (10)$$

где

$$K_f = \phi \cdot \ln \left(\frac{\lambda_f}{\lambda_m}\right) f. \quad (11)$$

Результаты оценки и обсуждение

Из выражений (8) и (9) следует, что при заданной теплопроводности порового флюида (в частности, воды – для водонасыщенных пород), которая в несколько раз меньше теплопроводности матрицы и эффективной теплопроводности карбонатных пород, основным фактором, определяющим зависимость погрешности оценки фактора f от неопределенности в оценке λ_m , является соотношение λ/λ_m .

На основе экспериментальных данных по эффективной теплопроводности рассматриваемых карбонатных пород, для которых были оценены теплопроводности матрицы пород (Попов и др., 2017; Pechnig et al., 2007; Popov et al., 2011), в настоящей работе с помощью формулы (9) выполнена оценка зависимости коэффициента K_1 от соотношения λ/λ_m . Общий характер такой зависимости иллюстрируют данные, приведенные на рис. 4, которые показывают резкое повышение погрешности в оценке фактора f с увеличением отношения λ/λ_m , что для водонасыщенных горных пород является отражением обратной зависимости коэффициента K_1 от пористости геоматериала. Так, например, при отношении λ/λ_m для карбонатных пород баженовской свиты в диапазоне от 0,92 до 0,96 (уменьшение пористости от 10 до 5 %) значение коэффициента K_1 увеличивается с 11,3 до 23,3. Это значит, что неопределенность в оценке теплопроводности матрицы на уровне 15–25 %, которая в большинстве реальных случаев является вполне удовлетворительным результатом (Столяров и др., 2007), может приводить к погрешности 170–280 % в оценке фактора f при пористости породы 10 % и 350–580 % при пористости 5 %.

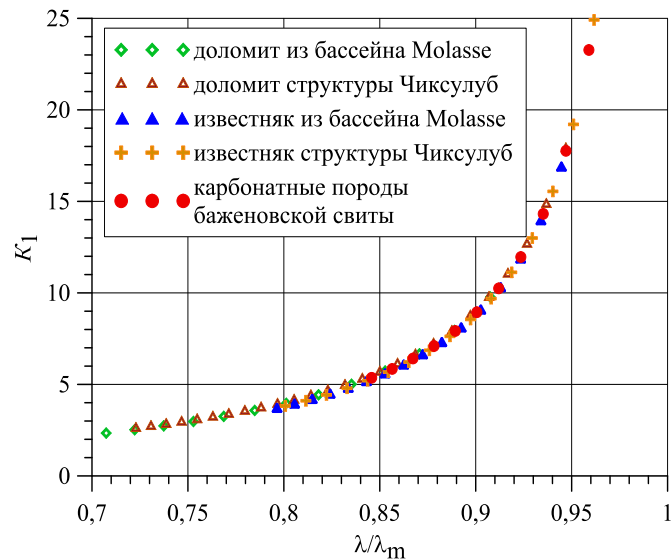


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_1 от отношения эффективной теплопроводности водонасыщенной породы к теплопроводности ее матрицы

Fig. 4. Dependence of coefficient K_1 on the ratio of the effective thermal conductivity of a water-saturated rock to the thermal conductivity of its matrix

Результаты расчетов коэффициента K_f в зависимости от соотношения λ/λ_m для карбонатных пород баженовской свиты и бассейна Molasse при оцененных значениях фактора f , которые использованы в формулах (5–7), приведены на рис. 5.

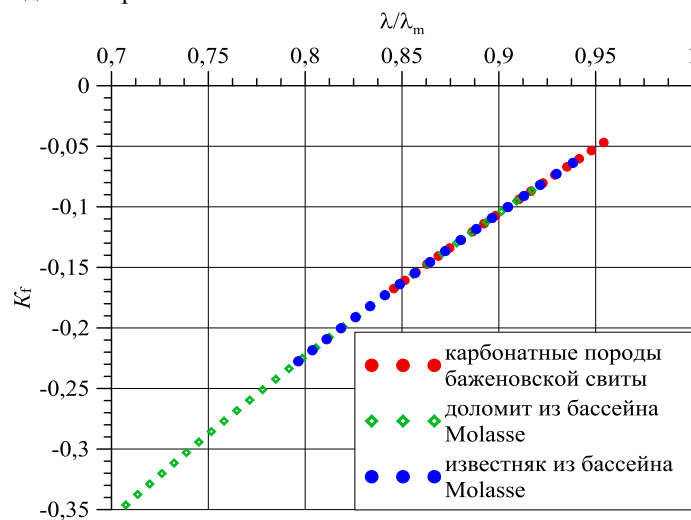


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_f от отношения эффективной теплопроводности водонасыщенной породы к теплопроводности ее матрицы

Fig. 5. Dependence of the K_f coefficient on the ratio of the effective thermal conductivity of water-saturated rock to the thermal conductivity of its matrix

На рис. 5 видно, что в отличие от влияния неопределенности в оценке теплопроводности матрицы породы на погрешность оценки фактора f , влияние структурного фактора f на неопределенность в оценке эффективной теплопроводности породы уменьшается при повышении соотношения λ/λ_m .

В дополнение к расчетным данным представляет интерес рассмотрение результатов теоретического анализа различных параметров модели Лихтенеккера – Асаада и, в частности, связи структурного фактора f с геометрическими характеристиками порового пространства (Новиков, 2009). В своем анализе автор этой работы базировался на теоретической модели эффективной теплопроводности многокомпонентной среды, основанной на теории эффективных сред, которая позволяет рассчитывать эффективное значение теплопроводности, исходя из данных о минеральном составе, пористости и геометрических характеристиках порового пространства (аспектное отношение и функция его распределения).

При построении модели предполагалось, что минеральные зерна, поры и трещины имеют форму эллипсоидов вращения, которая описывается аспектным отношением, представляющим собой отношение полуоси, нормально ориентированной к плоскости симметрии эллипсоида, и полуоси, лежащей в плоскости симметрии. Поскольку при анализе рассматривались изотропные образцы горных пород, для ориентации эллипсоидов использовалась случайная функция распределения.

На основе использованной теоретической модели проведены расчеты эффективной теплопроводности пород с разным аспектным отношением пор/трещин, диапазон которого варьировался от 0,001 до 1 при вариации значений теплопроводности минерального скелета от 3 до 7 Вт/(м·К). Результаты расчетов показали, что влияние аспектного отношения пор/трещин на эффективную теплопроводность породы зависит от отношения теплопроводностей минерального скелета и флюида в поровом пространстве. При этом для водонасыщенных пород наблюдается минимальное влияние аспектного отношения пор/трещин. Для таких пород наибольшее влияние геометрических характеристик порового пространства на эффективную теплопроводность породы наблюдается при пористости от 10 до 40 %. При пористости менее 10 % расхождение в величине эффективной теплопроводности породы во всем диапазоне аспектного отношения пор/трещин не превышает 4 %. В этом случае теплопроводность матрицы выступает в качестве доминирующего фактора.

Заключение

Выполнена расчетно-аналитическая оценка применения моделей Лихтенеккера и Лихтенеккера – Асаада для прогноза эффективной теплопроводности водонасыщенных горных пород. Обобщение результатов оценки позволяет сделать вывод, что использование модели Лихтенеккера – Асаада может приводить к погрешности оценки эффективной теплопроводности водонасыщенных непористых и слабопористых горных пород ($\phi \leq 0,1$), которая сопоставима или превышает относительное расхождение в теоретической оценке теплопроводности различных горных пород по экспериментальным данным и по модели Лихтенеккера. Модель Лихтенеккера – Асаада позволяет обеспечить высокое качество теоретической оценки теплопроводности горных пород при наличии экспериментальных данных, полученных на основе использования измерительного оборудования, обеспечивающего высокоточное определение структурного фактора. При отсутствии соответствующих экспериментальных данных на стадии предпроектных исследований для достаточно корректных инженерных оценок теплопроводности водонасыщенных слабопористых горных пород, которые представляют наибольший практический интерес для подземного размещения особо ответственных объектов, может быть применена модель Лихтенеккера.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0026 "Развитие методологии создания подземных комплексов для атомных станций малой мощности в Арктике".

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Дучков А. Д., Соколова Л. С., Родякин С. В., Черныш П. С. Зависимость теплопроводности пород осадочного чехла Западно-Сибирской плиты от влажности и пористости // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 991–1000. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20140520>. EDN: SMXAZB.
- Зверев А. Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземной атомной станции // Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики : материалы междунар. конф., Апатиты, 20–22 октября 1992 г. В 3 ч. Ч. 2. Вопросы строительства и обеспечения безопасности подземных атомных станций. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. С. 150–163.
- Новиков С. В. Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов: дис. ... канд. тех. наук. М., 2009. 155 с.
- Попов Е. Ю., Ромушкевич Р. А., Попов Ю. А. Измерения тепловых свойств пород на стандартных образцах как необходимый этап теплофизических исследований месторождений углеводородов // Известия вузов. Геология и разведка. 2017. № 2. С. 56–70. EDN: YUINNB.
- Столяров М. М., Попов Ю. А., Тертычный В. В., Коробков Д. А. Особенности методики определения теплопроводности горных пород на основе теоретической модели Лихтенеккера – Асаада // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 5. С. 69–72. EDN: LLZVFL.
- Fuchs S., Balling N., Förster A. Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs // Geophysical Journal International. 2015. Vol. 203, Iss. 3. P. 1977–2000. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggv403>.

- Fuchs S., Schütz F., Förster H.-J., Förster A. Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations // *Geothermics*. 2013. Vol. 47. P. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.02.002>.
- Goncharenko A. V., Lozovski V. Z., Venger E. F. Lichtenecker's equation: Applicability and limitations // *Optics Communications*. 2000. Vol. 174, Iss. 1–4. P. 19–32. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00695-1](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00695-1).
- Guo P. Y., Zhang N., He M. C., Bai B. H. Effect of water saturation and temperature in the range of 193 to 373 K on the thermal conductivity of sandstone // *Tectonophysics*. 2017. Vol. 699. P. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.024>.
- Leão T. P., Perfect E., Tyner J. S. Evaluation of Lichtenecker's mixing model for predicting effective permittivity of soils at 50 MHz // *Transactions of the ASABE*. 2015. Vol. 58, Iss. 1. P. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10720>.
- Pechinig R., Mottaghy D., Koch A., Jorand R. [et al.]. Prediction of thermal properties for mesozoic rocks of Southern Germany // *Proceedings European Geothermal Congress 2007*. Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June 2007. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/2007/265.pdf>.
- Popov Yu., Romushkevich R., Korobkov D., Mayr S. [et al.]. Thermal properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Impact Crater Chicxulub, Mexico) // *Geophysical Journal International*. 2011. Vol. 184, Iss. 2. P. 729–745. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04839.x>.
- Popov Yu., Tertychnyi V., Romushkevich R., Korobkov D. [et al.]. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: Experimental data // *Pure and Applied Geophysics*. 2003. Vol. 160. P. 1137–1161. DOI: <https://doi.org/10.1007/pl00012565>.
- Simpkin R. Derivation of Lichtenecker's logarithmic mixture formula from Maxwell's equations // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010. Vol. 58, Iss. 3. P. 545–550. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmmt.2010.2040406>.
- Zakri T., Laurent J.-P., Vauclin M. Theoretical evidence of Lichtenecker's mixture formulas based on the effective medium theory // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1998. Vol. 31, N 13. P. 1589–1594. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013>.
- Zhanga M., Bi J., Chen W., Zhang X. [et al.]. Evaluation of calculation models for the thermal conductivity of soils // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 94. P. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.005>.

References

- Duchkov, A. D., Sokolova, L. S., Rodyakin, S. V., Chernysh, P. S. 2014. Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the West Siberian Plate in relation to their humidity and porosity. *Russian Geology and Geophysics*, 55(5–6), pp. 991–1000. DOI: <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20140520>. EDN: SMXAZB. (In Russ.)
- Zverev, A. B. 1995. Results of in-situ studies of the stability of chamber structure in the underground nuclear power plant. *Proceedings of Intern. conf. Utilization of country's underground space to increase nuclear power safety*, October 20–22, 1992. Part 2. Apatity, pp. 150–163. (In Russ.)
- Novikov, S. V. 2009. Thermal properties of terrigenous reservoirs and saturating fluids. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Popov, E. Yu., Romushkevich, R. A., Popov, Yu. A. 2017. Measurements of the rock thermal properties on the standard core plugs as a necessary stage of the thermal-physic investigations of the hydrocarbon fields. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 2, pp. 56–70. EDN: YUINNB. (In Russ.)
- Stolyarov, M. M., Popov, Yu. A., Tertuchny, V. V., Korobkov, D. A. 2007. Features of the method for determining the thermal conductivity of rocks based on the theoretical Lichtenecker – Asaad model. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 5, pp. 69–72. EDN: LLZVFL. (In Russ.)
- Fuchs, S., Balling, N., Förster, A. 2015. Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs. *Geophysical Journal International*, 203(3), pp. 1977–2000. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggv403>.
- Fuchs, S., Schütz, F., Förster, H.-J., Förster, A. 2013. Evaluation of common mixing models for calculating bulk thermal conductivity of sedimentary rocks: Correction charts and new conversion equations. *Geothermics*, 47, pp. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.02.002>.
- Goncharenko, A. V., Lozovski, V. Z., Venger, E. F. 2000. Lichtenecker's equation: Applicability and limitations. *Optics Communications*, 174(1–4), pp. 19–32. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00695-1](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00695-1).
- Guo, P. Y., Zhang, N., He, M. C., Bai, B. H. 2017. Effect of water saturation and temperature in the range of 193 to 373 K on the thermal conductivity of sandstone. *Tectonophysics*, 699, pp. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.024>.

- Leão, T. P., Perfect, E., Tyner, J. S. 2015. Evaluation of Lichtenecker's mixing model for predicting effective permittivity of soils at 50 MHz. *Transactions of the ASABE*, 58(1), pp. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10720>.
- Pechnig, R., Mottaghy, D., Koch, A., Jorand, R. et al. 2007. Prediction of thermal properties for mesozoic rocks of Southern Germany. Proceedings European Geothermal Congress 2007. Unterhaching, Germany, 30 May – 1 June 2007. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/2007/265.pdf>.
- Popov, Yu., Romushkevich, R., Korobkov, D., Mayr, S. et al. 2011. Thermal properties of rocks of the borehole Yaxcopoil-1 (Impact Crater Chicxulub, Mexico). *Geophysical Journal International*, 184(2), pp. 729–745. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04839.x>.
- Popov, Yu., Tertychnyi, V., Romushkevich, R., Korobkov, D. et al. 2003. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: Experimental data. *Pure and Applied Geophysics*, 160, pp. 1137–1161. DOI: <https://doi.org/10.1007/pl00012565>.
- Simpkin, R. 2010. Derivation of Lichtenecker's logarithmic mixture formula from Maxwell's equations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 58(3), pp. 545–550. DOI: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2010.2040406>.
- Zakri, T., Laurent, J.-P., Vauclin, M. 1998. Theoretical evidence of Lichtenecker's mixture formulas based on the effective medium theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(13), pp. 1589–1594. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013>.
- Zhanga, M., Bi, J., Chen, W., Zhang, X. et al. 2018. Evaluation of calculation models for the thermal conductivity of soils. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 94, pp. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.005>.

Сведения об авторе

Гусак Сергей Андреевич – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209;
Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, доцент;
ул. Лесная, 29, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; филиал Мурманского арктического университета в г. Апатиты;
e-mail: gusaksa@arcticsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-326X>

Sergey A. Gusak – 24 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209;
Mining Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
29 Lesnaya Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Apatity Branch of Murmansk Arctic University;
e-mail: gusaksa@arcticsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5028-326X>

Требования к рукописи статьи

Общие требования

Оригинальность текста	В статьях допускается не более 20 % заимствованного текста из открытых источников.
Объем статьи	Максимальный объем статьи – 10 страниц (включая библиографический список).
Формат файла	Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе Microsoft Word и сохраняется с расширением *.doc, *.docx. В имени файла указывается фамилия и инициалы автора.
Параметры страницы	Формат А4. Поля: левое – 2,5 см, правое – 2,5 см, верхнее – 2,5 см, нижнее – 2,5 см.
Форматирование текста	Шрифт: Times New Roman. Размер шрифта – 10, абзацный отступ – 1,0, выравнивание по ширине. Межстрочный интервал – одинарный. Переносы слов не допускаются. Заголовки разделов помещают отдельной строкой через один межстрочный интервал после текста, печатают с прописной буквы. Шрифт полужирный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

Требования к содержанию и оформлению структурных элементов рукописи

Индекс УДК	Индекс УДК помещают перед инициалами и фамилией автора отдельной строкой. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по левому краю.
Автор (авторы)	Инициалы и фамилию автора(ов) на русском языке помещают после индекса УДК. Шрифт обычный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Заглавие	Заглавие помещают через один межстрочный интервал после инициалов и фамилии автора(ов), печатают с прописной буквы без точки в конце. Перевод инициалов, фамилии автора(ов) и заглавия на английский язык помещают соответственно после инициалов, фамилии авторов и заглавия на русском языке. Шрифт полужирный, размер шрифта – 12, выравнивание по центру.
Реферат	Рекомендуемый объем текста реферата 200–250 слов. Реферат на русском языке помещают через один межстрочный интервал после заглавия на английском языке. Перевод реферата на английский язык помещают через один межстрочный интервал после реферата на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по ширине.
Ключевые слова	Ключевые слова на русском языке помещают через один межстрочный интервал после аннотации на английском языке и разделяются запятой. Перевод ключевых слов на английский язык помещают на следующей строке после ключевых на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 8, выравнивание по левому краю.
Основной текст	Рекомендуемая структура основного текста статьи: введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, благодарности. Иллюстрации и таблицы помещаются в тексте статьи по месту их первого упоминания. Иллюстрации, таблицы и формулы нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией.
Библиографический список, библиографические ссылки	Библиографический список помещают через один межстрочный интервал после текста статьи. Перевод библиографического списка на английский язык помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка на русском языке. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, без абзацного отступа, выравнивание по ширине.
Сведения об авторе(ах)	Сведения об авторе(ах) помещают через один межстрочный интервал после библиографического списка. Фамилия Имя Отчество – шрифт полужирный, размер шрифта – 10. Почтовый адрес, наименование организации, ученая степень, звание, академический статус, должность, e-mail. Шрифт обычный, размер шрифта – 10, выравнивание по левому краю.

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 27, № 1 (январь – март) 2024 г.



Подписано в печать 19.03.2024
Дата выхода в свет 29.03.2024
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 13.26. Тираж 500 экз. Заказ № 53.
Цена 2 000 руб. 00 коп.

Адрес издателя:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в редакционно-издательском отделе МАУ:
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13