ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(7-1):105-115
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.3: 622 [571.56] DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_105

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КРИОГЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД БОРТОВ И ОТКОСОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЯКУТИИ

Г.А. Куляндин[1], Л.Л. Федорова[1], М.П. Федоров[1]

[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия, e-mail: kgavrilu@yandex.ru

Аннотация: Для обеспечения безопасности работ, устойчивости горно-технических сооружений в криолитозоне необходима достоверная, достаточно полная и своевременная информация об изменении геокриологических условий массива горных пород в процессе разработки месторождения. Рассмотрены возможности применения комплекса геофизических методов для мониторинга деградации многолетнемерзлых пород, от которых зависит устойчивость бортов, откосов и отвалов. Представлены результаты геофизических исследований состояния массива горных пород борта карьера месторождения строительного песка «Хатынг-Юряхское», расположенного возле г. Якутска. С мая по август по профилю вдоль борта карьера проведены измерения методами георадиолокации (георадар «ОКО-2», 250МГц), электротомографии (электроразведочная аппаратура «Скала-48К12») и инструментального бурения. Проведенные комплексные геофизические исследования позволили проследить сезонно-талый слой, базальный горизонт, выявить линзы галечников и оценить геокриологические условия горных пород борта карьера. При анализе данных особое внимание уделено определению глубины сезонно-талого слоя. Для мониторинга криогенного состояния массива горных пород предложена методика разносезонных измерений, которая предполагает применение метода георадиолокации для исследований верхней части разреза (до 4 м) и электротомографии для оценки геокриологических условий на глубине от 1 до 10 м.

Ключевые слова: георадиолокация, электротомография, мониторинг, разносезонные измерения, криогенное состояние, горные породы, радарограмма, волновой образ, георадиолокационный разрез, геоэлектрический разрез.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант № 13.ЦКП.21.0016.

Для цитирования: *Куляндин Г. А., Федорова Л. Л., Федоров М. П.* Геофизический мониторинг криогенного состояния горных пород бортов и откосов горнотехнических сооружений на территории Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 105–115. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_105.

© Г.А. Куляндин, Л.Л. Федорова, М.П. Федоров. 2024.

Geophysical monitoring of the cryogenic state of rocks boards and slopes of mining structures in Yakutia

G.A. Kulyandin[1], L.L. Fedorova[1], M.P. Fedorov[1]

[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract: To ensure the safety of operations, stability of mining structures in the cryolithozone requires reliable, sufficiently complete and timely information about changes in geocryological conditions of the rock massif in the process of deposit development. The article discusses the possibilities of using a complex of geophysical methods for monitoring the degradation of permafrost rocks, affecting the stability of faces, slopes, and spoils. The results of geophysical studies of the condition of the rock mass of the quarry face of the Khatyng-Yuryakh construction sand deposit, located near the city of Yakutsk, are presented. From May to August along the profile along the face of the quarry the measurements by GPR (OKO-2 (250MHz)), electrical resistivity tomography (ERT equipment Skala-48) and instrumental drilling were carried out. Comprehensive geophysical surveys allowed to trace the seasonally thawed layer, basal horizon, identify lenses of gravels, and assess the geocryological conditions of the rocks of the quarry face. When analyzing the data, special attention was paid to determining the depth of the seasonally thawed layer. To monitor the cryogenic state of the rock massif, a method of multi-seasonal measurements was proposed, which involves the use of GPR for studies of the upper part of the section (up to 4m) and electrical resistivity tomography to assess the geocryological conditions at a depth of 1-10m.

Key words: ground-penetrating radar, electrical resistivity tomography, monitoring, multi-seasonal measurements, cryogenic state, rocks, radarogramm, wave image, ground penetrating radar section, electrical resistivity tomography section.

Acknowledgements: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 0297-2021-0020, reg. No. 122011800086-1) with the use of equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center 'YSC SB RAS' (grant No. 13.ЦКП.21.0016).

For citation: Kulyandin G. A., Fedorova L. L., Fedorov M. P. Geophysical monitoring of the cryogenic state of rocks boards and slopes of mining structures in Yakutia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):105-115. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_105.

Введение

Для обеспечения безопасности и эффективности горных работ необходима достоверная информация о криогенном состоянии горных пород месторождения [1]. С геокриологическими условиями в значительной мере связаны прочностные, тепло- и электрофизические, фильтрационные и другие свойства массивов пород в области распространения многолетней мерзлоты [2, 3]. Мониторинговые наблюдения могут помочь в обеспечении устойчивости бортов и уступов карьеров [4—6]. Получение такой информации возможно с использованием космических интерферометрических радаров [7, 8], беспилотных летательных аппаратов [8, 9], с поверхности земли геодезическими методами [10], а также дистанционными неразрушающими, на-

пример георадиолокацией [11—13] и электротомографией. [14—16]. При этом особенностью геофизических методов является возможность исследовать горный массив на глубину до десятков метров, что значительно превышает сезонное оттаивание в Центральной Якутии (до 3 м).

В данной работе предлагается использовать комплекс методов для выполнения геофизического мониторинга криогенного состояния горных пород на уступе борта карьера. Изучение геометрии разреза с высокой производительностью и разрешающей способностью предлагается выполнять георадиолокацией, а определение электрофизических свойств и криогенного состояния массива горных пород — электротомографией [17—19].

Особенностью предлагаемого мониторинга являются разносезонные измерения, по результатам которых возможно обнаружение зон ослаблений массива, вызванных обводнением либо растеплением горных пород. В качестве примера реализации такого мониторинга в статье представлены исследования на месторождении строительного песка «Хатынг-Юряхское» (Центральная Якутия) [20].

Описание участка исследований

«Хатынг-Юряхское» месторождение строительного песка расположено на территории Центральной Якутии, в г. Якутске. Оно относится к первой надпойменной террасе р. Лены и образовано четвертичными отложениями. В настоящее время на нем ведутся добычные работы. Месторождение сложено песками желтовато-серыми, серыми, светло-серыми, большей частью мелко-среднезернистыми (0,5—0,125 мм) с примесью более грубого материала и с прослоями светлых глин и углефицированных древесных остатков. Местами встречаются прослои илистых супесей мощностью до 0,5—1,5 м. В верхней части разреза прослеживается слой маломощного (0,3—1 м) базального горизонта, образованный ожелезненными галечниками, которые также встречаются в виде линз (рис. 1).

В верхней части разреза повсеместно распространены суглинисто-супесчаные пески мощностью 2—3 м. При минералогическом анализе на месторождении

Рис. 1. Участок борта карьера вдоль геофизического профиля
Fig. 1. Section of the quarry face along the geophysical profile

Рис. 2. Положение геофизического профиля на местности
Fig. 2. Position of the geophysical profile on the field

обнаружены мелкие частицы золота небольшой концентрации [20].

Методика полевых работ

На данном участке работ для исследования горных пород был применен георадар «ОКО-2» с антенным блоком с центральной частотой 250 МГц, позволяющий проводить зондирование до глубины 8 м с разрешающей способностью от 0,25 м. Полевые измерения выполнены вдоль борта карьера, на безопасном для работ расстоянии от уступа, по профилю длиной 300 м (рис. 2). Запись данных георадаром велась во временном диапазоне 200 нс, с пешей скоростью. Режимные наблюдения георадиолокацией охватывают четыре месяца: май, июнь, июль, август. Для уточнения глубины оттайки пород при каждом измерении бурилась скважина. Весной и летом взяты пробы пород для определения влажности термостатно-весовым способом. В комплексе геофизических работ применялась электротомография. При измерениях использовалась электроразведочная аппаратура «Скала 48К12». Длина расстановки — 48 м, шаг между электродами — 1 м. Длина электроразведочного профиля, ввиду особенностей расстановки электродов, составила 340 м.

Методика разносезонных измерений предполагает геофизическую съемку в зимнее (весеннее) время, когда горные породы максимально промерзшие, и съемку летом, в период оттайки [19]. Основным определяемым параметром горных пород при георадиолокации является вещественная часть диэлектрической проницаемости, которая влияет на скорость прохождения электромагнитных волн. Ее значения по разрезу могут существенно различаться, и часто эти изменения связаны с влажностью пород. В зимнее время, при наличии многолетнемерзлых пород, на радарограмме не будет существенного изменения в значениях вещественной части диэлектрической проницаемости, так как массив полностью проморожен. По мере растепления влажность пород будет возрастать, что приведет к изменению волновой картины при последующих наблюдениях.

Такая последовательность работ позволит засечь на радарограмме границу талых и мерзлых пород, а затем просле-

дить за ее динамикой и оценить изменившиеся свойства массива.

Для электротомографии разносезонные измерения — это возможность определить диапазон значений кажущегося удельного электрического сопротивления, соответствующего мерзлым породам, что при дальнейших исследованиях позволит построить более точный геоэлектрический разрез с талыми и мерзлыми породами.

Результаты исследований

Обработка данных георадиолокации выполнена в программе GeoScan32. Процесс первичной обработки данных включал в себя выбор оптимального временного окна для обработки, а также коррекцию начала и конца радарограмм. Далее, для выделения осей синфазности от отражающих границ, радарограммы проходили различные процедуры обработки. Масштаб глубин определялся при помощи процедуры, известной как «гипербола», которая основывается на анализе волн дифракции от локальных объектов, таких как крупная галька, также учитывались данные, полученные в результате бурения. Так, кровля мерзлоты в период наблюдений зарегистрирована на следующих глубинах: май — 0,8 м; июнь — 1,8 м; июль — 2,4 м; август — 3,0 м. Значения вещественной части диэлектрической проницаемости в среднем по разрезу за период измерений составили $\varepsilon' = 6 — 8$. По результатам лабораторных работ весовая влажность пород в своих максимальных значениях весной и летом составила 5 и 13,6% соответственно. Наибольшая влажность сосредоточена у кровли мерзлоты, где происходит накопление влаги от осадков. В целом пески по разрезу сухие, сыпучие. Низкая влажность песков затрудняла определение точного положения границы талых и мерзлых пород, особенно на глубине более 2 м. Песок осыпался из пробоотборника и по стенкам скважины. По этой причине в августе бурение выполнено с проникновением в толщу мерзлоты на 0,2 м.

Анализ радарограмм выполнен на основе интерпретационных признаков георадиолокационных волновых картин, разработанных в результате выполненных авторами исследований криогенного состояния грунтов оснований инженерных сооружений [17—19], а также визуальной оценки борта карьера (см. рис. 1). По борту распознаются толщи песков, прослой галечников (базальный горизонт), а местами выклиниваются линзы ожелезненных галечников.

На рис. 3 приведены результаты мониторинговых наблюдений по данным георадиолокации. На радарограммах выделены две границы: верхняя — подошва сезонно-талого слоя (красная линия), нижняя — кровля слоя ожелезненных галечников (зеленая линия). Из рис. 3, *а* следует, что процесс оттаивания верхнего слоя песка начался уже в мае. При проведении бурения обнаружено, что толщина сезонно оттаявшего слоя на подошве составила 0,8 м. Согласно данным, полученным с помощью георадиолокационных исследований, на открытых, хорошо освещенных участках глубина оттаивания превышает 1 м.

На волновой картине этот слой отображается в виде протяженных осей синфазности, состоящей из последовательности сигналов одной фазы с высокой амплитудой. Контраст амплитуд на границе между талыми и мерзлыми слоями обусловлен различиями в диэлектрических проницаемостях: мерзлые породы имеют низкие значения, в то время как талые и влажные — высокие.

Процесс увлажнения в зоне границы сезонного оттаивания происходит за счет накопления влаги из осадков на водоупоре, сформированном мерзлыми породами.

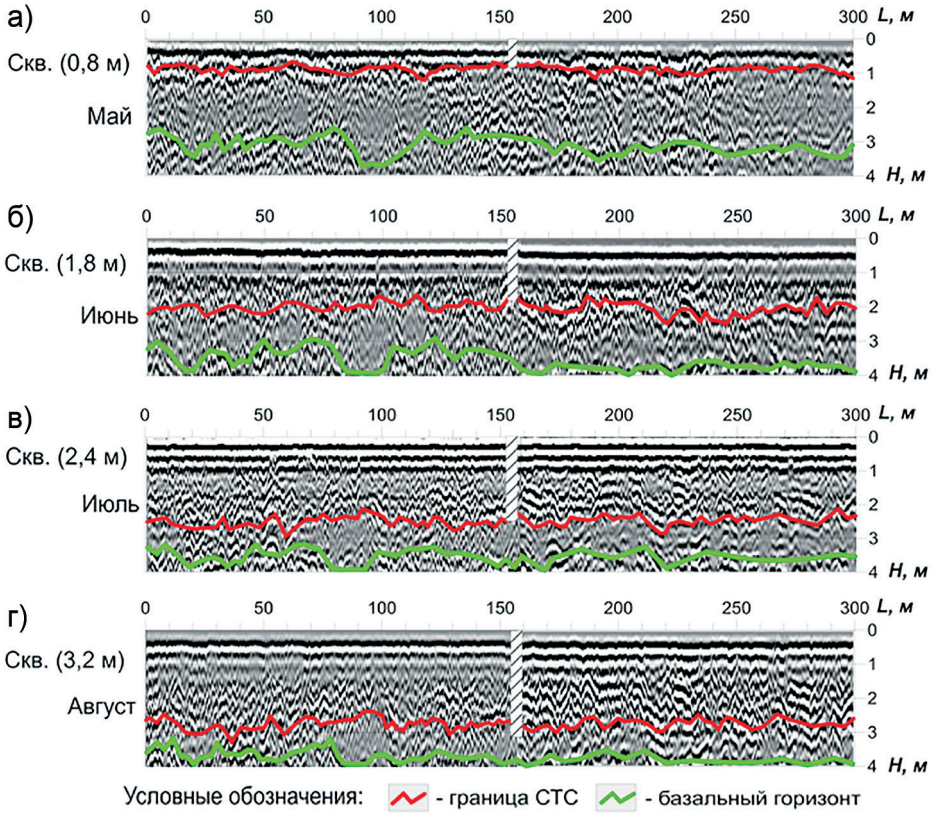

Рис. 3. Данные режимных георадиолокационных наблюдений
Fig. 3. Data of regime GPR observations

Ниже границы сезонно-талого слоя, на глубине 3—4 м, выявлен базальный горизонт небольшой мощности. Он состоит из мелкой сцементированной примесями гальки.

На радарограмме его волновой образ представлен прерывистыми осями синфазности и последовательностью волн дифракции, которые образовались на обломочном материале.

Аналогичная волновая картина наблюдается в летние месяцы. В июне (рис. 3, *б*), по данным бурения, породы оттаяли на 1,8 м. Прослеживаемая на радарограмме граница сезонно-талого слоя местами погрузилась ниже 2 м. На отдельных участках ее контрастность возросла, это наиболее заметно на отрезке 160—200 м по профилю, что связано с изменением литологии и криогенного состояния горных пород. Граница базального горизонта также несколько изменилась, особенно по глубине. Замедление скорости электромагнитных волн в талом слое привело к задержке времени регистрации сигналов, таким образом, визуально эта граница опустилась ниже.

В июле (рис. 3, *в*), по данным бурения, породы оттаяли на 2,4 м. По данным георадиолокации, подошва сезонно-талого слоя в некоторых местах приблизилась к 3 м (на отрезках 20—65 м и 215—230 м). Положение слоя галечников существенно не изменилось. На волновом поле радарограммы появилось

значительное количество высокоамплитудных сигналов в толще сезонно-талого слоя, связанных с изменением литологии и криогенного состояния горных пород. Эти сигналы образовали протяженные оси синфазности в результате различных отражений и отдельные «гиперболы», возникшие при дифракции от обломочного материала. На этом фоне сигналы от кровли мерзлоты уже не так контрастны и их стало сложнее прослеживать.

В августе (рис. 3, *г*), к концу цикла наблюдений, отмечалась глубина оттайки, которая местами превышала 3 м. Георадиолокационные данные указывали на максимальные значения оттайки в областях с менее плотными породами. Предполагается, что более рыхлая и неуплотненная структура этих участков способствовала дренированию осадков, что, в свою очередь, привело к более интенсивному растеплению. В пределах глубины талого слоя прослеживаются высокоамплитудные сигналы хаотично распределенных волн дифракции, местами образующих оси синфазности (по профилю, на отрезках: 130 — 145, 160 — 240, 265 — 300 м). Судя по борту карьера (см. рис. 1), эти зоны могут быть проявлением на радарограмме серых песков, а отличие их волновых образов от песков другого цвета связано с различными физическими свойствами, составом и неравномерным распределением влажности в толще горных пород. Слой галечников прослеживается на глубине около 4 м по волнам дифракции.

Комплексная интерпретация геофизических данных выполнена по заключительным наблюдениям (рис. 4). Георадиолокационный разрез представлен до глубины 6 м, со средним значением вещественной части диэлектрической проницаемости $\varepsilon' = 8$. Как описано выше по всем месяцам наблюдений, на нем также прослеживаются две протяженные границы: подошва сезонно-талого слоя и кровля базального горизонта. Под пластом ожелезненных галечников (базальным горизонтом) на радарограмме прослежены линзы ожелезненных галечни-

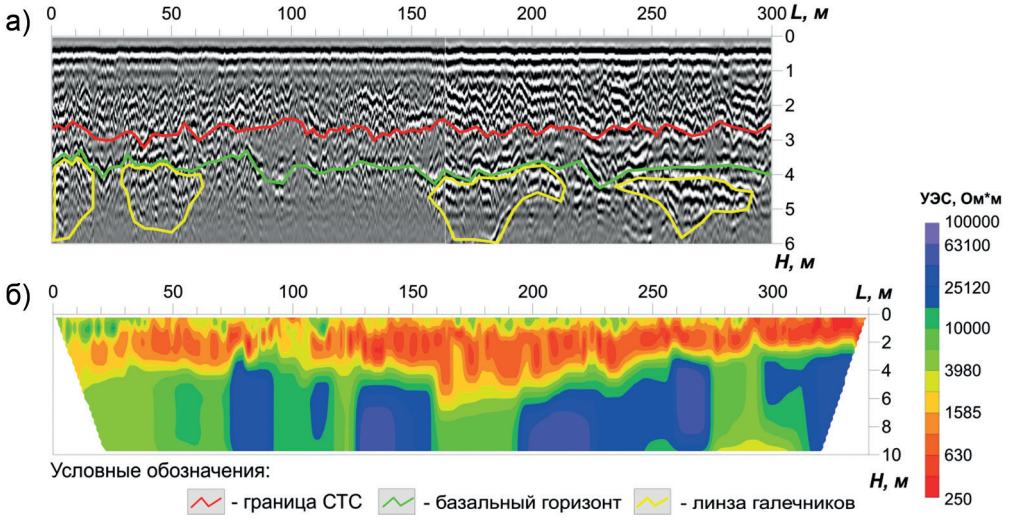

Рис. 4. Результаты комплексной интерпретации данных геофизического мониторинга криогенного состояния горных пород вдоль борта карьера: радарограмма (а); геоэлектрический разрез (б)

Fig. 4. Results of complex interpretation of geophysical monitoring data of cryogenic state of rocks along the quarry side: radarogramm (a); geoelectric section (b)

ков. Множество гиперболических волн дифракции, высокоамплитудных и иногда перекрывающих друг друга, составляют их волновой образ, не имеющий четких границ как по протяженности, так и по глубине. По представленным на рис. 4, *а* данным выявлены четыре крупные линзы, залегающие на глубинах 3,6—5,9 м, на отрезках: 0—20 м, 30—60 м, 160—215 м и 235—292 м.

Ниже радарограммы приведен геоэлектрический разрез длиной 340 м (см. рис. 4, *б*). Глубина исследований методом электротомографии составила 10 м. Диапазон зарегистрированных значений кажущегося удельного электрического сопротивления составил от 250 до 100 000 Ом*м. Сезонно-талому слою соответствует красно-оранжевая заливка, а мерзлым — синяя и темно-зеленая (рис. 4, *б*). Для талых пород значения кажущегося удельного электрического сопротивления определены в диапазоне 250—2500 Ом*м, они находятся на глубинах от 0 до 6 м. Значения для мерзлых и сухих составили 2500–100 000 Ом*м, они распределены в основном на глубинах от 2 до 10 м и лишь частично в приповерхностном слое до 1—2 м. Пласт и линзы ожелезненных галечников на геоэлектрическом разрезе окрашены в зеленый цвет и имеют значения кажущегося удельного электрического сопротивления в диапазоне 3980—15 850 Ом*м. Их положение по протяженности на разрезе совпадает с выделенными зонами на радарограмме.

Заключение

Проведенные комплексные геофизические исследования на уступе борта карьера месторождения строительного песка «Хатынг-Юряхское» позволили проследить сезонно-талый слой, базальный горизонт, выявить линзы галечников и оценить геокриологические условия горных пород борта карьера.

Результатами проведенных работ показано, что георадиолокация по методике разносезонных измерений дает возможность оперативно и с высокой точностью исследовать глубину оттайки массива пород в режиме мониторинга. Установлено, что неоднозначность определения криогенного состояния горных пород по данным георадиолокации может быть решена применением электротомографии в комплексе работ.

Таким образом, для наиболее объективной оценки геокриологических условий разреза, отражающих особенности состояния горного массива (мерзлые или талые породы), а также положения зон структурных неоднородностей и иных геологических границ рекомендуется проводить исследования комплексом геофизических методов (георадиолокация и электротомография) по методике разносезонных измерений (в мерзлом и талом состоянии пород).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рыльникова М. В.*, *Зотеев О. В.*, *Никифорова И. Л.* Развитие нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и отвалов // Горная промышленность. — 2018. — № 3(309). — С. 95—98.

2. *Koroleva E. S.*, *Khairullin R. R.*, *Babkina E. A.*, *Slagoda E. A.*, *Khomutov A. V.*, *Melnikov V. P.*, *Babkin E. M.*, *Tikhonravova Y. V.* Seasonal thawing local changes indicators for UAV-based cryolithozone mapping // Doklady Earth Sciences. 2020, vol. 491, no. 1, pp. 179—182. DOI: 10.1134/S1028334X20030095.

3. *Хосоев Д. В.*, *Панишев С. В.*, *Максимов М. С.* Инженерно-геокриологические условия эльгинского месторождения // Горная промышленность. — 2021. — № 2. — С. 96—100.

4. *Шестернёв Д. М.*, *Чжан Р. В.*, *Кузьмин Г. П.*, *Великин С. А.*, *Павлова Н. А.*, *Литовко А. В.* Мониторинг природно-технических систем в криолитозоне Якутии / Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения: сборник тезисов. — Якутск: Изд-во ИПМ им. Мельникова СО РАН, 2017. — 123 с.

5. *Casagli N., Intrieri E., Tofani V., Gigli G., Raspini F.* Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques // Nature Reviews Earth & Environment. 2023, no. 4, pp. 51—64. DOI: 10.1038/s43017-022-00373-x.

6. *Auflič M. J.*, *Herrera G.*, *Mateos R. M.*, *Poyiadji E., Quental L., Severine B.* Landslide monitoring techniques in the Geological Surveys of Europe // Landslides. 2023, vol. 20, pp. 951—965.

7. *Бондур В. Г.*, *Захарова Л. Н.*, *Захаров А. И.*, *Чимитдоржиев Т. Н.*, *Дмитриев А. В.*, *Дагуров П. Н.* Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров l-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея // Исследование Земли из космоса. — 2019. — № 5. — С. 3—14.

8. *Lissak C., Bartsch A., De Michele M., Gomez C., Olivier M., Raucoules D., Roulland T.* Remote sensing for assessing landslides and associated hazards // Surveys in Geophysics. 2020, vol. 41, pp. 1391—1435.

9. *Ricardo G., Irasema A.* The use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management: a literature review // Journal of Mountain Science. 2021, vol. 18, pp. 482—498. DOI: 10.1007/s11629-020-6467-7.

10. *Симонян В. В.*, *Волков В. И.* Оценка риска застроенных склоновых систем по данным геодезического мониторинга // Геодезия и картография. — 2021. — № 10. — С. 42—51. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-976-10-42-51.

11. *Дьяков А. Ю.*, *Калашник А. И.* Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2021. — 110 с.

12. *Судакова М. С.*, *Брушков А. В.*, *Великин С. А.*, *Владов М. Л.*, *Зыков Ю. Д.*, *Неклюдов В. В.*, *Оленченко В. В.*, *Пушкарев П. Ю.*, *Садуртдинов М. Р.*, *Скворцов А. Г.*, *Царев А. М.* Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2022. — № 6. — С. 141—151. DOI: 10.33623/0579-9406-2022-6-141-151.

13. *Madear C., Asimopolos L., Asimopolos N., Madear G.* Rockmass fracture analysis at cărpiniş travertine quarry using ground penetrating radar and geophysical methods // Mining Revue. 2023, vol. 29, pp. 75—81. DOI: 10.2478/minrv-2023-0017.

14. *Бричева С. С.*, *Бобачев А. А.*, *Матасов В. М.* Опыт комплексирования георадара и высокоразрешающей электротомографии в ландшафтных исследованиях / Научно-практическая конференция в смешанном онлайн-оффлайн формате: Георадар-2021: сборник тезисов. — М., 2022. — С. 77—82.

15. *Оленченко В. В.*, *Осипова П. С.* Электротомография аллювиальных отложений при поисковых работах на россыпное золото // Геология и геофизика. — 2022. — Т. 63. — № 1. — С. 117—129. DOI: 10.15372/gig2020171.

16. *Соловьев Е. Э.*, *Саввин Д. В.*, *Федорова Л. Л.* Исследование геокриологических условий массива многолетнемерзлых пород неразрушающими электромагнитными методами // Горный журнал. — 2019. — № 2. — С. 31—37.

17. *Fedorova L. L.*, *Kulyandin G. A.*, *Savvin D. V.* Geocryological analysis of rocks to predict adverse freeze-and-thaw effects // Journal of Mining Science. 2019, vol. 55, pp. 1023—1031.

18. *Соколов К. О.*, *Федорова Л. Л.*, *Федоров А. А.* Алгоритм обработки и интерпретации георадиолокационных данных при изучении геокриологических структур многолетнемерзлых пород // Известия Уральского государственного горного университета. — 2020. — № 3(59). — С. 5—80.

19. *Федорова Л. Л.*, *Саввин Д. В.*, *Фёдоров М. П.*, *Куляндин Г. А.*, *Стручков А. С.* Георадиолокационный мониторинг состояния грунтов дорожных конструкций, эксплуатируемых в условиях криолитозоны // Дороги и мосты. — 2017. — № 2(38). — С. 12.

20. *Смелов А. П.*, *Сурнин А. А.* Золото города Якутска // Наука из первых рук. — 2010. — Т. 34. — № 4. — С. 4. ГИАБ

REFERENCES

1. Rylnikova M. V., Zoteev O. V., Nikiforova I. L. Development of the regulatory framework in the field of ensuring the stability of the sides and ledges of quarries, cuts and dumps. *Russian Mining Industry Journal*. 2018, no. 3(309), pp. 95—98. [In Russ].

2. Koroleva E. S., Khairullin R. R., Babkina E. A., Slagoda E. A., Khomutov A. V., Melnikov V. P., Babkin E. M., Tikhonravova Y. V. Seasonal thawing local changes indicators for UAV-based cryolithozone mapping. *Doklady Earth Sciences*. 2020, vol. 491, no. 1, pp. 179—182. DOI: 10.1134/S1028334X20030095.

3. Khosoev D. V., Panishev S. V., Maksimov M. S. Engineering and geocryological conditions of the Elga deposit. *Russian Mining Industry Journal*. 2021, no. 2, pp. 96—100. [In Russ].

4. Shesternev D. M., Zhang R. V., Kuzmin G. P., Velikin S. A., Pavlova N. A., Litovko A. V. Monitoring of natural and technical systems in the permafrost zone of Yakutia. *Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya: sbornik tezisov* [Proceedings of the XI International Symposium on Problems of Engineering Permafrost Science. Collection of abstracts], Yakutsk, Izd-vo IPM im. Mel'nikova SO RAN, 2017, 123 p. [In Russ].

5. Casagli N., Intrieri E., Tofani V., Gigli G., Raspini F. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2023, no. 4, pp. 51—64. DOI: 10.1038/s43017-022-00373-x.

6. Auflič M. J., Herrera G., Mateos R. M., Poyiadji E., Quental L., Severine B. Landslide monitoring techniques in the Geological Surveys of Europe. *Landslides*. 2023, vol. 20, pp. 951—965.

7. Bondur V. G., Zakharova L. N., Zakharov A. I., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N. Monitoring of landslide processes using l-band space interferometric radars as an example collapse of the slope of the river Bureya. *Earth Research from Space*. 2019, no. 5, pp. 3—14. [In Russ].

8. Lissak C., Bartsch A., De Michele M., Gomez C., Olivier M., Raucoules D., Roulland T. Remote sensing for assessing landslides and associated hazards. *Surveys in Geophysics*. 2020, vol. 41, pp. 1391—1435.

9. Ricardo G., Irasema A. The use of UAVs for landslide disaster risk research and disaster risk management: a literature review. *Journal of Mountain Science*. 2021, vol. 18, pp. 482—498. DOI: 10.1007/s11629-020-6467-7.

10. Simonyan V. V., Volkov V. I., Risk assessment of built-up slope systems according to geodetic monitoring data. *Geodesy and Cartography*. 2021, no. 10, pp. 42—51. [In Russ]. DOI: 10.22389/0016-7126-2021-976-10-42-51.

11. D'yakov A. Yu., Kalashnik A. I. *Metodicheskie osnovy georadarnykh issledovaniy gornotekhnicheskikh ob"ektov* [Methodological bases of georadar research of mining facilities], Apatity, Izd-vo FITS KNTS RAN, 2021, 110 p.

12. Sudakova M. S., Brushkov A. V., Velikin S. A., Vladov M. L., Zykov Yu. D., Neklyudov V. V., Olenchenko V. V., Pushkaryov P. Yu. Sadurtdinov M. R., Skvortsov A. G., Tsarev A. M. Geophysical methods in geocryological monitoring. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2022, no. 6, pp. 141—151. [In Russ]. DOI: 10.33623/0579-9406-2022-6-141-151.

13. Madear C., Asimopolos L., Asimopolos N., Madear G. Rockmass fracture analysis at cărpiniş travertine quarry using ground penetrating radar and geophysical methods. *Mining Revue*. 2023, vol. 29, pp. 75—81. DOI: 10.2478/minrv-2023-0017.

14. Bricheva S. S., Bobachev A. A., Matasov V. M. The experience of combining GPR and high-resolution electrical tomography in landscape studies. *Nauchno-prakticheskaya konferentsiya v smeshannom onlayn-offlayn formate: Georadar-2021: sbornik tezisov* [Scientific and practical conference in a mixed online-offline format: Georadar 2021. Collection of abstracts], Moscow, 2022, pp. 77—82. [In Russ].

15. Olenchenko V. V., Osipova P. S. Electrotomography of alluvial deposits during prospecting for placer gold. *Geology and Geophysics*. 2022, vol. 63, no. 1, pp. 117—129. [In Russ]. DOI: 10.15372/gig2020171.

16. Soloviev E. E., Savvin D. V., and Fedorova L. L. Investigation of geocryological conditions of a permafrost massif using non-destructive electromagnetic methods. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 2, pp. 31—37. [In Russ].

17. Fedorova L. L., Kulyandin G. A., Savvin D. V. Geocryological analysis of rocks to predict adverse freeze-and-thaw effects. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, pp. 1023—1031.

18. Sokolov K. O., Fedorova L. L., Fedorov A. A. Algorithm for processing and interpreting georadar data in the study of geocryological structures of permafrost. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 3(59), pp. 5—80. [In Russ].

19. Fedorova L. L., Savvin D. V., Fedorov M. P., Kulyandin G. A., Struchkov A. S. Georadar monitoring of the state of soils of road structures operated in the permafrost zone. *Roads and bridges*. 2017, no. 2(38), pp. 12. [In Russ].

20. Smelov A. P., Surnin A. A. Gold of the city of Yakutsk. *Science first hand.* 2010, vol. 34, no. 4, pp. 4. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Куляндин Гаврил Александрович[1] — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7029-0777,
Федорова Лариса Лукинична[1] — канд. техн. наук,
доцент, ведущий научный сотрудник,
e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5002-6140,
Фёдоров Максим Петрович[1] — научный сотрудник,
e-mail: mpfedoroff@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-6722-2861,
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.
Для контактов: Куляндин Г.А., e-mail: kgavrilu@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.A. Kulyandin[1], Cand. Sci. (Eng.),
e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7029-0777,
L.L. Fedorova[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Leading Researcher,
e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5002-6140,
M.P. Fedorov[1], Researcher
e-mail: mpfedoroff@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-6722-2861,
[1] Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677980, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.
Corresponding author: G.A. Kulyandin, e-mail: kgavrilu@yandex.ru.

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 14.04.2024; принята к печати 10.06.2024.
Received by the editors 07.03.2024; received after the review 14.04.2024; accepted for printing 10.06.2024.