ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(5):99-111
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 551.345: 622.02: 621.396.96: 550.8 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_99

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТТАЙКИ МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

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

[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН, Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Аннотация: Для эффективной разработки месторождений в криолитозоне необходимо учитывать не только исходную геокриологическую обстановку, но и возможные ее изменения. Эти изменения могут быть вызваны развитием различных криогенных процессов, связанных с оттайкой мерзлых пород под влиянием природных и техногенных факторов. Рассмотрены возможности применения метода георадиолокации для мониторинга криогенного состояния горных пород. На основе результатов лабораторных георадиолокационных исследований массива мерзлого песка с включением пластового льда установлены закономерности изменения кинематических и спектральных характеристик сигналов в период оттайки. Сравнительный анализ радарограмм, полученных при зондировании пород в различном криогенном состоянии, показал, что замедление скорости распространения сигналов при переходе пород от мерзлого к талому состоянию позволяет зафиксировать начало процесса оттайки мерзлого песка с влажностью выше 3%. Установлено, что особенности огибающей спектра сигналов, отраженных от границ слоя подземного льда, связаны с уменьшением толщины льда в процессе оттайки. Сделан вывод о значительном потенциале метода георадиолокации для применения при мониторинге и прогнозировании изменения геокриологических условий на осваиваемых территориях.

Ключевые слова: мерзлые горные породы, лед, оттайка, криогенные процессы, георадиолокация, скорость распространения георадиолокационных сигналов, спектр сигналов.

Благодарность: Работа выполнена в рамках плана НИР и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-45-140061 р_а.

Для цитирования: *Федорова Л. Л., Федоров М. П., Куляндин Г. А., Саввин Д. В.* Георадиолокационные исследования оттайки мерзлых горных пород в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 99–111. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_99.

Ground-penetrating radar method to study thawing of frozen rock at the laboratory scale

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

[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Abstract: Efficient mining in the permafrost zone needs taking into account the initial geocryological situation and its possible change. The changes can be caused by various cryogenic pro-

© Л.Л. Федорова, М.П. Федоров, Г.А. Куляндин, Д.В. Саввин. 2021.

cesses connected with thawing of permafrost rocks under the influence of natural and induced factors. This article discusses abilities of the ground-radar penetrating method in monitoring of permafrost rocks. The tests of the ground-radar penetrating method in investigation of frozen sand with inclusion of formation ice at the laboratory scale allowed finding the mechanisms of change in the kinetic and spectral characteristics of signals in the period of thawing. The comparison of radarograms recorded in probing of different-degree frozen rocks shows that deceleration of signal propagation during transition of rocks from frozen condition to thawing points at the start of thawing in frozen sand with wetness above 3%. It is found that the features of the spectrum envelope of signals reflected from the boundary of the ground ice layer are related with the decreasing thickness of the ice layer during thawing. The conclusion is drawn on the considerable potential of the ground-penetrating radar method in monitoring and prediction of changes in geocryology in areas under mining.

Key words: frozen rocks, ice, thawing, cryogenic processes, ground-penetrating radar, radar signal velocity, signal spectrum.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 18-45-140061 r_a.

For citation: Fedorova L. L., Fedorov M. P., Kulyandin G. A., Savvin D. V. Ground-penetrating radar method to study thawing of frozen rock at the laboratory scale. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5):99-111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_99.

Введение

Эффективность разработки любого месторождения полезных ископаемых, расположенного на территории многолетней мерзлоты, достигается оптимальным выбором основных технологических параметров, которые для каждого месторождения определяются конкретными геокриологическими условиями. В этом случае наиболее значимыми геокриологическими параметрами массива горных пород являются: распространение многолетней мерзлоты и ее прерывистость; температура пород в подошве слоя годовых теплооборотов; влажность (льдистость) горных пород; условия залегания подземных льдов; мощность сезонно-талого слоя (СТС); наледи; надмерзлотные воды; талики. Из перечисленных параметров особый интерес вызывают включения льда в горных породах, проявляющиеся в различных формах, от мелких прожилок до огромных ледяных линз, затрудняющих ведение горных работ [1].

Характерной особенностью месторождений криолитозоны является резкое изменение прочности горных пород вследствие их промерзания или оттаивания. С наступлением теплой погоды в приповерхностных частях массива коренных и осадочных пород трещинный лед тает, в результате чего образуются пустоты и ликвидируются связи между блоками [2–4]. При оттаивании многолетнемерзлые породы часто разжижаются, становятся вязкими, что также затрудняет работу горнотранспортного оборудования [5 — 7].

Дальнейшее нарушение теплового режима будет способствовать увеличению водопритока и обводнению горных пород, которое может еще больше усугубить ситуацию и вызвать незапланированные деформации пород с их последующим обрушением или сдвижением [8]. Эти негативные процессы часто приводят к значительному замедлению и удорожанию добычи полезных ископаемых.

Для оценки геокриологической обстановки и более полного и достоверного представления о процессах, протекающих в массиве многолетнемерзлых горных пород при его освоении, а также для обоснованного выбора оптимальных параметров разработки актуальны исследования по развитию комплекса мониторинговых наблюдений за криогенным состоянием горных пород. Основой этой системы могут быть дистанционные геофизические методы.

Ведущими методами при изучении мерзлых горных пород являются электромагнитные методы, что обусловлено их высокой информативностью, мобильностью и относительно невысокой стоимостью [9–13]. В условиях различных помех урбанизированных территорий (высоковольтные линии, кабели, трубопроводы и т.д.) возможность дистанционных исследований горного массива в широком диапазоне температур окружающего воздуха обеспечивает метод георадиолокации [14]. Кроме того, методика выполнения полевых работ позволяет получать данные георадиолокации профилированием произвольной протяженности, выполнять дискретные зондирования в условиях сложно-пересеченной местности, вблизи инженерных сооружений и горной техники [15–18].

Цель данной статьи — оценить возможности георадиолокации при геокриологических исследованиях в режиме мониторинга. Статья написана по результатам лабораторных исследований, проведенных на физической модели массива мерзлых песков с включением подземного пластового льда.

Оборудование и методы

Электромагнитные волны, испускаемые георадаром, отражаются от границ раздела сред с различными электрофизическими параметрами. Интенсивность отраженных сигналов зависит от формы, протяженности, размеров, контрастности диэлектрических свойств отражающих объектов. Различия в электрофизических свойствах горных пород, льда и воды обеспечивают успешное применение георадиолокации при изучении верхней части разреза криолитозоны [14, 19–25].

Георадарные наблюдения оттайки мерзлых пород проведены в лабораторных условиях на базе ИГДС СО РАН. Исследуемая модель представлена массивом речного песка с включением пластового льда. Лабораторная установка собрана в виде деревянного короба (3×1×1,5 м), основанием которого является мерзлый грунт (рис. 1, *а*). Модель пластового льда представлена фрагментом речного льда размерами 1×0,4× ×0,72 м, размещенным на дне короба (рис. 1, *б*). Лабораторная установка за-

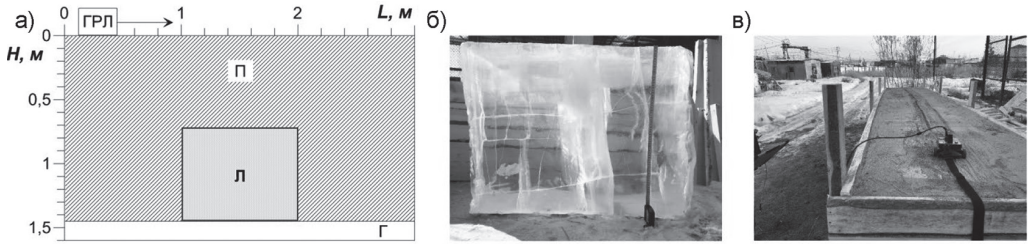

Рис. 1. Схема массива мерзлых пород (а) с включением пластового льда (б) (П — песок, Л — лед, Г — грунт) и процесс георадиолокационных измерений георадаром (ГРЛ) «ОКО-2» с антенным блоком АБ-1200 (в)

Fig. 1. Scheme of frozen rock mass (a) with ice pockets (b) (Sn — sand; I — ice; Sl — soil) and ground penetrating radar survey with georadar OKO-2 with antenna assembly AB-1200 (c)

полнена сыпучим, без смерзшихся комков и глыб речным песком, почти до верхней кромки, общей мощностью 1,44 м.

Исследования процесса оттайки модели проведены с конца апреля по июнь 2019 г. Контроль изменения толщины модели, а также мощность слоя песка, перекрывающего лед, определялись в процессе оттайки щупом и измерительной рулеткой. По результатам контактных измерений рассчитывалась толщина таящего льда.

Георадиолокационные измерения проведены георадаром «ОКО-2» (группа компаний «Логис-Геотех» с антенным блоком АБ-1200 (центральная частота 1200 МГц). Исследование пород модели проводилось методикой профилирования (рис. 1, *в*) со следующими параметрами зондирования: количество точек по вертикали принимаемых трасс — 511; временной диапазон регистрации данных (развертка) — 32 нс; число накоплений для усреднения трасс — от 4 до 32; диэлектрическая проницаемость ε' = = 4; шаг между трассами — 10 мм. Для замера пройденного пути был использован встроенный датчик перемещения. В результате исследований получены данные георадиолокации оттайки мерзлых пород. По временной шкале радарограмм определено время Δt для импульсов, отраженных от этих границ. По полученным значениям Δt и данным толщины слоев модели выполнены расчеты скоростей распространения георадиолокационных сигналов и вещественной части относительной диэлектрической проницаемости пород с использованием следующих соотношений:

$$V = \frac{2H}{\Delta t}, \qquad (1)$$

$$\varepsilon' = \left(\frac{c}{V}\right)^2, \qquad (2)$$

где ε' — диэлектрическая проницаемость слоя; c — скорость света; V — скорость распространения георадиолокационного сигнала; Δt — двойное время прохождения сигнала в слое; H — толщина слоя.

Для лабораторного исследования зависимости радиофизических характеристик георадиолокационных сигналов среднезернистого песка (речной песок) от влажности подготавливались специальные образцы в емкости размерами 0,5×0,5×0,25 м. Влажность образцов песка определялась по ГОСТу 5180-2015 [26]. Затем они замораживались в холодильной камере «Castlcool» при температуре —15°. После полного промерзания образцы извлекались из камеры и оставались при комнатной температуре. В процессе оттайки, через каждые 30 мин, проводились георадиолокационные измерения георадаром «ОКО-2» с центральной частотой антенного блока 1200 МГц.

Обработка результатов измерений выполнена программным обеспечением (ПО) «GeoScan32» (группа компаний «Логис-Геотех», Россия) с применением следующих процедур: корректировка начала записи, редактирование трасс, полосовая фильтрация в полосе соответствующему полезному сигналу и коррекция амплитудных характеристик.

Результаты

На основе наблюдений за оттайкой пород построены графики изменений в модели за весь период исследований (рис. 2).

В апреле толщина слоев модели не изменялась, породы были мерзлыми. В период с 7 мая по 30 июня наблюдалось уменьшение общей толщины модели от 1,44 м до 1,15 м (рис. 2, сплошная линия). Просадка модели произошла за счет вытаивания льда от 0,72 м до 0,11 м (рис. 2, пунктирная линия). Несоответствие глубины просадки общей модели (0,29 м) и мощности вытаивания льда (0,61 м) объясняется медленным

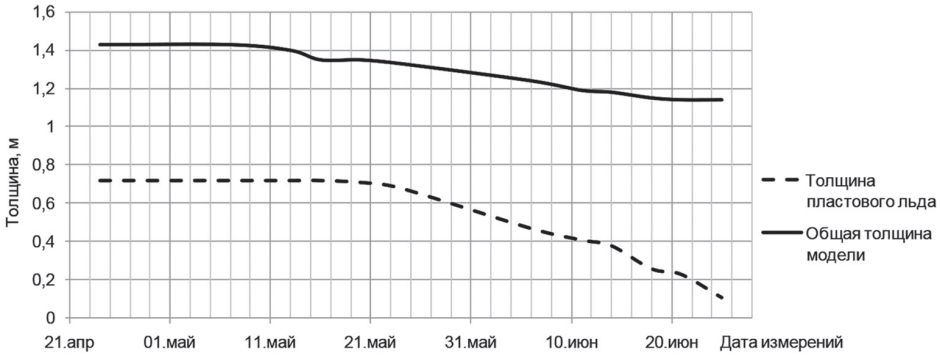

Рис. 2. Изменения в модели массива мерзлых пород в процессе оттайки
Fig. 2. Changes in the model of frozen rock mass during thawing

процессом растепления пород, в результате которого, образующееся при вытаивании льда поровое пространство постепенно заполнялось песком под действием собственного веса.

На рис. 3 представлены радарограммы, полученные в результате георадиолокационного профилирования с поверхности модели. На всех радарограммах, состоящих из совокупности георадиолокационных трасс, прослеживаются протяженные оси синфазности сигналов, отраженных от границ слоев модели: «мерзлый песок — лед» и «лед — мерзлый грунт».

Обсуждение результатов

Результаты расчетов скоростей распространения георадиолокационных сигналов ($V_п$ — в песке, $V_л$ — во льду) и вещественной части относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon'_п$ — песка, $\varepsilon'_л$ — льда) представлены в таблице.

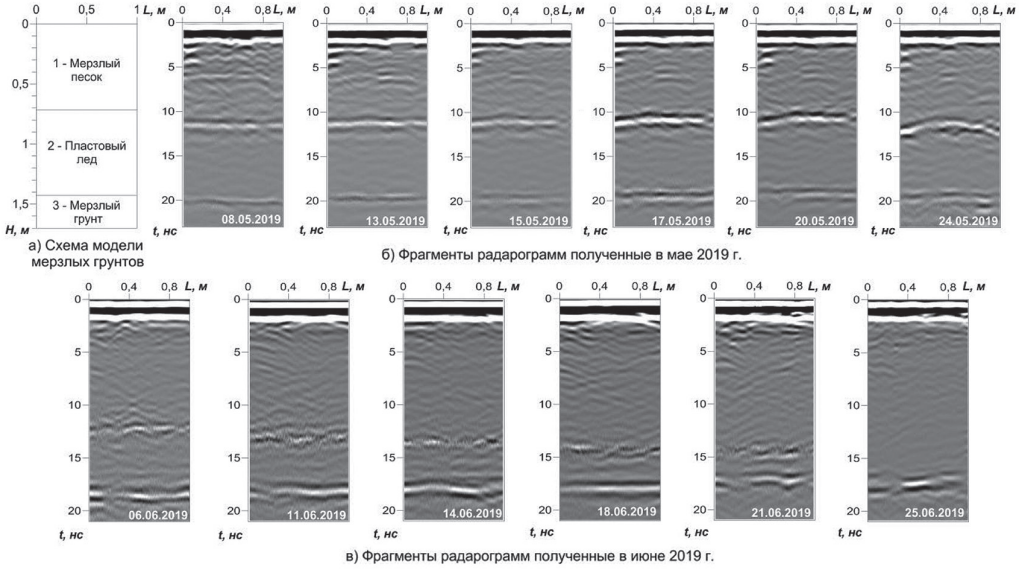

Рис. 3. Схема модели массива мерзлых пород (а) и результаты георадиолокационного профилирования (радарограммы) (б, в)
Fig. 3. Model structure of frozen rock mass (a) and ground penetrating radar exploration results (radarograms) (b, c)

Электрофизические характеристики пород модели по данным георадиолокации
Electrophysical characteristics of model rocks from ground penetrating radar data

Дата	05.04	30.04	08.05	13.05	17.05	20.05	24.05	06.06	11.06	14.06	18.06	21.06	25.06
$V_п$,	0,150	0,149	0,134	0,132	0,128	0,128	0,128	0,125	0,129	0,125	0,126	0,127	0,127
$\varepsilon'_п$	4	4	5	5,2	5,5	5,5	5,5	5,8	5,4	5,8	5,7	5,6	5,6
$V_л$,	0,168	0,168	0,165	0,162	0,156	0,159	0,162	0,154	0,140	0,146	0,146	0,150	–
$\varepsilon'_л$	3,2	3,2	3,3	3,4	3,7	3,6	3,4	3,8	4,6	4,2	4,2	4	–

Данные показали, что при оттайке модели массива мерзлых грунтов наблюдаются изменение характеристик георадиолокационных сигналов. Среднее значение скорости распространения георадиолокационного сигнала в песке ($V_п$) варьирует от 0,125 м/нс до 0,150 м/нс, а средние значения $\varepsilon'_п$ — от 4 до 5,8. Значение $V_л$ изменяется в пределах 0,140–0,168 м/нс, соответственно $\varepsilon'_л$ — 3,2–4,6.

Для отображения рассчитанных скоростей распространения георадиолокационных сигналов (таблица) построены графики (рис. 4, *а*, *б*). Из рис. 4, а видно, что в процессе оттайки модели массива мерзлых пород наблюдается снижение скоростей распространения сигналов по интервалам. В интервале I скорость распространения сигнала в мерзлых породах составила 0,15 м/нс. В интервале II прослеживается тенденция уменьшения скорости от 0,149 м/нс до 0,128 м/нс, что указывает на процесс оттайки мерзлых пород. В интервале III зафиксировано полное оттаивание массива пород при скорости 0,128 м/нс. При этом влажность грунтов по ГОСТ 5180-2015 [26] составила 5%. Значения $V_п$ для песков с такой влажностью в целом соответствуют ранее полученным результатам [27].

Данные на рис. 4, *б* демонстрируют ступенчатое снижение скорости распространения сигналов в процессе таяния пластового льда. Скорость в сухом льде (интервал I) составила 0,168 м/нс. В интервале II наблюдается процесс таяния льда. При этом скорость стабилизировалась при значении 0,155 м/нс на короткий промежуток времени. Далее в этом интервале скорость идет на убыль до полного оттаивания льда.

При оттайке модели массива мерзлых пород с включением пластового льда с апреля по июнь выполнен анализ амплитудных спектров отраженных волн на границе «песок — лед». Спектры сигналов по данным на разные даты представлены на рис. 5. В период оттай-

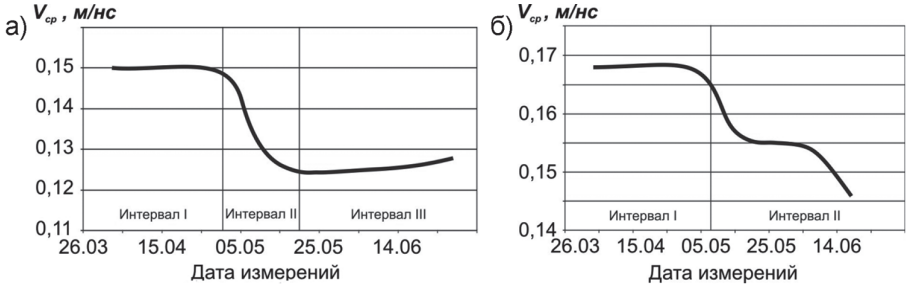

Рис. 4. Скорость распространения георадиолокационных сигналов при оттайке массива мерзлых пород (а) и при таянии пластового льда (б)

Fig. 4. Propagation velocity of ground penetrating radar signals during thawing of frozen rocks (a) and formation ice (b)

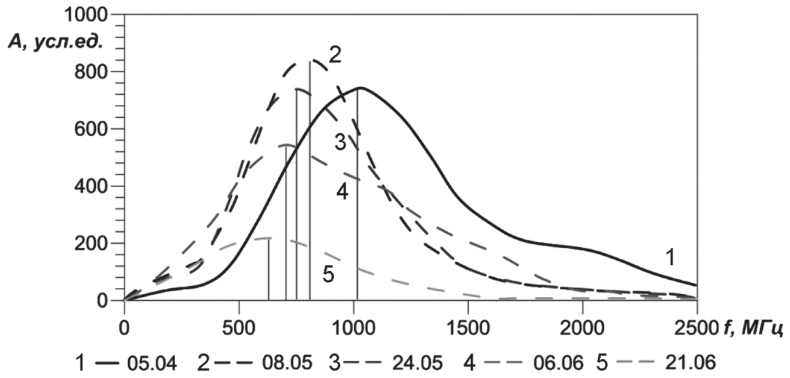

Рис. 5. Амплитудные спектры сигналов, отраженных от границы «песок — лед»
Fig. 5. Amplitude spectra of signals reflected from sand–ice interface

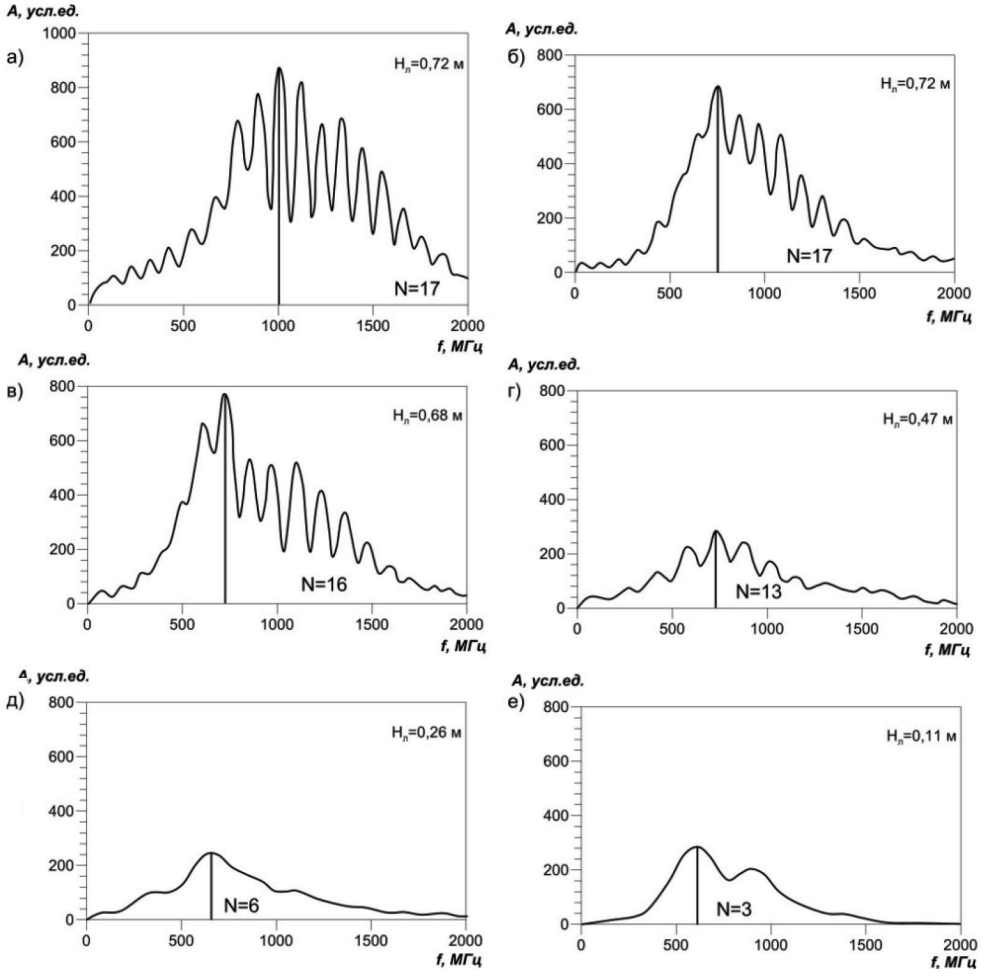

Рис. 6. Амплитудные спектры георадиолокационных сигналов от границ пластового льда при оттайке
Fig. 6. Amplitude spectra of ground penetrating radar signals from boundary of formation ice during thawing

ки пород модели с 8 мая по 21 июня зафиксировано смещение центральной частоты спектра с 1000 МГц до 625 МГц. Как видим, при увеличении влажности песка в процессе оттайки происходит смещение центральной частоты спектра отраженного сигнала в низкочастотную область.

Анализ спектров сигналов, полученных при толщине льда ($H_л$) от 0,72 м до 0,11 м (рис. 2), показывает различную форму огибающей Фурье-спектра. Установлено, что спектр георадиолокационных сигналов от пластового льда имеет «изрезанную» форму (рис. 7). Согласно [28], при георадиолокации слой электрически менее плотного непоглощающего вещества внутри более плотного непоглощающего можно рассматривать как режекторный гребенчатый фильтр, у которого «зубья» режекции расположены на частотах $k/\Delta t$ (где Δt — двойное время прохождения электромагнитной волны во льду; k = 0, 1, 2 ...).

В нашем случае в качестве гребенчатого режекторного фильтра выступает слой пластового льда внутри песка. При этом количество максимумов (N) на огибающей спектра (параметр «изрезанности») зависит от толщины льда. По данным наших исследований для льда в исходном состоянии ($H_л$ = 0,72 м, Δt = 8,62 нс) частота режекции составляет: $1/\Delta t$ = 114 МГц.

При ширине диапазона спектра частот 2000 МГц дляиспользуемого антенного блока (1200 МГц) на Фурье-спектре георадиолокационной трассы (рис. 6, *а*) ожидается N = 2000/114 ≈ 17 максимумов. Данное расчетное количество максимумов спектра (N) подтверждается их подсчетом на спектрах сигналов экспериментальных измерений (рис. 6, *а*, при толщине пластового льда $H_л$ = 0,72 м, N = 17). Как видно на рис. 6, с уменьшением толщины льда количество максимумов (N) снижается.

Выборка данных из лабораторных исследований зависимости радиофизических характеристик георадиолокационных сигналов в образцах среднезернистого песка (речной песок) от влажности выполнена по мерзлому песку в диапазоне отрицательных температур образцов, от –11,6° до –7,6°, по талому песку в диапазоне положительных температур образцов, от 14,9° до 21,3°. Результаты исследований показали, что мерзлому состоянию речного песка с влажностью от 21,8% до 3,6% соответствуют скорости распространения радиоволн ($V_м$) в диапазоне 0,137–0,157 м/нс. Скорости в талом состоянии ($V_т$) при этих же значениях влажности находятся в диапа-

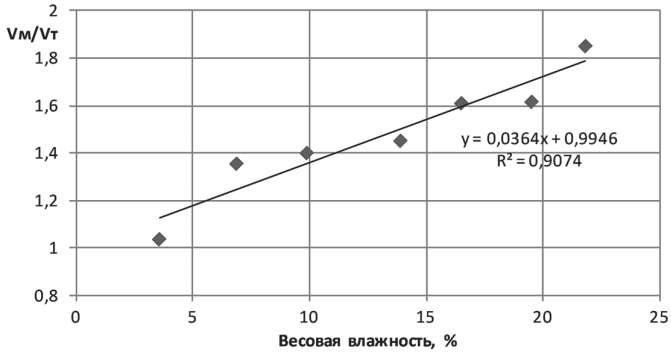

Рис. 7. Относительное изменение скорости распространения георадиолокационных сигналов в образцах горных пород с различной влажностью в мерзлом и талом состоянии

Fig. 7. Fractional variation in propagation velocity of ground penetrating radar signals in frozen and thawed rocks having different moisture content

зоне 0,074–0,136 м/нс. Относительное изменение скорости распространения радиоволн ($V_м/V_т$) в разноувлажненном песке показало, что оно увеличивается с увеличением весовой влажности образцов (рис. 7).

Результаты проведенных исследований показывают, что процесс оттайки мерзлых пород отображается в георадиолокационных волновых полях изменением кинематических и спектральных характеристик отраженных сигналов.

Замедление скорости распространения сигналов при переходе от мерзлого состояния пород к полной их оттайке составляет до 1,85 раз. Это значение зависит от влажности породы. Чем больше влажность, тем более заметно замедление скорости. Таким образом, зафиксировать изменение криогенного состояния пород возможно по разнице скорости распространения (времени задержки) георадиолокационных сигналов, полученных при исследованиях в режиме мониторинга. При этом сравнительный анализ скорости георадиолокационных сигналов возможен при достаточной влажности породы. Например, для исследованного речного песка замедление скорости при разных его криогенных состояниях заметно при влажности выше 3% [27]. Также необходимо учитывать, что данные признаки установлены для дисперсных пород.

Одним из георадиолокационных признаков для мониторинга оттайки горных пород могут выступать спектральные характеристики сигналов. Так, смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкую область характеризует увеличение незамерзшей воды в породе, то есть процесс оттайки. Уменьшение толщины слоя подземного льда при оттайке можно оценить по уменьшению «изрезанности» огибающей Фурье спектра георадиолокационных сигналов.

Для практического применения установленных признаков изменения характеристик георадиолокационных сигналов при оттайке горных пород необходимо провести дальнейшие исследования по разработке методики георадиолокационного мониторинга криогенного состояния горных пород с обоснованием рационального режима измерений, учета повторяемости условий полевых измерений, хранения, привязки данных, граф обработки и интерпретации, представления радарограмм и т.п.

Заключение

По результатам экспериментальных георадиолокационных исследований горных пород различного криогенного состояния установлены закономерности изменения кинематических и спектральных характеристик сигналов в процессе оттайки пород. Установленные закономерности позволяют утверждать, что применение метода георадиолокации имеет значительный потенциал для оценки, мониторинга и прогнозирования изменения геокриологических условий на осваиваемых территориях. Наши дальнейшие исследования будут сосредоточены на разработке методики геокриологического мониторинга с использованием установленных закономерностей изменения характеристик георадиолокационных сигналов, разработке программно-методического обеспечения и обосновании рационального режима измерений для ее практического применения с целью повышения технологической эффективности отработки месторождений твердых полезных ископаемых и обеспечения устойчивости эксплуатируемых инженерно-технических сооружений.

При проведении экспериментальных работ приняли участие сотрудники лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН Н.Д. Прудецкий, А.А. Федоров и аспирант Р.А. Дягилева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Николаев С. П.*, *Заровняев Б. Н.*, *Федорова Л. Л.*, *Куляндин Г. А.* Оценка состояния массива георадиолокационным зондированием для совершенствования буровзрывных работ в условиях криолитозоны // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 9—13. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.02.

2. *Галкин А. Ф.*, *Курта И. В.* Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 82—91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.

3. *Ткач С. М.*, *Курилко А. С.*, *Романова Е. К.* Роль теплофизических исследований в обеспечении эффективности и безопасности эксплуатации глубоких карьеров криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S56. — С. 80—85.

4. *Гончаров Ю. М.* Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. — Якутск: ИМЗ СО РАН, 2016. — 578 с.

5. *Панишев С. В.*, *Каймонов М. В.* Методический подход к прогнозу производительности драглайна при разработке взорванной горной массы в карьерах криолитозоны // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 98—104.

6. *Изаксон В. Ю.*, *Петров Е. Е.*, *Ковлеков И. И.* Прогноз термомеханического состояния многолетнемерзлого массива. — Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. — 108 с.

7. *Курилко А. С.*, *Ермаков С. А.*, *Хохолов Ю. А.*, *Каймонов М. В.*, *Бураков А. М.* Моделирование тепловых процессов в горном массиве при открытой разработке россыпей криолитозоны. — Новосибирск: Гео, 2011. — 139 с.

8. *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, no. 6, pp. 1023—1031.

9. *Туренко С. К.*, *Дружинина К. В.* О системном подходе к повышению эффективности исследований объектов криолитозоны геофизическими методами // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2018. — № 2. — С. 27—31.

10. *Ефремов В. Н.*, *Дроздов А. В.* Изменения геокриологического состояния насыпных ГТС в Западной Якутии и оптимизация их мониторинга комплексом электроразведочных методов геофизики // Наука и образование. — 2016. — № 3(83). — С. 36—42.

11. *Великин С. А. Марченко Ю. Л.*, *Бажин К. И.* Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного борта карьера «Нюрбинский» (Западная Якутия) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2015. — № 3. — Вып. 27. — С. 35—46.

12. *Briggs M. A.*, *Seth C.*, *Jay N.*, *Walvoord M. A.*, *Ntarlagiannis D., Day-Lewis F., Lane J. W.* Surface geophysical methods for characterising frozen // Ground in transitional permafrost landscapes. 2017, vol. 28, no. 1, pp. 52—65.

13. *Xinglin Lu, Ao Song, Rongyi Qian, Lanbo Liu* Characterization of subsurface structure in different landforms based on GPR profiles along the Qinghai-Tibet Highway on permafrost region / GPR 2018: 17th International Conference on Ground Penetrating Radar. Rapperswil, Switzerland, 2018, pp. 335—339.

14. *Harry M. J.* Ground penetrating radar: theory and applications, Elsevier, 2009. 524 p.

15. *Андрианов С. В.* Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 5. — С. 124—132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

16. *Hinkel K. M.*, *Doolittle J. A.*, *Bockheim J. G.*, *Nelson F. E.*, *Paetzold R., Kimble J. M.*, *Travis R.* Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 2001, no. 12, pp. 179—190.

17. *Noskevich V. V.*, *Kuzbozhev A. S.* GPR investigations of soils in the permafrost zone of the gas pipeline Bovanenkovo — Ukhta // Geophysical research. 2017, vol. 18, no. 3, pp. 17—26.

18. *Funk C. W.*, *van den Berghe M.* Mapping complex geology with GPR in a Canadian Potash Mine // GPR 2018: 17th International Conference on Ground Penetrating Radar. Rapperswil, Switzerland, 2018, pp. 417 — 421.

19. *Омельяненко А. В.*, *Федорова Л. Л.* Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2006. — 136 с.

20. *Ермаков А. П.*, *Старовойтов А. В.* Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестник московского университета. Серия 4. Геология. — 2010. — № 6. — С. 91 — 96.

21. *Wollschläger U., Gerhards H., Yu Q., Roth K.* Multi-channel ground-penetrating radar to explore spatial variations in thaw depth and moisture content in the active layer of a permafrost site // The Cryosphere. 2010, no. 4, pp. 269 — 283.

22. *Судакова М. С.*, *Садуртдинов М. Р.*, *Малкова Г. В.*, *Скворцов А. Г.*, *Царев А. М.* Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях // Криосфера Земли. — 2017. — т. XXI. — № 3. — С. 69 — 82.

23. *Бричева С. С.*, *Крылов С. С.* Георадиолокация приповерхностных многолетнемерзлых пород // Инженерные изыскания. — 2014. — № 9–10. — С. 38 — 44.

24. *Cao B., Gruber S., Zhang T., Li L., Peng X., Wang K., Zheng L., Shao W., Guo H.* Spatial variability of active layer thickness detected by ground-penetrating radar in the Qilian Mountains, Western China // Journal of Geophysical Research Earth Surface. 2017, vol. 122, no. 3, pp. 574 — 591.

25. *Gusmeroli A., Lin L., Schaefer K., Zhang T., Schaefer T., Grosse G.* Active layer stratigraphy and organic layer thickness at a thermokarst site in Arctic Alaska identified using ground penetrating radar // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2015, vol. 47, no. 2, pp. 195 — 202.

26. *Грунты.* Методы лабораторного определения физических характеристик. — М.: Стандартинформ, 2016. — 30 с.

27. *Федорова Л. Л.*, *Саввин Д. В.*, *Соколов К. О.*, *Куляндин Г. А.* Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности // Наука и образование. — 2016. — № 3(83). — С. 42 — 46.

28. *Финкельштейн М. И.*, *Кутев В. А.*, *Золотарев В. П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. — М.: Недра, 1986. — 128 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Nikolaev S. P., Zarovnyaev B. N., Fedorova L. L., Kulyandin G. A. Ground-penetrating radar surveys towards drilling and blasting improvement in permafrost. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no 12, pp. 9 — 13. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.02.

2. Galkin A. F., Kurta I. V. Effect of temperature on thaw depth in frozen rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 2, pp. 82 — 91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91.

3. Tkach S. M., Kurilko A. S., Romanova E. K. Effect of thermophysical research to cryolitezone deep opencast effectiveness and safety exploitation providing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no S56, pp. 80 — 85. [In Russ].

4. Goncharov Yu. M. *Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlykh gruntakh* [Bases and foundations on permafrost grounds], Yakutsk, IMZ SO RAN, 2016, 578 p.

5. Panishev S. V., Kaimonov M. V. Technical approach to prediction of dragline productiveness in blasted rock handling at open pit mines in permafrost zone. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no 4, pp. 98 — 104. [In Russ].

6. Izakson V. Yu., Petrov E. E., Kovlekov I. I. *Prognoz termomekhanicheskogo sostoyaniya mnogoletnemerzlogo massiva* [Forecast of the thermomechanical state of the permafrost massif], Yakutsk, YaNTS SO AN SSSR, 1989, 108 p.

7. Kurilko A. S., Ermakov S. A., Khokholov Yu. A., Kaymonov M. V., Burakov A. M. *Modelirovanie teplovykh protsessov v gornom massive pri otkrytoy razrabotke rossypey kriolitozony* [Modeling of thermal processes in a rock massif during mining placers of the cryolithozone], Novosibirsk, Geo, 2011, 139 p.

8. 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, no. 6, pp. 1023 — 1031.

9. Turenko S. K., Druzhinina K. V. On systemic approach to increasing the effectiveness of researches of cryolithozone objects by geophysical methods. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. *Neft' i gaz*. 2018, no 2, pp. 27 — 31. [In Russ].

10. Efremov V. N., Drozdov A. V. Changes of a geocryologic condition of earthfill dams in Western Yakutia and optimization of monitoring by a complex of geophysical electroprospecting methods. *Nauka i obrazovanie*. 2016, no 3(83), pp. 36 — 42. [In Russ].

11. Velikin S. A., Marchenko U. L., Bazhin K. I. Geophysical research during the study of engineering and geocryological state of host rocks in the eastern mine «Nyurba» (Western Yakutia). *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific Center». Earth Sciences*. 2015, no 3, iss. 27, pp. 35 — 46. [In Russ].

12. Briggs M. A., Seth C., Jay N., Walvoord M. A., Ntarlagiannis D., Day-Lewis F., Lane J. W. Surface geophysical methods for characterising frozen. *Ground in transitional permafrost landscapes*. 2017, vol. 28, no. 1, pp. 52 — 65.

13. Xinglin Lu, Ao Song, Rongyi Qian, Lanbo Liu Characterization of subsurface structure in different landforms based on GPR profiles along the Qinghai-Tibet Highway on permafrost region. *GPR 2018: 17th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Rapperswil, Switzerland, 2018, pp. 335 — 339.

14. Harry M. J. *Ground penetrating radar: theory and applications*, Elsevier, 2009. 524 p.

15. Andrianov S. V. GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no 5, pp. 124 — 132. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

16. Hinkel K. M., Doolittle J. A., Bockheim J. G., Nelson F. E., Paetzold R., Kimble J. M., Travis R. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2001, no. 12, pp. 179 — 190.

17. Noskevich V. V., Kuzbozhev A. S. GPR investigations of soils in the permafrost zone of the gas pipeline Bovanenkovo — Ukhta. *Geophysical research*. 2017, vol. 18, no. 3, pp. 17 — 26.

18. Funk C. W., van den Berghe M. Mapping complex geology with GPR in a Canadian Potash Mine. *GPR 2018: 17th International Conference on Ground Penetrating Radar*. Rapperswil, Switzerland, 2018, pp. 417 — 421.

19. Omel'yanenko A. V., Fedorova L. L. *Georadiolokatsionnye issledovaniya mnogoletnemerzlykh porod* [Ground penetrating radar survey of permafrost rocks: monograph], Yakutsk, YaNTS SO RAN, 2006, 136 p.

20. Ermakov A. P., Starovoytov A. V. Application of ground penetration radar method in ingineering and geological research in order to estimate geocryological condition. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2010, no 6, pp. 91 — 96.

21. Wollschläger U., Gerhards H., Yu Q., Roth K. Multi-channel ground-penetrating radar to explore spatial variations in thaw depth and moisture content in the active layer of a permafrost site. *The Cryosphere*. 2010, no. 4, pp. 269 — 283.

22. Sudakova M. S., Sadurtdinov M. R., Malkova G. V., Skvortsov A. G., Tsarev A. M. Application of ground penetrating radar in permafrost investigations. *Kriosfera Zemli*. 2017, vol. XXI, no 3, pp. 69 — 82. [In Russ].

23. Bricheva S. S., Krylov S. S. Ground-penetrating radar investigations of near-surface permafrost soils on the Gydan Peninsula. *Inzhenernye izyskaniya*. 2014, no 9-10, pp. 38 — 44. [In Russ].

24. Cao B., Gruber S., Zhang T., Li L., Peng X., Wang K., Zheng L., Shao W., Guo H. Spatial variability of active layer thickness detected by ground-penetrating radar in the Qilian Mountains, Western China. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*. 2017, vol. 122, no. 3, pp. 574 – 591.

25. Gusmeroli A., Lin L., Schaefer K., Zhang T., Schaefer T., Grosse G. Active layer stratigraphy and organic layer thickness at a thermokarst site in Arctic Alaska identified using ground penetrating radar. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 2015, vol. 47, no. 2, pp. 195 – 202.

26. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik* [Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics], Moscow, Standartinform, 2016, 30 p. [In Russ].

27. Fedorova L. L., Savvin D. V., Sokolov K. O., Kulyandin G. A. Investigation of GPR signals parameters changes during defrosting process of frozen dispersed rocks of different humidity. *Nauka i obrazovanie*. 2016, no 3(83), pp. 42 – 46. [In Russ].

28. Finkel'shteyn M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. *Primenenie radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii* [Applications of subsurface radar in geology], Moscow, Nedra, 1986, 128 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федорова Лариса Лукинична[1] – канд. техн. наук, доцент,
ведущий научный сотрудник, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,
Федоров Максим Петрович[1] – научный сотрудник,
e-mail: mpfedoroff@gmail.com,
Куляндин Гаврил Александрович[1] – научный сотрудник,
e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
Саввин Денис Валерьевич[1] – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: savvin.denis@inbox.ru,
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.
Для контактов: Федорова Л.Л., e-mail: lar-fed-90@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.L. Fedorova[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Leading Researcher, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,
M.P. Fedorov[1], Researcher, e-mail: mpfedoroff@gmail.com,
G.A. Kulyandin[1], Researcher, e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
D.V. Savvin[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: savvin.denis@inbox.ru,
[1] Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677000, Yakutsk,
Republic of Sakha (Yakutia), Russia.
Corresponding author: L.L. Fedorova, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru.

Получена редакцией 08.06.2020; получена после рецензии 22.06.2020; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 08.06.2020; received after the review 22.06.2020; accepted for printing 10.04.2021.