

УДК 551.3:622.02:621.396.96
DOI 10.17513/use.38163

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЧАСТКОВ ТАЛЫХ ПОРОД В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛОМ МАССИВЕ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Прудецкий Н.Д.

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», Институт горного дела Севера имени Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, e-mail: kgavrilu@yandex.ru

В данной статье рассмотрены возможности метода георадиолокации при решении инженерно-геокриологических задач на участках горных работ россыпного месторождения криолитозоны. Представлена методика проведения георадарных измерений в условиях действующего месторождения с учетом тех мест, где непрерывное профилирование затруднительно. Ее особенность заключается в проведении измерений угловым георадиолокационным сканированием (УГС) в отдельных точках для оценки геокриологических условий массива горных пород. Рассмотрены особенности георадиолокационных волновых полей геокриологического разреза. Предложены интерпретационные признаки, позволяющие выделять сигналы, отраженные от границ мерзлые – талые породы. Установлено, что сигналы-отражения от талых пород обнаруживаются по повышению значений их амплитуд и смещению центральной частоты спектра в низкочастотную область по сравнению с характеристиками сигналов, полученных при зондировании на участках мерзлых пород. Представлены результаты геокриологических исследований на территории Северной части Якутской алмазодобывающей провинции методами георадиолокации и бурения. В соответствии с предложенными интерпретационными признаками выполнен анализ волновых полей, а для подтверждения интерпретации использована информация более десяти скважин: на пяти скважинах выявлены талые породы. На основе данных георадиолокации, по семи профилям, построена карта распространения талых горных пород на глубинах 1,5–5,9 м по участку исследований.

Ключевые слова: массив мерзлых горных пород, талые породы, месторождения криолитозоны, георадиолокация, интерпретационные признаки, волновые поля

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1) и программы деятельности научно-образовательного центра «СЕВЕР: Территория устойчивого развития» по технологическому проекту № 4: «Технологии эффективного и комплексного извлечения полезных компонентов из минерального сырья» с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант № 13.ЦКП.21.0016.

DETERMINATION OF AREAS OF THAWED ROCKS IN A PERMAFROST MASSIF BASED ON GPR DATA

Fedorova L.L., Kulyandin G.A., Prudetskiy N.D.

*N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, e-mail: kgavrilu@yandex.ru*

This article considers the capabilities of the ground-penetrating radar (GPR) method in solving engineering geocryological problems at sites of placer mining operations in the permafrost zone. The methodology of conducting GPR measurements in the conditions of an active deposit is presented, taking into account those areas where continuous profiling is difficult. Its peculiarity lies in conducting measurements by angular GPR scanning (AGS) at individual points to assess the geocryological conditions of the rock mass. The features of the GPR wave fields of the geocryological section are considered. Interpretative characteristics are proposed that allow distinguishing signals reflected from the boundaries of frozen-thawed rocks. It has been established that reflection signals from thawed rocks are detected by an increase in their amplitude values and a shift of the central frequency of the spectrum to the low-frequency area compared to the characteristics of signals obtained when probing frozen rock areas. The results of geocryological studies in the Northern part of the Yakutsk diamondiferous province using GPR and drilling methods are presented. In accordance with the proposed interpretation features, wave fields were analyzed, and information from more than ten wells was used to confirm the interpretation: thawed rocks were detected in five wells. Based on the GPR data, a map of thawed rock distribution at depths of 1.5–5.9 m across the study area was constructed using seven profiles.

Keywords: frozen rock massif, thawed rocks, mineral deposits of cryolithozone, GPR, interpretive features, wave fields

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0020, of the unified state information system for recording research, development and technological work for civil purposes No. 122011800086-1) and the program of activities of the scientific and educational center “NORTH: Territory of Sustainable Development” for technological project No. 4: “Technologies for efficient and comprehensive extraction of useful components from mineral raw materials” using the equipment of the Center for Collective Use of the Federal research center «Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», grant No. 13. Center for collective use 21.0016.

Для оценки геокриологической обстановки, составления прогноза изменения состояния мерзлоты при разработке месторождений в криолитозоне, создания инфраструктуры горных предприятий, на всех стадиях инженерных изысканий выполняются инженерно-геокриологические исследования. При этом необходимо не только тщательно изучать геокриологические аспекты, но и внимательно отслеживать изменения в этих условиях, которые могут быть вызваны как естественными, так и техногенными факторами, особенно в контексте проведения горных работ [1]. Неполное понимание геокриологических условий может стать причиной непредвиденных деформаций пород и даже привести к их обрушению или смещению [2–4]. Такие геомеханические изменения часто происходят из-за таяния мерзлых пород с высоким содержанием льда. В дальнейшем это вызывает нарушение теплового баланса, увеличение притока воды и влажности горных пород. Высокая влажность и обводненность пород могут вызвать проблемы, такие как прилипание или примерзание пород к рабочим элементам горнодобывающего оборудования и транспортным средствам, что ведет к задержкам в работе и увеличению стоимости добычи.

Горные работы, строительство и эксплуатация объектов инфраструктуры горнодобывающего предприятия значительно меняют естественные температурные и гидрологические условия вечномерзлых пород. Это приводит к таянию пород и стимулирует развитие различных опасных криогенных явлений, таких как суффозия, морозное пучение, термоэрозия и других. Все эти процессы снижают прочностные характеристики грунтов оснований и становятся причиной деформации инженерных сооружений, иногда даже аварийного характера.

В связи с потеплением климата и антропогенным влиянием на геосистему актуальность приобретают исследования, направленные на улучшение методик дистанционной оценки свойств и состояния разрабатываемых массивов горных пород, а также на создание систем для мониторинга криогенных процессов в грунтах горно-технических сооружений [5–7]. Однако в практике проектных и строительных компаний часто применяются устаревшие теплотехнические методы расчета, разработанные десятилетия назад, которые не учитывают современную динамику деградации криолитозоны, особенности влияния криогенных процессов и явлений.

В настоящее время, согласно источникам [8–10], при инженерно-геологических изысканиях широко используется георадиолокация как основной геофизический метод. Этот выбор обусловлен рядом преимуществ георадиолокации: глубина исследования мерзлого массива до 30 м, высокое разрешение слоев до 0,1–0,2 м, точность определения аномалий по профилю в пределах 0,05–0,1 м, а также отличная помехоустойчивость и быстрота получения результатов [11, 12]. От содержания воды в мерзлых рыхлых отложениях в значительной степени зависят их физико-механические и электрофизические свойства. При этом водонасыщенность грунтов при оттайке оказывает большое значение и на формирование радарограмм, а потому является одним из параметров, имеющих объективные предпосылки к эффективному применению георадиолокации для геокриологических исследований [13, 14].

Целью представленных исследований является усовершенствование методики георадиолокационного изучения криогенного состояния горных пород на участках действующих горнодобывающих предприятий в условиях пересеченной и ограниченной местности.

Материалы и методы исследования

Данные георадиолокационных исследований геокриологических условий получены на территории Северной части Якутской алмазонасной провинции зимой. Изучаемый район находится в зоне многолетнемерзлых пород мощностью более 350 м. Глубина деятельного слоя варьируется от 0,3 до 1,2 м. На южных склонах грунт оттаивает до глубины 0,5–1,2 м, на северных – до 0,3 м. Продуктивный слой верхнечетвертичной россыпи скрыт под слоем вскрышных пород толщиной до 8 м. Этот слой состоит из аллювиальных глинистых отложений с содержанием от 20 до 50 % гравия, гальки, щебня и мелких валунов-плит преимущественно местных карбонатных пород. Для площадного георадиолокационного обследования представлен вскрышной блок, находящийся вблизи инженерно-технических сооружений, воздействие которых на прилегающую территорию привело к растеплению многолетнемерзлых горных пород.

Для определения строения и криогенного состояния горных пород обследуемого участка георадиолокационная съемка проведена георадаром «ОКО-2» с антенным

блоком «АБ-250М» (НПО «Логис-Геотех», Россия). Антенны георадара экранированы, что позволяет использовать его вблизи инженерно-технических сооружений и горной техники. Центральная частота прибора составляет 250 МГц и обеспечивает глубину исследований до 8 м, с разрешением 0,25 м.

Для представления результатов георадарной съемки в виде 3D-карт измерения проводятся по равномерно распределенным по площади профилям. На обследуемом участке они проложены параллельно, в крест предполагаемого направления деградации мерзлоты, для возможности обнаружения путей миграции техногенных жидкостей вниз по склону. Среднее расстояние между профилями 6,5 м. При таком интервале по участку намечено семь профилей и одна опорная точка углового георадиолокационного сканирования (УГС) для получения информации о геокриологическом состоянии массива из локального местоположения. По методике, такие точки располагают в межпрофильном пространстве или на участках, где непрерывное профилирование невозможно [15]. Георадиолокационная съемка в режиме непрерывного профилирования произведена в контакте с поверхностью. Трассы сигналов записаны с шагом 0,1 м по датчику перемещения с колесом. В опорной точке выполнение полевых исследова-

ний осуществляется по методике УГС: в подготовленном углублении выполняют зондирование в секторе 70° , с шагом 5° и накоплением по 100 трасс в каждом угловом положении. По завершении сканирования из всех файлов собирается синтезированная радарограмма, которая обрабатывается стандартными процедурами (фильтрация, коррекция затухания, регулировка контрастности радарограмм и т.д.) программного обеспечения GeoScan32 (НПО «Логис-Геотех», Россия), как радарограмма, записанная при непрерывном профилировании.

Результаты сканирования, проведенные на опорной точке обследуемой территории возле скважины № 3/7 (на 7-м метре по профилю № 3), представлены на рис. 1. С помощью антенного блока «АБ-250М» зафиксировано 1500 точек зондирования в секторе 70° с интервалом угловых положений в 5° . Осуществленная обработка радарограмм УГС и последующая интерпретация, в сопоставлении с данными скважины № 3/7, позволили выявить и уверенно проследить границы слоев в массиве многолетнемерзлых пород. На волновом поле радарограммы выделена горизонтальная граница в толще песчано-гравийно-галечных отложений. Она сформирована из сигналов-отражений от крупнообломочных материалов на глубине около 1 м.

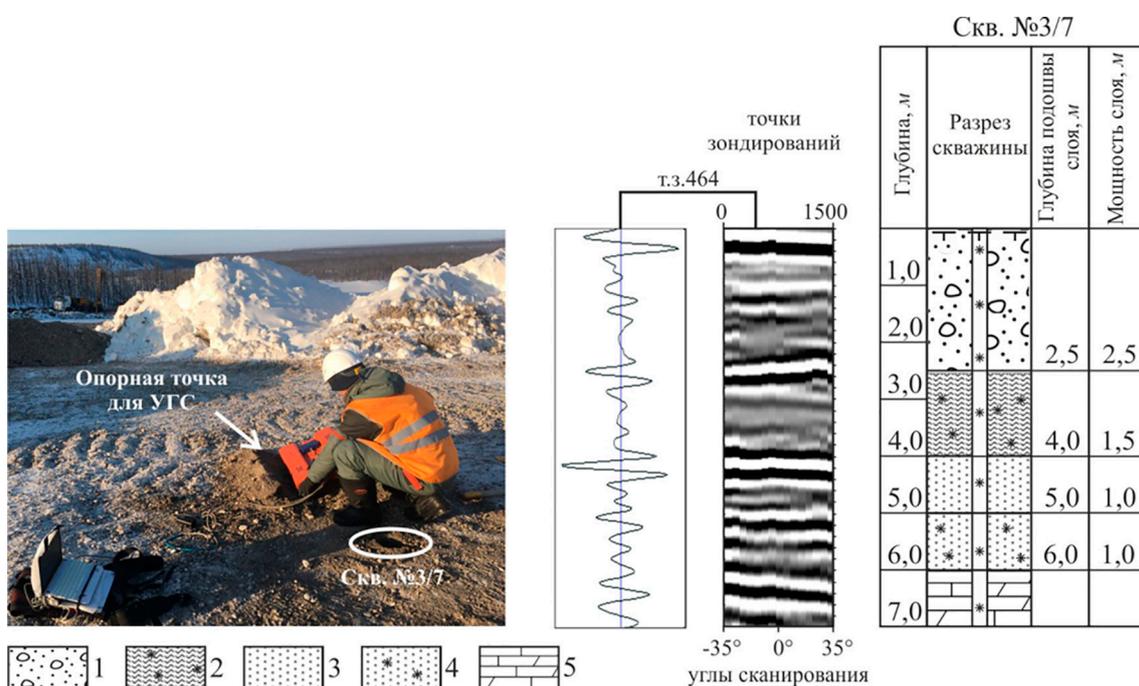


Рис. 1. Данные полевых исследований по методике углового георадиолокационного сканирования (УГС) в опорной точке, рядом со скважиной № 3/7: 1 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 2 – высокольдистые илисто-глинистые отложения; 3 – суглинок темно-серый мерзлый; 4 – суглинок темно-серый с включением льда; 5 – доломиты

Верхняя граница слоя высокольдистых илисто-глинистых отложений (мощностью 1,5 м) образована песчано-гравийно-галечными слоями, а нижняя – суглинками. Нижний слой суглинков имеет ледяные включения и потому образует дополнительную отражающую границу на глубине около 5 м. На радарограмме отражение этих отложений видно как равномерно распределенные сигналы, заключенные между контрастными горизонтальными осями синфазности. Такие же контрастные сигналы наблюдаются по осям синфазности на границе суглинков и доломитов.

Для обработки данных георадарного профилирования также применено программное обеспечение GeoScan32. Проведена предварительная редакция данных с использованием входящих в него стандартных процедур: реверс, удаление трасс, привязка нуля к поверхности среды, частотная фильтрация, коррекция затухания амплитуд.

Участки талых пород в массиве многолетнемерзлых пород на волновом поле определены по особенностям динамических характеристик сигналов, которые отмечены при опыте георадиолокационных исследований по поиску мест локального повышенного увлажнения, заверенных бурением и шурфами [6, 13, 14]. Таких особенностей две: первая – это повышение амплитуды сигналов; вторая – смещение центральной частоты спектра отраженных сигналов в низкочастотную область. Например, в работе [13] показано, что сигналы, отраженные от верхней границы слоя талых пород, имеют спектр с центральной частотой 202 МГц, а отраженные от нижней границы – 187 МГц. Амплитуда сигналов на участке талых пород в два раза больше, чем на соседних, мерзлых участках. Стоит отметить, что такие изменения динамических характеристик наиболее заметны визуально при анализе волновых полей радарограммы в целом, а не отдельных трасс сигналов [13].

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам бурения на контрольных точках и анализа радарограммы профиля № 12 (рис. 2) были определены интерпретационные признаки присутствия талых грунтов в мерзлых горных породах на исследуемом участке. На радарограмме указанного профиля в диапазонах 40–52 и 72–88 м наблюдается углубление подошвы песчано-гравий-

но-галечного слоя. Эти изменения связаны со смещением осей синфазности сигналов, относящихся к этим границам. Ниже, под слоем илисто-глинистых отложений выделяются две зоны хаотичных сигналов с относительно высокими амплитудами (пунктирные линии на рис. 2, а). Они прослеживаются в слое суглинков и могут указывать на их нарушенную криогенную структуру, изменение которой вызвано оттайкой и нарушением связности частиц под влиянием техногенных жидкостей.

Чтобы подтвердить точность интерпретации обнаруженных аномалий волнового поля, на контрольных точках на расстояниях 46, 60 и 80 м было проведено бурение трех скважин (№ 12/46, 12/60 и 12/80). В результате бурения подтвердились предположения о присутствии талых пород в толще суглинков в скважинах № 12/46 и 12/80 на глубинах 3,1–4,0 и 3,5–4,5 м соответственно. В скважине № 12/60 все породы были обнаружены в замерзшем состоянии. Геокриологический разрез по профилю № 12 представлен на рис. 2, б. Сопоставление глубины границ по данным бурения со временем задержки георадиолокационных сигналов позволило определить средние по разрезу значения относительной диэлектрической проницаемости пород: для мерзлых – 4, для талых – 9.

По совмещенным данным бурения и георадиолокации уточнено геологическое строение участка. Установлено, что слой песчано-гравийно-галечных отложений имеет различную мощность на всем протяжении участка. Под ним на глубине около 2 м залегает невыдержанный по толщине слой высокольдистых илисто-глинистых отложений. Его мощность колеблется от 0,5 до 1,5 м. Находящийся ниже слой суглинков залегает на коренных породах и местами содержит включения пластового льда.

На основе установленных и подтвержденных признаков выявления зон талых пород выполнена интерпретация георадарных данных на всем исследуемом участке. В результате талые породы обнаружены по семи профилям. На рис. 3 представлен фрагмент исследуемого участка с оконтуриванием талых зон в многолетнемерзлом массиве горных пород. Эта карта была создана на основе данных георадиолокационного профилирования и УГС в опорной точке, зоны талых пород выделены градиентной заливкой в черном пунктирном контуре. Цветовая шкала на карте демонстрирует глубину

подошвы слоя талых пород, варьирующуюся от 1,5 до 5,9 м. Видно, что глубина растепления горных пород не связана с радиационно-тепловым воздействием солнца, а имеет техногенный характер. Деградация мерзлоты в массиве идет от инженерно-технических сооружений по четырем каналам

в направлении склона, к борту карьера. Согласно данным георадиолокации площадь талых пород оценивается примерно в 1600 м². Для подтверждения данных георадиолокационного исследования участок дополнительно обследован бурением скважин по профилям (рис. 3).

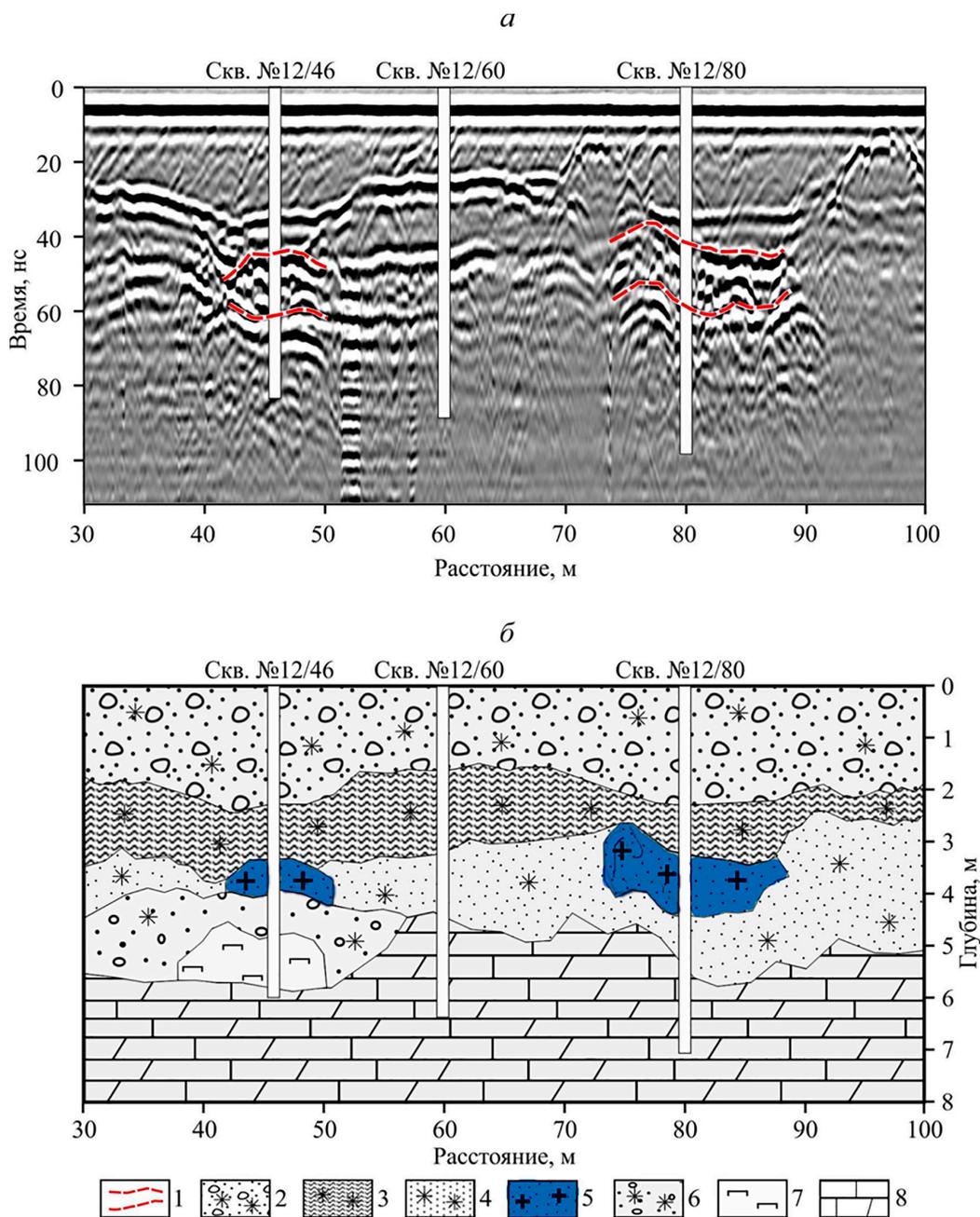


Рис. 2. Выявление зон талых пород по данным георадиолокации и бурения на фрагменте радарограммы по профилю № 12 (а – временной разрез; б – глубинный интерпретационный разрез): 1 – границы зон талых пород; 2 – мерзлые песчано-гравийно-галечные отложения; 3 – высокольдистые илисто-глинистые отложения; 4 – суглинок темно-серый мерзлый; 5 – суглинок темно-серый талый; 6 – песок льдистый мелкий с галечником; 7 – подземный лед; 8 – доломиты

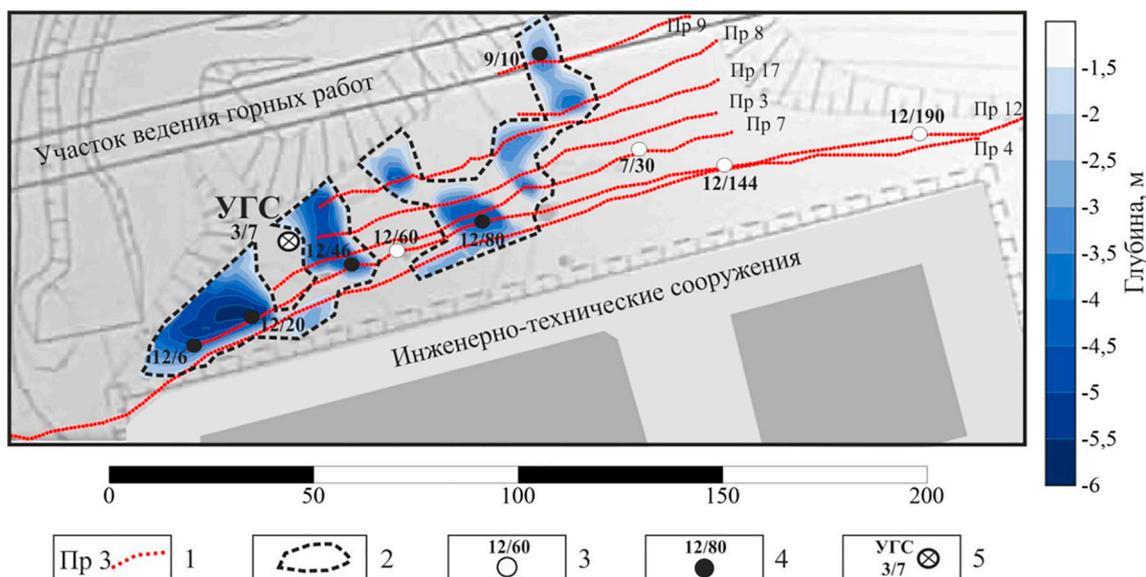


Рис. 3. Карта распространения зон талых горных пород, выявленных по данным георадиолокации и бурения: 1 – георадиолокационный профиль; 2 – контур талых горных пород; 3 – скважина с мерзлыми горными породами; 4 – скважина с талыми горными породами; 5 – опорная точка со скважиной.

Заключение

Для повышения результативности геофизических исследований геокриологических условий на участках действующих горнодобывающих предприятий в условиях пересеченной и ограниченной местности предложено комплексное использование методик профилирования и углового сканирования методом георадиолокации. По данным экспериментальных исследований обоснованы признаки обнаружения участков талых пород на радарограмме. Апробация методики картирования выполнена на территории Северной части Якутской алмазодобывающей провинции. В соответствии с предложенными интерпретационными признаками выполнен анализ волновых полей радарограмм полевых измерений. На основе данных георадиолокационного профилирования и УГС построена карта распространения талых горных пород по участку исследований. Показано, что применение георадиолокации позволяет получить оперативную информацию о криогенном состоянии горных пород на разрабатываемых месторождениях и в зоне техногенного воздействия инженерно-технических объектов. Полученные результаты позволят оперативно и корректно принимать решения по обеспечению устойчивости бортов и уступов карьеров при горно-добывчных работах, а также бу-

дут полезны в выборе рациональных параметров вскрышных работ: выбор глубины взрывных скважин, их расположение и расстояние между ними, типа взрывчатого вещества, его мощности.

Список литературы

1. Ткач С.М. Геомеханические и геотехнологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых севера России // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020. Т. № 1. С. 149–154.
2. Великин С.А., Марченко Ю.Л., Бажин К.И. Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного карьера «Нюрбинский» (Западная Якутия) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2015. № 3. Вып. 27. С. 35–46.
3. Курленя М.В., Чернышов Г.С., Сердюков А.С., Дучков А.А., Яблоков А.В. Методика и результаты сейсмического исследования процессов образования оползней в условиях многолетнемерзлых пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016. № 5. С. 6–13.
4. Wei M., Fujun N., Satoshi A., Dewu J. Slope instability phenomena in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau, China // *Landslides*. 2006. Vol. 3. P. 260–264.
5. Оленченко В.В., Картозия А.А., Цибизов Л.В., Осипова П.С., Есин Е.И. Геоэлектрическая характеристика побережья острова Самойловский (дельта реки Лена) // *Геофизические технологии*. 2018. № 4. P. 39–49.
6. 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. 91–97.
7. Соловьев Е.Э., Саввин Д.В., Федорова Л.Л. Исследование геокриологических условий массива мерзлых горных пород неразрушающими электромагнитными методами // *Горный журнал*. 2019. № 2. С. 31–37.

8. Николаев С.П., Зарвняев 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.
9. Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
10. Старовойтов А.В., Романова А.М., Калашников А.Ю. Возможности георадиолокации при изучении ослабленных зон в верхней части разреза // Инженерные изыскания. 2011. № 4. С. 62–70.
11. Harry M.J. Ground penetrating radar: theory and applications. Elsevier, 2008. 524 p.
12. Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophysical Prospecting. 1989. Vol. 37, Is. 5. P. 531–551.
13. Саввин Д.В., Куляндин Г.А., Федорова Л.Л. Обнаружение талых грунтов в основаниях инженерных сооружений в криолитозоне методом георадиолокации // Естественные и технические науки. 2018. № 11 (125). С. 171–173.
14. Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. Возможности георадиолокации для исследования заболоченных торфяников в криолитозоне // Геология и геофизика. 2019. № 7. С. 1004–1013.
15. Kulyandin G.A., Fedorova L.L. Improvement GPR research of dredged polygons using the angular scanning technique // Conference Proceedings: Engineering and Mining Geophysics (Perm, 2020). 2020. Vol. 2020. P. 1–5.