

УДК 621.396.96:551.328

МЕТОДИКА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО КАРТИРОВАНИЯ НЕ ЗАТРОНУТЫХ ТЕРМОКАРСТОМ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

¹Прудецкий Н.Д., ¹Соколов К.О., ²Попков П.А.

¹Институт горного дела Севера Сибирского отделения Российской академии наук
им. Н.В. Черского, Якутск, e-mail: igds@ysn.ru;

²ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова»,
Якутск, e-mail: svfu-info@mail.ru

Эффективность ведения буровзрывных работ существенно зависит от степени льдистости вскрышных горных пород; например, на прииске «Маят» льдистость достигает 60%. Обзор геокриологических исследований показывает, что на разрабатываемых участках АО «Алмазы Анабара», находящихся в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья на границе с Приленской низменностью, в основном прослеживаются повторно-жильные льды, не затронутые термокарстом. Традиционными методами невозможно их оконтурить, и для этой цели предлагается применение геофизических методов. В работе приводятся расчет затухания электромагнитных волн (τ) по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ, и материалы георадиолокационных исследований в виде площадной съемки на участке АО «Алмазы Анабара». Представлены полевые данные, в том числе интерпретационный георадиолокационный разрез, а также критерии выявления повторно-жильных льдов, не затронутых термокарстом, в массиве мерзлых горных пород. Показано, что методом георадиолокации возможно выявить и оконтурить распространение повторно-жильных льдов, не затронутых термокарстом, в массиве мерзлых горных пород. В дальнейшем полученная информация о строении массива мерзлых горных пород может способствовать повышению эффективности вскрышных и буровзрывных работ.

Ключевые слова: массив мерзлых горных пород, повторно-жильные льды, не затронутые термокарстом, георадиолокация, буровзрывные работы, картирование подземных льдов

MAPPING OF ICE WEDGES NOT AFFECTED BY THERMOKARST ACCORDING TO GPR DATA

¹Prudetskiy N.D., ¹Sokolov K.O., ²Popkov P.A.

¹Mining Institute of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: igds@ysn.ru;

²North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, e-mail: svfu-info@mail.ru

The efficiency of drilling and blasting operations significantly depends on the degree of ice content of overburden rocks, for example, at the Mayat mine, ice content reaches 60%. A review of geocryological studies shows that in the developed areas of Almazny Anabara JSC, located in the northeastern part of the Central Siberian Plateau on the border with the Prilenskaya Lowland, there are mainly re-veined ice not affected by thermokarst. It is impossible to outline them by traditional methods, and for this purpose the use of geophysical methods is proposed. The paper presents the calculation of the attenuation of electromagnetic waves (τ) by the amplitudes of georadar signals reflected from the upper and lower boundaries of the PZHL and the materials of georadar studies in the form of an areal survey at the site of Almazny Anabara JSC. Field data are presented, including an interpretative georadar section, as well as criteria for identifying wedge ice not affected by thermokarst in a frozen rock mass. It is shown that it is possible to identify and delineate the distribution of re-veined ice, not affected by thermokarst, in a frozen rock mass using GPR. In the future, the information obtained on the structure of the frozen rock massif can help improve the efficiency of stripping and drilling and blasting.

Keywords: frozen rock mass, re-veined ice not affected by thermokarst, ground penetrating radar, drilling and blasting, underground ice mapping

При разработке россыпных месторождений криолитозоны при производстве вскрышных работ часто (в зимний период) требуется буровзрывная подготовка торфов к выемке. Возможное наличие в составе вскрышных пород (торфов) повторно-жильных льдов, не прослеживаемых визуально термокарстовыми проявлениями, существенно снижает эффективность буровзрывных работ по причине неучета различия физико-механических свойств горных пород и льда при проектировании массовых взрывов, что приводит к снижению качества дробления вплоть до выхода негабаритов. В частности, подобные гор-

но-геологические условия разработки характерны для алмазосодержащей россыпи Северо-Западной Якутии, разрабатываемой АО «Алмазы Анабара».

Обзор ранее проведенных геокриологических исследований россыпных месторождений алмазов криолитозоны показывает, что прослеживаемые в теле россыпи (торфах) повторно-жильные льды (ПЖЛ), как правило, существенно не затронуты термокарстом [1]. Они обычно слабо выражены в рельефе, и их наличие практически невозможно фиксировать на аэрофотоснимках, что затрудняет их выявление и картирование для планирования и эффектив-

ного ведения буровзрывных работ (БВР). Следовательно, традиционными методами невозможно оконтурить ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород и поэтому для их выявления предлагается применение геофизических методов. Анализ ранее проведенных геофизических работ показал, что наиболее универсальным методом изучения ПЖЛ, не затронутых термокарстом, является метод георадиолокации (Прудецкий и др., 2019, Федорова и др., 2014) [2–4]. В настоящее время разработана основа методики выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, базирующаяся на особенностях структуры волновой картины, которая может быть получена при зондировании ПЖЛ или неоднородности массива горных пород схожей формы (валунов, трещин, заполненных рыхлыми отложениями). Таким образом, необходимо определить дополнительный критерий выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, который будет основан на электрофизических свойствах ПЖЛ.

Вопросами изучения ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород на Северо-Западе Якутии занимались многие ученые, применяя при этом различные методы исследования. Анализ работ А.Ю. Деревягина, С.Н. Булдовича, С.Ф. Хруцкого, Ю.К. Васильчука, В.Н. Конищева, Е.М. Катасонова, В.В. Куницкого и др. [5] показал, что в большинстве случаев изучение ПЖЛ производилось на основе оценки обнажений и керна буровых скважин. Методы геофизики применялись для исследования различных видов подземных льдов. Например, для изучения бугров пучения (линзы подземного льда) применялись методы электромагнитной индукции (Л.Г. Нерадовский), вертикального электрического зондирования (Д.В. Котелевец, К. Yoshikawa) [6] и георадиолокации (А.П. Ермаков, А.В. Старовойтов, Т. Kohout) [7]. С помощью метода георадиолокации проводились опытно-методические работы по выявлению пластовых льдов (А.В. Омеляненко, К.О. Соколов), ПЖЛ, расположенных под палеоруслинами на севере Канады (М. Allard), ПЖЛ, затронутых термокарстом (С.С. Бричева) [8]. Таким образом, методы геофизики успешно применяются для изучения некоторых видов подземных льдов, однако в настоящее время не проводились исследования по выявлению не затронутых термокарстом ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород, так как они слабо выражены в рельефе местности, что затрудняет применение традиционных методов для их изучения.

Целью данного исследования является разработка методики измерений и обработки данных георадиолокации, для выявления не затронутых термокарстом ПЖЛ. Метод георадиолокации в изучении ПЖЛ, не затронутых термокарстом, имеет ряд преимуществ перед другими геофизическими методами. Во-первых, оперативность: возможно быстро получить непрерывные георадиолокационные данные, где в результате обработки их по горизонтали и по вертикали выделить контрастные по электрическим свойствам среды и локальные объекты. Во-вторых, широкий диапазон имеющихся на сегодняшний день георадарных антенн позволяет успешно решать задачи определения глубины (с разрешением до 10 см с высокочастотными антеннами) и мощности (до глубин 30–35 м с низкочастотными антеннами) залегания локального объекта в массиве горных пород.

Для разработки методики картирования ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород методом георадиолокации необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ параметров ПЖЛ на разных участках россыпных месторождений криолитозоны;
- провести экспериментальные и натурные георадиолокационные измерения массива мерзлых горных пород с включением ПЖЛ;
- определить особенности проявления ПЖЛ на данных георадиолокации;
- разработать методику проведения полевых георадиолокационных измерений, обработки и интерпретаций полученных данных, позволяющую выявить и оконтурить распространение ПЖЛ, не затронутых термокарстом, в массиве мерзлых горных пород.

Материалы и методы исследования

Россыпные месторождения алмазов криолитозоны в основном расположены на территории, которая является частью системы краевых депрессий Сибирской платформы, а собственно лежат на западной окраине Лено-Анабарского прогиба. На уровне современного эрозионного среза развиты карбонатные породы среднего-верхнего кембрия, терригенные отложения перми и юры, вулканогенно-осадочные образования триаса, а также нижнемеловые и плиоценовые отложения, залегающие в карстовых и эрозионно-карстовых палеодепрессиях. Четвертичные образования в районе развиты повсеместно. На территории, в пределах низких пластовых плато, ПЖЛ установле-

ны практически во всех комплексах рыхлых четвертичных отложений. Наиболее широкое развитие они имеют в аллювиальных, озерно-аллювиальных, озерно-болотных и делювиальных отложениях. Характерной особенностью распространения ПЖЛ является их приуроченность не только к супесчано-суглинистым, но и к песчаным и крупнообломочным отложениям. Мощность ледяных жил, как правило, контролируется мощностью рыхлых отложений и не превышает 2–4 м, в пределах аллювиальных террас, полигональных и плоскобугристых торфяников доходит до 5–7 м [9]. Электрофизическое свойство ПЖЛ, в том числе диэлектрическая проницаемость ϵ , меняется в зависимости от чистоты льда в пределах от 3,2 до 4,1.

Для выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород методом георадиолокации в натуральных условиях, на базе лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН, проведено численное и физическое моделирование распространения георадиолокационных сигналов в мерзлом песке с включением чистого речного льда, результаты которых опубликованы нами ранее [10]. Для определения особенностей проявления ПЖЛ на данных георадиолокации проведен анализ амплитудно-временных характеристик георадиолокационных сигналов. По результатам

зондирований на участках месторождений «р. В. Маят» и «р. Молодо» рассчитаны затухания электромагнитных волн (r) по амплитудам георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней границ ПЖЛ, по формуле $r = 20 \cdot \lg(A_{\text{верх}}/A_{\text{нижн}})$ (дБ) и построены их графики в зависимости от времени $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}}$ (нс) прохождения в ПЖЛ, которые могут быть линейно аппроксимированы функциями r_m , $r_{\text{вм}}$ (рис. 1). Общий вид графиков схож, так как угловой коэффициент обеих линий составляет около 0,74. При этом синие точки характеризуют более чистый ПЖЛ, чем лед на участке «р. В. Маят». На основе полученных полевых данных возможно обобщение значений r , с помощью уравнения $r(\Delta t) = 0,74 \cdot (\Delta t + k)$, где k – коэффициент чистоты льда, который равняется 3,2 для участка месторождения «р. Молодо», -8 для участка «р. В. Маят».

Для подтверждения уравнения $r(\Delta t)$ проведено физическое моделирование распространения электромагнитных волн в массиве мерзлых горных пород, содержащем ПЖЛ, с последующим расчетом r . На рис. 1, б, представлен график с полученными значениями r , линейная аппроксимация которых соответствует угловому коэффициенту 0,78. Данный график подтверждает достоверность уравнения $r(\Delta t)$ результатов полевых данных.

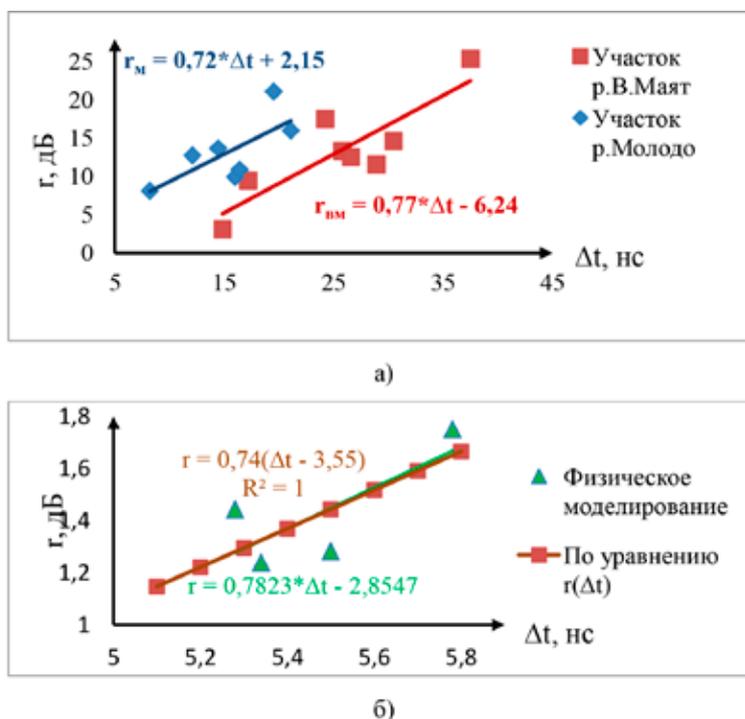


Рис. 1. Графики зависимостей затухания амплитуды георадиолокационных сигналов от времени прохождения по результатам: а) полевых измерений; б) физического моделирования

Однако метод георадиолокации не всегда дает достаточно хорошие результаты в массиве мерзлых горных пород, содержащих ледяные включения. Однозначная интерпретация таких видов разрезов затруднительна, геометрия границ очень сложна и не поддается точному выделению по результатам стандартной обработки. Для того чтобы повысить эффективность метода георадиолокации при изучении ПЖЛ, не затронутых термокарстом, в массиве мерзлых горных пород, предлагается методика, которая апробирована на участке россыпного месторождения алмазов криолитозоны (АО «Алмазы Анабара»), включающая в себя следующие этапы:

- сбор априорных данных (геологические разрезы по шурфовым данным, буровых скважин);
- выбор аппаратуры и параметров измерения (шаг измерения между точками зондирования, режим зондирования, скорость передвижения радара);
- обработка георадиолокационных данных по разработанному алгоритму;
- интерпретация георадиолокационного разреза на основе выработанных критериев;
- картирование включений ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород.

Сбор априорных данных – один из основных этапов данной методики. Опыт проведения георадиолокационных исследований на производственных объектах крупных алмазодобывающих предприятий Севера показывает, что при достаточной имеющейся информации о строении и структуре массива горных пород можно выбрать частоты антенного блока георадара.

В априорные данные входит информация о рельефе местности, степени залесенности, инженерно-геологическое строение массива горных пород включающего в себе состав и мощность рыхлых отложений, наличие криогенных объектов, в том числе ПЖЛ и талых пород. Важную роль играет топографо-геодезическая изученность района исследования. Результатом таких работ является топографическая схема с сечением рельефа, планово-высотная привязка буровзрывных полигонов, илоотстойников, зумпфов, руслоотводных каналов (горнопроходческие работы (ГПР), горнотехнические сооружения (ГТС)), поисково-оценочных шурфовых и буровых линий и т.д.

Также необходимо иметь информацию о геолого-геоморфологическом очерке района, который включает в себе та-

кие разделы, как стратиграфия, тектоника и геоморфология.

Так как россыпные месторождения алмазов криолитозоны Лено-Анабарского междуречья Севера Якутской алмазонасной провинции (ЯАП) в основном приурочены к аллювиальным отложениям, которые развиты в руслово-низкопойменных частях и высокой пойме речных долин. Следовательно, необходимо иметь информацию о стратиграфии современных отложений, которые в основном представляются гравийно-галечным материалом с примесью глины, песка и валунов, так как их мощность в основном изменяется в широких пределах от 0,4–0,5 до 4–7 м.

В тектоническом отношении россыпные месторождения алмазов Анабарского и Приленского алмазонасных провинций приурочены к узлам пересечения глубинных разломов, под влиянием которых могут оказаться на уровне современного эрозионного среза (до 5–30 м) сложнопостроенные тела, такие как сочетание даечных, жильных и пластовых тел (силлов) различной мощности и ориентировки с формированием в конечном счете специфических по форме «штокверкообразных» тел.

В геоморфологическом отношении бассейны рек россыпных месторождений алмазов в основном представляют собой выработанную в доломитах денудационно-аккумулятивную поверхность выравнивания, в которые врезаны унаследованные с верхнечетвертичного времени долины современных водотоков, представляющих несколько типов рельефа: структурно-денудационный, денудационно-аккумулятивный, денудационно-эрозионный и эрозионно-аккумулятивный.

Выбор аппаратуры и параметров измерения. На основании априорных данных проводится выбор аппаратуры и параметров георадиолокационных измерений, который направлен на обеспечение достаточной глубинности и разрешающей способности работ. В таблице указан спектр частот антенных блоков в зависимости от требуемой глубины зондирования. В зависимости от условий пересеченной местности и размеров площади исследования выбирается режим проведения георадиолокационных измерений. Необходимо отметить, что при проведении георадарной съемки в дискретном режиме минимальный шаг съемки составляет 1 м, чтобы не упустить ПЖЛ между точками зондирования.

Характеристики антенных блоков
георадаров «ОКО-2»

Требуемая глубина, м	Антенный блок, МГц	Режим съемки
До 5 м	АБ-400	Непрерывный Дискретный По перемещению
5–8 м	АБ-400, 250	
8–12 м	АБ-250, 150	
12–30 м	АБ-90, АБДЛ-100, 50	

Обработка и интерпретация георадиолокационных данных. Для точной и однозначной интерпретации радарограммы для выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород разработан алгоритм обработки георадиолокационных данных. Алгоритм состоит из трех этапов: 1) подготовка первичных полевых данных (объединение фрагментов протяженных профилей, выделение волн-помех, определение уровня относительного нуля шкалы глубин, топографическая привязка меток радарограммы); 2) редакция данных (удаление отдельных трасс помех; удаление неинформативных фрагментов радарограммы; прореживание или интерполяция в соответствии с новым шагом по профилю); 3) процедуры обработки данных (изменение коэффициента усиления, подавление помех (цифровая фильтрация), вычитание среднего, а также при необходимости выставление рельефа местности).

Апробирование разработанной методики по картированию ПЖЛ, не затронутых термокарстом, методом георадиолокации проведено на участке АО «Алмазы Анабара», находящегося в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья на границе с Приленской низменностью. Для определения границы залегания и оконтуривания ПЖЛ, не затронутых термокарстом, в массиве мерзлых горных пород исследуемого участка работы выполнены георадаром «ОКО-2» с антенным блоком «АБ-250М» (НПО «Логис-Геотех», Россия). Георадиолокационные исследования проводились в марте, при полном промерзании массива горных пород. Работа проводилась в виде площадной съемки, так как было необходимо провести картирование ПЖЛ на исследуемом участке. Следовательно, георадиолокационные профили проложены параллельно друг к другу, по направлению русла реки, расстояние между ними составляло от 2 до 3 м. Режим георадиолокационной съемки выбран «по перемещению».

Для привязки георадиолокационных данных на местности использовался датчик перемещения с колесом (ДП-32), а также GPS приемник. Обработка георадиолокационных данных выполнена в программном обеспечении ПО «GeoScan32» (НПО «Логис-Геотех», Россия). Все полученные результаты георадиолокационных измерений заверялись данными буровых скважин и обнажений борта массива горных пород.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Результаты полевых георадиолокационных исследований массива горных пород с включениями ПЖЛ приведены на рис. 2. Заверка волновых образов подземного льда на радарограммах выполнена по рекогносцировочному профилю, непосредственно примыкающему к исследуемому участку, вдоль буровой линии и обнажения массива горных пород. Протяженность профиля составляла 230 м, поверхность была расчищена от деревьев и снега (рис. 2, а). Скважины пробурены с шагом 4–5 м и отмечены на интерпретационном георадиолокационном разрезе черными вертикальными линиями (рис. 2, б).

На георадиолокационном разрезе выявлены две границы, приуроченные к прослою льда и кровле коренных пород. В рыхлых отложениях отмечены ПЖЛ и пластовые льды, оконтуренные черной линией. Синим прямоугольником отмечен участок, на котором имеется обнажение ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. На рис. 2, в, показана фотография обнажения, где красной пунктирной линией оконтурен ПЖЛ, а также представлен фрагмент георадиолокационного разреза с волновым образом льда. Красными пунктирными линиями обозначены верхняя и нижняя границы льда, отображенные на радарограмме дифрагированными волнами в виде гипербол. Далее представлена трасса георадиолокационного сигнала по центру льда, где его фаза от нижней границы меняется относительно верхней. И, как видно, спектр частот, взятый в области волнового образа льда, имеет изрезанную форму. По этим трем критериям возможна интерпретация данной волновой картины, как отражения от границ ПЖЛ. Критерии выявления ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород определялись по результатам проведения их численного и физического моделирования и описаны в трудах Prudetskiy N.D. et al. [11].

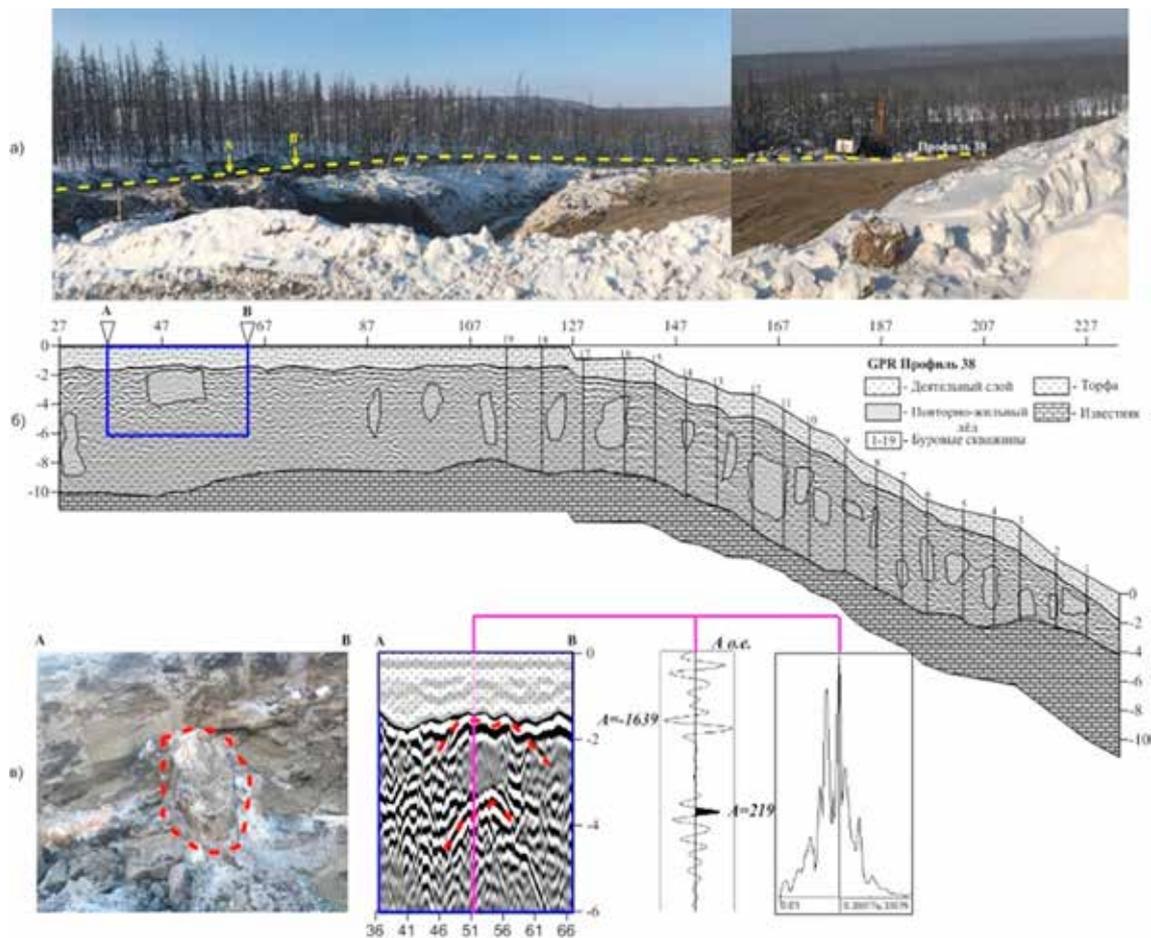


Рис. 2. Полевые материалы георадиолокационного исследования ПЖЛ

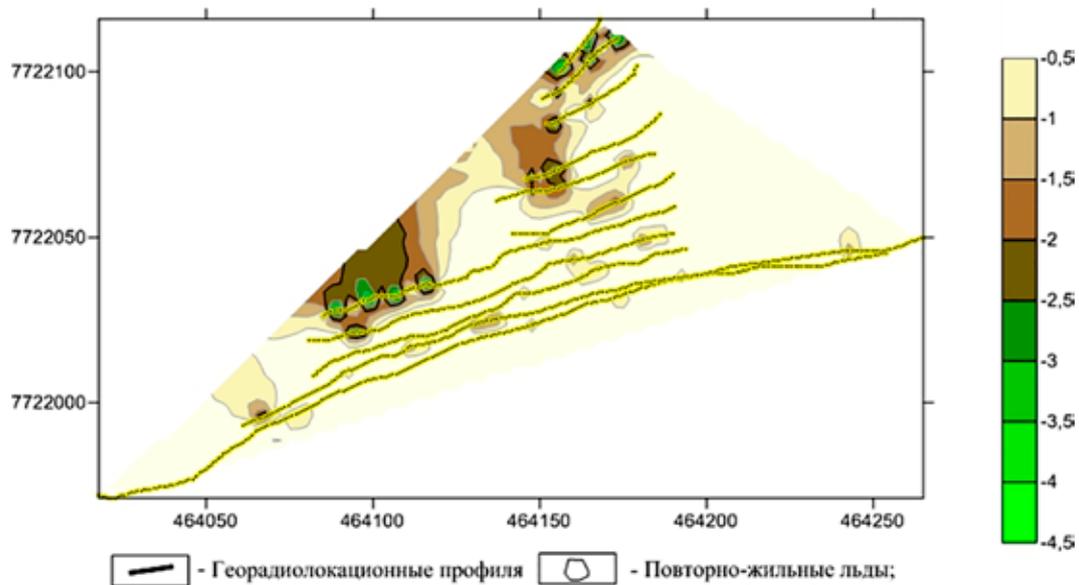


Рис. 3. Карта глубины залегания кровли ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород

На основе подтвержденных интерпретационных признаков выявления ПЖЛ на тестовом профиле произведены обработка и интерпретация 11 георадиолокационных профилей (желтые пунктирные линии на рис. 3). По полученным результатам построена карта глубины залегания кровли ПЖЛ в массиве мерзлых горных пород. Цветными пятнами показаны и оконтурены верхние границы ПЖЛ и глубины их залегания.

Заключение

В результате разработки и апробации методики георадиолокационного картирования подземных льдов построена карта глубины залегания кровли ПЖЛ на участке россыпного месторождения. Показано, что методом георадиолокации возможно выявить и оконтурить ПЖЛ, не затронутые термокарстом, в массиве мерзлых горных пород. В дальнейшем полученная информация о строении массива мерзлых горных пород может способствовать повышению эффективности вскрышных и буровзрывных работ.

Полевые исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Список литературы

1. Ершов Э.Д. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М.: Недра, 1989. 414 с.
2. Прудецкий Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Аналитический обзор методов исследования трещин в четвертичных отложениях криолитозоны // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 185–191.
3. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2018. № 2. С. 3–12.
4. Нерадовский Л.Г. Оценки объемной льдистости дисперсных грунтов Центрально-Якутской низменности по данным георадиолокации // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 81–92.
5. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н., Станиловская Ю.В. Миграционные бугры пучения в криолитозоне Восточной Сибири и Дальнего Востока // Инженерная геология. 2014. № 1. С. 40–64.
6. Котелевец Д.В., Васильчук Д.Ю. Комплексное изучение ледоминеральных бугров пучения геофизическими методами в долине реки Сенца, республика Бурятия // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 122–132. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.1.25935.
7. 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.
8. Бричева С.С. Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.10. Московский государственный университет. Москва, 2018. 25 с.
9. Граханов С.А., Шаталов В.И., Веретенников В.А., Егоров К.Н., Липашова А.Н., Помазанский Б.С., Селиванова В.В. Древние россыпи алмазов Сибирской платформы // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2006. № 2. С. 167–177.
10. Прудецкий Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л. Физическое моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещиной заполненной льдом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. С. 107–114.
11. Prudetskiy N.D., Sokolov K. O., Dyagileva R.A. GPR studies of overburden rocks with a crack filled with ice during the development of alluvial diamond deposits in Yakutia. Conference Proceedings: Engineering and Mining Geophysics 2020. Perm. 2020. P. 1–6.