

ОБЗОРЫ

УДК 551.34:622.023.623

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИН
В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ****Прудецкий Н.Д., Соколов К.О., Федорова Л.Л.***Институт горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского, Якутск, e-mail: igds@ysn.ru*

На большинстве россыпных месторождений алмазов Якутии рыхление вскрышных пород производится буровзрывным способом. Мощность торфов на россыпях находится в пределах от десятков сантиметров до десятков метров, при этом породные массивы при отрицательных температурах превращаются в прочно армированные монолиты за счет заполнения пор и трещин льдом. Трещины рыхлых отложений образуются в результате такого криогенного процесса, как морозобойное растрескивание, образуя на поверхности полигоны, и в дальнейшем проникают вглубь массива горных пород. Заполнителями трещин в основном являются вода, воздух, песок, обломочные породы, торф, которые образуют полигонально-жилые ледяные структуры, создающие значительные трудности при проведении буровзрывных работ. Для решения этой проблемы необходимо выявить и очертить зону повышенной трещиноватости на полигонах буровзрывных блоков. В статье представлен аналитический обзор методов исследования трещин в четвертичных отложениях (геологическими, с помощью скважин, зарисовок и фотографирования и геофизическими). Из геофизических методов были рассмотрены сейсмоакустический, оптический, плотностной гамма-гамма-каротаж, электрометрический и георадиолокационный. А также перечислены модели разрезов трещин, заполненных различными горными породами, которые образовались в результате морозобойного растрескивания массива многолетнемерзлых пород. На основе их размеров и физических параметров заполнителей описаны особенности и недостатки каждого рассмотренного метода. По результатам аналитического обзора, выбран метод георадиолокации, который позволит выявлять зоны развития криогенных процессов и повышенной трещиноватости после соответствующей доработки методического обеспечения.

Ключевые слова: трещиноватость, массив горных пород, четвертичные отложения, георадиолокация, геофизические методы, лёд, буровзрывные работы

**ANALYTICAL REVIEW OF RESEARCH METHODS IN QUATERNARY
FRACTURES DEPOSITS OF PERMAFROST ZONE****Prudetskiy N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L.***Mining Institute of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, e-mail: igds@ysn.ru*

On the majority of placer deposits of diamonds of Yakutia loosening of overburden is made by the drilling and blasting method. The power of peat on placers is in the range from tens of centimeters to tens of meters, while rock massifs at negative temperatures turn into strongly reinforced monoliths by filling pores and cracks with ice. Cracks of loose deposits are formed as a result of such a cryogenic process as frost cracking, forming polygons on the surface, and subsequently penetrate deep into the rock mass. Crack fillers are mainly water, air, sand, detritus, peat, which form polygonal-vein ice structures that create significant difficulties in drilling and blasting. To solve this problem, it is necessary to identify and delineate the zone of increased fracturing at the landfills of drilling and blasting blocks. The article presents an analytical review of methods for studying cracks in Quaternary sediments (geological, with the help of wells, sketches and photographing and geophysical). From geophysical methods seismoacoustic, optical, density gamma-gamma-ray logging, electrometric and georadar were considered. And also the models of sections of cracks filled with various rocks, which were formed as a result of frost cracking of permafrost massif, are listed. On the basis of their sizes and physical parameters of fillers, features and shortcomings of each considered method are described. According to the results of the analytical review, the method of GPR was chosen, which will allow identifying zones of cryogenic processes and increased fracturing after the appropriate refinement of the methodological support.

Keywords: fracture, of rocks, Quaternary deposits, ground-penetrating radar, geophysical techniques, ice blasting

Для эффективного и безопасного ведения горных работ при разработке алмазных россыпных месторождений криолитозоны необходима точная и надежная информация о строении и состоянии массива горных пород разрабатываемых месторождений. Россыпные месторождения алмазов Якутии разрабатываются открытым способом, при этом для подготовки россыпного месторождения к разработке с него

предварительно удаляют пустые породы (торфа), покрывающие пласт полезного ископаемого (пески). Учитывая особенности залегания россыпных месторождений в условиях криолитозоны, возникает необходимость разупрочнения многолетнемерзлых пород, с целью приведения их в состояние, при котором возможна их разработка. Мощность торфов на россыпях бывает различной и колеблется в пределах от десят-

ков сантиметров до десятков метров. В зависимости от мощности и объемов торфов применяют различные способы рыхления горных пород, например бульдозерный, экскаваторный или буровзрывной. Однако практика добычных работ показывает, что крупные алмазодобывающие предприятия в основном используют буровзрывной способ, так как он наиболее эффективен в условиях короткого полевое сезона.

Буровзрывные работы (БВР) производятся в условиях, когда породные массивы при влиянии отрицательной температуры превращаются в прочно армированные монолиты за счет заполнения пор и трещин льдом [1, 2]. Для эффективного и оперативного выявления трещин в четвертичных отложениях криолитозоны требуется выбрать наиболее оптимальный метод исследования, для достижения этой цели необходимо провести аналитический обзор геологических и геофизических методов изучения строения массива горных пород.

Трещины рыхлых отложений образуются в результате такого криогенного процесса, как морозобойное растрескивание (процесс деформации мерзлых пород в изменяющемся градиентном температурном поле) [3]. Трещины возникают на поверхности, образуя полигоны, и в дальнейшем проникают вглубь массива горных пород. В условиях Крайнего Севера, где охлаждение массива горных пород зимой происходит резко и глубоко, возникают частые морозобойные трещины, расположенные на расстоянии от 1–1,5 до 100–200 м, а их форма в зависимости от степени однородности пород по составу и льдистости изменяется от правильной тетрагональной до пяти-

шестиугольной часто неправильной формы (рис. 1). При сезонном промерзании пород их глубина ограничивается мощностью промерзшего слоя, а в криолитозоне трещина может проникать на глубину 3–4 м и более за один зимний сезон. Глубина проникновения трещины пропорциональна температуре многолетнемерзлых пород, т.е. чем ниже, тем глубже. Ширина трещин на поверхности массива горных пород может достигать 0,05–0,1 м.



Рис. 1. Морозобойные полигоны с системой повторно-жильных льдов на пойменной террасе р. Волосовича (остров Котельный)

Морозобойное растрескивание, как правило, сопровождается заполнением трещин водой (а), воздухом (б), песком (в), обломочными породами (г), торфом и образованием полигонально-жильных ледяных структур (д), которые подразделяются на четыре типа: повторно-жильные льды, изначально-грунтовые жилы, первично песчаные жилы и псевдоморфозы по повторно-жильным льдам (рис. 2) [4].



Рис. 2. Модели разрезов, образованных в результате морозобойного растрескивания массива горных пород криолитозоны

Исследование трещин мёрзлых горных пород проводится в рамках детальных геолого-геофизических изысканий. При изучении трещин основное внимание уделяется [4-6]:

– пространственной ориентировке трещин и системам трещин, установлению главного или главных направлений развития трещин;

– морфологии трещин и их соотношению со слоями пород, складками, разломами с целью восстановления генетического типа и вида трещин;

– определению интенсивности трещиноватости пород с целью количественной оценки степени раздробленности пород, выделения участков, различающихся по интенсивности трещиноватости;

– определению длины, ширины (раскрытия) трещин.

Трещины изучаются следующими методами: 1) геологическими, 2) с помощью скважин, 3) зарисовок и фотографирования, 4) геофизическими. Геологические методы изучения трещиноватости требуют наблюдений на обнаженной поверхности пород. На территории Анабарского района (Якутия) геологические обнажения (рис. 3), выходы коренных пород встречаются крайне редко, в основном в руслах рек и ручьев, в остальном рельеф местности пологий, местами ровный, что не позволяет проводить изучение трещиноватости массива горных пород по традиционным методикам.



Рис. 3. Геологические обнажения по руслу р. Анабар

Метод бурения скважин

Проведение исследований трещины в массиве горных пород по данным бурения скважин обладает рядом особенностей. Оно может быть произведено с помощью обзора или фотографирования стенок скважины либо путем описания керна. Сравнивая

кern и стенки скважин, можно отметить, что в керне наблюдаются как естественные, так и искусственные трещины. По трещинам kern разваливается, вследствие чего ширину трещин по керну определить совершенно невозможно, отчего неориентированном в керне невозможно определить азимут падения трещин. В противоположность этому в стенке скважины трещины сохраняют все параметры неискаженными или малоискаженными, но они труднодоступны, съемку стенок скважин можно провести лишь с применением сложных оптических приборов. Прибор позволяет фиксировать на стенках скважины следы трещин, определять местоположение трещин, ширину раскрытия и расстояние между ними. Наблюдение можно проводить непосредственно во взрывных скважинах до глубины 15–20 м. Из-за большой трудоемкости выполнения наблюдений и обработки результатов этот способ применяется как контрольный с другим способом оценки трещиноватости.

Исследования трещиноватости горных пород, извлеченных из скважины, не дают полной информации, поскольку, как правило, наиболее крупные и эффективные для фильтрации трещины не выявляются, так как по ним kern раскалывается. Из зоны повышенной трещиноватости извлекают наиболее плотные обломки пород. В связи с этим, естественно, возникает необходимость непосредственного наблюдения горных пород в скважинах, что осуществляется путем спуска в скважину телевизионного или фотоустройства. Эти оптические методы помогают получить качественную характеристику трещиноватости, определить, как и в каком состоянии залегают породы, установить характер трещиноватости в различных интервалах скважин, т.е. проследить ее изменчивость.

Метод зарисовок и фотографирования [7] применяется в основном для изучения структуры массива коренных пород и состояния уступов и бортов карьера. Метод является ручным и трудоёмким, а её конечный результат является субъективностью и неточностью. Альтернативой зарисовки является масштабированный фотоснимок, до недавнего времени его применение для геологического картирования карьеров было практически невозможно из-за отсутствия соответствующего оборудования. В настоящее время с помощью цифровых фотоаппаратов с высокой разрешающей способностью и высокоточных

фотообъективов можно получить качественные снимки при любой погоде и даже с удаленного расстояния (до 2 км), кроме того, значительно снижается время их обработки. Исходя из задач геолого-структурного картирования следует выделить три вида фотодокументации: одного уступа по трассе геологического маршрута, группы уступов и получение обзорных фотопанорам бортов карьера. В результате фотоснимков полученный масштабированный фотоматериал разрешит установить позицию и тип деформации уступов карьера, которых недоступных для непосредственного исследования, обнаружить проблемные с точки зрения устойчивости уступов участки прироторной зоны карьера, дать прогноз их развития на глубину.

В настоящее время для выявления трещин в массиве горных пород применяются разные геофизические методы: сейсмоакустический, оптический, плотностной гамма-гамма-каротаж, электрометрический и георадиолокационный.

графов, по которым определяются: 1) интервальные скорости упругих волн; 2) мощность отдельных слоев, отличающихся степенью трещиноватости; 3) акустические показатели трещиноватости по каждому слою; 4) зоны нарушений и отдельные раскрытые трещины. Результаты исследований наносятся на план участка, на котором приводится краткая геологическая характеристика пород, сейсмический разрез и указывается категория пород по крепости и трещиноватости. Однако положительные результаты можно получить только при горизонтальном или близко к горизонтальному залеганию слоев и если наблюдается возрастание скоростей упругих волн с глубиной от одного слоя к другому. При обратной картине методом преломленных волн определить степень трещиноватости нижележащих слоев породного массива не представляется возможным.

В этом случае успешно применяются сейсмоакустические исследования в скважинах (метод прозвучивания и ультразвуковой

Связь между трещиноватостью горных пород и акустическим показателем

Категория трещиноватости пород	I	II	III	IV	V
Акустический показатель трещиноватости	менее 0,1	0,1–0,25	0,25–0,4	0,4–0,6	0,6–1,0

Сейсмоакустический метод

Из геофизических методов для оценки трещиноватости и степени нарушенности массива горных пород, сейсмоакустический метод применяется в основном для исследования глубоко залегающих трещин. Методика определения трещиноватости этим способом основана на сопоставлении скоростей продольных волн в зоне трещиноватых горных пород и находящихся вне ее пределов. Количественно степень трещиноватости пород оценивается акустическим показателем трещиноватости. Специально проведенными исследованиями на ряде карьеров в породах с различной трещиноватостью установлена зависимость [8, 9] между категорией пород по классификации Межведомственной комиссии по взрывному делу и акустическим показателем трещиноватости (таблица). Для определения скорости продольной волны в нарушенном массиве применяется метод продольного профилирования, который позволяет проводить исследования на расчищенных под бурение рабочих участках.

По результатам профилирования строится система встречно-нагоняющих годо-

каротаж «УЗК») [10, 11]. Исследования проводятся с помощью двух скважин, в одной размещается источник упругих колебаний, в другой на такой же глубине приемник, при этом расстояние между ними принимается от 5–10 до 20 и более метров. Методика определения трещиноватости горных пород методом УЗК приводится в работе [11]. На каждой стоянке зонда в скважине производятся наблюдения по встречной системе, когда один из крайних датчиков поочередно включается в качестве излучателя упругих импульсов. При перемещении зонда по скважине с шагом 1 м по всей ее длине получается непрерывная система встречных годографов, на которых определяется скорость упругих волн в массиве. Результаты исследований методом УЗК наносятся на разрез скважины и служат для оценки степени трещиноватости и особенностей строения породного массива.

Электроразведочные методы

Для изучения трещин на малых глубинах (до 50 м) возможно применение следующих методов электроразведки: дипольного электромагнитного профилирования

(ДЭМП), вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), зондирований методом переходных процессов (ЗМПП), электропрофилеирования (ЭП) и георадиолокации (ГРЛ) [12]. Каждый метод применяется для изучения трещин разными материалами заполнителя, в соответствии создаваемым его источником (рамка, петля, заряд, заземлённый кабель) и перемещением приёмного устройства (рамка, линия *MN*) относительно источника поля [13]. Метод ВЭЗ применяется для изучения горизонтально-слоистых сред с небольшими углами наклона границ (до 15–20 градусов). В частности, для поиска локальных объектов (вертикальных) принято применять метод ЭП. При благоприятных условиях обводнённые трещины выделяются пониженным сопротивлением, а «сухая» трещина (полости и трещины заполнены воздухом) – повышенным, которые легко оконтуриваются методом ДЭМП.

возможным [16]. Толщи мёрзлых горных пород представляют собой экранирующие горизонты для зондирования методом переходных процессов (ЗМПП), а низкая контрастность электрических свойств льда, рыхлых отложений и скальных коренных пород не позволяет уверенно их дифференцировать. Следовательно, выявление трещины, в частности заполненной льдом, в массиве мёрзлых горных пород с помощью большинства электроразведочных методов сильно затруднено, в условиях современного уровня развития их методического и аппаратного обеспечения.

В настоящее время метод георадиолокации применяется для изучения в верхней части разреза (до 30 м). Принцип действия подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии – георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных)

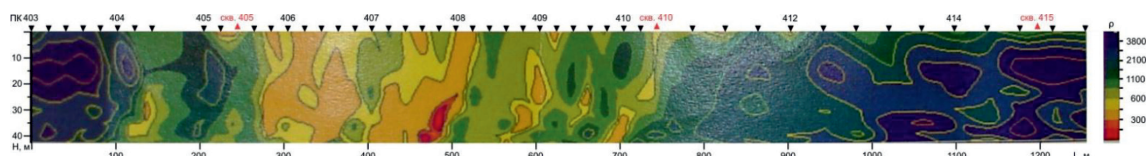


Рис. 4. Результаты количественной интерпретации ДЭМП по ПР-М1 (уч. 405, АО «Алмазы Анабара»)

Глубина трещины оценивается много-разносным профилированием или методом ВЭЗ, но кривые зондирования в этом случае могут быть существенно искажены [14]. Измерения методом ЭП производятся с такой же электроразведочной установкой, как в методе ВЭЗ, но только при одном-двух значениях разносов АВ. Установка профилирования перемещается по профилю наблюдений с шагом от 5–10 до 50–100 м, в зависимости от размеров объектов поиска и требуемой детальности съемки. Однако при выполнении работ в области распространения многолетнемёрзлых горных пород существуют значительные трудности с заземлением электродов (для методов ДЭМП, ВЭЗ, ЭП) и интерпретацией полученных данных, так как удельное электрическое сопротивление (*УЭС*) мёрзлых суглинков и супесей с массивной криотекстурой составляет $3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а у подземного льда $10^4 - 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [15] (рис. 4).

Указанные значения *УЭС* не являются контрастными и выявление подземного льда в многолетнемёрзлых горных породах методами ВЭЗ и ЭП не представляется

импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различную диэлектрическую проницаемость (ϵ') [17]. Для мёрзлых суглинков и супесей диэлектрическая проницаемость не превышает ($\epsilon = 6-9$), для льда составляет ($\epsilon = 3,2$), следовательно, отражение между этими средами будет достаточно контрастной.

В настоящее время большинство георадаров работают в диапазоне от 50 МГц до 2000 МГц, в зависимости от геометрических размеров и положение по глубине залегания трещин в рыхлых отложениях криолитозоны, выбираются соответствующие типы антенных блоков.

Исходя из априорных данных исследуемого участка проводится профилирование или площадная съемка по ранее намеченным профилям. По результатам профилирования получается волновая картина (радарограмма), по которой определяются: ширина трещины, материал заполнителя. Результаты исследований наносятся на план участка, на котором приводится геологический раз-

рез с литологической колонкой опорных скважин, георадиолокационный разрез, и указываются трещины в четвертичных отложениях криолитозоны. Однако положительный результат можно получить, выполняя георадиолокационные работы при полном промерзании сезонно-талого слоя, чтобы талые и водонасыщенные горные породы не создавали дополнительные помехи и шумы, а также при правильном выборе антенного блока в зависимости от ширины и глубины залегания трещины.

Анализ ранее проведенных георадиолокационных исследований показывает, что в основном работы проводились для изучения тектонических трещин [18–20], где критерием выявления являются: разрыв осей синфазности [21–23], их смещения или резкое изменение угла наклона [24–26], образование дифрагированных волн в плоскости сместителя, уменьшение амплитуды и т.д. [27, 28]. Публикации по поиску трещин в мерзлых рыхлых отложениях, и в частности заполненных льдом, вовсе не встречаются. Однако имеются успешные георадиолокационные исследования полигональных, повторно-жильных и подземных льдов [29, 30]. Следовательно, для изучения трещиноватости четвертичных отложений криолитозоны с целью повышения эффективности проведения буровзрывных работ необходимо разработать соответствующую методику георадиолокационных исследований.

Заключение

В обзоре рассмотрены основные методы исследования трещин в четвертичных отложениях криолитозоны на территории Анабарского района Республики Саха (Якутия), где традиционными геологическими методами невозможно выявить зоны повышенной трещиноватости из-за отсутствия обнажений и выходов коренных пород. Для изучения на малых глубинах (до 50 м) возможно использование электроразведочных методов разных модификаций, для глубоко залегающих трещин применяется сейсмоакустический метод. Выбор конкретной модификации производится по особенностям электрофизических свойств заполнителя трещины, глубине и направлению залегания. Однако показано, что существуют сложности при выделении трещин, заполненных льдом в массиве многолетнемерзлых горных пород методами ВЭЗ и ЭП, так как УЭС льда и мерзлых пород в достаточной степени не являются контраст-

ными. Аналитический обзор показал, что наиболее перспективным геофизическим методом для этих целей является метод георадиолокации, который является достаточно точным, хотя и не позволяет в некоторых случаях однозначно определить наличие трещин в многолетнемерзлых горных породах. Это вызвано тем, что множество других явлений, например неоднородности, валунистость и т.д., дают отражение георадиолокационных сигналов, сравнимых с отражением от трещин. Таким образом, для эффективного изучения трещин в четвертичных отложениях криолитозоны с помощью метода георадиолокации, необходимо разработать соответствующее методическое обеспечение обработки и интерпретации георадиолокационных данных, основанное на результатах современных исследований [31].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 18-45-140061 p_a.

Список литературы / References

1. Кутузов Б.Н. Взрывные работы. М.: Недра, 1988. 217 с.
Kutuzov B.N. Blasting operations. M.: Nedra, 1988. 217 p. (in Russian).
2. Негодяева А.А. Обоснование геолого-информационного обеспечения технологии горных работ на угольных карьерах: автореф. дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2016. 22 с.
Negodyaeva A.A. Substantiation of geological and information support of mining technology in coal mines: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. SPb., 2016. 22 p. (in Russian).
3. Ершов Э.Д. Общая геокриология. М.: Недра, 1990. 559 с.
Ershov E.D. General Geocryology. M.: Nedra, 1990. 559 p. (in Russian).
4. Шишкин И.В. Развитие методов оценки устойчивости газопроводов в многолетнемерзлых грунтах: дис. ... канд. тех. наук. Ухта, 2014. 159 с.
Shishkin I.V. Development of methods for assessing the stability of gas pipelines in permafrost soils: dis. ... kand. tekh. nauk. Ukhra, 2014. 159 p. (in Russian).
5. Васильев П.Н., Зубков В.П., Иудина Т.М., Заровняев Б.Н., Шубин Г.В., Сорокин В.С. Трещиноватость горных пород на угольных месторождениях Республики Саха (Якутия). Якутск: ИД СВФУ, 2013. 182 с.
Vasilev P.N., Zubkov V.P., Judina T.M., Zarovnyayev B.N., Shubin G.V., Sorokin V.S. Fracturing of rocks in the coal deposits of the Republic of Sakha (Yakutia). Yakutsk: ID SVFU, 2013. 182 p. (in Russian).
6. Ефремов Э.И. Разрушение горных пород энергией взрыва. Киев: Наукова думка, 1987. 264 с.
Efremov E.I. Rock destruction by explosion energy. Kiev: Naukova Dumka, 1987. 264 p. (in Russian).
7. Бурзунова Ю.П. Сложные сети трещин в разломных зонах (результаты тектонофизического анализа): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 2015. 23 с.
Burzunova Y.P. Complex crack networks in fault zones (results of tectonophysical analysis). dissertation abstract. avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Irkutsk, 2015. 23 p. (in Russian).
8. Яницкий Е.Б., Игнатенко И.М., Дунаев А.В. Применение фотометодов для изучения структуры массива скальных пород и состояния стационарных уступов в карьере // Геология, география и глобальная энергия. 2009. № 1 (32). С. 31–36.
Janicki E.B., Ignatenko I.M., Dunaev A.V. Application of photomethod to study the structure of solid rock and the state

- of the stationary ledges in the quarry // *Geologia, geographia i globalnaya energia*. 2009. № 1 (32). P. 31–36 (in Russian).
9. Шамурина А.И. Разработка алгоритмов обработки сигналов в информационно-измерительных системах для контроля изменения трещиноватости в образцах горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Хабаровск, 2017. 18 с.
- Shamurina A.I. Development of signal processing algorithms in information-measuring systems for monitoring fracture changes in rock samples: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. Khabarovsk, 2017. 18 p. (in Russian).
10. Методические указания по оценке механического состояния горных массивов с помощью упругих волн. М.: Изд-во СФТПГ ИФЗ АН СССР, 1978. 59 с.
- Guidelines for the assessment of the mechanical state of rock massifs by means of elastic waves. M.: Izd-vo SFTPG IFZ AN SSSR. 1978. 59 p. (in Russian).
11. Ржевский В.В., Ямщиков В.С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. М.: Наука, 1973. 224 p.
- Rzhevsky V.V., Yamshchikov V.S. Acoustic methods of investigation and control of rocks in the massif. M.: Nauka, 1973. 224 p. (in Russian)
12. Лаломов Д.А. Комплексирование методов электротомографии и георадиолокации при решении инженерно-геологических задач на объектах транспортного строительства: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб, 2017. 182 с.
- Lalomov D.A. Integration of methods of electrotomography and GPR in solving engineering and geological problems at the objects of transport construction: dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. SPb, 2017. 182 p. (in Russian).
13. Ялов Т.В. Электрическая анизотропия горизонтально-неоднородных сред: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 27 с.
- Yalov T.V. Electrical anisotropy of horizontally heterogeneous media: avtoref. dis. ... kand. tekh. nauk. M., 2014. 27 p. (in Russian).
14. Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Ященко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массива скальных пород / под ред. А.М. Епинатьева. М.: Недра, 1969. 239 с.
- Savich A.I., Koptev V.I., Nikitin V.N., Yashchenko Z.G. Seismoacoustic methods for studying rock massif / Ed. A.M. Yepinat'eva. M.: Nedra, 1969. 239 p. (in Russian).
15. Иголкин В.И., Тронин О.А., Хохлов М.Ф., Шайдуров Г.Я. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016. 272 с.
- Igolkin V.I., Tronin O.A., Khokhlov M.F., Shaidurov G.Ya. Methods and apparatus for electrical intelligence on alternating current. Krasnoyarsk: SFU, 2016. 272 p. (in Russian).
16. Дортман М.Н. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. М.: Недра, 1984. 455 с.
- Dortman M.N. Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Handbook of Geophysics. M.: Nedra, 1984. 455 p. (in Russian).
17. Электрическое зондирование геологической среды. Часть II / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. М., 1992. 199 с.
- Electrical sounding of the geological environment. Part II / Pod red. V.K. Khmelevskogo, V.A. Shevnina. M., 1992. 199 p. (in Russian).
18. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: «ГЕОС», 2017. 240 с.
- Vladov M.L., Sudakova M.S. GPR: from the physical basics to the most promising directions. Textbook. M.: «GEOS», 2017. 240 p. (in Russian).
19. Arosio D. Rock fracture characterization with GPR by means of deterministic deconvolution. *Journal of Applied Geophysics*. 2016. Vol. 126. P. 27–34. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.006.
20. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bondua S., Bruno R. Implementation of a Fracture Modeling Strategy Based on Georadar Survey in a Large Area of Limestone Quarry Bench. *Geosciences*. 2018. Vol. 8 Issue 12. P. 481. DOI: 10.3390/geosciences8120481.
21. Соколов К.О., Попков П.А., Прудецкий Н.Д. Возмозности георадиолокации при исследовании разрывных нарушений на месторождениях полезных ископаемых криолитозоны // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2013. № 3. С. 351–355.
- Sokolov K.O., Popkov P.A., Prudetskiy N.D. The capabilities of GPR in the study of faulting on the mineral deposits of the permafrost zone // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2013. № 3. P. 351–355 (in Russian).
22. Соколов К.О., Прудецкий Н.Д. Опыт применения георадиолокации для исследования разрывных нарушений на россыпных месторождениях криолитозоны // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № S30. С. 333–337.
- Sokolov K.O., Prudetskiy N.D. Experience in the application of GPR to the study of faulting on placer deposits of the permafrost zone // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. № S30. P. 333–337 (in Russian).
23. Лунина О.В., Гладков А.С., Афонкин А.М., Серебряков Е.В. Стиль деформаций в зоне динамического влияния Мондинского разлома по данным георадиолокации (Тункинская впадина, юг Восточной Сибири) // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 9. С. 1616–1633. DOI: 10.15372/GiG20160902.
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Afonkin A.M., Serebryakov E.V. Deformation style in the damage zone of the Mondy fault: GPR evidence (Tunka basin, southern East Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. T. 57. № 9. P. 1269–1282. DOI: 10.1016/j.rgg.2016.08.012.
24. Arosio D., Deparis J., Zanzi L., Garambois S. Fracture characterization with GPR: A comparative study // *GPR 2016: 16th International Conference of GPR on 13–16 June 2016. Hong Kong, 2016*. [Electronic resource]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7292656/>. (date of access: 15.10.2019). DOI: 10.1109/ICGPR.2016.7572679.
25. Ercoli M., Pauselli C., Forte E., Volpe R., Federico C. 2D-3D GPR as an efficient tool for paleoseismology: A successful case history across the Castrovillari fault (southern Apennines, Italy) // *GPR 2014: 15th International Conference of GPR on 30 June – 4 July 2014. Brussels, 2014*. [Electronic resource]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970566> (date of access: 15.10.2019). DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970566.
26. Uddin W. An overview of GPR applications for evaluation of pavement thickness and cracking // *GPR 2014: 15th International Conference of GPR on 30 June – 4 July 2014. Brussels, 2014*. [Electronic resource]. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970561> (date of access: 15.10.2019). DOI: 10.1109/ICGPR.2014.6970561.
27. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учеб. пособие. М.: Изд. МГУ, 2008. 192 с.
- Starovoytov A.V. Interpretation of GPR data. Textbook. M.: Izd. MGU, 2008. 192 p. (in Russian).
28. Markovaara-Koivisto M., Hokkanen T., Huuskonen-Snicker E. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2014. V. 73. Issue 3. P. 815–823. DOI: 10.1007/s10064-013-0566-4.
29. Dallimore S.R., Davis J.L., Pilon J. Ground penetrating radar investigations of massive ground ice. In *Ground penetrating radar. Geological Survey of Canada*, 1992. P. 41–48.
30. Бричева С.С., Станюковская Ю.В. Изучение «скрытых» повторно-жильных льдов в Чарской котловине (Забайкальский край, Россия) методом георадиолокации // 13 Конференция и выставка. Инженерная геофизика 2017. Кисловодск, 24–28 апреля 2017 г. DOI: 10.3997/2214-4609.201700386.
- Bricheva S.S., Stanilovskaya Yu.V. The study of «hidden» re-vein ice in the Charskaya Depression (Trans-Baikal Territory, Russia) using georadar // 13th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2017. Kislovodsk, 24–28 april 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201700386 (in Russian).
31. 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. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-107-113.
- Prudetskiy N.D., Sokolov K.O., Fedorova L.L. Physical modeling of the propagation of an electromagnetic high-frequency wave in a rock mass with a crack filled with ice // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2018. № 11. P. 107–114 (in Russian).