

Разработка метода выявления трещин в горных породах криолитозоны на основе дифференцирования данных георадиолокации

Кирилл Олегович СОКОЛОВ*

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия

Аннотация

Актуальность работы. Наличие трещин существенно влияет на физико-механические свойства горных пород, что необходимо учитывать при планировании добычных работ и строительстве горнотехнических сооружений. В условиях распространения многолетнемерзлых горных пород, характерных для Северо-Востока России, изучение трещиноватости возможно методом георадиолокации, применяющимся для оценки строения массивов горных пород россыпных месторождений. Критерии выявления трещин по особенностям волновых георадиолокационных полей в настоящее время известны, и основной проблемой, препятствующей полноценному использованию метода георадиолокации для изучения трещин в подповерхностных слоях горных пород, является существенная трудоемкость процессов обработки и интерпретации данных георадиолокационных измерений.

Цель работы – разработать метод обработки результатов георадиолокационных измерений для выявления трещин в мерзлых горных породах.

Методы – физическое и компьютерное моделирование георадиолокационных измерений массива горных пород с трещиной, методы дифференциального исчисления для анализа модели структуры георадиолокационного волнового поля.

Результаты работы и область их применения. В результате проведенных исследований на основе ранней разработанной модели структуры георадиолокационного волнового поля обосновано применение операции дифференцирования для выявления трещин в горных породах криолитозоны. Рассмотрены частные случаи прямолинейных наклонных и горизонтальных осей синфазности георадиолокационных сигналов и для них получены соответствующие формулы. Полученные теоретические результаты апробированы на данных компьютерного и физического моделирования, а также на данных полевых измерений. Проведен анализ особенностей сигналов после дифференцирования, отмечены особенности исходных радарограмм, которые могут помешать достоверной интерпретации полученных результатов.

Выводы. В практике обработки данных георадиолокационных измерений результаты проведенных исследований позволят быстрее выявлять зоны повышенной трещиноватости горных пород. В дальнейшем планируется разработка алгоритма и реализующего его программного обеспечения для картирования трещин горных пород по данным георадиолокации.

Ключевые слова: георадиолокация, трещина, горные породы, модель, интерпретация.

Введение

В горном деле массив горных пород рассматривается как неоднородное геологическое образование, характеризующееся наличием большого количества трещин различного масштабного уровня, разделяющих блоки пород. Трещиноватость значительно влияет на физико-механические свойства горных пород [1–3], и эту характеристику необходимо учитывать при разработке месторождений полезных ископаемых, а также при строительстве горнотехнических сооружений.

На Северо-Востоке России большая часть месторождений полезных ископаемых находится в области распространения многолетнемерзлых горных пород, и для изучения трещиноватости возможно применение

такого метода геофизики, как георадиолокация. Существующие критерии выявления трещин по данным георадиолокации [4–12] рассчитаны на опытного оператора-геофизика, что не позволяет полноценно использовать этот геофизический метод для изучения трещин в подповерхностных слоях горных пород из-за высокой трудоемкости процессов обработки и интерпретации данных.

Для разработки методов автоматизированного выявления трещин горных пород криолитозоны по данным георадиолокационных измерений необходимо установить закономерности проявления трещин в георадиолокационных волновых полях. В данной работе при построении

*k.sokolov@ro.ru

алгоритма обработки георадиолокационных данных нужно будет основываться на разработанной ранее модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной [13]. В данной модели устанавливается связь между параметрами трещины (положение границ слоев горных пород по глубине слева и справа от трещины и ее ширина) и кинематическими характеристиками наблюдаемого георадиолокационного волнового поля.

Теория. В работе [14] модель GPR представляет собой структуру георадиолокационного разреза, получаемого при зондировании двухслойного массива мерзлых горных пород с прямолинейными границами:

$$GPR = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N U_s(d+kT-d_{cm})\theta(T-T_{cm}) \times (1 - \Pi(T-T_{cm}, W_{cm})) + n(T) \quad (1)$$

где K – количество трасс; N – количество отсчетов в трассе; U_s – функция расчета амплитудных значений сигналов; θ – функция Хэвисайда; Π – функция прямоугольного импульса; k – параметр наклона оси синфазности сигналов; T_{cm} – номер трассы, с которой начинается трещина; W_{cm} – ширина трещины; d_{cm} – смещение оси синфазности по вертикали.

В работе [15] на основе феноменологического подхода автором предложены способ описания изменения амплитуд сигналов в области расположения трещины и метод их выявления с помощью дифференцирования данных георадиолокации. Для обоснования применения операции дифференцирования в более общем случае необходимо найти производную выражения (1) по T , т. е. $GPR'_T = dGPR/dT$. Исходя из свойств операции дифференцирования, для нахождения GPR'_T достаточно найти производную следующего выражения:

$$U_s(d+kT-d_{cm})\theta(T-T_{cm})(1 - \Pi(T-T_{cm}, W_{cm})),$$

в котором предварительно раскроем скобки и воспользуемся тем, что функция прямоугольного импульса может быть представлена разностью двух функций Хэвисайда;

$$\begin{aligned} U_s(d+kT - \theta(T-T_{cm})d_{cm})(1 - \theta(T-T_{cm}) + \theta(T-(W_{cm}+T_{cm}))) = \\ = U_s(d+kT - \theta(T-T_{cm})d_{cm})(1 - \theta(T-T_{cm})) + \\ + U_s(d+kT - \theta(T-T_{cm})d_{cm})\theta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \end{aligned}$$

Получившееся выражение упростим, исходя из того, что множитель $1 - \theta(T - T_{cm})$ не равен 0 при $T < T_{cm}$, и на этом промежутке $\theta(T - T_{cm})d_{cm} = 0$, что позволяет привести выражение, которое уже можно продифференцировать, к следующему виду:

$$\begin{aligned} (U_s(d+kT)(1 - \theta(T-T_{cm})) + U_s(d+kT-d_{cm})) \\ \theta(T-(W_{cm}+T_{cm}))' = U_s'(d+kT)(1 - \theta(T-T_{cm})) - \\ - U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \\ \theta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + U_s(d+kT-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) = \\ = U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \\ \delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + U_s'(d+kT)(1 - \theta(T-T_{cm})) + \end{aligned}$$

$$+ U_s'(d+kT-d_{cm})\theta(T-(W_{cm}+T_{cm})), \quad (2)$$

где $U_s'(d+kT-d_{cm}) = U_s(d+k(T+1)-d_{cm}) - U_s(d+kT-d_{cm})$.

В формуле (2) третье и четвертое слагаемые показывают, что останется после дифференцирования от осей синфазности георадиолокационных сигналов, первое и второе указывают на начало и конец трещины. В горизонтально-слоистых средах (при $k = 0$) третье и четвертое слагаемые обнуляются, так как $U_s' = 0$:

$$-U_s(d)\delta(T-T_{cm}) + U_s(d-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm}))$$

В результате при $k = 0$ получим:

$$GPR'_T = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N -U_s(d)\delta(T-T_{cm}) + U_s(d-d_{cm}) \times \delta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \quad (3)$$

Анализ формулы (3) показывает, что дифференцирование георадиолокационного волнового поля с горизонтальными осями синфазности приводит к обнулению всего поля, и только на трассах с номерами T_{cm} и $W_{cm} + T_{cm}$ присутствуют разнонаправленные сигналы $-U_s(d)$ и $U_s(d-d_{cm})$, которые однозначно указывают на начало и конец трещины.

В общем же виде с учетом влияния наклонных границ получаем выражение:

$$\begin{aligned} GPR'_T = \sum_{T=0}^K \sum_{d=0}^N -U_s(d+kT)\delta(T-T_{cm}) + \\ + U_s(d+kT-d_{cm})\delta(T-(W_{cm}+T_{cm})) + \\ + U_s'(d+kT)(1 - \theta(T-T_{cm})) + U_s'(d+kT-d_{cm}) \times \\ \times \theta(T-(W_{cm}+T_{cm})). \quad (4) \end{aligned}$$

По формуле (4) в GPR'_0 присутствуют мешающие определению местоположения трещины, многочисленные значения, которые представляют собой разность соседних сигналов U_s , один из которых сдвинут относительно другого в соответствии с коэффициентом k . Для того чтобы исключить из рассмотрения эти значения, проведем анализ U'_s , чтобы оценить ее возможные амплитуды. В качестве примера функции U_s рассмотрим импульс Гаусса $U_\Gamma = \exp[-(t-t_{max})^2/c^2]$, который используется в системе grMax [13], наиболее популярной для моделирования данных георадиолокации. Обозначим A – амплитуду импульса; c – ширину импульса; n – количество отсчетов, на которое происходит смещение импульса относительно соседней трассы; t_{max} – время регистрации максимума импульса. Тогда изменение амплитуд импульса Гаусса (dU_Γ) будет равно:

$$dU_\Gamma(t) = U_\Gamma(t-n) - U_\Gamma(t) = A \exp[-(t-n-t_{max})^2/2c^2] - A \exp[-(t-t_{max})^2/2c^2].$$

Данное выражение неудобно для использования в практических целях, так как амплитуда импульсов всегда разная, поэтому определим относительное изменение амплитуд:

$$\frac{dU_\Gamma(t)}{U_\Gamma(t)} = \frac{A \exp[-(t-n-t_{max})^2/2c^2]}{A \exp[-(t-t_{max})^2/2c^2]} = \quad (5)$$

$$= \exp \left[- \left(n^2 + 2tn - 2nt_{\max} \right)^2 / 2c^2 \right].$$

По формуле (5) проведены численные расчеты при различных значениях n , в результате которых установлено, что максимальные значения dU_r наблюдаются в точках перегиба функции U_r , расположенных в $t_{\max} \pm c$. При этом максимальные значения $dU_r = n \cdot 1,5 \%$, что позволяет получать на дифференцированной радарограмме сигналы только на концах осей синфазности путем фильтрации амплитудных значений, больших, чем $An \cdot 0,015$.

Апробация полученных теоретических результатов

Компьютерное моделирование проведено для двух моделей двухслойной среды с горизонтальной и наклонной границами с параметрами: U_s – вторая производная импульса Гаусса; $f = 450$ МГц; $dt = 0,12$ нс; $n = 360$. В первой модели установлены следующие характеристики слоев: 1) мощность $h_1 = 1,2$ м; вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon'_1 = 4$; 2) $h_2 = 1,5$ м; $\epsilon'_2 = 6$. Время регистрации сигналов, отраженных от границы между первым и вторым слоем, составило $t = 2h\sqrt{\epsilon'}/0.3 = 2 \cdot 1.2 \cdot \sqrt{4}/0.3 = 16$ нс (рис. 1, а). Наличие трещины на синтетической радарограмме моделируется разрывом осей синфазности георадиолокационных сигналов на промежутке 1,8–2,5 м. Во второй модели мощность первого слоя изменяется от 1,2 м (в начале радарограммы) до 1 м (в конце радарограммы), что соответствует $t = 13,3$ нс (рис. 1, б), остальные параметры

аналогичны первой модели. После дифференцирования синтетических радарограмм на месте концов осей синфазности сигналов наблюдаются два разнонаправленных одиночных сигнала (рис. 1, в, г), что соответствует формуле (3) и двум первым слагаемым формулы (4). На рис. 1, г также прослеживаются низкоамплитудные сигналы, полученные при вычитании из каждого сигнала соседнего, который сдвинут по времени вверх, в соответствии с третьим и четвертым слагаемыми формулы (4).

Физическое моделирование георадиолокации массива мерзлых горных пород с трещиной проведено в соответствии со схемой, представленной на рис. 2, а. Модель состояла из двух блоков льда, отделенных друг от друга уплотненным снегом, из которого также сформирован верхний слой. В измерениях использовался георадар ОКО-3 с АБ-1200 МГц. На радарограмме (рис. 2, б), полученной в результате измерений, наблюдается разрыв осей синфазности георадиолокационных сигналов, немало искаженных дифрагированными волнами. После дифференцирования на радарограмме (рис. 2, в) в месте расположения трещины остались импульсы с противоположными фазами (выделены белым пунктирным прямоугольником). Так, с левой стороны сигнал начинается с положительного значения (черный цвет), а с правой стороны – с отрицательного значения (белый цвет). Горизонтальные оси синфазности георадиолокационных сигналов, в том числе сигнал прямого прохождения, по-

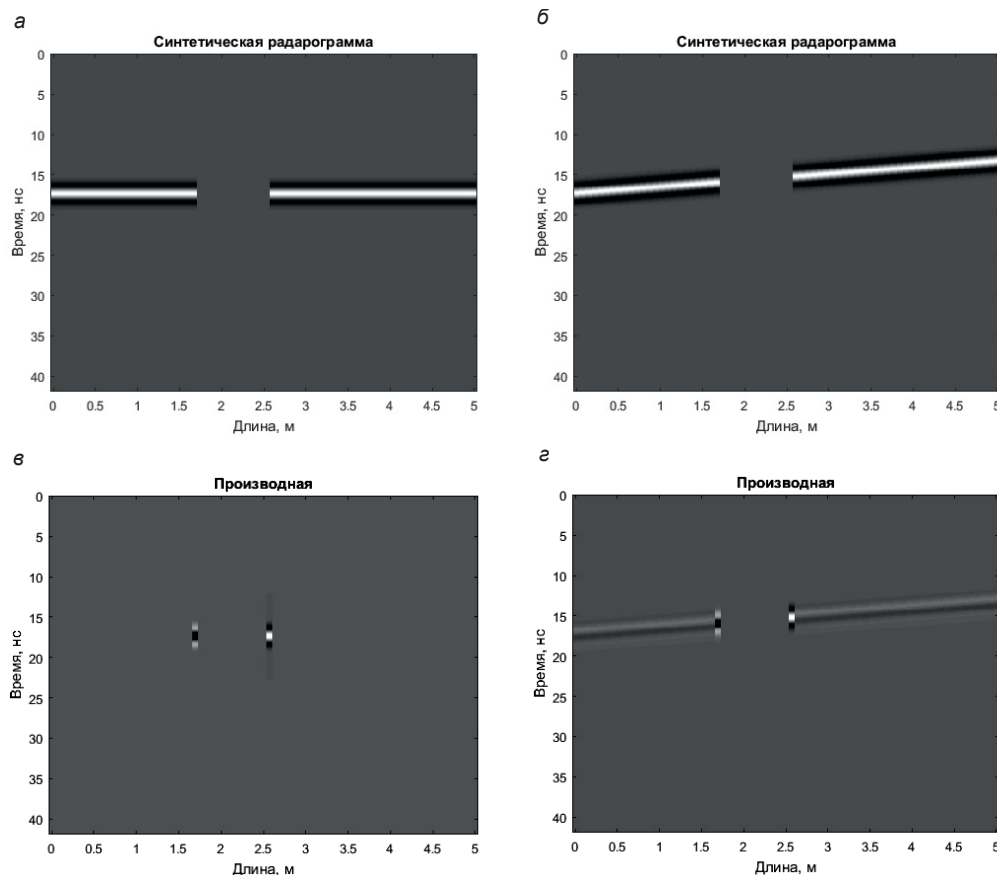


Рисунок 1. Синтетические радарограммы – а, б и результаты их дифференцирования – в, г
 Figure 1. Synthetic radargrams – а, б and the results of their differentiation – в, г

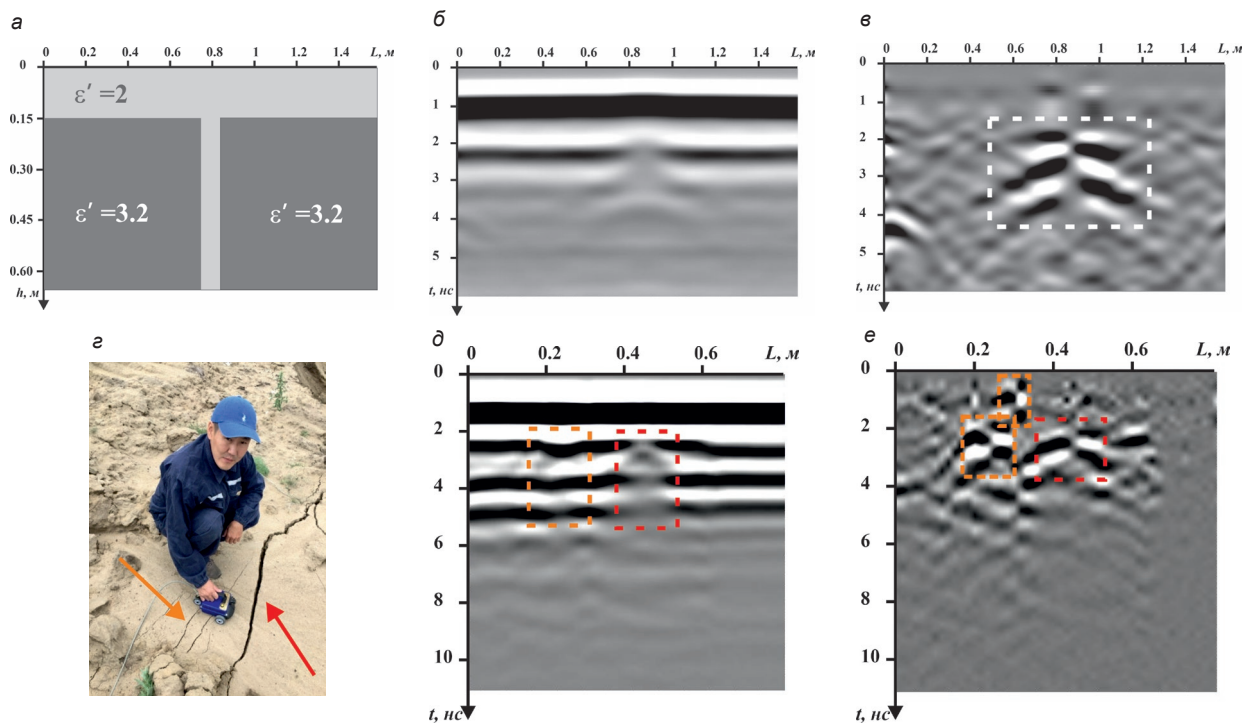


Рисунок 2. Материалы, иллюстрирующие эксперименты по георадиолокационному изучению массива горных пород с трещиной: а – схема массива горных пород для физического моделирования; а – фото эксперимента; б, д – радарограммы; в, е – результаты дифференцирования радарограмм б, д
Figure 2. Materials illustrating experiments on GPR studies of rock masses with a crack: а – diagram of a rock mass for physical modeling; а – photo of the experiment; б, д – radargrams; в, е – results of differentiation of radargrams б, д

сле дифференцирования практически исчезли, остались только малоамплитудные сигналы-помехи.

Натурное моделирование георадиолокационных измерений массива горных пород с трещиной проведено на уступе карьера Кангаласского бурогоугольного месторождения (рис. 2, а). При предварительной обработке полученной радарограммы (рис. 2, б) использовалась только процедура изменения контрастности цвета для облегчения визуального восприятия разрыва осей синфазности. Так, например, широкая трещина (отмечена красным цветом) отобразилась непосредственно разрывом, а более узкие (оранжевый цвет) – только изменением амплитудных значений георадиолокационных сигналов и искажением формы осей синфазности из-за дифрагированных волн. После дифференцирования (рис. 2, в) все трещины выглядят так же, как и в предыдущем эксперименте. Узкие трещины, которые были плохо видны на исходных данных, после обработки отображаются четко и однозначно.

Результаты исследований

В георадиолокации распространение электромагнитных волн происходит в виде сферической волны, вследствие этого на радарограмме присутствуют волны, дифрагированные на концевых участках границ слоев, что приводит к появлению на дифференцированной радарограмме в начале и конце трещины не отдельных сигналов, а коротких наклонных осей синфазности сигналов. Длина этих осей зависит от их глубины, параметров трещины и электрофизических свойств горных пород. После операции дифференцирования «пустое» место в разрыве осей синфазности георадиолокационных сигналов уменьша-

ется на одну трассу, так как происходит вычитание из последней «пустой» трассы первой трассы с правой оси синфазности, что приводит к зрительному уменьшению ширины трещины. Количество импульсов (белых и черных полос) в дифференцированных сигналах может также варьироваться в зависимости от используемого георадара, а также электрической проводимости горных пород.

Схожие результаты после дифференцирования может также давать геофизическая аномалия «яркое пятно», когда на границе раздела геологических сред присутствует локальное резкое увеличение или уменьшение значений электрофизических свойств, например, увеличение влажности приводит к росту вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости, что соответственно увеличивает коэффициент отражения и амплитуду отраженного георадиолокационного сигнала. В идеальных условиях данная аномалия после дифференцирования будет ограничена либо только положительными импульсами (черный цвет), либо только отрицательными (белый цвет). Однако при изучении реальных геологических сред «яркое пятно» может отображаться теми же сигналами, что и трещина, но с более низкими амплитудами.

Закрытая трещина со смещением по вертикали после дифференцирования отображается на радарограмме в виде одиночного сигнала, как на рис. 2, в (на отметке 0,6 м по профилю). Необходимо также учитывать наличие на исходной радарограмме множества сигналов-помех, которые искажают георадиолокационные сигналы в большинстве случаев незначительно, но это приводит к появлению низкоамплитудных импульсов и их осей синфазности после дифференцирования.

Выводы

В результате проведенных исследований на основе ранней разработанной модели структуры георадиолокационного волнового поля обосновано применение операции дифференцирования для выявления трещин в горных породах криолитозоны. Рассмотрены частные случаи прямолинейных наклонных и горизонтальных осей синфазности георадиолокационных сигналов и для них получены соответствующие формулы. Полученные теоретические результаты апробированы на данных компьютерного и физического моделирования, а также

на данных полевых измерений. Проведен анализ особенностей сигналов после дифференцирования, отмечены особенности исходных радарограмм, которые могут мешать достоверной интерпретации полученных результатов. В практике обработки данных георадиолокационных измерений результаты проведенных исследований позволят быстрее выявлять зоны повышенной трещиноватости горных пород. В дальнейшем планируется разработка алгоритма и реализующего его программного обеспечения для картирования трещин горных пород по данным георадиолокации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
2. Лайхансурэ Б. К расчету оптимальных параметров взрывных работ с учетом трещиноватости массива // ГИАБ. 2008. Т. 14. № 1. С. 165–172.
3. Иудин М. М. О трещиноватости массива горных пород // ГИАБ. 2007. Т. 17. № 2. С. 279–283.
4. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemain T., Effendiantz L., Mathy A. Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potentially unstable cliff site (the “Roche du Midi”, Vercors massif, France) // Journal of Geophysics and Engineering. 2008. Vol. 5(2). P. 147–157. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/2/002>
5. Theune U., Rokosh D., Sacchi M. D., Schmitt D. R. Mapping fractures with GPR: A case study from Turtle Mountain // Geophysics. 2006. Vol. 71(5). P. B139–B150. <https://doi.org/10.1190/1.2335515>
6. Ding Ya-lei, Song Lei, Yang Wei-hao, Li Hai-peng. Permittivity and EM wave field of the stochastic broken rock and its applications // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. Brussels, Belgium. 2014. P. 941–946. <https://doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970565>
7. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. Diffraction imaging of ground-penetrating radar data // Geophysics. 2019. Vol. 84 (3). P. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
8. Porsani J. L., Sauck W. A., Júnior A. O. S. GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil // Journal of Applied Geophysics. 2006. Vol. 58(3). P. 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.05.010>
9. Molron J., Linde N., Baron L., Selroos J.-O., Darcel C., Davy P. Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden // Engineering Geology. 2020. Vol. 273. Article number 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
10. Jaworowski C., Lynne B. Y., Heasler H., Foley D., Smith I. J., Smith G. J. Detecting natural fractures with ground penetrating radar and airborne night-thermal infrared imagery around Old Faithful Geyser, Yellowstone National Park, USA // Geothermics. 2020. Vol. 85. Article number 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>
11. Seren A., Acikgoz A. D. Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey // Scientific Research and Essays. 2012. Vol. 7(40). P. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
12. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bonduà 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(12). P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
13. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. 2016. Vol. 209. P. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
14. Соколов К. О. Разработка модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной // Известия УГГУ. 2021. № 2(62). С. 134–139. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-134-139>
15. Соколов К. О. Алгоритм обработки данных георадиолокации для выявления контуров деформационных геологических структур // ГИАБ. 2018. № 10. С. 138–144. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144>

Статья поступила в редакцию 18 августа 2023 года

Development of a method for identifying cracks in permafrost rocks based on differentiation of GPR data

Kirill Olegovich SOKOLOV*

N. V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract

Relevance. The presence of cracks significantly affects the physical and mechanical properties of rocks, which must be taken into account when planning mining operations and building mining structures. In the conditions of the distribution of permafrost rocks, characteristic of the North-East of Russia, the study of fracturing is possible using the ground penetrating radar method, which is used to assess the structure of rock masses of placer deposits. The criteria for identifying cracks based on the characteristics of GPR wave fields are currently known, and the main problem preventing the full use of the GPR method for studying cracks in subsurface layers of rocks is the significant complexity of processing and interpreting GPR measurement data.

The purpose of the work is to develop a method for processing the results of ground penetrating radar measurements to identify cracks in frozen rocks.

Methods. Physical and computer modeling of GPR measurements of a rock mass with a fracture, differential calculus methods for analyzing the GPR wave field structure model.

Results and their scope. As a result of the research, based on an early developed model of the structure of the GPR wave field, the use of the differentiation operation for identifying cracks in permafrost rocks was justified. Special cases of rectilinear inclined and horizontal axes of in-phase of ground penetrating radar signals are considered and corresponding formulas are obtained for them. The theoretical results obtained were tested on computer and physical modeling data, as well as on field measurement data. An analysis of the features of the signals after differentiation was carried out, and the features of the original radargrams were noted, which may interfere with the reliable interpretation of the results obtained.

Conclusions. In the practice of processing data from ground penetrating radar measurements, the results of the research will make it possible to more quickly identify zones of increased fracturing in rocks. In the future, it is planned to develop an algorithm and software that implements it for mapping rock fractures using ground penetrating radar data.

Keywords: ground penetrating radar, crack, rocks, model, interpretation.

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, EGISU R&D No. 122011800086-1) using the equipment of the Common Use Center of the Federal Research Center YSC SB RAS, grant No. 13.CUC.21.0016.

REFERENCES

1. Rats M. V., Chernyshev S. N. 1970, Fractures and properties of fractured rocks. Moscow, 164 p. (*In Russ.*)
2. Laikhansure B. 2008, Towards the calculation of optimal parameters of blasting operations taking into account the fracturing of the massif. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], vol. 14, no. 1, pp. 165–172. (*In Russ.*)
3. Iudin M. M. 2007, On the fracturing of rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], vol. 17, no. 2, pp. 279–283. (*In Russ.*)
4. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemin T., Effendiantz L., Mathy A. 2008, Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potentially unstable cliff site (the "Roche du Midi", Vercors massif, France). *Journal of Geophysics and Engineering*, vol. 5 (2), pp. 147–157. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/2/002>
5. Theune U., Rokosh D., Sacchi M. D., Schmitt D. R. 2006, Mapping fractures with GPR: A case study from Turtle Mountain. *Geophysics*, vol. 71 (5), pp. B139–B150. <https://doi.org/10.1190/1.2335515>
6. Ding Ya-lei, Song Lei, Yang Wei-hao, Li Hai-peng. 2014, Permittivity and EM wave field of the stochastic broken rock and its applications. Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar. Brussels, pp. 941–946. <https://doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970565>
7. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. 2019, Diffraction imaging of ground-penetrating radar data. *Geophysics*, vol. 84 (3), pp. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
8. Porsani J. L., Sauck W. A., Júnior A. O. S. 2006, GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 58 (3), pp. 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.05.010>
9. Molron J., Linde N., Baron L., Selroos J. O., Darcel C., Davy P. 2020, Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology*, vol. 273, article number 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
10. Jaworowski C., Lynne B. Y., Heasler H., Foley D., Smith I. J., Smith G. J. 2020, Detecting natural fractures with ground penetrating radar and airborne night-thermal infrared imagery around Old Faithful Geyser, Yellowstone National Park, USA. *Geothermics*, vol. 85, article number 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>

*k.sokolov@ro.ru

11. Seren A., Acikgoz A. D. 2012, Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey. *Scientific Research and Essays*, vol. 7 (40), pp. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
12. Elkarmoty M., Tinti F., Kasmaeeyazdi S., Giannino F., Bonduà S., Bruno R. 2018, Implementation of a Fracture Modeling Strategy Based on Georadar Survey in a Large Area of Limestone Quarry Bench. *Geosciences*, vol. 8 (12), pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
13. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. 2016, gprMax: Open-source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, vol. 209, pp. 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>
14. Sokolov K. O. 2021, Development of a model of a GPR section of a frozen rock mass with a crack. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta* [News of the Ural State Mining University], no. 2 (62), pp. 134–139. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-2-134-139> (In Russ.)
15. Sokolov K. O. 2018, Algorithm for processing GPR data to identify the contours of deformation geological structures. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], no. 10, pp. 138–144. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-10-0-138-144> (In Russ.)

The article was received on August 18, 2023