Разработка модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной

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: установить закономерности проявления трещин мерзлых горных пород в георадиолокационных волновых полях.

Методология проведения работы. На основе результатов многолетних полевых работ на разрабатываемых участках россыпных месторождений алмазов (АО «Алмазы Анабара») в Анабарском районе Республики Саха (Якутия) определены основные элементы структуры радарограмм и представлены в виде единой формулы. Разработанная формула реализована в программах в СКМ Matlab и результаты ее выполнения сравнены с результатами моделирования в системе gprMax.

Результаты работы и область их применения. Полученная формула описывает основные элементы георадиолокационных радарограмм достаточно корректно, что подтвердило их сравнение с полученными модельными данными. Коэффициент корреляции между полученными матрицами (Matlab и gprMax) без учета низкоамплитудных значений кратных переотражений составил 0,91, что показывает идентичность структуры георадиолокационных волновых полей.

Выводы. Проведенные исследования подтвердили возможность математического описания георадиолокационного волнового поля, получаемого при зондировании массива мерзлых горных пород с трещиной. Высокий коэффициент корреляции показал адекватность разработанной модели радарограммы, которая будет доработана с учетом диаграмм направленности существующих георадаров.

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

Введение

Трещиноватость является природным свойством массивов горных пород, и ее исследованию уделяется большое внимание, так как она существенно влияет на физико-механические свойства горных пород [1–3]. Их, в свою очередь, 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 [4, 5]. Критерии выявления трещин по особенностям волновых георадиолокационных полей в настоящее время известны [6–14], 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.

Для разработки методов автоматизированного выявления трещин горных пород по данным георадиолокации необходимо установить закономерности проявления трещин в георадиолокационных волновых полях с последующим их математическим описанием.

Теория

Автоматизированная обработка данных основывается на использовании алгоритмов, являющихся следствием разработки математически обоснованной теории обработки для различных наборов данных, имеющих схожие характеристики, которые могут быть формализованы в виде модели. Для построения адекватной модели, кроме четкого понимания цели обработки данных, необходимы априорные

*k.sokolov@ro.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4179-9619>

представления о структуре георадиолокационного волнового поля, полученного при зондировании массива мерзлых горных пород с трещиной. Наше исследование особенностей георадиолокационных волновых полей проведено на основе многочисленных материалов полевых измерений на разрабатываемых участках россыпных месторождений алмазов (АО «Алмазы Анабара») в Анабарском районе Республики Саха (Якутия). Георадиолокационные измерения проводились вкрест простирания Эбелях-Уджинского и Догой-Куойкского разломов георадарами ОКО с антенными блоками АБДЛ (центральная частота 50 МГц) и АБ150. На рис. 1, 2 даны фрагменты георадиолокационных радарограмм, представляющие наиболее характерные случаи трещин горных пород криолитозоны.

Основными элементами радарограмм, по которым возможно выявление трещин горных пород, являются резкое изменение времени регистрации отраженных сигналов с разрывом их корреляции и вертикальным смещением осей синфазности, а также наличие дифрагированных волн на концах

осей синфазности при ширине трещины, большей радиуса первой зоны Френеля.

Существующие модели трасс (суммы элементарных волн, полученных в точке зондирования) разработаны довольно давно [15]; построим модель радарограммы как набор подобных трасс. Обозначим функцию, определяющую форму георадиолокационного сигнала, как $U_s(T, d)$, где T – номер трассы; d – номер дискрета (отсчета) трассы. Количество трасс в модели обозначим как K , отсчетов – N . Численно $U_s(T, d)$ может быть реализована различными способами, например, с помощью n -й производной функции Гаусса, функции Рикера и т. д.

В модели ось синфазности георадиолокационных сигналов будет представлена в виде $U_s(T, d)$, при d , имеющем постоянное значение для некоторого диапазона значений T (рис. 3). Для описания разрыва оси синфазности будем использовать инвертированную функцию прямоугольного импульса $1 - \Pi(T - T_{\text{см}}, W_{\text{см}})$, где $T_{\text{см}}$ – номер трассы, с которой начинается разрыв; $W_{\text{см}}$ – ширина

Рисунок 1. Пример радарограммы с разрывом осей синфазности и смещением по вертикали
Figure 1. An example of a radarogram with a break in the inphase axes and a vertical offset

Рисунок 2. Пример отображения на радарограмме геологической границы с разноплановыми тектоническими нарушениями
Figure 2. Example of displaying a geological boundary with diverse tectonic faults on a radarogram

Рисунок 3. Схема расположения основных элементов модели радарограммы
Figure 3. Layout of the main elements of the radarogram model

разрыва, представляющая собой количество трасс, в которых функция $U_s(T, d)$ зануляется. Таким образом, мы приходим к следующему выражению: $U_s(T, d)(1 - \Pi(T - T_{cm}, W_{cm}))$. Для ввода в модель возможности описания взбросов или сбросов используем функцию Хевисайда $2(T - T_{cm})d_{cm}$, где

d_{cm} – количество отсчетов, на которое смещается ось синфазности.

Кроме осей синфазности на радарограмме могут присутствовать различные помехи $n(T)$, например, дифрагированные волны, и модель радарограммы может быть представлена как:

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

GPR является матрицей $N \cdot K$, и при численной реализации модели для корректного ввода дифрагированных волн следует произвести расчет d , соответствующий текущей трассе T , по следующей формуле:

$$d = \frac{0,3dt}{\sqrt{\epsilon_1}} \sqrt{\left((T - T_{cm})RMT\right)^2 + \left(\frac{GLGrdt \cdot 0,6}{\sqrt{\epsilon_1}}\right)^2}, \quad (2)$$

где ϵ_1 – действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости верхнего слоя модели; RMT – расстояние между трассами, м; $GLGr$ – глубина залегания границы раздела слоев модели, м; dt – период дискретизации, нс (рис. 4).

Рисунок 4. Схема-пояснение к выводу формулы (2)
Figure 4. Explanatory diagram for the derivation of the formula (2)

Рисунок 5. Исходные параметры (а) и результаты моделирования в Matlab (б) и gprMax (в)
Figure 5. Initial parameters (a) and simulation results in Matlab (b) and gprMax (c)

Результаты исследований

Апробация разработанной модели радарограммы проведена в СКМ Matlab с параметрами, указанными на рис. 5, а. Для проверки корректности формулы (1) и ее реализации на языке программирования (рис. 5, б) с аналогичными параметрами проведено моделирование георадиолокационных измерений в системе gprMax (рис. 5, в). Сравнение полученных результатов показывает идентичность структуры георадиолокационных волновых полей. Схожесть полученных радарограмм была оценена с помощью функции corr2, входящей в состав Matlab и позволяющей рассчитать коэффициент корреляции r для двух матриц. Так как в результате моделирования в gprMax учитывается большее количество

помех, в том числе кратных переотражений, то значение r составило 0,72. После фильтрации низкоамплитудных помех, которые не видны на рис. 5, в, значение r составило 0,91.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили возможность математического описания георадиолокационного волнового поля, получаемого при зондировании массива мерзлых горных пород с трещиной. Высокий коэффициент корреляции между результатами моделирования по формуле (1) и в системе gprMax показал адекватность разработанной модели радарограммы, которая будет доработана с учетом диаграмм направленности существующих георадаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рац М. В., Чернышев С. Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с.
2. Лайхансурэн 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. Sokolov K. O., Savvin D. V. Using of GPR for Study of Deposits in Cryolithozone // 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong, China, 2016. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572630>
5. Соколов К. О. Интерпретация данных георадиолокации для определения зон повышенной трещиноватости массива мерзлых горных пород // Успехи современного естествознания. 2019. № 12(1). С. 150–155.
6. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemin 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>
7. 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>
8. 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>
9. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. Diffraction imaging of GPR data // Geophysics. 2019. Vol. 84 (3). P. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
10. 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>
11. 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. P. 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
12. 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. P. 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>
13. Seren A., Acikgoz A. D. Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey // Sci. Res. Essays. 2012. Vol. 7(40). P. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
14. 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(12). P. 481. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
15. Козлов Е. А., Гогоненков Г. Н., Лернер Б. Л. и др. Цифровая обработка сейсмических данных. М.: Недра, 1976. 297 с.

Статья поступила в редакцию 31 марта 2021 года

Development of a model of a ground-penetrating radar section of a frozen rock massif with a crack

Kirill Olegovich SOKOLOV*

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

Abstract

Relevance of the work. The presence of cracks significantly affects the physical and mechanical properties of rocks, which should be taken into account when planning mining operations and building mining facilities. In the conditions of the spread of permafrost rocks, characteristic of northeastern Russia, the study of fracturing is possible by the GPR method, which is used to assess the structure of rock massifs in placer deposits. The criteria for detecting cracks based on the features of wave georadar fields are currently known, and the main problem that prevents the full use of the georadar method for studying cracks in subsurface layers of rocks is the labour-consuming nature of processing and interpreting data from georadar measurements.

Purpose of the work – to determine the patterns of cracks occurrence in frozen rocks in GPR wave fields.

Methodology of the work. Based on the results of longstanding field work at the developed areas of alluvial diamond deposits in the Anabar region of the Republic of Sakha (Yakutia), the main elements of the radarogram structure were determined and presented in the form of a single formula. The developed formula is implemented in programs in the SCM Matlab and the results of its execution are compared with the results of modeling in the gprMax system.

Results of the work and the scope of their application. The resultant formula describes the main elements of GPR radarograms quite correctly, which confirmed their comparison with the obtained model data. The correlation coefficient between the obtained matrices (Matlab and gprMax) without the low-amplitude values of multiple reflections was 0.91, which shows the identity of the structure of GPR wave fields.

Conclusions. The studies carried out have confirmed the possibility of a mathematical description of the ground penetrating radar wave field obtained by sounding a mass of frozen rocks with a crack. The high correlation coefficient showed the adequacy of the developed radarogram model, which will be finalized taking into account the directional diagrams of existing georadars.

Keywords: georadiolocation, crack, rocks, model, interpretation.

REFERENCES

1. Ratz M. V., Chernyshev S. N. 1970, Fracturing and properties of fractured rocks, Moscow, 164 p. (In Russ.)
2. Laihansuren B. K. 2008, Calculation of the optimal parameters of blasting taking into account the fracturing of the massif. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], vol. 14, no. 1, pp. 165–172. (In Russ.)
3. Iudin M. M. 2007, On the fracturing of the rock mass. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin], vol. 17, no. 2, pp. 279–283. (In Russ.)
4. Sokolov K. O., Savvin D. V. Using of GPR for Study of Deposits in Cryolithozone. 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong, China, 2016. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572630>
5. Sokolov K. O. 2019, Interpretation of geo-radar data for determining zones of increased fracturing of the frozen rock mass. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural science], no. 12(1), pp. 150–155. (In Russ.)
6. Deparis J., Fricout B., Jongmans D., Villemain 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), p. 147–157. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/2/002>
7. 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), p. B139–B150. <https://doi.org/10.1190/1.2335515>
8. 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, Belgium. P. 941–946. <https://doi.org/10.1109/icgpr.2014.6970565>
9. Yuan H., Montazeri M., Looms M. C., Nielsen L. 2019, Diffraction imaging of GPR data. *Geophysics*, vol. 84 (3), p. H1–H12. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0269.1>
10. 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), p. 177–187. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2005.05.010>
11. Molron J., Linde N., Baron L., Selroos J.-O., Darcel C., Davy P. Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? 2020, Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology*, vol. 273, 105674. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105674>
12. 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, 101775. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101775>

*k.sokolov@ro.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4179-9619>

13. Seren A., Acikgoz A. D. 2012, Imaging fractures in a massive limestone with ground penetrating radar, Haymana, Turkey. *Sci. Res. Essays*, vol. 7(40), P. 3368–3381. <https://doi.org/10.5897/SRE11.1877>
14. 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), 481. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120481>
15. Kozlov E. A., Gogonenkov G. N., Lerner B. L., et al. 1976, Digital processing of seismic data. Moscow, 297 p. (*In Russ.*)

The article was received on March 31, 2021