

Н.Д. Прудецкий, К.О. Соколов, Л.Л. Федорова

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВОЛНЫ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД С ТРЕЩИНОЙ ЗАПОЛНЕННОЙ ЛЬДОМ

Аннотация. Для выработки критериев выявления трещин в многолетнемерзлых горных породах методом георадиолокации проведено физическое моделирование георадиолокационных зондирований горного массива с трещиной заполненной льдом. Представлены результаты физического моделирования методом георадиолокации. Зондирования проведены георадаром «ОКО-2» (Группа компаний «Логис-Геотех», Россия) с антенным блоком АБ-1200 МГц. Описаны условия, параметры, последовательность и методика проведения экспериментальной работы. В результате экспериментальных георадиолокационных измерений, были получены радарограммы, на которых четко прослежены контрастные электрофизические границы, отражающие структуру модели. Проведен частотный анализ георадиолокационных сигналов, на основе которого установлены спектральные признаки выявления трещины заполненной льдом в массиве горных пород, отмечены изменения осей синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от нижней и верхней границ льда, определена форма Фурье-спектра георадиолокационной трассы полученной во льду и в песке. На основе установленных критериев появляется возможность изучения трещиноватости мерзлых горных пород методом георадиолокации.

Ключевые слова: георадиолокация, трещиноватость, горный массив, физическое моделирование, Фурье спектр, георадиолокационный сигнал, лед.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-107-113

Одной из важных проблем при решении вопросов рационального освоения россыпных месторождений Севера является определение трещиноватости массива горных пород. В большинстве случаев трещины в рыхлых отложениях заполнены обломочными горными породами и льдом.

Наличие льда осложняет геологоразведочные работы, увеличивая объем буровых скважин и проходки шурфов, подготовку горного полигона, поддержание выработанного пространства, способствует образованию негабаритов в результате буровзрывных работ, а также

вызывает дополнительные потери и разубоживание полезного ископаемого, в целом приводит к удорожанию разработки месторождений [1–3]. В настоящее время для выявления трещин применяются разные геофизические методы, сейсморазведка, акустический каротаж и георадиолокация. Сейсморазведка и акустический каротаж применяются в основном для исследования глубоко залегающих трещин, для изучения на малых глубинах (до 30 м) возможно применение метода георадиолокации [4, 5].

Однако, в настоящее время отсутствует соответствующее программное и ме-

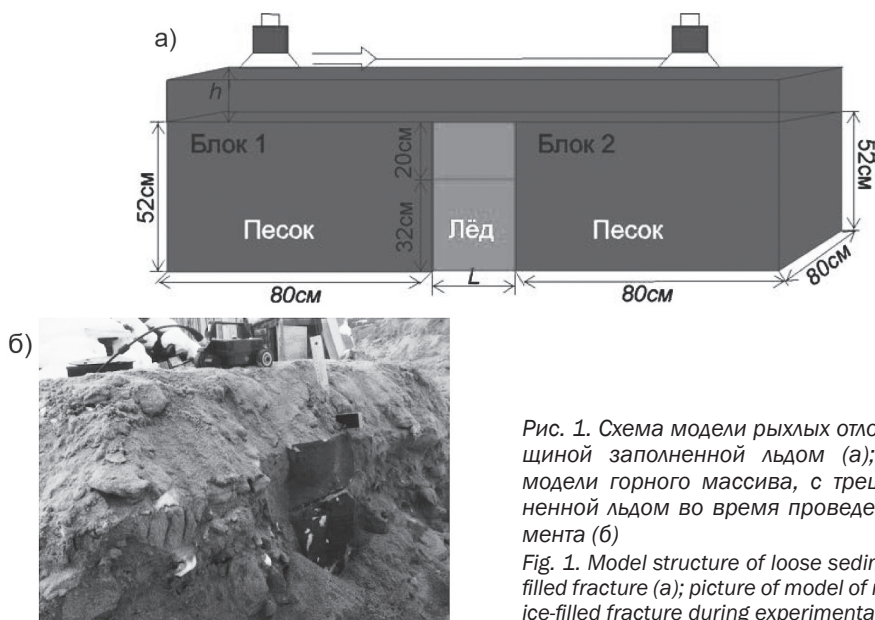


Рис. 1. Схема модели рыхлых отложений, с трещиной заполненной льдом (а); фотография модели горного массива, с трещиной заполненной льдом во время проведения эксперимента (б)

Fig. 1. Model structure of loose sediments with ice-filled fracture (a); picture of model of rock mass with ice-filled fracture during experimentation (b)

тодическое обеспечение георадиолокационных исследований.

Для выработки критериев выявления трещин в многолетнемерзлых горных породах методом георадиолокации [6–8] было проведено физическое моделирование георадиолокационных зондирований горного массива с трещиной заполненной льдом. Физическое моделирование позволяет получить информацию, необходимую для интерпретации различных аномалий осей синфазности георадиолокационных сигналов полученных на участках с трещинами [9, 10]. Работы по моделированию распространения георадиолокационных сигналов проводились на открытом воздухе во второй половине марта при отрицательной температуре воздуха.

Использованная в экспериментальных исследованиях физическая модель горного массива с трещиной заполненной льдом, представляет собой 2 одинаковых деревянных контейнера размерами 80×80×52 см между которыми помещались куски речного льда размерами 32 и 20 см (рис. 1, а), при этом ширина

льда (L) менялась от 25 см до 5 см с шагом 10 см. В эксперименте применялся георадар «ОКО-2» (Группа компаний «Логис-Геотех», Россия), с высокочастотным антенным блоком АБ-1200 МГц. Размеры контейнеров выбраны исходя из параметров диаграммы направленности георадара АБ-1200 МГц [11, 12]. Радиус первой зоны Френеля для АБ-1200 МГц на глубине 52 см (высота контейнеров) составляет 26 см, а при отсыпке физической модели на 20 см равен 31 см.

Для устранения возможных помех после установки модели были убраны все деревянные стенки контейнеров, оператор с ноутбуком и блоком управления (БУ) находился на удалении от модели во время эксперимента. В первом эксперименте ширина льда составляла 25 см, георадар находился в контакте со средой, съемка начиналась от середины первого блока и заканчивалась на середине второго блока, при этом лед был отмечен меткой с двух сторон на георадиолокационной радарограмме. Далее измерения были проведены при отсыпке модели слоем песка с шагом 5 см до

высоты до 20 см, также меняли ширину льда на 25, 15 и 5 см.

На рис. 1, б представлена модель эксперимента, горного массива с трещиной заполненной льдом, погребенной рыхлыми отложениями, мощность которых составляет 20 см. Всего во время эксперимента было проведено более 50 георадиолокационных измерений. В результате экспериментальных георадиолокационных измерений, были получены радарограммы, на которых видна граница между кусками льда (рис. 2, а) и нижняя граница льда, имеющая гиперболическую форму, а также нижние границы блоков, т.е. песков.

На рис. 2, б, в представлены спектральные характеристики георадиолокационных сигналов, полученных на границе песок-лед, а также от нижней границы льда, с центральными частотами 1082 МГц и 780 МГц соответственно. При этом спектральные характеристики георадиолокационных трасс полученных при зондировании песка имеют относительно гладкую форму, а трассы полученные в месте расположения льда имеют довольно изрезанный спектр. Эта особенность объясняется суммированием

спектров георадиолокационных сигналов дифрагированных на поверхности льда, т.к. диаграмма направленности георадара шире льда, то различные частотные составляющие зондирующего сигнала по-разному распространяются в модели горного массива. Более низкие частоты или огибают лед, или отражаются от него сложным образом. Эта особенность спектральных характеристик может служить критерием выявления трещины заполненной льдом.

Апробация применения выработанных критериев была проведена на участках россыпного месторождения в Анабарском районе Республики Саха (Якутия) [13]. Критерии позволили выявить области распространения трещин заполненных льдом в массиве горных пород россыпного месторождения «Маят» методом георадиолокации. Георадиолокационная съемка проводилась георадаром ОКО-2 с антенным блоком АБ-250 с центральной частотой 250 МГц в непрерывном режиме.

В результате обработки и интерпретации георадиолокационных данных была получена радарограмма (рис. 3, а), на которой выделены границы геологиче-

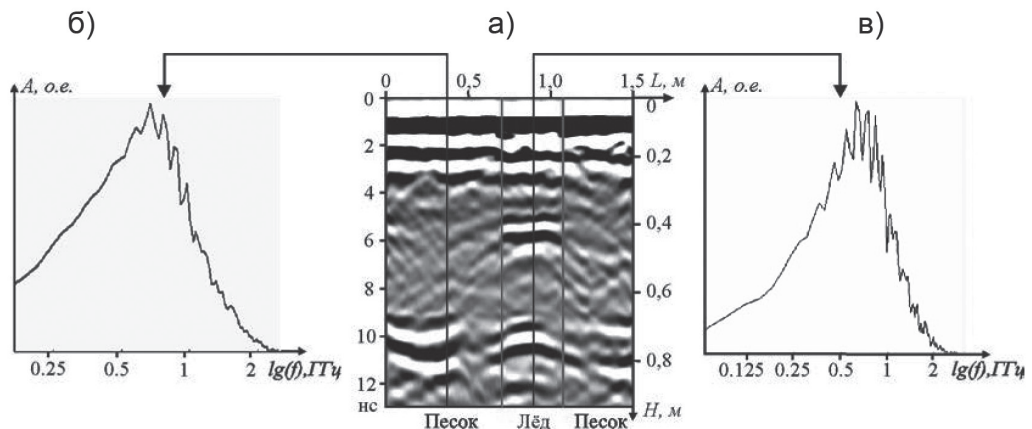


Рис. 2. Радарограмма (а) и спектральные характеристики георадиолокационных трасс: в песке (б); во льду (в)

Fig. 2. Radarogram (a) and spectrum characteristics of ground-penetrating radar path: in sand (b) and in ice (v)

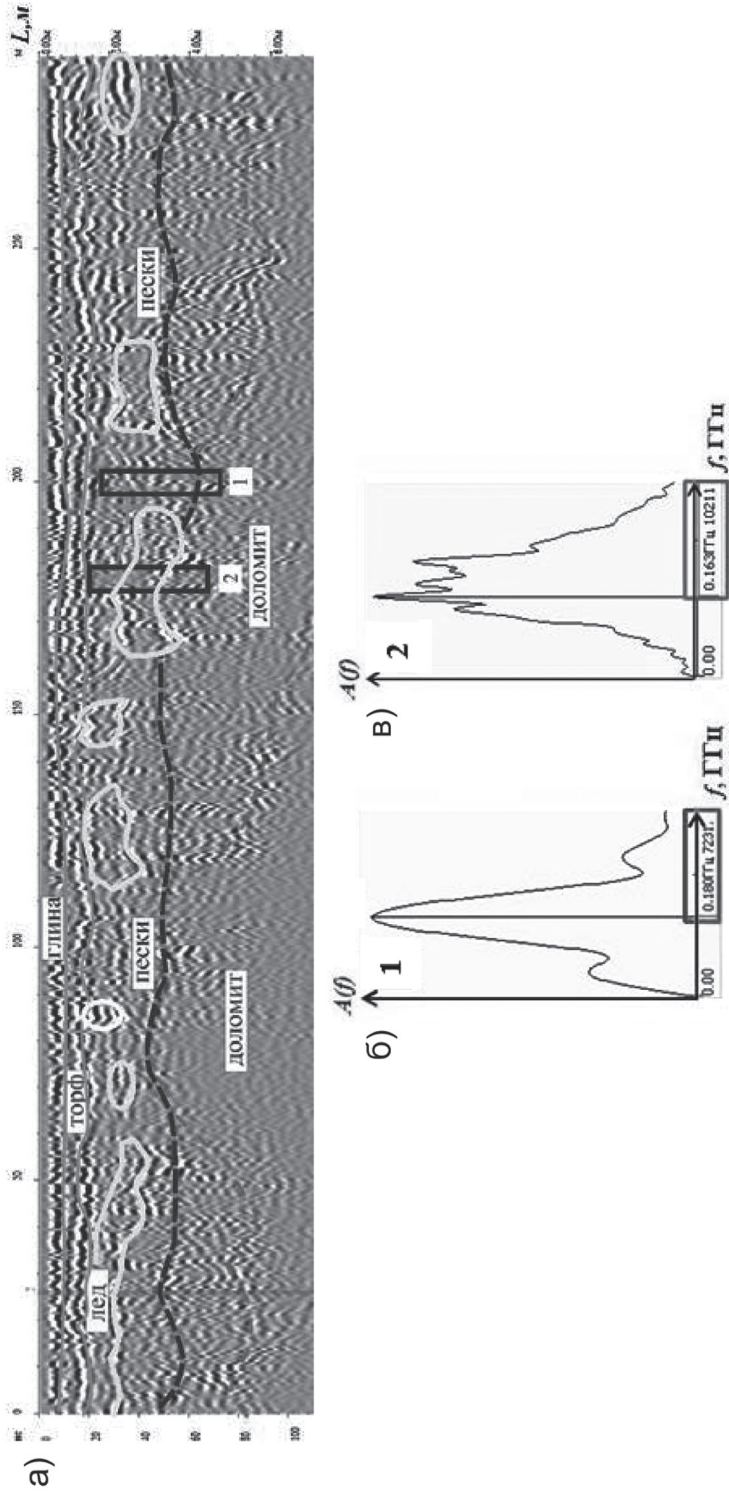


Рис. 3. Результаты георадиолокационных зондирований на россыпном месторождении алмазов «Маят»: георадиолокационная радарограмма с обозначенными границами раздела геологических сред и включений льда (а); Фурье-спектры участков 1 и 2 радарограммы (б, в)
 Fig. 3. Results of ground-penetrating radar sounding at diamond placer Mayat: radarogram with the marked interfaces of geological media and ice pockets (a); Fourier spectra of sections 1 (b) and 2 (b) in the radarogram

ских сред в соответствии с данными бурения скважин. Граница подошвы рыхлых отложений расположена на глубине около 4 м, ниже которой залегают коренные породы, представленные доломитами. Также на радарограмме выявляются локальные неоднородности, интерпретируемые нами как линзы льда (на рисунках отмечены контурами серого цвета). Присутствие ледяных линз определяется по спектральным характеристикам георадиолокационных трасс. Прямоугольниками выделены участки радарограмм, Фурье-спектр которых представлен на рис. 3, б, в. По данным бурения на участке 2 обнаружена линза льда, спектр на этом участке имеет изрезанную форму, в отличие от спектра сигналов участка 1, где включений льда не было обнаружено.

Физическое моделирование распространения георадиолокационных сигналов в массиве мерзлых горных пород с трещиной заполненной льдом позволило определить радиофизические характеристики сигналов в зависимости от параметров трещины. Данную информацию невозможно получить методом численного моделирования, т.к. в существую-

щих программах (gprMax, Matgpr и др.) не учитываются в полной мере особенности процесса распространения электромагнитных волн, а также аппаратного и программного обеспечения георадаров. В результате физического моделирования получено более 50 радарограмм, анализ которых показал, что оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от нижней границы льда более низкочастотны, чем от верхней границы и имеют гиперболическую форму. При этом Фурье-спектр георадиолокационной трассы полученной во льду имеет изрезанную форму, а в песке более гладкую.

В результате проведенного исследования выработаны критерии определения трещины заполненной льдом в мерзлом массиве горных пород по данным георадиолокации, что позволяет применять метод георадиолокации для изучения распределения трещин и льда при эксплуатационной разведке россыпных месторождений Севера. Также выработанные критерии, успешно апробированы в натурных исследованиях на участках россыпных месторождений криолитозоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожков И. С., Михалев Г. П., Прокопчук Б. И., Шамшина Э. А. Алмазоносные россыпи Западной Якутии. — М.: Наука, 1967. — 294 с.
2. Лаломов А. В., Бочнева А. А., Чефранов Р. М., Чефранова А. В. Россыпные месторождения Арктической зоны России: современное состояние и пути развития минерально-сырьевой базы // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 2 (18). — С. 66–77.
3. Ермаков С. А., Бураков А. М. Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений криолитозоны // Проблемы недропользования. — 2014. — № 3. — С. 96–104.
4. Соколов К. О., Прудецкий Н. Д., Попков П. А. Возможности георадиолокации при исследовании разрывных нарушений на месторождениях полезных ископаемых криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 3. — С. 351–356.
5. Соколов К. О., Прудецкий Н. Д. Опыт применения георадиолокации для исследования разрывных нарушений на россыпных месторождениях криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — Об 30. — С. 333–335.
6. Elkarmoty M., Colla C., Gabrielli E. Mapping and modelling fractures using ground penetrating radar for ornamental stone assessment and recovery optimization: Two case studies // The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin. 2017. pp. 63–76.
7. Porsani J. L., William A. Sauck 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, no 58. — pp. 177–187.

8. *Alhumimidi M. S., Hussein M. Harbi* Imaging fracture distributions of the Al-Khuff Formation outcrops using GPR and ERT geophysical techniques, Al-Qassim area, Saudi Arabia // Arab J Geosci. 2017. 10: 306.

9. *Прудецкий Н. Д., Соколов К. О.* Моделирование распространения электромагнитной высокочастотной волны в массиве горных пород с трещинами различной ширины / Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 5–7 апреля 2017 г. — Якутск, 2017. — С. 485–490.

10. *Федоров В. Н., Федорова Л. Л.* Электродинамическое моделирование структурных особенностей массива горных пород россыпных месторождений при георадиолокации // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т. 58. — № 8/2. — С. 48–51.

11. *Владов М. Л., Судакова М. С.* Георадиолокация. Учебное пособие. — М.: Изд-во «ГЕОС», 2017. — 240 с.

12. *Markovaara M.-Koivisto, Hokkanen T., Huuskonen-Snicker E.* The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal // Bull Eng Geol Environ. 2014. No 73 (3). pp. 815–823.

13. *Прудецкий Н. Д., Соколов К. О.* Методические основы георадиолокационного исследования разрывных нарушений на северной части Оленекского поднятия / Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2016: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 6–8 апреля 2016 г. — Якутск, 2016. — С. 600–603. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Прудецкий Николай Дмитриевич*¹ — ведущий инженер,
e-mail: kolyageofiz2000@yandex.ru,

*Соколов Кирил Олегович*¹ — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: k.sokolov@ro.ru,

*Федорова Лариса Лукинична*¹ — кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,

¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 107–113.

Physical modeling of high-frequency electromagnetic wave propagation in rocks with ice-filled fracture

*Prudetskiy N.D.*¹, Leading Engineer,
e-mail: kolyageofiz2000@yandex.ru,

*Sokolov K.O.*¹, Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: k.sokolov@ro.ru,

*Fedorova L.L.*¹, Leading Researcher,
e-mail: lar-fed-90@rambler.ru,

¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677018, Yakutsk, Russia.

Abstract. One of the problems in placer mining by the opencast method in the North is the determination of rock mass fracturing. Generally, fractures in loose sediments are filled with conglomerates and ice. The presence of ice complicates geological exploration by increasing amount of drilling and promotes formation of oversizes after blasting. At the present time, fractures can be detected by various geophysical methods, seismic exploration, acoustic logging and ground-penetrating radar. Seismics and acoustic logging are mostly used to study deep fractures, while ground-penetrating radar is applicable at shallow depths (to 30 m). Proper procedures and software to backup the ground-penetrating radar studies are unavailable by now. Aimed to develop criteria for detecting fractures in permafrost by ground-penetrating radar, physical modeling of GPR sounding in permafrost rock mass with ice-filled fracture is carried out. The modeling results are described. The sounding was implemented using ground-penetrating radar OKO-2 (Logis-Geotekh Group of Companies, Russia) with antenna assembly AB-1200 MHz. Conditions, parameters, sequence and procedure of the experimentation are presented. The GPR-resultant radarograms show clearly traced contrast electrophysical boundaries reflective of the structure of the model. The fre

quency analysis of the radar signals has allowed identifying spectrum features of fracture filled with ice. Furthermore, the changes in the lineups of the signals reflected from the lower and upper boundaries of ice are marked, and the Fourier spectra of the radar path in ice and sand are obtained. Based on the determined criteria, it is possible to study fracturing of permafrost using the ground-penetrating radar method.

Key words: ground-penetrating radar, fracturing, rock mass, physical modeling, Fourier-spectrum, radar signal, ice.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-107-113

REFERENCES

1. Rozhkov I.S., Mikhalev G.P., Prokopchuk B.I., Shamshina E.A. *Almazonosnye rossypi Zapadnoy Yakutii* [Diamond placers in West Yakutia], Moscow, Nauka, 1967, 294 p.
2. Lalomov A.V., Bochneva A.A., Chefranov R.M., Chefranova A.V. Rossyprnye mestorozhdeniya Arkticheskoy zony Rossii: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy [Placers in the Arctic zone of Russia: Current state and ways of development of mineral resources], *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2015, no 2 (18), pp. 66–77. [In Russ].
3. Ermakov S.A., Burakov A.M. Sovershenstvovanie geotekhnologiy otkrytoy razrabotki mestorozhdeniy kriolitozony [Improvement of open pit mining technologies for permafrost zone], *Problemy nedropol'zovaniya*. 2014, no 3, pp. 96–104. [In Russ].
4. Sokolov K.O., Prudetskiy N.D., Popkov P.A. Vozmozhnosti georadiolokatsii pri issledovanii razryvnykh narusheniy na mestorozhdeniyakh poleznykh iskopaemykh kriolitozony [Capacities of ground-penetrating radar in the research of fractures at mineral deposits in permafrost]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 3, pp. 351–356. [In Russ].
5. Sokolov K.O., Prudetskiy N.D. Opyt primeneniya georadiolokatsii dlya issledovaniya razryvnykh narusheniy na rossyprnykh mestorozhdeniyakh kriolitozony [Experience of application of ground-penetrating radar to studying fractures at placers in permafrost zone]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015. Special edition 30, pp. 333–335. [In Russ].
6. Elkarmoty M., Colla C., Gabrielli E. Mapping and modelling fractures using ground penetrating radar for ornamental stone assessment and recovery optimization: Two case studies. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin*. 2017. pp. 63–76.
7. Porsani J.L., William A. Sauck 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, no 58. pp. 177–187.
8. Alhumimidi M.S., Hussein M. Harbi Imaging fracture distributions of the Al-Khuff Formation outcrops using GPR and ERT geophysical techniques, Al-Qassim area, Saudi Arabia. *Arab J Geosci*. 2017. 10: 306.
9. Prudetskiy N.D., Sokolov K.O. Modelirovanie rasprostraneniya elektromagnitnoy vysokochastotnoy volny v massive gornyykh porod s treshchinami razlichnoy shiriny [Modeling propagation of high-frequency electromagnetic wave in rock mass with different-width fractures]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Yakutsk, 5–7 April 2017, Yakutsk, 2017, pp. 485–490. [In Russ].
10. Fedorov V.N., Fedorova L.L. Elektrodinamicheskoe modelirovanie strukturnykh osobennostey massiva gornyykh porod rossyprnykh mestorozhdeniy pri georadiolokatsii [Electrodynamic modeling of structural features at placers by ground-penetrating radar]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015, vol. 58, no 8/2, pp. 48–51. [In Russ].
11. Vladov M.L., Sudakova M.S. *Georadiolokatsiya*. Uchebnoe posobie [GPR. Educational aid], Moscow, IZD-VO «GEOS», 2017, 240 p.
12. Markovaara M.-Koivisto, Hokkanen T., Huuskonen-Snicker E. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal. *Bull Eng Geol Environ*. 2014. No 73 (3). pp. 815–823.
13. Prudetskiy N.D., Sokolov K.O. Metodicheskie osnovy georadiolokatsionnogo issledovaniya razryvnykh narusheniy na severnoy chasti Oleneskogo podnyatiya [Methodical framework for studying fractures in rock mass in the north of the Oleneskoe upland by ground-penetrating radar]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii 2016: Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 6–8 April 2016, Yakutsk, 2016, pp. 600–603. [In Russ].

