

УДК 551.34:622.023.623:621.396.96

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ПОВЫШЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Соколов К.О.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: k.sokolov@ro.ru*

Наличие трещин в массиве мерзлых горных пород существенно влияет на физико-механические свойства горных пород, которые необходимо учитывать как при планировании добычных работ, так и при строительстве горнотехнических сооружений. В настоящее время существуют различные методы изучения трещиноватости массива мерзлых горных пород, для большинства из них необходимо наличие обнажений, на которых возможно наблюдение трещиноватости. Метод георадиолокации успешно используется при изучении строения массива горных пород криолитозоны и позволяет исследовать трещины в подповерхностных слоях горных пород. Критерии выявления трещин по особенностям волновых георадиолокационных полей известны, основной проблемой является высокая трудоемкость процессов обработки и интерпретации данных георадиолокационных измерений. Для решения этой проблемы необходима автоматизация определения наличия признаков трещин массива мерзлых горных пород в данных георадиолокации. В статье предлагается способ обработки данных, основанный на расчете аргумента ( $\alpha$ ) комплексного числа, действительной и мнимой частью которого являются амплитудные значения двух соседних георадиолокационных трасс. По значениям  $\alpha$  возможно выделение участков не только с явными трещинами ( $\alpha \approx -\pi/2$ ), но и трещин, размеры которых значительно меньше первой зоны Френеля используемого георадара ( $\alpha \approx -\pi/4$ ). В положительном диапазоне значений  $\alpha$ , интервал в некоторой окрестности  $\pi/4$ , говорит о наличии горизонтальных осей синфазности, не имеющих каких-либо значительных искажений. Разработанный подход также позволяет выявлять пликативные нарушения, отличающиеся группировкой отрицательных значений  $\alpha$ , имеющих горизонтальный характер расположения. В статье описаны алгоритмы выявления дизъюнктивных и пликативных нарушений. Разработанные алгоритмы существенно сократят временные затраты на обработку и интерпретацию данных, что позволит расширить область применения георадиолокации в интересах не только науки, но и недропользователей на стадиях доразведки и эксплуатационной разведки месторождений полезных ископаемых криолитозоны.

**Ключевые слова:** трещина, массив горных пород, криолитозона, георадиолокация, обработка данных

## GPR DATA INTERPRETATION FOR DETERMINATION OF THE FRACTURED ZONE OF THE FROZEN ROCK MASSIF

Sokolov K.O.

*Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: k.sokolov@ro.ru*

The presence of cracks in the massif of frozen rocks significantly affects the physical and mechanical properties of rocks, which must be taken into account both when planning mining operations and during the construction of mining structures. Currently, there are various methods for studying the fracturing of an array of frozen rocks, for most of them it is necessary to have outcrops on which the observation of fracturing is possible. The GPR method has been successfully used to study the structure of the rock mass of the permafrost zone and allows us to investigate cracks in the subsurface layers of rocks. Criteria for detecting cracks by the characteristics of wave GPR fields are known, the main problem is the high complexity of the processing and interpretation of GPR data. To solve this problem, it is necessary to automate the determination of the presence of signs of cracks in an array of frozen rocks in the GPR data. The article proposes a data processing method based on the calculation of the argument ( $\alpha$ ) of a complex number, the real and imaginary part of which are the amplitude values of two adjacent GPR paths. According to the values of  $\alpha$ , it is possible to identify areas not only with obvious cracks ( $\alpha \approx -\pi/2$ ), but also cracks whose dimensions are much smaller than the first Fresnel zone of the GPR used ( $\alpha \approx -\pi/4$ ). In the positive range of values of  $\alpha$ , an interval in a certain neighborhood of  $\pi/4$  indicates the presence of horizontal in-phase axes that do not have any significant distortions. The developed approach also makes it possible to detect plicative abnormalities that differ in the grouping of negative  $\alpha$  values having a horizontal arrangement. The article describes algorithms for detecting disjunctive and plicative disorders. The developed algorithms will significantly reduce the time spent on processing and interpreting data, which will expand the scope of GPR in the interests of not only science but also subsoil users at the stages of additional exploration and operational exploration of mineral deposits in the permafrost zone.

**Keywords:** crack, rock massif, cryolithozone, GPR, data processing

Наличие трещин в массиве мерзлых горных пород существенно влияет на физико-механические свойства горных пород, которые необходимо учитывать как при планировании добычных работ, так и при строительстве горнотехнических сооружений. В настоящее время суще-

ствуют различные методы изучения трещиноватости массива мерзлых горных пород, однако для большинства из них необходимо наличие обнажений, на которых возможно наблюдение трещиноватости. Изучение трещиноватости в естественном залегании возможно с помощью

геофизических методов [1]. В подповерхностных слоях горных пород для выявления трещин возможно использование метода георадиолокации, позволяющего изучать строение массива мерзлых горных пород на глубину до 30 м. В настоящее время разработано несколько методик выявления трещин по данным георадиолокационных измерений [2–4], также проведены исследования по изучению трещин в зданиях [5] и льдах [6], однако они не позволяют в полной мере раскрыть потенциал метода георадиолокации в силу ограниченности возможностей их применения.

Существенно лучше развито соответствие программно-методическое обеспечение в сейсморазведке, позволяющее выявлять и проследивать разрывные нарушения и разломы полуавтоматически [7] автоматически для 2D [8] и 3D [9] данных сейсморазведки. Существуют методики, основанные на использовании математического аппарата цифровой обработки сигналов [10], особенностей параметров сейсмических данных [11], методов искусственного интеллекта [12]. Применение указанных методов для обработки данных георадиолокации недостаточно эффективно из-за более сложного строения волнового поля по сравнению с данными сейсморазведки. Данный недостаток одновременно является и достоинством, так как георадиолокация позволяет с большой точностью изучать распределение трещин в массиве мерзлых горных пород.

Цель исследования: разработать способ анализа волновых полей, позволяющий определять наличие признаков трещин массива мерзлых горных пород по данным георадиолокационных измерений для решения проблемы автоматизированного выявления трещин.

#### Материалы и методы исследования

Индикационные признаки трещин рыхлых отложений криолитозоны [13] установлены в рамках выполнения проекта РФФИ № 15-45-05119:

- 1) потеря корреляции осей синфазности георадиолокационных сигналов;
- 2) смещение осей синфазности по вертикали;
- 3) изменение угла наклона осей синфазности;
- 4) аномальными амплитудными значениями ограниченных вертикальными плоскостями;

5) смещение спектральных характеристик георадиолокационных сигналов в сторону низких частот.

Если георадиолокационные измерения проведены в непрерывном режиме, то признаки 1–4 отображаются в виде изменения амплитудных значений сигналов при отслеживании их вдоль профиля на фиксированном времени задержки сигналов. Результаты георадиолокационных измерений в дискретном режиме с шагом 1 м и более не позволяют использовать амплитудные значения сигналов в качестве индикаторов трещин, так как амплитуды сигналов соседних трасс могут значительно отличаться.

Рассмотрим случай с вертикальным смещением осей синфазности георадиолокационных сигналов (рис. 1, а). Смещение приводит к скачкообразному изменению амплитудных значений, например при времени задержки  $t$ , обозначенному серой пунктирной линией, амплитуда уменьшится с  $A_1$  (рис. 1, б) до  $A_2$  (рис. 1, в). Вдоль трасс (по глубине) подобные изменения весьма различны, что связано как с техническими особенностями георадаров, так и с закономерностями распространения электромагнитных волн в различных средах. Для разработки более универсальной характеристики, чем простое  $\Delta A = A_1 - A_2$ , представим пару амплитудных значений в виде комплексного числа (рис. 1, г) и найдем угол  $\alpha$ , который будет характеризовать  $\Delta A$  независимо от величины  $A_1$  и  $A_2$ .

Для упрощения анализа данных георадиолокации вычисление угла  $\alpha$  будем проводить по формуле

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\max(A_1, A_2)}{\min(A_1, A_2)}\right), \quad (*)$$

где функции  $\max()$  и  $\min()$  возвращают соответственно наибольшее и наименьшее значение из  $A_1$  и  $A_2$ .

Данный подход позволит упростить интерпретацию результатов расчетов и повысить их однозначность в случае широких трещин, так как при расчетах по формуле (\*) левая и правая стенки будут характеризоваться одним и тем же значением  $\alpha$ . Если же учитывать порядок следования амплитудных значений трасс, то переходы правый берег трещины – заполнитель трещины и заполнитель трещины – левый берег трещины будут характеризоваться различными значениями  $\alpha$ , что потребует дополнительных усилий интерпретатора по выявлению признаков трещин в данных георадиолокации.

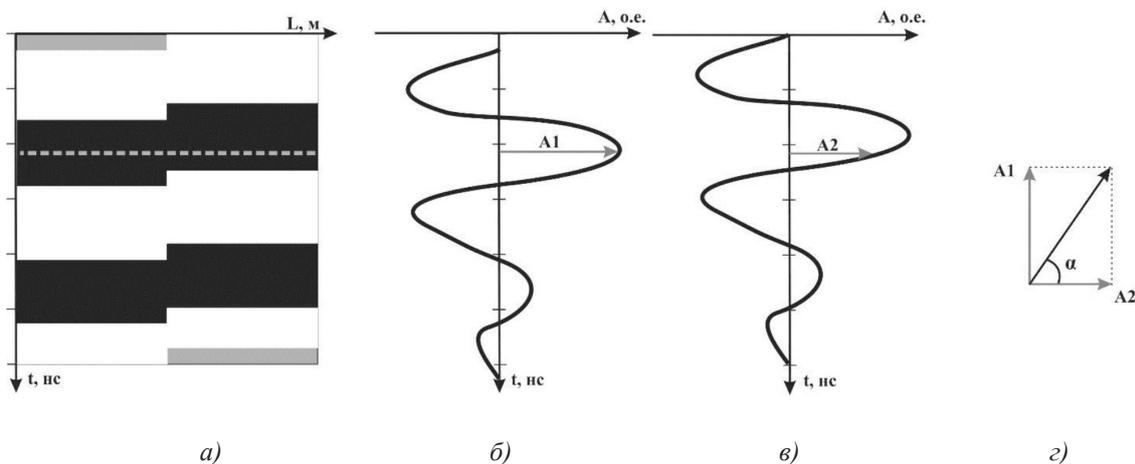


Рис. 1. Изменение амплитудных значений георадиолокационных сигналов при вертикальном смещении осей синфазности. а) синтетическая георадиолокационная радарограмма; б) трасса из левой половины (а); в) трасса из правой половины (а); г) геометрическое представление амплитудных значений сигналов двух трасс в виде комплексного числа

Возможные значения  $\alpha$  в зависимости от величины и знака  $A1$  и  $A2$

	$A1, A2 > 0$	$A1, A2 < 0$	$A1 > 0, A2 < 0$	$A1 < 0, A2 > 0$
$ A1  >  A2 $	$\left(\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{2}\right)$	$\left(0; \frac{\pi}{4}\right)$	$\left(-\frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{4}\right)$	$\left(-\frac{\pi}{4}; 0\right)$
$ A1  <  A2 $	$\left(\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{2}\right)$	$\left(0; \frac{\pi}{4}\right)$	$\left(-\frac{\pi}{4}; 0\right)$	$\left(-\frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{4}\right)$
$ A1  =  A2 $	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{4}$

Значения  $\alpha$ , которые могут быть получены при расчете по формуле (\*), представлены в таблице. Из них наиболее просто определять наличие трещин в массиве многолетнемерзлых горных пород по отрицательным значениям  $\alpha$  из интервала  $(-\pi/2; 0)$ . В этих случаях на радарограмме наблюдается переход с положительного значения амплитуды на отрицательную или наоборот, что явно указывает на потерю корреляции осей синфазности георадиолокационных сигналов и их смещение по вертикали. Значениями  $\alpha$  около  $-\pi/2$  характеризуются такие резкие изменения, как обрыв оси синфазности, значения  $\alpha \approx -\pi/4$  показывают наличие сильно деформированных осей синфазности характерных для неярко выраженных трещин. В положительном диапазоне значений  $\alpha$ , интервал в некоторой окрестности  $\pi/4$ , говорит о наличии горизонтальных осей синфазности не имеющих каких-либо значительных искажений.

### Результаты исследования и их обсуждение

Апробация предлагаемого подхода к выявлению трещин проведена по данным компьютерного моделирования (рис. 2, а) и результатам георадиолокационных зондирований рыхлых отложений криолитозоны (рис. 2, в).

На рис. 2, а, представлена грабеноподобная структура, имеющая смещение осей синфазности по вертикали в интервале 65–125 нс, на отметках по профилю 100 м и 200 м. В результате расчета  $\alpha$  получена матрица  $M$  (рис. 2, б), строки которой соответствуют номерам отсчетов трасс оригинальной радарограммы, а количество столбцов меньше на 1, чем на рис. 2, а. Все горизонтально-слоистые участки радарограммы в матрице  $M$  имеют значение 45, что показано равномерной фоновой окраской, на которой четко выделяются две полосы

в местах смещения осей синфазности. Полоски имеют сложную окраску, что связано с физической природой георадиолокационных сигналов, имеющих колебательный характер (1,5–2-периодный).

На рис. 2, в представлена радарограмма с типичными нарушениями слоев горных пород. На отметке 1378 по профилю, в диапазоне 30–85 нс прослеживается расширяющаяся трещина, правее которой имеются сопутствующие пликативные и дизъюнктивные нарушения. Результат расчета  $\alpha$  (рис. 2, г) имеет практически однородную окраску на горизонтальных участках с незначительной раз-

ницей в местах соответствующим отрицательным и положительным амплитудным значениям. В зоне нарушения горных пород более темный цвет указывает на изгиб осей синфазности, при этом чем сильнее изгиб, тем темнее цвет. Участки с потерей корреляции осей синфазности георадиолокационных сигналов, приуроченные к нарушению сплошности горных пород, отмечены тёмно-синим цветом. Таким же цветом обозначены резкие изломы осей синфазности, характерные для трещин, размеры которых меньше первой зоны Френеля для центральной частоты используемого георадара.

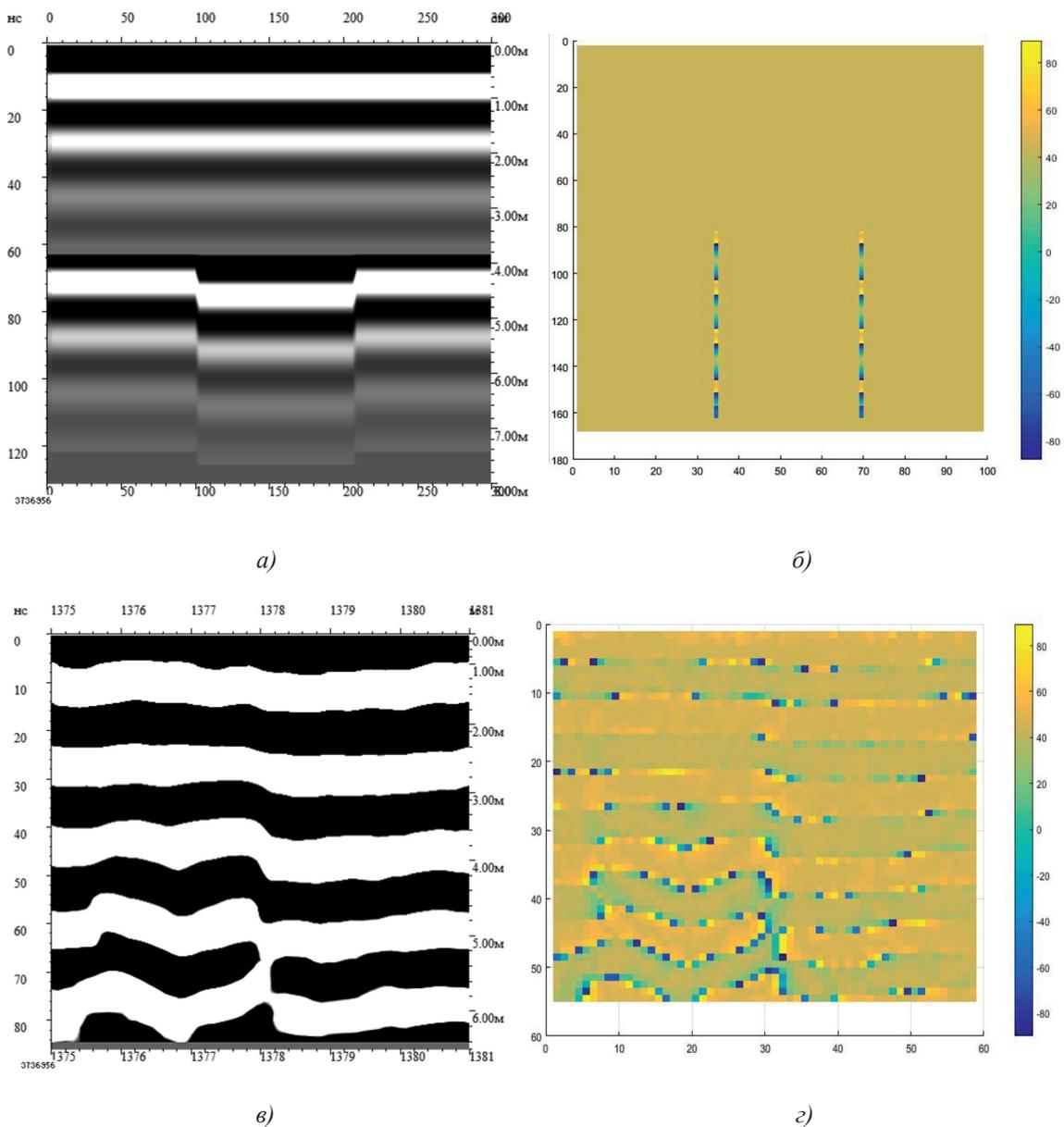


Рис. 2. Примеры результатов расчета  $\alpha$  (б, г) для радарограмм (а, в)

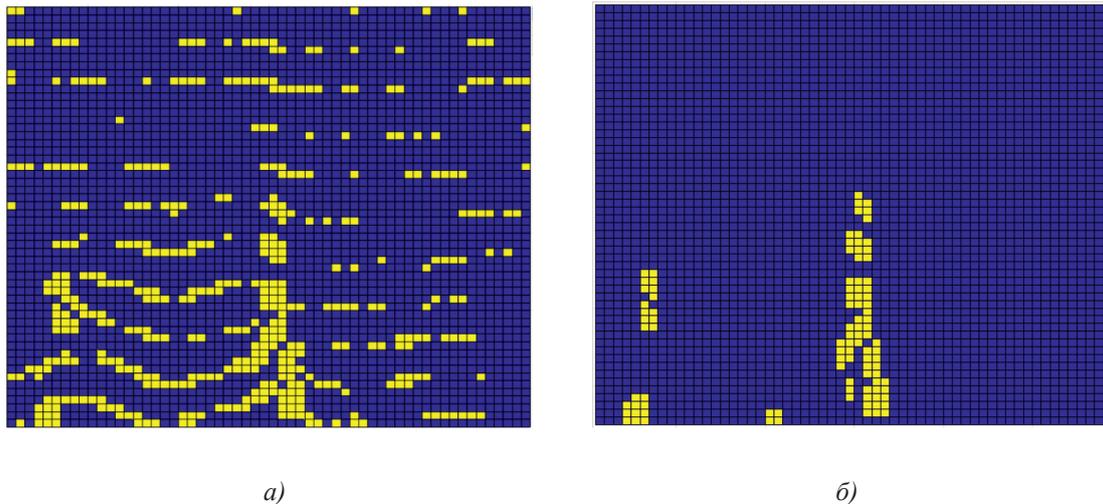


Рис. 3. Результаты обработки матрицы  $M$  (рис. 2, г): а) отрицательные значения  $\alpha$ ; б) вертикальные группы отрицательных значений  $\alpha$

При поиске трещин по данным георадиолокационных измерений необходимо автоматизированное выделение двух вышеуказанных типов волновых картин (потеря корреляции и излом осей синфазности). Для этой цели полученная матрица  $M$  преобразуется следующим образом:

1. Удаляются все положительные значения.
2. Удаляются группы отрицательных значений, имеющие горизонтальный характер расположения.

На рис. 3 представлены результаты подобного преобразования, на заключительном этапе которого становится возможным определение наличия, местоположения, форм и размеров нарушений горных пород, связанных с трещинами.

Для выявления пликативных нарушений необходимо удалить не горизонтальные, а вертикальные группы отрицательных значений, при использовании различной окраски для двух этих групп получится более полная картина, характеризующая нарушенность приповерхностных слоев массива многолетнемерзлых горных пород. Разработанный способ также позволяет производить автоматизированный поиск зон повышенной трещиноватости массива мерзлых горных пород, результатом которого может быть график наличия трещин, полученный по следующему алгоритму:

1. Произвести расчет  $\alpha$  по формуле (\*) с первой до предпоследней трассы, результаты занести в матрицу  $M$ .

2. Удалить все положительные значения и группы отрицательных значений, имеющие горизонтальный характер расположения.

3. Произвести сложение всех элементов каждого столбца матрицы, если сумма больше 0, то в матрицу-строку в ячейку под номером соответствующим номеру столбца записать 1.

4. Вывести на экран полученную матрицу-строку.

### Заключение

Разработан способ обработки данных георадиолокационных измерений, позволяющий выявлять трещины в массиве горных пород на основе расчета аргумента ( $\alpha$ ) комплексного числа, действительной и мнимой частью которого являются амплитудные значения двух соседних георадиолокационных трасс. По значениям  $\alpha$  возможно выделение участков не только с явными трещинами ( $\alpha \approx -\pi/2$ ), но и трещин, размеры которых значительно меньше первой зоны Френеля используемого георадара ( $\alpha \approx -\pi/4$ ). В положительном диапазоне значений  $\alpha$ , интервал в некоторой окрестности  $\pi/4$ , говорит о наличии горизонтальных осей синфазности не имеющих каких-либо значительных искажений. Разработанный способ позволяет выявлять участки радарограмм характерных для пликативных и дизъюнктивных нарушений слоев горных пород. Описанные алгоритмы существенно сократят временные затраты на обработку и интерпретацию георадиолокационных данных, что позволит расширить область

применения георадиолокации в интересах не только науки, но и недропользователей на стадиях доразведки и эксплуатационной разведки месторождений полезных ископаемых криолитозоны

### Список литературы / References

1. Walton G., Lato M., Anschutz H., Perras M.A., Diederichs M.S. Non-invasive detection of fractures, fracture zones, and rock damage in a hard rock excavation – Experience from the Aspö Hard Rock Laboratory in Sweden. *Engineering Geology*. 2015. vol. 196. P. 210–221. DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.07.010.
2. 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.
3. Elkarmoty M., Tinti F., Kasraeezadi 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. UNSP 481. DOI: 10.3390/geosciences8120481.
4. Conti I.M.M., de Castro D.L., Bezerra F.H.R., Cazarin C.L. Porosity estimation and geometric characterization of fractured and karstified carbonate rocks using GPR data in the salitre formation. *Pure and Applied Geophysics*. 2019. vol. 176. № 4. P. 1673–1689. DOI: 10.1007/s00024-018-2032-5.
5. Bavusi M., Soldovieri F., Piscitelli S., Loperte A., Vallianatos F., Soupios P. Ground-penetrating radar and microwave tomography to evaluate the crack and joint geometry in historical buildings: some examples from Chania, Crete, Greece. *Near Surface Geophysics*. 2010. vol. 8. P. 377–387. DOI: 10.3997/1873-0604.2010039.
6. Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.
7. Popov S.V., Polyakov S.P. GPR localization of cracks in the area of Russian Antarctic stations Progress and Mirnyi (East Antarctica) in the season 2014/15 // *Cryosphere of the Earth*. Vol. XX. № 1. P. 90–98 (in Russian).
8. Tingdahl K.M., De Rooij M. Semi-automatic detection of faults in 3D seismic data. *Geophysical Prospecting*. 2005. vol. 53. № 4. P. 533–542. DOI: 10.1111/j.1365-2478.2005.00489.x.
9. Jacquemin P., Mallet J-L. Automatic fault extraction using double Hough transform. *Society of Exploration Geophysicists*. 2005. P. 755–788.
10. Admasu F., Back S., Toennies K. Autotracking of faults on 3D seismic data. *Geophysics*. 2006. vol. 71. № 6. P. A49–A53.
11. Priezzhev I.I., Scollard A. Faults and Fracture Detection based on Seismic Surface Orthogonal Decomposition. 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating, Denmark. 2012. [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/275335720\\_Faults\\_and\\_Fracture\\_Detection\\_based\\_on\\_Seismic\\_Surface\\_Orthogonal\\_Decomposition](https://www.researchgate.net/publication/275335720_Faults_and_Fracture_Detection_based_on_Seismic_Surface_Orthogonal_Decomposition) (date of access: 23.10.2019).
12. Фаткин К.Б. Атрибутный AVO-анализ для обнаружения зон трещиноватости по данным шахтных сейсмоакустических исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 6. С. 406–410.
13. Fatkin K.B. Attribute AVO-analysis for the detection of fracture zones according to mine seismoacoustic studies // *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009. № 6. P. 406–410 (in Russian).
14. Зелинский Н.Р., Владов М.Л. Опыт применения нейронных сетей для выделения тектонических нарушений в угленосных толщах по данным сейсморазведки // *Геофизика*. 2013. № 2. С. 38–44.
15. Zelinsky N.R., Vladov M.L. Experience of application of neural networks for allocation of tectonic violations in coal-bearing strata according to seismic survey // *Geophysics*. 2013. № 2. P. 38–44 (in Russian).
16. Соколов К.О., Федорова Л.Л., Прудетский Н.Д. Индикационные признаки трещин рыхлых отложений для оценки геокриологических условий месторождений криолитозоны методом георадиолокации // *Естественные и технические науки*. 2018. № 11. С. 174–177.
17. Sokolov K.O., Fedorova L.L., Prudetsky N.D. Indicative signs of cracks of loose sediments for estimation of geocryological conditions of cryolithozone deposits by the method of GPR // *Natural and technical Sciences*. 2018. № 11. P. 174–177 (in Russian).