

Алгоритм обработки и интерпретации георадиолокационных данных при изучении геокриологических структур многолетнемерзлых пород

Кирилл Олегович СОКОЛОВ^{*},
Лариса Лукинична ФЕДОРОВА^{**},
Андрей Андреевич ФЕДОРОВ^{***}

Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация

Актуальность. Подземные льды являются одним из неустойчивых компонентов криолитозоны и в общем объеме занимают 400–600 км³. Изменение условий теплообмена подземных льдов под воздействием внешних или внутренних факторов могут привести к образованию в массиве мерзлых горных пород термокарстовых провалов, солифлюкционных оплывин, криогенных оползней и других опасных криогенных явлений. Для исследований подземных льдов применяются различные методы, из которых можно выделить метод георадиолокации, достоинствами которого является оперативность и высокая детальность измерений. Однако процесс выявления подземных льдов по результатам обработки и интерпретации данных георадиолокации в настоящее время не формализован в виде алгоритма.

Цель работы. Для оперативного картирования геокриологических структур требуется разработка соответствующего алгоритма (последовательности формализованных процедур) обработки и интерпретации георадиолокационных данных.

Методология алгоритма основана на анализе характеристик георадиолокационных трасс, использовании быстрого преобразования Фурье для расчета спектров георадиолокационных трасс и дальнейшего анализа полученных результатов.

Результаты исследований. Разработанный алгоритм позволит оперативно изучать особенности строения массива мерзлых горных пород с выделением пластового льда. Алгоритм апробирован на результатах физического и компьютерного моделирования георадиолокационных измерений массива горных пород с включением льда.

Выводы. Использование алгоритмов обработки и интерпретации георадиолокационных данных для оперативного картирования геокриологических структур массивов мерзлых горных пород позволяет обоснованно и рационально применять комплекс мер для предупреждения возникновения неблагоприятных инженерно-геологических процессов либо для уменьшения экономических потерь при активизации негативных геокриологических процессов.

Ключевые слова: алгоритм, обработка, интерпретация, пластовый лед, геокриологические структуры.

Введение

Криолитозона как сложная и многофазная система состоит из различных компонентов (минеральный и органо-минеральный скелеты, жидкая и твердая фаза воды, газообразная составляющая) и характеризуется высокой чувствительностью к техногенным воздействиям, приводящим к возникновению или активизации неблагоприятных инженерно-геологических процессов (карстово-суффозионные, эрозионные процессы и пр.) в массиве мерзлых горных пород [1].

Обширные площади криолитозоны занимают льды различного генезиса [2, 3], в том числе подземные льды, общий объем которых достигает 400–600 км³ [4, 5]. Подземные льды являются одним из неустойчивых компонентов криолитозоны, и изменение условий теплообмена подземных льдов под воздействием внешних или внутренних факторов может привести к образованию в

массиве мерзлых горных пород термокарстовых провалов, солифлюкционных оплывин, криогенных оползней и других опасных криогенных явлений [6].

Для исследований льдов в массиве мерзлых горных пород применяются различные методы (бурение скважин, проходка шурфов и др.), в том числе и геофизические, которые дают возможность опосредованного объемного изучения. Среди геофизических методов можно выделить метод георадиолокации, успешно использующийся для таких исследований с 1970-х гг. [7–9].

Тем не менее процесс выделения подземных льдов по результатам обработки и интерпретации георадиолокационных данных до сих пор осуществляется «вручную» и не формализован в виде совокупности последовательных процедур (алгоритм).

*k.sokolov@ro.ru

**Lar-fed-90@rambler.ru

***Aan.fedorov@s-vfu.ru

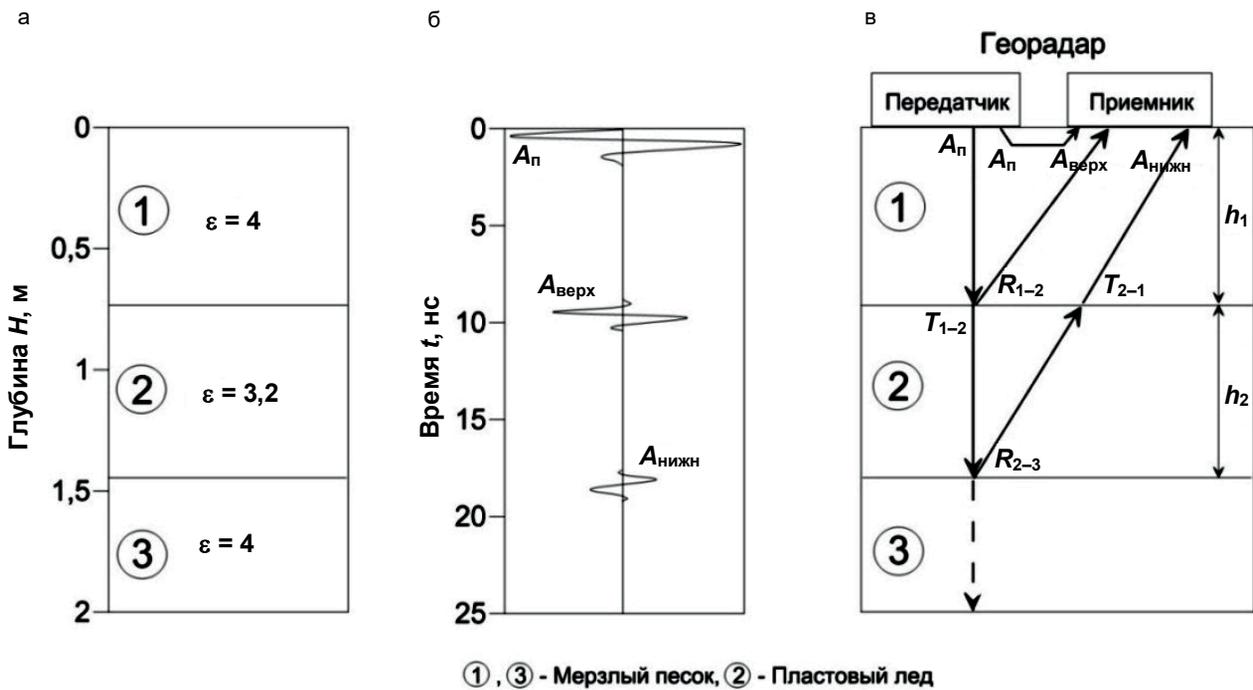


Рисунок 1. Георадиолокационная модель массива мерзлых горных пород с листовым льдом (а, б) и схема формирования отраженных электромагнитных волн (в) при зондировании модели (а).
Figure 1. Georadar model of a frozen rock massif with sheet ice (a, b) and a scheme of the formation of reflected electromagnetic waves (c) during sounding of the model (a).

Методология

Методология построения алгоритма, кроме подготовки радарограмм для интерпретации и кинематического анализа, состоит в анализе георадиолокационных характеристик (амплитуда, фаза, время регистрации, Фурье-спектр). По результатам анализа радиофизических характеристик георадиолокационной трассы выявляются следующие признаки листового льда: непрерывные оси синфазности с противоположными фазами сигнала; отношения амплитуд верхней и нижней границ льдов; «изрезанность» Фурье-спектра трассы и др., присущие подземному листовому льду в массиве мерзлых горных пород (рис. 1).

Для выделения на радарограмме полезных сигналов, отраженных от геокриологических объектов, применяются следующие процедуры обработки георадиолокационных данных [10, 11]:

1. Редактирование радарограмм (удаление бракованных трасс, реверсирование);
2. Ввод информации о координатах, превышениях, априорных поправках;
3. Подавление регулярных помех (удаление сигнала прямого прохождения и постоянных горизонтальных помех);
4. Регулировка амплитуд (усиление сигнала и подбор контрастности изображения) для повышения четкости отображения сигналов на радарограмме;
5. Деконволюция (предсказывающая или пиковая), обострение сигналов для повышения разрешающей способности;
6. Фильтрация (полосовая и режекторная) применяется для удаления высоко- или низкочастотных помех на радарограмме;

7. Выявление и подавление кратных волн;
8. Подавление нерегулярных помех (от воздушных объектов и пр.).

После подготовки радарограммы к процедуре интерпретации производится кинематический анализ данных:

1. Определяются скорости распространения электромагнитных волн в горных породах по результатам совместного анализа с данными бурения с помощью инструментов «Гипербола» или «Уклон» ПО Geoscan32;
2. Выявляются оси синфазности сигналов, при наличии априорной информации производится привязка выявленных осей синфазности сигналов с известными геологическими границами;
3. Прослеживаются наиболее устойчивые на радарограмме оси синфазности сигналов, характерные для геологических границ исследуемого участка массива горных пород;
4. Выделяются оси синфазности сигналов, отраженных от локальных объектов, определяются время их регистрации, вариации амплитудных значений, фиксируются частотный состав, фазы сигналов и их изменение с глубиной;
5. Производится расчленение волнового поля радарограммы на георадарные комплексы (участки волнового поля, имеющие характерные особенности и отличающиеся структурой поля);
6. Выделяются георадарные фации (участков волновых полей, отличающихся от соседних по одному из признаков: конфигурация и протяженность осей синфазности, амплитудные значения, частотный состав, скорость распространения электромагнитных волн).

Для определения наличия на радарограмме волновых полей, характерных для пластового льда, производится обработка по следующему алгоритму:

1. Выделить непрерывные субгоризонтальные оси синфазности сигналов, находящиеся одна под другой;
2. Выбрать пары осей синфазности, у которых противоположны фазы сигналов;
3. Для каждой георадиолокационной трассы радарограммы:
 - произвести быстрое преобразование Фурье [12, 13];
 - рассчитать модуль результата п. 1 для получения Фурье-спектра;
 - подсчитать количество локальных максимумов Фурье-спектра в рабочем диапазоне частот;
4. Построить график количества локальных максимумов для всех трасс;
5. На графике выбрать участки с высокими значениями, состоящие из трех и более точек;
6. Для трасс, входящих в выбранные участки и оси синфазности:
 - определить амплитудные значения сигналов от нижней и верхней осей синфазности и рассчитать их отношение;
 - вычислить $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}}$ ($t_{\text{нижн}}$, $t_{\text{верх}}$ – время регистрации сигнала от нижней и верхней границы льда);
 - проверить $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}} < 0,95^{\Delta t}$ ($A_{\text{нижн}}$, $A_{\text{верх}}$ – амплитуда сигнала от нижней и верхней границы льда);
7. Если существуют оси синфазности, для которых выполняются условия из п. 2, 5, 6, то отметить данную георадарную фацию как пластовый лед;
8. Произвести перерасчет времени задержки сигналов t в значения глубины h ;
9. Вывод результатов обработки, отражающих про-

странственное местоположение выявленных пластовых льдов, в виде $h_{\text{верх}}/h_{\text{нижн}}$, где $h_{\text{верх}}$, $h_{\text{нижн}}$ – глубина залегания верхней и нижней границы льда соответственно, рассчитываемая по формулам $h_{\text{верх}} = 0,15t_{\text{верх}}/2$; $h_{\text{нижн}} = h_{\text{верх}} + 0,168 \Delta t/2$.

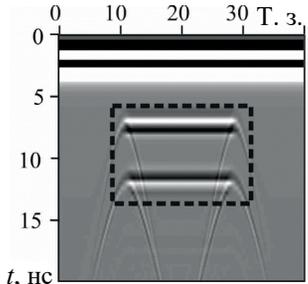
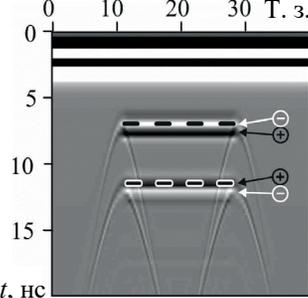
Для определения наличия на радарограмме волновых полей, характерных для жильного льда, который может находиться в зонах повышенной трещиноватости массива мерзлых горных пород [14, 15], производится обработка по следующему алгоритму:

1. Производится поиск георадарных фаций двух типов:
 - короткая горизонтальная ось синфазности, ниже которой находится ось синфазности гиперболической формы;
 - две оси синфазности гиперболической формы, расположенные одна под другой;
2. С помощью инструмента «Спектр выделенного прямоугольника» ПО GeoScan32 выделяется георадарная фация, найденная по условиям п. 1, и визуально оценивается количество локальных максимумов в рабочем диапазоне частот;
3. Если количество локальных максимумов выше среднего значения по радарограмме, то отметить данную георадарную фацию как жильный лед.

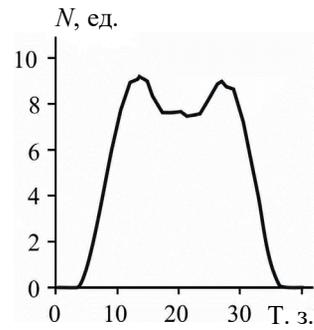
Для определения наличия на радарограмме волновых полей, характерных для зон обводнения в крупно- и среднезернистых песках, обработка данных выполняется по следующему алгоритму:

1. Производится поиск субгоризонтальных осей синфазности, отличающихся высокими амплитудными значениями;
2. Проверяется наличие кратных волн на оригинальной радарограмме под высокоамплитудными осями синфазности;

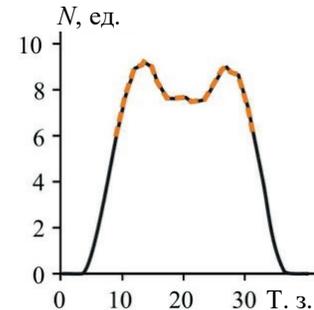
Реализация разработанной методики картирования геокриологических структур. Implementation of the developed methodology for mapping geocryological structures.

Процедура алгоритма	Результат выполнения процедуры
1. Выделить непрерывные оси синфазности сигналов, находящиеся одна под другой	
2. Выбрать пары осей синфазности, у которых противоположны фазы сигналов	

3. Для каждой георадиолокационной трассы радарограммы:
 – произвести быстрое преобразование Фурье;
 – рассчитать модуль результата для получения Фурье-спектра;
 – подсчитать количество локальных максимумов Фурье-спектра в рабочем диапазоне частот



4. Построить график количества локальных максимумов для всех трасс



5. На графике выбрать участки с высокими значениями, состоящие из трех и более точек

6. Для трасс, входящих в выбранные участки и оси синфазности:
 – определить амплитудные значения сигналов от нижней и верхней осей синфазности и рассчитать их отношение;
 – вычислить $\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}}$;
 – проверить $A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}} < 0,95^{\Delta t}$

$$A_{\text{нижн}} = 68$$

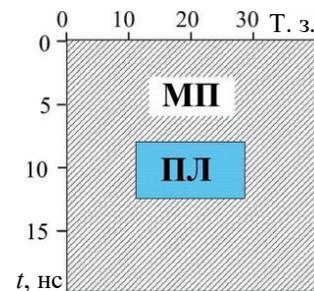
$$A_{\text{верх}} = 84$$

$$A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}} = 0,8$$

$$\Delta t = t_{\text{нижн}} - t_{\text{верх}} = 10,15 - 6,7 = 3,45 \text{ нс}$$

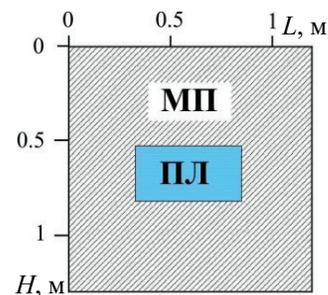
$$A_{\text{нижн}}/A_{\text{верх}} < 0,95^{3,45} = 0,84$$

7. Если существуют оси синфазности, для которых выполняются условия из п. 2, 5, 6, то отметить данную георадарную фацию как пластовый лед



МП – мерзлый песок
 ПЛ – пластовый лед

8. Произвести перерасчет времени задержки сигналов t в значения глубины h и точек зондирования (т. з.) в длину профиля L



9. Вывод результатов обработки



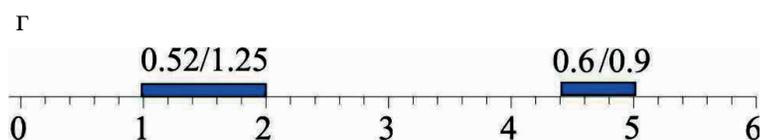


Рисунок 2. Результаты основных этапов обработки данных физического моделирования: а – радарограмма с выделенными осями синфазности по первому признаку; б – график «изрезанности» Фурье-спектров георадиолокационных трасс с отмеченными участками повышенных значений N ; в – схема геологического разреза с установленными местоположениями пластовых льдов; г – результат картирования пластовых льдов по георадиолокационному профилю с указанием глубины верхней и нижней границы льда.

Figure 2. Results of the main stages of physical modeling data processing: a – radarogram with highlighted in-phase axes by the first sign; b – graph of “irregularity” of the Fourier spectra of GPR traces with marked areas of increased N values; c – diagram of the geological section with the determined locations of the formation ice; d – the result of mapping the stratal ice along the GPR profile, indicating the depth of the upper and lower ice boundaries.

3. Производится поиск осей синфазности георадиолокационных сигналов, имеющих большее время регистрации и частотный состав, смещенный в низкочастотную область, по сравнению с аналогичными характеристиками соседних георадиолокационных фаций.

4. Интервал точек зондирования (т. з.), удовлетворяющих условиям п. 1–3, отмечается как зона обводнения.

Результаты исследований

Разработанный алгоритм позволит оперативно изучать особенности строения массива мерзлых горных пород и зон обводнения. Апробация разработанной методики проведена на результатах компьютерного и физического моделирования. В соответствии с установленными признаками пластового льда и разработанным алгоритмом проведена обработка синтетической радарограммы, полученной в результате компьютерного моделирования (таблица).

Основные результаты обработки и интерпретации полевой радарограммы подземных пластового и жильного льдов по разработанному алгоритму представлены на рис. 2.

Выводы

Геокриологические структуры, такие как подземные льды, имеют отличные от вмещающего его массива мерзлых горных пород электрофизические свойства, что потенциально позволяет после анализа, обработки и интерпретации данных георадиолокации выделять подземный пластовый лед по комплексу георадиолокационных признаков и картировать интервалы и границы распространения льдов.

Реализация на практике процедур анализа, обработки и интерпретации георадиолокационных данных по разработанному алгоритму позволит более оперативно проводить исследования строения массива мерзлых горных пород. Использование полученных результатов для оперативного картирования геокриологических структур массивов мерзлых горных пород позволяет разрабатывать и рационально применять обоснованные комплексы мер для предупреждения возникновения или активизации негативных геокриологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- Nitze I., Cooley S., Duguay C., Jones B. M., Grosse G. The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: Fast-forward into the future // The Cryosphere Discuss. 2020. In review. <https://doi.org/10.5194/tc-2020-106>
- Втюрин Б. И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.
- Шполянская Н. А., Стрелецкая И. Д. Генетические типы пластовых льдов и особенности их распространения в Российской субарктике // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 4. С. 56–71.
- Основы геокриологии (мерзлотоведения). Ч. 1. Общая геокриология / отв. ред. П. Ф. Швецов, Б. Н. Достовалов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 459 с.
- Природные опасности России. Т. 4. Геокриологические опасности / общ. ред. В. И. Осипова, С. К. Шойгу. М.: Крук, 2000. 315 с.
- Мерзлотоведение / под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Изд-во МГУ, 1981. 240 с.
- Yoshikawa K., Leuschen C., Ikeda A., Harada K., Gogineni P., Hoekstra P., Hinzman L., Sawada Y., Matsuoka N. Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice) // J. Geophys. Res., 2006. Vol. 111, issue E6. E06S19. <https://doi.org/10.1029/2005JE002573>
- Dallimore S. R., Davis J. L. Ground penetrating radar investigations of massive ground ice // Ground penetrating radar / ed. J. Pilon. Ottawa, Ontario, Canada, 1992. Paper 90–4. P. 41–48. <https://doi.org/10.4095/133646>
- Bertram C. L., Campbell K. J., Sandler S. S. Locating large masses of ground ice with an impulse radar system // Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor: University of Michigan, 1972. Vol. 1. P. 241–260.
- Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. 2nd edition. London: IEE Press, 2004. 726 p.
- Старовойтов А. В., Владов М. Л. Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений // Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 11–14.
- Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. М.: Радио и связь, 1985. 248 с.
- Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.
- Соколов К. О. Интерпретация данных георадиолокации для определения зон повышенной трещиноватости массива мерзлых горных пород // Успехи современного естествознания. 2019. № 12. С. 150–155.
- Автоматический поиск вертикальных трещин в массиве горных пород криолитозоны на основе анализа данных георадиолокации: программа; свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2019660628 РФ / Соколов К. О.; правообладатель Федер. гос. бюджет. учреждение науки Федер. исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 09.08.2019.

Статья поступила в редакцию 17 июня 2020 года

Algorithm for processing and interpretation of ground-penetrating radar data in the study of permafrost geocryological structures

Kirill Olegovich SOKOLOV^{*}
Larisa Lukinichna FEDOROVA^{**},
Andrey Andreevich FEDOROV^{***}

N. V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of RAS, Yakutsk, Russia

Abstract

Relevance. Ground ice is one of unstable components of the cryolithozone and occupies 400–600 km³ in total. Changes in the conditions of heat transfer of ground ice under the influence of external or internal factors can lead to the formation of thermokarst sinkholes, solifluction mudslides, cryogenic landslides and other dangerous cryogenic phenomena in the frozen rock mass. Various methods are used to study underground ice. You can distinguish the method of GPR. Its advantages are efficiency and high detail of measurements. However, the process of identifying underground ice based on the results of processing and interpreting ground-penetrating radar data is currently not formalized in the form of an algorithm.

Purpose of the work. Rapid mapping of geocryological structures requires the development of an appropriate algorithm (sequence of formalized procedures) for the processing and interpretation of ground penetrating radar data.

Methodology of the algorithm is based on the analysis of characteristics of GPR traces, the use of fast Fourier transform to calculate the spectra of GPR traces and further analysis of the results.

Results of the study. The developed algorithm will make it possible to quickly study the structural features of the frozen rock massif with the release of layer ice. The algorithm was tested on the results of physical and computer modeling of ground-penetrating radar measurements of rock mass with ice included.

Conclusions. The use of algorithms for processing and interpretation of ground-penetrating radar data for the operational mapping of geocryological structures of frozen rock massifs makes it possible to reasonably and rationally apply a set of measures to prevent the occurrence of unfavorable geotechnical processes or to reduce economic losses when negative geocryological processes are activated.

Keywords: algorithm, processing, interpretation, formation ice, geocryological structures.

REFERENCES

1. Nitze I., Cooley S., Duguay C., Jones B. M., Grosse G. 2020, The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: Fast-forward into the future. The Cryosphere Discuss. In review. <https://doi.org/10.5194/tc-2020-106>
2. Vtyurin B. I. 1975, *Podzemnyye l'dy SSSR* [Underground ice of the USSR]. Moscow, 214 p.
3. Shpolyanskaya N. A., Streletskaya I. D. 2004, Genetic types of sheet ice and features of their distribution in the Russian subarctic. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], vol. VIII, no. 4, pp. 56–71. (In Russ.)
4. Shvetsov P. F., Dostovalov B. N. 1959, *Osnovy geokriologii (merzlotovedeniya)*. *Obshchaya geokriologiya* [Fundamentals of geocryology (permafrost)]. Part 1. General geocryology]. Moscow, 459 p.
5. Osipova V. I., Shoigu S. K. 2000, *Prirodnyye opasnosti Rossii. Geokriologicheskiye opasnosti* [Natural hazards of Russia. T. 4. Geocryological hazards]. Moscow, 315 p.
6. Kudryavtsev V. A. 1981, *Merzlotovedeniye* [Geocryology], 240 p.
7. Yoshikawa K., Leuschen C., Ikeda A., Harada K., Gogineni P., Hoekstra P., Hinzman L., Sawada Y., Matsuoka N. 2006, Comparison of geophysical investigations for detection of massive ground ice (pingo ice). *J. Geophys. Res.*, vol. 111, issue E6. E06S19. <https://doi.org/10.1029/2005JE002573>
8. Dallimore S. R., Davis J. L. 1992, Ground penetrating radar investigations of massive ground ice. Ground penetrating radar / ed. J. Pilon. Ottawa, Ontario, Canada, paper 90–4, pp. 41–48. <https://doi.org/10.4095/133646>
9. Bertram C. L., Campbell K. J., Sandler S. S. 1972, Locating large masses of ground ice with an impulse radar system. Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor: University of Michigan, vol. 1, pp. 241–260.
10. Daniels D. J. 2004, *Ground Penetrating Radar*. 2nd edition. London: IEE Press, 726 p.
11. Starovoitov A. V., Vladov M. L. 2001, Interpretation of GPR data. *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and protection of mineral resources], no. 3, pp. 11–14. (In Russ.)
12. Nussbaumer G. 1985, *Bystroye preobrazovaniye Fur'ye i algoritmy vychisleniya svertok* [Fast fourier transform and convolution algorithms]. Moscow, 248 p.
13. Lyons R. 2006, *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Understanding Digital Signal Processing]. Moscow, 656 p.
14. Sokolov K. O. 2019, Interpretation of ground-penetrating radar data for determining zones of increased fracturing of frozen rock massif. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in current natural science], no. 12, pp.150–155. (In Russ.)
15. Sokolov K. O. 2019, Automatic search for vertical cracks in the rock mass of the permafrost zone based on the analysis of GPR data: program; certificate of registration no. 2019660628 RF.

The article was received on June 17, 2020

✉k.sokolov@ro.ru

**Lar-fed-90@rambler.ru

***Aan.fedorov@s-vfu.ru