

УДК 621.396.96:551.34:622.02(001.57)
DOI 10.17513/use.38340

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАССИВЕ РЫХЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Федорова Л.Л., Фёдоров М.П., Свинобоев А.С.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск, e-mail: mpfedoroff@gmail.com*

Целью работы являлось совершенствование методики георадиолокационного мониторинга свойств и состояния массива горных пород. Исследование особенностей распространения электромагнитных волн выполнено на примере георадиолокационных измерений физической модели массива рыхлых горных пород, включающего зоны пород различной влажности. Массив горных пород физической модели представлен песком из карьера Хатынг-Юрях г. Якутска. По результатам исследований установлено, что в период с февраля по апрель в диапазоне отрицательных температур воздуха скорость в мерзлой породе различной влажности (5–30%) характеризуется высокими значениями. С апреля по июнь, когда температура воздуха поднимается от 0°C до положительных значений, происходят интенсивное оттаивание мерзлых пород различной влажности и резкое снижение значений скоростей. В мае полностью оттаивает порода влажностью 5%, которая находится в талом состоянии до конца сентября. Порода влажностью 15% полностью оттаивает в июне и в талом состоянии сохраняется до октября. Породы влажностью 22% и 30% плавно оттаивают с июня по август и остаются в талом состоянии до октября. Установлено, что скорость в этих талых породах характеризуется низкими значениями. По установленным значениям скоростей в породах различной влажности в зимний период можно оценить примерную влажность, а также период полной оттайки. Полученная информация позволяет скорректировать план разносезонного георадиолокационного мониторинга динамики криогенного состояния рыхлых горных пород Центральной Якутии.

Ключевые слова: талые и мерзлые рыхлые горные породы, влажность рыхлых горных пород, физическое моделирование, георадиолокация, мониторинг

Исследования, представленные в Разделе «Материал и методы исследования» выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1). Результаты, представленные в Разделе «Результаты исследования и их обсуждение», получены в рамках Программы комплексных научных исследований в РС(Я), направленных на развитие производительных сил и социальной сферы на 2021-2024 гг. (проект № 4, этап 2, № АААА-Б-17-217060520052-0).

PHYSICAL MODELING OF GPR MONITORING OF CRYOGENIC PROCESSES IN A LOOSE ROCK MASSIF

Fedorova L.L., Fedorov M.P., Svinoboev A.S.

*Mining Institute of the North Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Yakutsk,
e-mail: mpfedoroff@gmail.com*

The aim of the work was to improve the technique of GPR monitoring of the properties and condition of the rock massif. The study of the features of electromagnetic wave propagation is carried out using the example of GPR measurements of a physical model of a loose rock massif, including zones of rocks of various moisture. The rock massif of the physical model is represented by sand from the Khatyng-Yuryakh quarry in Yakutsk. According to the results of the research, it was found that in the period from February to April, in the range of negative air temperatures, the velocity in the frozen rock of various moisture of 5–30% is characterized by high values. From April to June, when the air temperature rises from zero to positive values, there is an intensive thawing of frozen rocks of various moisture and a sharp decrease in velocity values. In May, the rock thaws completely with a moisture of 5%, which is in a thawed state until the end of September. The rock with a moisture of 15% thaws completely in June, and remains in a thawed state until October. Rocks with a moisture of 22% and 30% thaw gradually from June to August, and remain in a thawed state until October. It has been established that the velocity in these meltwater rocks is characterized by low values. The information obtained allows us to adjust the plan for multi-season GPR monitoring of the dynamics of the cryogenic state of loose rocks in Central Yakutia.

Keywords: thawed and frozen loose rocks, moisture content of loose rocks, physical modeling, ground penetrating radar (GPR), monitoring

The studies presented in the Section «Material and Research Methods» were carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FWRS-2021-0020, of the unified state information system for recording research, development and technological work for civil purposes No. 122011800086-1). The results presented in the Section «Research Results and Discussion» were obtained within the framework of the Program of Comprehensive Scientific Research in the Republic of Sakha (Yakutia) Aimed at the Development of Productive Forces and the Social Sphere for 2021-2024 (project No. 4, stage 2, No. АААА-Б-17-217060520052-0).

Введение

На территории Северо-Востока России в толще многолетнемерзлых горных пород нередко встречаются локальные участки талых пород. Эти участки затрудняют проведение открытых горных работ, требующих планирования и применения специализированных технологий для соблюдения требований безопасности труда. Известно, что талые, или немерзлые, горные породы – это те породы, у которых средняя годовая температура выше 0°C [1, с. 55]. Их пространственное положение может быть различным по отношению к мерзлым толщам. Возможно, что талые породы могут залегать с поверхности до кровли многолетнемерзлых пород. Также они могут быть ограничены мерзлыми толщами со всех сторон или находиться ниже мерзлой толщи. При этом существование талых пород непрерывно более одного года приводит к формированию различных типов таликов. Н.Н. Романовский предложил классификационную схему таликов, которая включает основные типы и подтипы таликов, а также дал описание их возможного распространения на исследуемой территории [2, с. 58].

В настоящее время для определения расположения и размеров талых зон в массиве мерзлых горных пород используется в основном электротомография [3–5]. Также применяются малоглубинная сейсмика и бесконтактное измерение электрического поля [6, 7]. Данные методы характеризуются значительными затратами времени и усилий при проведении исследований. Их применение зимой сопряжено с методическими сложностями. Оперативное исследование массива горных пород в широком диапазоне температур окружающего воздуха обеспечивает метод георадиолокации [8]. Методика исследования позволяет получать данные георадиолокации путем профилирования или зондирования в сложных условиях местности. Для контроля за изменением криогенного состояния и свойств массива горных пород требуется проводить периодические измерения.

Целью данных исследований является совершенствование методики георадиолокационного мониторинга свойств и состояния массива горных пород.

Материал и методы исследования

По материалам литературных источников [9, 10], в Центральной Якутии в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород выявлены локальные участки

талых пород различной мощности. Глубина сезонного оттаивания в зависимости от типов ландшафтов изменяется от 0,5 до 3,5–4 м, а температура многолетнемерзлых пород – от $-0,2^{\circ}\text{C}$ до -2°C . Геологический разрез Центральной Якутии представлен аллювиальными песчаными отложениями, залегающими на карбонатных породах [11, 12].

На основе геологической информации представлена схема физической модели массива горных пород с включением пород различной влажности (рис. 1а). Массив горных пород физической модели представлен песком из карьера Хатынг-Юрех г. Якутска. На специальном стенде с размерами 6 м * 1 м * 1,4 м была собрана модель с мощностью 1,4 м (рис. 1б). В массиве на глубине 0,5 м расположены три гидроизолированных локальных объекта мощностью 0,4 м на равном расстоянии 0,5 м друг от друга. Объекты представлены песком с расчетной влажностью 15%, 22% и 30% и перекрыты песком с влажностью 5% и мощностью 0,5 м. При расчете геометрических размеров физической модели учитывались характеристики высокочастотных антенн георадара. Пробы грунтов локальных объектов, определенные по ГОСТ 32768-2014, показали приблизительные значения, соответствующие расчетным значениям влажности. Также были установлены обсадные скважины, расположенные между стенкой короба и локальными объектами. Модель была покрыта пакетом для снижения влияния атмосферных осадков.

Исследование распространения электромагнитных волн в физической модели выполнено с помощью метода георадиолокации. Данный метод позволяет изучить характеристики волновых полей, связанных с геометрическими параметрами и электрофизическими свойствами объектов [13]. С февраля по ноябрь выполнены исследования модели антенным блоком АБ1200 георадара «ОКО-2». Измерения температуры массива пород проведены многозонным цифровым датчиком температур МЦДТ 0922. На каждой скважине опускалась термокаса с датчиками, расположенными до глубины 1,4 м с шагом 0,2 м. Данные измерений температуры в трех скважин оказались приблизительно одинаковыми. В таблице 1 приведены результаты измерений температуры в скважине 2 по месяцам на разных глубинах массива пород. С ноября по апрель породы находятся в мерзлом состоянии. В мае наблюдается их оттаивание. С июня до октября породы находятся в талом состоянии.

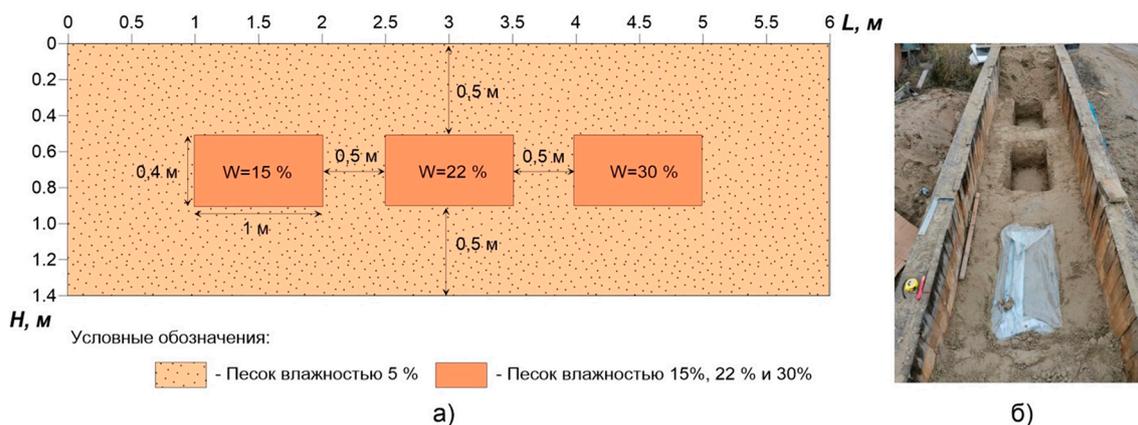


Рис. 1. Схема физической модели массива горных пород с включением пород различной влажности (а) со сборкой на специальном стенде (б)

Таблица 1

Температура в массиве горной породы на разных глубинах

Н, м	Температура, °С									
	Февр.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.
0	-29,8	-19,2	0,6	4,8	29,1	30,1	21,2	11,8	1,8	-18,2
0,2	-28,3	-20,2	-3,6	2,6	20	22	18,5	7,3	0,3	-15,5
0,4	-26,2	-18,8	-4,3	0,5	15,6	19,2	17,3	7	0,03	-11,7
0,6	-23,7	-17,2	-4,6	-0,06	12,7	17,5	16,9	7,3	0,05	-8,2
0,8	-21,2	-15,8	-4,8	-0,2	9,9	15,7	15,9	7,2	0,1	-5,3
1	-18,4	-14,2	-4,9	-0,4	6,4	13,2	14,4	6,8	0,2	-2,3
1,2	-15,5	-12,6	-5,1	-0,8	2,7	10,2	12,4	6,2	0,24	-0,3

Результаты исследования и их обсуждение

Данные георадиолокации, полученные при исследовании физической модели, были обработаны в программе «GeoScan32». В процессе обработки были применены следующие процедуры: корректировка протяженности радарограмм по меткам; амплитудная коррекция волновой картины; полосовая фильтрация для подавления шумов с целью отображения отраженных волн; сглаживание сигналов от скачкообразных изменений. Каждая радарограмма была подвергнута индивидуальной обработке с применением вышеуказанных процедур. На рисунке 2 приведены результаты обработки радарограмм.

Радарограммы, полученные в феврале, демонстрирует волновую картину песка с включением песка влажностью 15% (рис. 2а), 22% (рис. 2г), 30% (рис. 2ж). Эти пески находятся в мерзлом состоянии. На радарограммах наблюдаются первая контрастная ось синфазности отраженных волн от кровли песка и вторая слабоконтрастная ось синфазности от подошвы песка. На рисун-

ках 2б, 2д, 2з представлены радарограммы, полученные в ходе начального процесса оттайки песка, на которых можно увидеть первую контрастную ось синфазности отраженных волн от кровли песка и вторую прерывающуюся ось синфазности от подошвы песка. На радарограммах (рис. 2в, 2е, 2и), полученных в результате полной оттайки песка, прослеживаются первая субгоризонтальная контрастная ось синфазности от верхней границы песка и вторая слабоконтрастная со смещениями ось синфазности от нижней границы песка.

По временным характеристикам волн, отраженных от верхней и нижней границы песка различной влажности, была получена информация о значительной вариации времени прихода отраженных волн. На основе этой информации о разности времени с учетом мощности песка были определены скорость распространения электромагнитных волн и диэлектрическая проницаемость. Полученные результаты расчета представлены в таблице 2. На рисунке 3 приведен график скорости распространения волн в песках различной влажности.

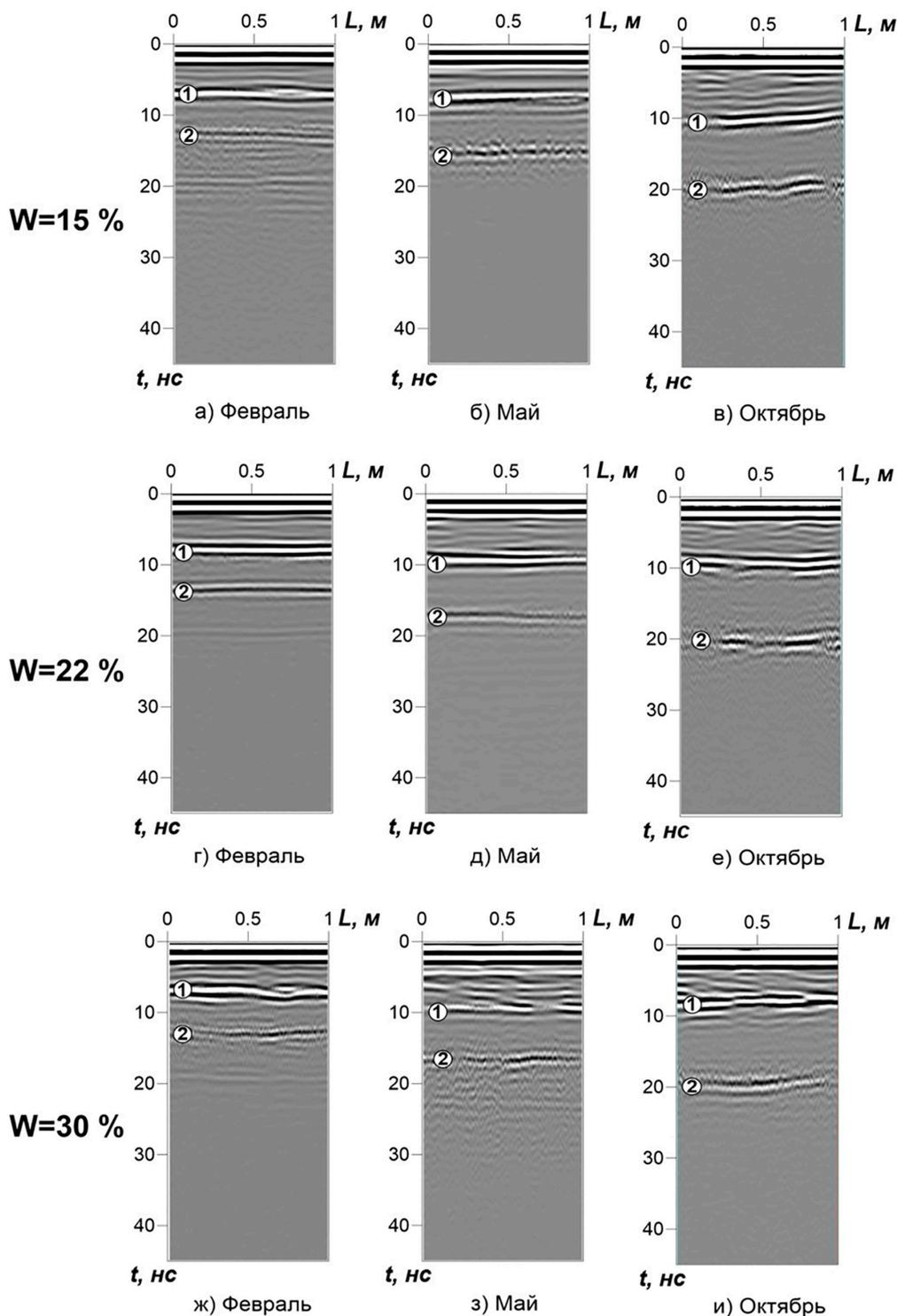


Рис. 2. Фрагменты радарограмм массива песка с включением песка влажностью 15% (а-в), 22% (г-е) и 30% (ж-и)

По данным таблицы 2 следует, что скорость в песке влажностью 5% в талом и мерзлом состоянии составляет 0,11 м/нс и 0,173 м/нс соответственно. В талом песке влажностью 15% скорость составляет 0,074 м/нс, а в мерзлом – 0,137 м/нс.

Скорость в талом и мерзлом песке влажностью 22% – 0,063 м/нс и 0,141 м/нс соответственно. Показатели скорости в песке влажностью 30% в талом и мерзлом состоянии – 0,062 м/нс и 0,125 м/нс соответственно.

Таблица 2

Результаты георадиолокационных измерений песка различной влажности

	W=5%		W=15%		W=22%		W=30%	
	V_{cp} , м/нс	ϵ_{cp}						
Февраль	0,173	3	0,137	4,8	0,139	4,7	0,125	5,8
Март	0,172	3,1	0,139	4,7	0,139	4,6	0,121	6,1
Апрель	0,160	3,5	0,139	4,7	0,136	4,8	0,117	6,5
Май	0,115	6,8	0,099	9,1	0,104	8,4	0,110	7,4
Июнь	0,113	7,1	0,074	16,3	0,073	17	0,072	17,4
Июль	0,111	7,3	0,074	16,4	0,069	19,1	0,072	17,4
Август	0,110	7,5	0,075	16	0,064	21,7	0,063	23
Сентябрь	0,112	7,2	0,074	16,3	0,063	23	0,062	23,2
Октябрь	0,122	6,1	0,075	16,2	0,064	21,9	0,063	23,1
Ноябрь	0,173	3	0,134	5	0,141	4,5	0,12	6,2

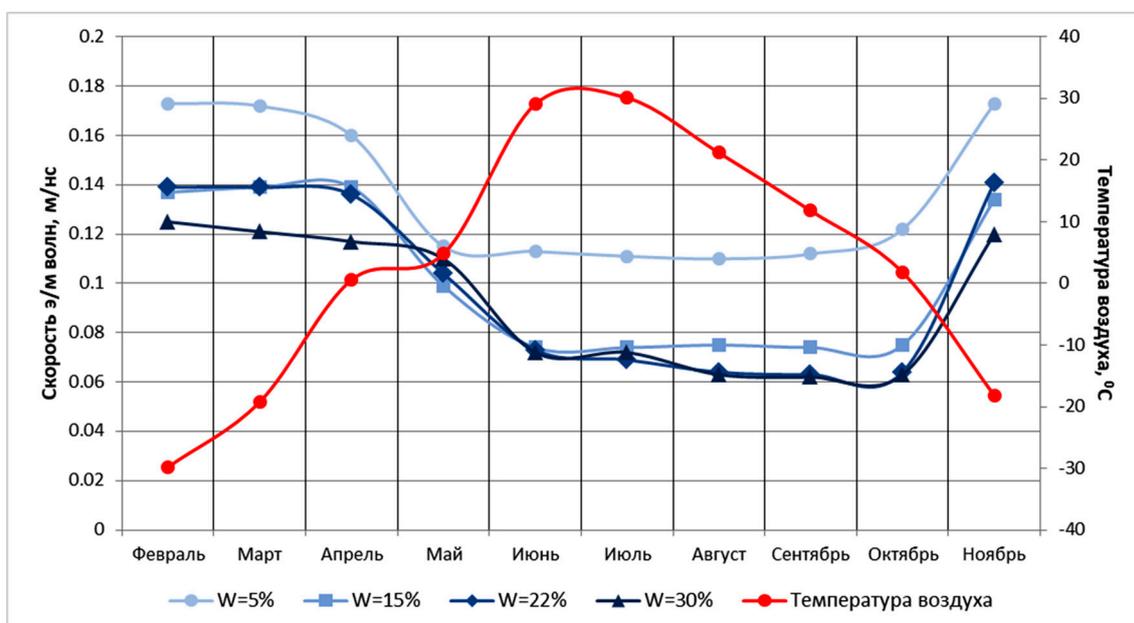


Рис. 3. Скорость распространения волн в песках различной влажности

Таблица 3

Скорость распространения волн в песках различной влажности в разные сезоны года

	W=5%	W=15%	W=22%	W=30%
Вср в мерзлом песке	0,168 м/нс с ноября по апрель	0,138 м/нс с ноября по апрель	0,138 м/нс с ноября по апрель	0,121 м/нс с ноября по апрель
Вср в период оттайки песка	0,16–0,113 м/нс с апреля по май	0,139–0,074 м/нс с апреля по июнь	0,136–0,063 м/нс с апреля по август	0,117–0,063 м/нс с апреля по август
Вср в талом песке	0,112 м/нс с мая по сентябрь	0,074 м/нс с июня по октябрь	0,064 м/нс с августа по октябрь	0,063 м/нс с августа по октябрь

Низкие скорости наблюдаются в талых песках различной влажности, а высокие скорости – в мерзлых песках, что согласуется с ранее установленными закономерностями [14]. Отмечается, что при повышении влажности до 5–30% в талом песке скорость уменьшается в 1,77 раза, а в мерзлом – в 1,4 раза.

Из графика на рисунке 3 следует, что скорости в мерзлом песке влажностью 5%, 15%, 22% и 30% в период с февраля по апрель в диапазоне температур от –30°C до 0°C характеризуются постоянными значениями, но отличаются друг от друга. В то же время значения скоростей в песках влажностью 15% и 22% почти совпадают. С апреля по июнь повышение температуры воздуха с 0°C до 25°C приводит к интенсивному оттаиванию мерзлых песков различной влажности. В этот период происходит резкое снижение значений скоростей в песках. Исключением является песок влажностью 5%, у которого процесс оттаивания завершается в мае. Данный песок в талом состоянии находится до конца сентября, при этом скорость характеризуется постоянной величиной. Песок влажностью 15% полностью оттаивает в июне и в талом состоянии сохраняется до октября. Скорость в талом песке влажностью 15% характеризуется постоянной величиной. Пески влажностью 22% и 30% плавно оттаивают с июня по август и остаются в талом состоянии до октября. Скорости в этих талых песках почти одинаковые. В октябре с переходом на отрицательные температуры воздуха начинается процесс замерзания песков различной влажности. Результаты анализа вариации скоростей в разные сезоны года по данным георадиолокации приведены в таблице 3.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований рыхлых горных пород различной влажности, проведенных с февраля по ноябрь, позволили определить временные интервалы, в течение которых породы находились в мерзлом, талом состоянии и в период оттаивания. Также установлено варьирование скорости распространения волн в породах различной влажности. Мерзлые породы влажностью 5–30% характеризуются высокими значениями скоростей – от 0,121 до 0,168 м/нс. В период оттайки этих пород наблюдается резкое снижение скоростей – с 0,16 м/нс до 0,063 м/нс. Скорости в талых породах характеризуются низкими значениями – 0,063–0,112 м/нс.

На практике по экспериментально установленным значениям скоростей в породах различной влажности в пределах глубины сезонно-талого слоя можно оценить влажность и криогенное состояние рыхлых горных пород по полевым данным георадиолокации в зависимости от месяца проведения измерений. Полученная информация позволяет скорректировать план разносезонного георадиолокационного мониторинга динамики криогенного состояния рыхлых горных пород Центральной Якутии.

Список литературы

1. Бойцов А.В. Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. 178 с.
2. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны. М.: МГУ, 1983. 232 с.
3. Козак С. З. Выделение таликов при разведке на воду с применением геофизических методов // Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 55-57.
4. Бажин К.И., Лебедева Л.С. Изучение надмерзлотных вод Центральной Якутии с использованием метода электротомографии // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (г. Новосибирск, 18–22 июня 2018 г.). Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 63-67.
5. Гринченко В.А., Аксеновская А.А., Валеев Р.Р., Савельев Е.А. Динамика и режим межмерзлотных подземных вод радиационно-тепловых таликов при разработке Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения // Недрапользование XXI век. 2019. № 1 (77). С. 84-89.
6. Копылов Д.В., Садуртдинов М.Р. Изучение талика под малым водотоком методом бесконтактной электроразведки // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 6. С. 45-54. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-6(45-54).
7. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А., Владов М.Л., Зыков Ю.Д., Неклюдов В.В., Оленченко В.В., Пушкарев П.Ю., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2022. № 6. С. 141-151.
8. Христофоров И.И., Данилов К.П., Лебедева Л.С., Горохов И.В. Изучение надмерзлотных таликов Центральной Якутии (Виллойская низменность) методом георадиолокации // Сборник тезисов научно-практической конференции ГЕОРАДАР-2021. Пенза: ИД «Академия Естествознания», 2022. С. 14-17.
9. Константинов П.Я., Федоров А.Н., Угаров И.С., Аргунов Р.Н., Суздалов Д.А., Йижима Й. Результаты исследований межгодовой изменчивости глубины сезонного протавивания около Якутска // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 4. С. 23-32.
10. Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 2. С. 29-38. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38).
11. Аверкина Т.И., Андреева Т.В., Балыкова С.Д. Состав, строение и свойства многолетнемерзлых песков территории Восточной Сибири // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 84-94. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27019.
12. Смелов А.П., Сурнин А.А. Золото города Якутска // Наука из первых рук. 2010. № 4 (34). С. 16-19.
13. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2018. № 2. С. 3-12.
14. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А., Соколов К.О. Георадиолокационная оценка влажности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 153-158. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-152-158.