УДК 621.396.96: 622.02

Л.Л. Федорова, Г.А. Куляндин, К.О. Соколов

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННАЯ ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

В лабораторных и натурных условиях проведены экспериментальные исследования зависимости скорости распространения электромагнитных волн в горных породах от их вещественного состава, влажности и температуры. Лабораторные исследования проводились на образцах дисперсных горных пород: мелкозернистом (горном) и среднезернистом (речном) песках, влажность которых увеличивалась во время эксперимента. Максимальная скорость наблюдалась в мерзлых породах, в талом состоянии этих пород скорость снижалась из-за влияния влажности. В результате проведенных исследований с применением георадиолокации предложена эмпирическая формула, описывающая зависимость относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны в породах от их влажности. Определены граничные условия ее использования. Отмечено, что данная зависимость учитывает криогенное состояние и вещественный состав горных пород посредством введения в расчет поправочных коэффициентов. Ее апробация выполнена в натурных условиях на двух объектах: вторая терраса долины Туймаада и массив вскрышных пород Кангаласского угольного разреза (Республика Саха (Якутия)). Для определения влажности пород также пробурены контрольные скважины. Данные георадиолокации рассмотрены в пределах деятельного слоя, в период полного промерзания и оттайки горных пород. Проведено сопоставление экспериментальных данных относительного изменения времени задержки сигнала с расчетными значениями, а также с лабораторными. В ходе выполненных работ предложен способ оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки (Nt) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в мерзлом ($t_м$, нс) и талом ($t_т$, нс) состоянии. Применение предложенного способа позволит дистанционно оценить влажность горных пород и ее изменения под воздействием различных природно-климатических и техногенных факторов в пределах деятельного слоя горного массива криолитозоны.

Ключевые слова: георадиолокация, горные породы, криолитозона, определение влажности.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-152-158

Одним из направлений обеспечения безопасности и эффективности эксплуатации объектов горной промышленности в криолитозоне является совершенствование существующих методов изучения строения и состояния горных пород бортов карьеров, кровли горных выработок и грунтов оснований инженерных сооружений. Как известно, физико-механические свойства мерзлых дисперсных горных пород зависят от влажности (льдистости) и температуры [1]. При разовых измерениях их значений в отдельных точках, могут быть пропущены или не обнаружены зоны дренирования, застоя воды, деградационные процессы в дамбах, бортах и кровле горных выработок. Наблюдения методом георадиолокации

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 152–158.
© Л.Л. Федорова, Г.А. Куляндин, К.О. Соколов. 2017.

за изменением влажности горных пород позволяют получать непрерывные данные на протяженных участках и могут, в отдельных случаях, существенно прояснить их криогенное состояние [2—5].

Скорость распространения электромагнитных волн в горных породах зависит от их вещественного состава, влажности и температуры. Максимальная скорость наблюдается в мерзлых породах, при этом она незначительно варьируется от содержания льда для пород схожего гранулометрического и вещественного состава. В талом состоянии пород скорость в них снижается и ключевым фактором, определяющим изменение скорости распространения электромагнитных волн, является влажность.

Лабораторные исследования зависимости радиофизических характеристик георадиолокационных сигналов от влажности проведены на образцах дисперсных пород характерных для рыхлых отложений Центральной Якутии: речной песок (0,5—0,25 мм) и горный песок (0,25—0,1 мм) [6, 7]. Ранее проведенный анализ данных эксперимента, при котором проводилось увлажнение, заморозка образцов и георадиолокационное зондирование в процессе их оттайки показал, что для пород с влажностью $W \geq 7\%$ значения скорости (V, м/с) при полной заморозке и оттайке различаются на 10—46%. Этого достаточно для определения изменения влажности по времени задержки сигналов, полученных по результатам разносезонных (в мерзлом и талом состоянии) георадиолокационных измерений [6].

Исследование образцов проводилось контактным зондированием георадаром ОКО-2 с центральной частотой 1200 МГц. Отбор проб и определение влажности (W, %) осуществлялись согласно ГОСТ 5180-84 [8, 9]. В процессе эксперимента регистрировалось время (t, нс), затраченное георадиолокационным сигналом на прохождение в толще образца. Запись и обработка георадиолокационных сигналов производилась программой «GeoScan32» [10, 11]. В результате рассчитаны скорость распространения электромагнитной волны в породах с различной влажностью и ее относительное изменение N_v в их талом и мерзлом состоянии по выражению:

$$N_V = \frac{(v_м - v_т)}{v_м} * 100\%, \qquad (1)$$

где $v_м$ — максимальная скорость распространения электромагнитных волн в горной породе, т.е. скорость, определенная в период полного промерзания; $v_т$ — скорость распространения электромагнитных волн в период оттайки пород.

По полученным данным установлено, что значения N_v для всех исследуемых горных пород с относительным отклонением 4,3% могут быть аппроксимированы линейной формулой:

$$N_v = 1{,}55W + c, \qquad (2)$$

где c — коэффициент, зависящий от вещественного состава горной породы. Данная формула позволяет получать корректные результаты расчетов при влажности пород выше 7%. Так, для горного песка коэффициент с определен значением 0,3, а для речного — 11.

Выполнены экспериментальные исследования по апробации данной зависимости в натурных условиях на двух объектах: вторая терраса долины Туймаада и массив вскрышных пород Кангаласского угольного разреза.

Образцы второй террасы долины Туймаада получены вдоль Федеральной автомобильной дороги А331 «Вилюй» в черте г. Якутска по 6 скважинам. Для рассмотрения выбраны значения влажности с 1 и 2 м по глубине (табл. 1).

Для построения графиков зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитных волн

Таблица 1

Влажность образцов горных пород второй террасы долины Туймаада по данным бурения

Глубина/№ Скважины	Скв. 1	Скв. 2	Скв. 3	Скв. 4	Скв. 5	Скв. 6
H, м	W, %	W, %	W, %	W, %	W, %	W, %
1,0	6,10	46,78	12,13	14,28	4,68	16,02
2,0	13,19	24,03	10,75	15,42	24,80	19,32

от влажности выполнен пересчет на средневзвешенную влажность по глубине $W_{ср}$ (от 0 до 2 м). Пересчет связан с тем, что распространение электромагнитных волн георадара происходит по всей толще породы, до определенной глубины, при этом их скорость замедляется в зависимости от влажности пород. За опорную границу, по которой рассчитано относительное изменение скорости электромагнитных волн, принята кровля многолетнемерзлых пород на глубине 2 м.

На рис. 1 приведено сопоставление результатов расчетов по формуле (2) ($N_{vрасч}(W)$) с расчетами на основе экспериментальных данных по формуле (1) ($N_{vэксп}(W)$). Коэффициент с характеризует горные породы, слагающие исследуемый участок, и равен 2,8. В целом, отмечается достаточно равномерное распределение значений в диапазоне 7—25%, разброс имеется при малой влажности — до 7% и при большой — более 25%. Т.е. полученный результат вписывается в граничные условия применимости предложенной формулы от 7 до 25%.

Данные георадиолокации и образцы горных пород со второго объекта получены в летний период, с июля по август 2016 г., на участке угольного разреза «Кангаласский», расположенного в 45 км к северу от г. Якутска. Георадиолокационные исследования выполнены по методике профилирования, антенным блоком АБ-400 по вскрышным породам угольного разреза. Контрольные скважины для определения влажности пробурены в трех точках до глубины 1,8 м, в начале, в середине и в конце георадиолокационного профиля. Образцы были взяты

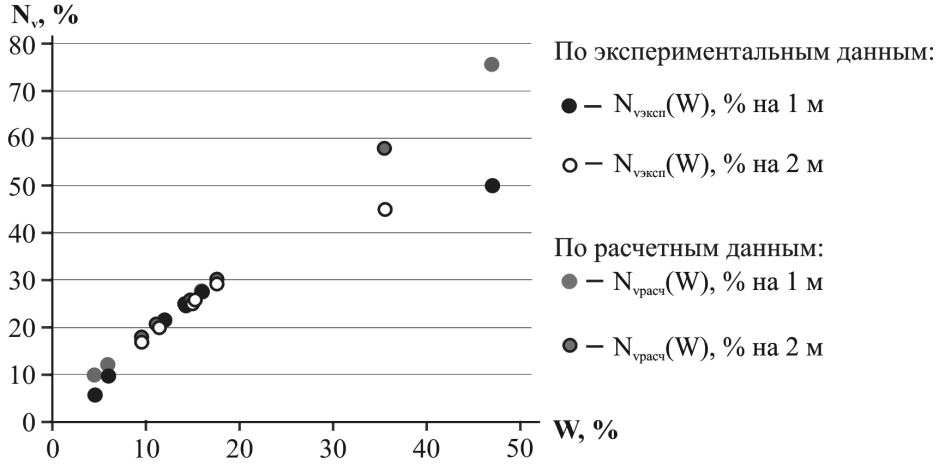

Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны (N_v) от влажности (W) горных пород второй террасы долины Туймаада

Таблица 2

Данные по влажности горных пород в точке наблюдений № 2 (угольный разрез «Кангаласский»)

№ скв.	Дата	Глубина скважины, м				
		0,5	1	1,5	1,8	до 1,8
		W, %	*W*, %	*W*, %	*W*, %	$W_{ср}$,%
1	19.07	–	7,79	7,3	20,88	11,99
2	28.07	–	6,98	–	16,77	11,87
3	03.08	7,29	7,21	8,49	11,89	8,72
4	19.08	6,45	7,76	7,45	7,67	7,33
5	22.08	6,68	10,21	9,25	11,65	9,45
6	24.08	7,26	7,53	7,07	7,65	7,38
7	26.08	6,99	6,53	7,64	12,1	8,31
8	31.08	6,23	7,37	9,3	12,61	8,88

на глубинах 0,5 м, 1 м, 1,5 м и 1,8 м. По ним в лаборатории определены весовые влажности каждой пробы, а затем средние значения влажностей ($W_{ср}$) в каждой скважине. Для примера в табл. 2 приведены данные в точке наблюдений № 2, с середины профиля.

Даты измерений выбраны исходя из погодных условий, т.е. после атмосферных осадков, для того чтобы зафиксировать максимальные изменения влажности пород. При взятии проб установлено, что на отметке 1,8 м наблюдается существенное увеличение влажности пород. Этот рост продолжается до кровли глинистых мерзлых пород.

Для анализа выбран диапазон данных, соответствующих талым породам в окрестности точки наблюдений № 2, с 19 июля по 31 августа. По среднему значению времени задержки сигнала, определенному по трем точкам георадиолокационных зондирований, и глубине до отражающего слоя в этом месте, определена скорость распространения электромагнитных волн. Относительное

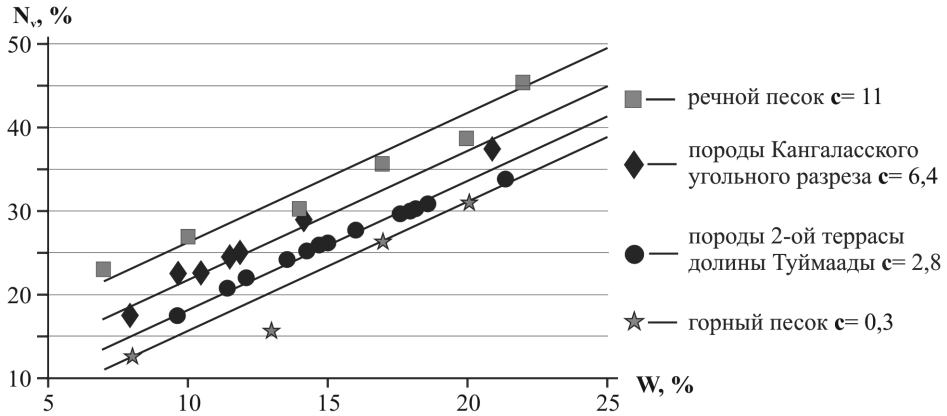

Рис. 2. Зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны (N_v) от вещественного состава и влажности (W) горных пород

изменение скорости определяется по выражению (1). Максимальная скорость распространения электромагнитных волн ($v_м$) в горной породе, определенная в период полного промерзания (0,120 м/нс для данного участка); $v_т$ — определяется в произвольный момент времени, в течении года, предполагается, что в период оттайки пород.

Сопоставление расчетных значений (по формуле (2)) с экспериментальными (по формуле (1)) выполнено при коэффициенте c = 6,4, характеризующем горные породы, слагающие исследуемый участок.

На рис. 2 показаны экспериментальные значения N_v в диапазоне влажности 7—25% и соответствующие определенным образцам кривые аппроксимации с коэффициентами c. Поскольку породы Кангаласского угольного разреза и 2-ой террасы долины Туймаада представлены различными песками и суглинками, то значения N_v для них расположились между лабораторными данными по речному и горному песку.

Таким образом, полученная зависимость скорости распространения электромагнитной волны от влажности горных пород (7% < W < 25%), описывающаяся эмпирической формулой, учитывает криогенное состояние и вещественный состав горных пород, тем самым может быть использована для разработки технологии георадиолокационного мониторинга влажности горных пород в пределах деятельного слоя.

Полученный результат позволяет предложить способ оценки влажности (W) горных пород на основе исследования относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны (N_v). Для этого необходима хотя бы одна скважина с информацией о влажности горных пород по участку. Тогда, при проведении разносезонных георадиолокационных исследований, появляется возможность рассчитать весовые значения влажности по данным относительного изменения времени задержки сигналов (N_t) от опорной границы в талых породах, по сравнению с мерзлыми по эмпирической формуле:

$$W = 0{,}65N_t - a, \qquad (3)$$

где W — влажность; а — коэффициент, зависящий от вещественного состава исследуемых горных пород; N_t — относительное изменение времени задержки сигналов, которое определяется из выражения:

$$N_t = \frac{(t_т - t_м)}{t_T}100\%, \qquad (4)$$

где $t_м$ — время задержки сигналов для пород в мерзлом состоянии; $t_т$ — время задержки сигналов для пород в талом состоянии.

Применение предложенного способа позволит дистанционно оценить влажность дисперсных горных пород и ее изменения под воздействием различных природно-климатических и техногенных факторов в пределах деятельного слоя горного массива криолитозоны, при этом сократить объемы буровых работ, либо оптимизировать размещение скважин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фролов А. Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. — Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. — 607 с.

2. *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.

3. *Федорова Л. Л.*, *Федоров М. П.*, *Стручков А. С.*, *Саввин Д. В.* Основы информационно-программного обеспечения георадиолокационных исследований состояния грунтов автодорог

криолитозоны в режиме мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень (специальный выпуск). — 2015. — С. 325—332.

4. *Федорова Л.Л.*, *Федоров М.П.*, *Стручков А.С.*, *Саввин Д.В.* Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в подповерхностных грунтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 8 (специальный выпуск 21) — С. 154—163.

5. *Fedorova L.L.*, *Savvin D.V.*, *Fedorov M.P.*, *Struchkov A.S.* GPR Monitoring of Cryogenic Processes in Subgrade Soils // GPR 2016: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13—16 June 2016. — Hong Kong, 2016. — Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/document/7572624/ (дата обращения: 18 января 2017 г.).

6. *Федорова Л.Л.*, *Саввин Д.В.*, *Соколов К.О.*, *Куляндин Г.А.* Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности // Наука и образование. — 2016. — № 3 — С. 42—46.

7. *Fedorova L.L.*, *Sokolov K.O.*, *Savvin D.V.*, *Ammosov A.P.* Studying of influence of temperature of rocks with varying humidity on GPR data // GPR 2016: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13—16 June 2016. — Hong Kong, 2016. — Режим доступа: http://ieeexplore.ieee.org/document/7572637/ (дата обращения: 18 января 2017 г.).

8. *ГОСТ 5180-84* Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Взамен ГОСТ 5180-75; Введ. 30.06.1985. — М.: Стандартинформ, 2005. — 19 с.

9. *Шувалов А.Н.*, *Гензе Д.А.* Диэлектрическая проницаемость грунтов нарушенной структуры // Вестник ТГАСУ. — 2011. — № 1. — С. 200—206.

10. *Техническое* описание и инструкция по эксплуатации на Георадар «ОКО-2». — Режим доступа: http://geotech.ru/files/georadar/gprtov26beta303.pdf (дата обращения: 18 января 2017 г.).

11. *Руководство* пользователя программой GeoScan32. — Режим доступа: http://logsys.ru/download/new/geoscan32manual.pdf (дата обращения: 18 января 2017 г.). ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Федорова Лариса Лукинична[1] — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: Lar-fed-90@rambler.ru,
Куляндин Гаврил Александрович[1] — младший научный сотрудник, e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
Соколов Кирилл Олегович[1] — кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: k.sokolov@ro.ru,
[1] Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 8, pp. 152–158.

UDC 621.396.96: 622.02

L.L. Fedorova, G.A. Kulyandin, K.O. Sokolov

GPR EVALUATION OF MOISTURE CONTENT OF ROCKS

In laboratory and field conditions, experimental studies have been carried out depending on the speed of propagation of electromagnetic waves in the rocks of their material composition, temperature and humidity. Laboratory studies have been carried out on samples of dispersed rocks: fine-grained (rock sand) and medium (river sand), sand, humidity, which increased during the experiment. Maximum speed has been observed in permafrost in the thawed state of the rocks speed reduced due to moisture influence.

In results of the studies using GPR an empirical formula has been offered describing the dependence of the relative change in the velocity of propagation of electromagnetic waves in the rocks of

their moisture. Defined boundary conditions of its use. It is noted that this relationship allows for cryogenic state and composition of rocks by introducing correction factors into account. Approba tion carried out in field conditions at two sites: the second terrace of the valley Tuymaada and overburden massive of Kangalassky coal mine (the Republic of Sakha (Yakutia)). Pilot holes have been drilled to determine the humidity content of rocks. GPR data is considered within the active layer, in a period of complete freezing and defrosting rocks. A comparison of experimental data has been carried on the relative change in signal delay time with the calculated values, as well as a laboratory.

During the executed research method for evaluating humidity of dispersed rocks by the empirical formula has been offered, based on the determination of the relative change in the delay time (N_t) GPR signals reflected from interfaces of media in the frozen (t_M, ns) and thawed (t_T, ns) condition.

Application of the method allows to remotely evaluation the moisture content of rocks and its changes under the influence of the various climatic and anthropogenic factors within the active layer of the permafrost zone of the rock mass.

Key words: GPR, rocks, permafrost, humidity.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-152-158

AUTHORS

Fedorova L.L.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Leading Researcher, e-mail: Lar-fed-90@rambler.ru,
Kulyandin G.A.[1], Junior Researcher, e-mail: kgavrilu@yandex.ru,
Sokolov K.O.[1], Candidate of Technical Sciences,
Researcher, e-mail: k.sokolov@ro.ru,
[1] Chersky Mining Institute of the North,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677980, Yakutsk, Russia e-mail: igds@ysn.ru.

REFERENCES

1. Frolov A. D. *Elektricheskie i uprugie svoystva merzlykh porod i l'dov* (Electric and elastic properties of frozen rocks and ice), Pushchino, ONTI PNTs RAN, 2005, 607 p.

2. Fedorov V. N., Fedorova L. L. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015, vol. 58, no 8/2, pp. 48—51.

3. Fedorova L. L., Fedorov M. P., Struchkov A. S., Savvin D. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* (Special edition). 2015, pp. 325—332.

4. Fedorova L. L., Fedorov M. P., Struchkov A. S., Savvin D. V. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 8 (Special edition 21), pp. 154—163.

5. Fedorova L. L., Savvin D. V., Fedorov M. P., Struchkov A. S. GPR Monitoring of Cryogenic Processes in Subgrade Soils. *GPR 2016: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13—16 June 2016*. Hong Kong, 2016, available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7572624/ (accessed: 18 January 2017).

6. Fedorova L. L., Savvin D. V., Sokolov K. O., Kulyandin G. A. *Nauka i obrazovanie*. 2016, no 3, pp. 42—46.

7. Fedorova L. L., Sokolov K. O., Savvin D. V., Ammosov A. P. Studying of influence of temperature of rocks with varying humidity on GPR data. *GPR 2016: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13—16 June 2016*. Hong Kong, 2016, available at: http://ieeexplore.ieee.org/document/7572637/ (accessed: 18 January 2017).

8. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. GOST 5180-84 Vzamen GOST 5180-75; Vved. 30.06.1985 (Soils. Methods of laboratory determination of physical characteristics. State Standart 5180-84. Replace State Standart 5180-75; Introduced 30.06.1985), Moscow, Standartinform, 2005, 19 p.

9. Shuvalov A. N., Genze D. A. *Vestnik TGASU*. 2011, no 1, pp. 200—206.

10. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii na Georadar «OKO-2»*, available at: http://geotech.ru/files/georadar/gprtov26beta303.pdf (accessed: 18 January 2017).

11. *Rukovodstvo pol'zovatelya programmoy GeoScan32*, available at: http://logsys.ru/download/new/geoscan32manual.pdf (accessed: 18 January 2017).