1. Постановление Госгортехнадзора РФ от 28.01.2002 № 6 «Об утверждении Правил безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 16.04.2002 № 3372) // URL: http://base.consultant.ru/cons/cgi (дата обращения: 18.12.2015).

2. Ефремов В.Н. Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зон

дированием // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума (3–7 сентября 2011 г., г. Мирный). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – С. 469–475.

3. Каминский А.Е., Ерохин С.А., Шлыков А.А. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и РМТ/АМТ // Геофизика. – 2015. – №4. – С. 32–39.

Поступила в редакцию 12.04.2016

УДК 622.02:621.396.96

Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности

Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин, К.О. Соколов, Г.А. Куляндин

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

Представлены результаты лабораторных зондирований георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц образцов дисперсных горных пород различной влажности, замороженных в холодильной камере, с последующей оттайкой при температуре 22°С. Рассчитаны скорости распространения георадиолокационных сигналов в образцах при влажности от 3 до 22% и изменении температуры от -15° С до 15° С. В результате исследований установлено, что существенное различие скоростей распространения георадиолокационных сигналов сиследований установлено, что существенное различие скоростей распространения георадиолокационных сигналов при отрицательных и положительных температурах в двух типах песков четвертичных отложений наблюдается при влажности более 7%. Также описаны амплитудные значения георадиолокационных сигналов и их частотный состав в зависимости от температуры и влажности исследуемых образцов. Полученные результаты будут способствовать созданию автоматизированной системы контроля динамики влажности пород на горных объектах с последующим отображением данных в геоинформационной системе, применение которой перспективно для мониторинга физико-механических свойств горных пород бортов карьеров, кровли подземных горных выработок и грунтов оснований инженерных сооружений.

Ключевые слова: георадиолокация, дисперсные горные породы, оттайка, влажность, температура, диэлектрическая проницаемость, горные объекты, криолитозона.

Investigation of GPR Signals Parameters Changes during Defrosting Process of Frozen Dispersed Rocks of Different Humidity

L.L. Fedorova, D.V. Savvin, K.O. Sokolov, G.A. Kulyandin

Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk

Laboratory studies are conducted on dispersed rock samples of different moisture content frozen in a refrigerating chamber, with the subsequent defrosting at temperature 22°C. According to the results of sensing by GPR OKO-2 with a center frequency of 1200 MHz delay time, amplitudes and spectral characteristic of the signals at varying moisture (from 3 to 20%) and temperature (from -15 to 15 °C) of rocks were determined. The results of the research showed a significant difference between the velocity of

ФЕДОРОВА Лариса Лукинична – к.т.н., зав. лаб., Lar-fed–90@rambler.ru; САВВИН Денис Валерьевич – к.т.н., н.с., deophysic@mail.ru; СОКОЛОВ Кирилл Олегович – к.т.н., н.с., k.sokolov@ro.ru; КУЛЯНДИН Гаврил Александрович – м.н.с., kgavrilu@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

GPR signals at negative and positive temperatures for two types of sands of Quaternary deposits with a moisture content more than 7%. GPR amplitude values of signals and their frequency composition are described, depending on the temperature and humidity of the samples. The obtained results will serve as a basis for creation of automated system for determining the variation of the moisture in the rocks and display the data through geographic information system, which will greatly facilitate the control of moisture content of rocks in the mining industry. Application of the developed system is promising for monitoring of rock properties of pit walls and roofs of mine openings and soil foundations of engineering structures.

Key words: ground penetrating radar, dispersed rocks, defrost, humidity, temperature, dielectric permittivity, mining facilities, permafrost.

Введение

При проведении инженерных предпроектных изысканий на месторождениях полезных ископаемых особое место отводится геофизическим исследованиям физико-механических свойств горных пород, как в мерзлом, так и в талом состояниях, а также их динамики в процессе техногенных воздействий. Для проведения подобных исследований предпочтительно использование такого дистанционного, неразрушающего геофизического метода, как георадиолокация [1-7]. Как известно, физико-механические свойства мерзлых дисперсных горных пород зависят от их влажности (льдистости) и температуры [8–10]. Количественное содержание воды в горных породах при отрицательных и положительных температурах отражается на таких параметрах георадиолокационных сигналов, как время задержки (t, нс), амплитуда (A, o.e.) и частота (F, МГц) [11–14]. Большинство публикаций, содержащих материалы по исследованию скорости распространения георадиолокационного сигнала (V, м/нс) в горных породах с различной влажностью, не учитывают влияния температуры изучаемых пород на параметры принимаемых сигналов [15–17]. Для точной интерпретации результатов георадиолокационных зондирований необходимо знать закономерности вышеуказанных параметров георадиолокационных сигналов от влажности и температуры изучаемых горных пород.

Материалы и методы исследования

В ИГДС СО РАН были проведены лабораторные исследования зависимости радиофизических характеристик георадиолокационных сигналов образцов горных пород, характерных для четвертичных отложений Центральной Якутии от их влажности и температуры. Образцы представлены песками различного состава и крупности. Первый образец среднезернистым песком, добываемым в русле р. Лена (далее «речной песок», второй образец мелкозернистым песком с примесью глинистых частиц (далее «горный песок»). В процессе эксперимента проводились заморозка и последующая оттайка образцов горных пород с различной влажностью. Исследуемые пески помещались поочередно в контейнер из ДСП. Размеры контейнера 0,5 м х 0,5 м х 0,25 м. Изготовление образцов и определение влажности песков (W, %) осуществлялись согласно ГОСТ 5180-84 [18, 19]. Подготовленные пески с различной влажностью в количестве 12 образцов поочередно помещались в холодильную камеру «Castlcool» и выдерживались при температуре – 15°С до полной заморозки в течение от 1 до 3 дней. После этого исследуемые образцы извлекались из камеры и находились при температуре 22°С до полной их оттайки. Исследование образцов проводилось контактным зондирова-нием георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц (рис. 1). Измерение температуры образцов проводилось цифровым термометром «CENTER-314» с периодом 30 мин в трех точках (рис. 2).

Исследуемая экспериментальная модель состоит из двух слоев. Первым слоем служит образец горной породы шириной 0,25 м, вторым слоем является воздух, толщина этого слоя принимается как бесконечная, исходя из условий проведения эксперимента и параметров георадиолокационного зондирования. Запись и обработка георадиолокационных сигналов производилась программой «GeoScan32» [20, 21]. Зондирования проведены в дискретном и непрерыв-



Рис. 1. Георадиолокационное зондирование контейнера с образцом горных пород



Рис. 2. Схема расположения георадара и датчиков при измерении температуры образцов горных пород термометром «CENTER-314»: а – вид сбоку; б – вид спереди

ном режимах с параметрами: накопление сигналов – 128; количество точек по глубине – 511; развертка по глубине – 16 нс. При выбранном режиме записи радарограмм шаг дискретизации (точность регистрации времени задержки) составил 0,03 нс.

В процессе эксперимента регистрировалось двойное время задержки (t, нс), затраченное георадиолокационным сигналом на прохождение расстояния от антенного блока георадара до границы порода–воздух (сквозь образец) и обратно до антенного блока, после отражения сигнала на границе. Значения амплитуд, полученных георадиолокационных сигналов, имеют размерность относительные единицы (о.е.). Изменение амплитуды георадиолокационного сигнала зависит от двух параметров, поглощения электромагнитной энергии в исследуемой среде и коэффициента отражения k на границе горная порода–воздух.

Результаты и обсуждение

По результатам лабораторных исследований были рассчитаны скорости (V, м/нс) распространения георадиолокационных сигналов при оттайке мерзлых образцов различной влажности (льдистости) по формуле:

$$V = \frac{2S}{t}$$

где t – время регистрации отраженного сигнала от задней поверхности образца (нс); s – ширина образца (м). По результатам расчетов, представленных на рис. 3, можно выделить три участка с диапазоном изменений температур: 1 – от –15°C до –3,5°C; 2 – от –3,5°C до 1°C; 3 – от 1°C до 15°C.

На участках 1 и 3 значения скоростей распространения георадиолокационных сигналов стабильны, в отличие от участка 2, где происходит фазовый переход воды, содержащейся в образцах.

Как видно из графиков, на первом участке в интервале температур от -15°C до -3,5°C скорости распространения георадиолокационных сигналов снижаются с увеличением влажности пород: в речном песке от 0,158 до 0,133 м/нс при влажности от 3 до 22%, в горном песке от 0,125 до 0,118 м/нс при влажности от 3 до 20%. Снижение скорости распространения георадиолокационных сигналов в горной породе с увеличением их влажности (льдистости) при отрицательной температуре связано с возникновением криогенной системы пор и макродипольной поляризацией, что увеличивает действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости (є') исследуемых образцов. На втором участке в пределах от -3,5°С до 1°С происходит резкое уменьшение скоростей пропорционально



Рис. 3. Зависимости скорости (V, м/нс) распространения георадиолокационных сигналов в образцах горных пород с различной влажностью (W, %) и температурой (T,°C) при их оттайке: а – речной песок; б – горный песок

значению влажности. Это связано с повышением количества незамерзшей воды в породе. На третьем участке в интервале температур от 1°C до 15°C с увеличением влажности значения скоростей сигналов в речном песке снижаются с 0,136 м/нс (при W= 3%) до 0,074 м/нс (при W= 22%), в горном песке с 0,118 м/нс (при W= 3%) до 0,089 м/нс (при W= 20%).

Величина снижения скорости распространения георадиолокационного сигнала в образце горной породы, находящемся в талом состоянии, по сравнению с мерзлым в большей степени зависит от влажности образца. При влажности W=3% образцов речного песка разница в скоростях распространения сигнала, находящихся в талом и мерзлом состояниях, составляет ΔV=4% (от 0,140 до 0,135 м/нс). При последующем увлажнении эта разница значительно увеличивается и при влажности W=22% (рис. 3, а) снижение скорости достигает 46% (от 0,138 до 0,075 м/нс). В мерзлом горном песке при начальной влажности также наблюдается небольшое снижение скорости сигнала (∆V≈4%), но уже при влажности W=8% оно составляет около 10%, что является достаточным для оценки значений влажности породы по разнице скоростей в мерзлом и талом состояниях. При увеличении влажности горного песка до W=20% скорость распространения георадиолокационного сигнала снизилась на 32% (рис. 3, б).

По результатам лабораторных исследований была проанализирована зависимость амплитуды георадиолокационного сигнала от влажности и температуры образцов горных пород. Было выявлено, что значения амплитуд сигналов, полученных при исследовании речного песка, в среднем в 3-4 раза больше, чем при зондированиях горного песка при одинаковых значениях влажности и температуры. В мерзлом речном песке амплитудные значения сигнала уменьшаются с увеличением влажности от 2300 о.е. до 1100 о.е. Колебания значений амплитуд обусловлены влиянием связанной воды, находящейся в горной породе. На втором участке интервала температур наблюдается резкое возрастание амплитудных значений, обусловленных увеличением коэффициента отражения k из-за значительного повышения диэлектрической проницаемости горной породы, связанного с фазовым переходом влаги (лед-вода). В талом состоянии речного песка амплитуды уменьшаются и стабилизируются в диапазоне 1400-600 о.е. в соответствии с влажностью горных пород. Максимальная разница амплитуд между данными, полученными при отрицательных и положительных температурах, составляет около 1000 о.е. для наименьшей влажности, при этом минимальная разница составляет около 500 о.е. для наибольшей влажности. В среднем уменьшение амплитуд составляет ≈50% от начальной амплитуды (в мерзлом состоянии).

Амплитуды георадиолокационных сигналов, полученные при зондировании горного песка, в целом имеют ту же закономерность уменьшения амплитуд при оттайке. Имеющиеся в горном песке глинистые частицы значительно увеличивают затухание электромагнитной энергии в образце по сравнению с речным песком. Даже в мерзлом состоянии полученные амплитуды не превышают 500 о.е. и после оттайки падение амплитуд достигает 60–70%. На втором участке интервала температур наблюдаются выбросы только до влажности 17%, что связано с особенностями впитывания влаги глинистыми частицами.

Частотный состав георадиолокационных сигналов, полученных по результатам зондирования образцов горных пород в процессе их оттайки, совпадает с таковым результатов других исследователей [22, 23]. При отрицательных температурах (от -10° С и ниже) частотный состав практически не зависит от влажности пород и находится около отметки 1070 МГц. При увеличении температуры наблюдаются флуктуации частот с резкими изменениями значений в переходной зоне. В талой зоне с повышением влажности образцов максимальные амплитуды Фурье-спектра смещаются с 850 до 650 МГц.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных георадиолокационных исследований мерзлых дисперсных горных пород, характерных для четвертичных отложений Центральной Якутии, с влажностью от 3 до 22% определены закономерности динамики скорости распространения (V, м/нс) георадиолокационного сигнала в мерзлых породах при их оттайке. Установлено, что для пород с влажностью $W \geq 7\%$ значения V при полной заморозке и оттайке различаются на 10-46%, что достаточно для мониторинга изменения влажности по времени задержки сигналов, полученных по результатам (весна-осень) георадиолокаразносезонных ционных измерений.

Полученные результаты могут быть использованы при создании автоматизированной системы контроля динамики влажности пород с последующим отображением данных в геоинформационной системе, которая существенно облегчит контроль за влажностью пород на объектах горной промышленности. Применение разрабатываемой системы перспективно для мониторинга физико-механических свойств горных пород бортов карьеров, кровли подземных горных выработок и грунтов оснований инженерных сооружений.

Литература

1. Омельяненко А.В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород: монография / А.В. Омельяненко, Л.Л. Федорова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.

2. Владов М.Л. Георадиолокационные исследования верхней части разреза / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – С. 90.

3. *Нерадовский Л.Г.* Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии / Л.Г. Нерадовский. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – 166 с.

4. *Гринев А.Ю.* Вопросы подповерхностной георадиолокации: монография / А. Ю. Гринев. – М.: Радиотехника, 2005. – 416 с.

5. *Harry M.J.* Ground penetrating radar: theory and applications / M.J. Harry. – Elsevier. – 2009. – 524 c.

6. Ермаков А.П. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки /А.П. Ермаков, А.В. Старовойтов // Вестник МГУ. Сер. 4: Геология. – 2010. – № 6. – С. 91–96.

7. *Fedorova L.L.* Analysis of variance amplitudes of signals for detecting structural permafrost heterogeneities by ground penetrating radar / L.L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Savvin, G. A. Kulyandin // GPR–2014: Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, June 30–July 4, 2014. – P. 305–308.

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

9. *Якупов В.С.* Исследование мерзлых толщ методами геофизики: монография / В.С. Якупов. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – 336 с.

10. Neradovskii L.G. Calculation of the temperature of frozen ground on the basis of mathematical models of the temperature dependence of ground penetrating radar signals / L.G. Neradovskii. – Measurement Techniques, 2011. – V.54, issue 8. – P. 931–938.

11. *Greaves R.J.* Velocity variations and water content estimated from multi-of set, ground-penetrating radar / R.J. Greaves, D.P. Lesmes, J.M. Lee. –Geophysics, 1996. – V.61. – P. 683–695.

12. Боярский Д.А. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв / Д.А. Боярский, В.В. Тихонов. – М.: Институт космических исследований РАН, 2003. – 48 с.

13. *Tran A.P.* Soil moisture estimation using full-wave inversion of near-and far-field ground-penetrating radar data: A comparative evaluation / A.P. Tran, F. Wiaux, S. Lambot // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – V.1. – P. 300–304.

14. Sokolov K. Capabilities of the wavelet analysis of GPR data to determine the rock moisture in frozen rock mass / K. Sokolov // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8, 2012. – Shanghai, China. – V.2. – P. 358–361.

15. *Kruglikov A*. Investigation of long term moisture changes in roadbeds using GPR / A. Kruglikov, V. Yavna, G. Lazorenko // GPR–2014: Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels, Belgium, June 30 –July 4, 2014. – P. 887–891.

16. *Grote K.* Characterization of Soil Water Content Variability and Soil Texture using GPR Groundwave Techniques / K. Grote, C. Anger, B. Kelly, S. Hubbard, Y. Rubin // Journal of Environmental and Engineering Geophysics (JEEG), 2010. – V.15, issue 3. – P. 93–110.

17. *Huisman J.A.* Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review / J.A. Huisman, S.S. Hubbard, J.D. Redman and A.P. Annan // Vadose zone journal. – 2003. – V.2. – P. 476–491.

18. ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». – М.: Стандартинформ, 2005. – 19 с.

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

20. *Техническое* описание и инструкция по эксплуатации на Георадар «ОКО-2». – Режим доступа /http://geotech.ru/files/georadar/gprtov26beta303. pdf.

21. Руководство пользователя программой «GeoScan32». URL: http://logsys.ru/download/new/ geoscan32manual.pdf.

22. *Koh G*. Effects of Soil Texture and Moisture on Dielectric Behavior at GPR Frequencies / G. Koh // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8, 2012. – Shanghai, China. – V.1. – P. 51–55.

23. *Rodriguez P.A.* Moisture determination based on ground penetrating radar measurements. URL: https://www.researchgate.net/publication/255517033_moisture_determination_based_on_ground_penetrating_radar_measurements.

Поступила в редакцию 27.06.2016