

Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород

Л.Л. Федорова, Г.А. Куляндин

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Россия
e-mail: Lar-fed-90@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности оценки влажности горных пород на основе данных георадиолокации. Предложена методика оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки (N_i) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в мерзлом (t_m , ns) и талом (t_t , ns) состоянии. Ее апробация выполнена в натурных условиях на двух объектах Центральной Якутии. Данные георадиолокации рассмотрены в пределах деятельного слоя в период полного промерзания и оттайки горных пород. На первом участке апробации значения данных выбраны с отрезка профиля в окрестности скважины контрольного бурения. По трем соседним точкам зондирования рассчитано среднее значение времени задержки сигнала от опорной границы на глубине 1,7 м. Оценено относительное изменение времени задержки сигналов N_i . Рассчитана средняя весовая влажность по предложенной формуле. В соответствии с методикой также определено распределение влажности вдоль георадиолокационного профиля на втором участке апробации. Применение предложенной методики 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.

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

Method of GPR Evaluation of the Humidity of Dispersed Rocks

L.L. Fedorova, G.A. Kulyandin

Chersky Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
e-mail: Lar-fed-90@rambler.ru

Abstract. Potential of GPR data for evaluation of rocks humidity is considered. A method for evaluation of humidity of dispersed rocks by an empirical formula is proposed, which is based on determination of a relative change in the delay time (N_i) of GPR signals reflected from interfaces of media in frozen (t_m , ns) and thawed (t_t , ns) condition. The method was tested in field conditions at two sites in Central Yakutia. The GPR data are considered within an active layer, in a period of complete freezing and defrosting of the rocks. In the first site of testing the data values were taken from a part of a profile in the vicinity of the borehole test drilling. The average time delay of a GPR signal from the reference boundary at the depth of 1.7 m was calculated by three neighboring points of sounding. The relative change of the delay time of the signals N_i is evaluated. The average humidity content is calculated by the proposed formula. In accordance with the method the humidity distribution along the GPR profile in the second site of testing is also determined. Application of the method will allow to evaluate humidity of dispersed rocks remotely and its changes under the influence of various climatic and anthropogenic factors within the active layer of the permafrost zone rock mass.

Key words: GPR, rocks, permafrost, humidity evaluation.

Введение

В пределах деятельного слоя сезонных колебаний температуры в толще многолетнемерзлых пород наблюдаются интенсивные изменения их влажности и прочности. Эти параметры оказывают существенное влияние на строительство гидротехнических сооружений, таких как водоподпорные плотины и дражные котлованы, а также при разведке россыпей, залегающих в обводненных породах, для контроля мощности зоны промерзания [1]. Как известно, физикомеханические свойства мерзлых дисперсных горных пород зависят от влажности (льдистости) и температуры [2]. 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 за изменением влажности горных пород возможны в диапазоне 5–70 % [2], что позволит получать непрерывные данные на протяженных участках, проявляя в отдельных случаях их криогенное состояние [3–6].

В настоящее время для получения информации о строении горных пород и их гидрогеологическом состоянии применяется дорогостоящий разрушающий метод бурения. Однако стремительное развитие георадиолокации направлено к ее вовлечению в комплексное изучение геосред. Так, изучая их геологическое строение, попутно решается задача определения влажности [7–11].

Как отмечается в работе [12], в диапазоне метровых волн действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε' грунтов, а, следовательно, и скорость распространения электромагнитных волн v очень сильно зависят от их влажности W (где W – весовая влажность). Скорость и действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости связаны простым соотношением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; ε' – действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды; v – скорость распространения электромагнитных импульсов в среде [12, с.11, 16], которая определяется по данным о времени прохождения отраженной волны.

Согласно J. Huisman, оценка содержания воды в почве основана на времени задержки сигнала. Для его регистрации может быть использовано отражение от рассеивающих подповерхностных объектов либо отражение от геологи-

ческих границ, полученное посредством разности антенн [13].

Для перехода от значений W к значениям ε' существует целый ряд эмпирических формул [12].

Для песков и суглинков:

$$\varepsilon' = 3,2 + 1,1W. \quad (2)$$

Для осадочных пород в широком диапазоне изменения влажности 3–45%:

$$\varepsilon' = 3,03 + 9,2W_{ob} + 146W_{ob}^2 - 76,7W_{ob}^3, \quad (3)$$

где W_{ob} – объемная влажность.

Для сред с большой влажностью зависимость [12, с. 16–17]:

$$\varepsilon' = 720/(180 - W). \quad (4)$$

Наиболее часто используемая в зарубежной литературе зависимость между диэлектрической проницаемостью (ε') и объемным содержанием воды в почве (θ) была предложена в работе [14]:

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon' - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon'^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon'^3. \quad (5)$$

Она получена эмпирически для минеральных почв с различной структурой.

Более простое соотношение содержания воды в почве и диэлектрической проницаемости предложено в работах [15, 16]:

$$\theta = a\sqrt{\varepsilon'_b} - b, \quad (6)$$

где a и b – параметры калибровки; $\sqrt{\varepsilon'_b}$ – показатель преломления.

На практике приведенные соотношения имеют определенные погрешности из-за неконтролируемого изменения волновых характеристик по площади и глубине. Так, в работе [17] отмечается, что разброс ошибок определения значений W_{ob} по отношению к лабораторным данным составляет в относительной метрике 19 %. Для расчетов при определении влажности предложено двумерное уравнение линейной регрессии:

$$W_{ob} = -11 + 690V - 16,5G, \quad (7)$$

где W_{ob} – средневзвешенное значение суммарной объёмной влажности (льдистости) мерзлого массива грунтов в процентах до глубины 10–13 м; V (м/нс) и G (дБ/м) – средневзвешенные значения скорости и затухания по всему разрезу до глубины 10–13 м.

Оценка влажности дисперсных горных пород на основе данных георадиолокации

Для оценки влажности дисперсных горных пород Центральной Якутии авторами проведены экспериментальные исследования в лабораторных и натурных условиях. Во время оттайки георадиолокацией обследовались разнотемпературные замороженные образцы горного и реч-

ного песка. В результате выполненных работ предложен способ оценки влажности дисперсных горных пород по эмпирической формуле, основанной на определении относительного изменения времени задержки (N_t) георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в талом (t_T , нс) и мерзлом (t_M , нс) состоянии:

$$W=0,65N_t-a, \quad (8)$$

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

$$N_t = \frac{(t_T - t_M)}{t_T} 100\%, \quad (9)$$

где t_M – время задержки сигналов для пород в мерзлом состоянии; t_T – время задержки сигналов для пород в талом состоянии.

Суть способа сводится к тому, что скорость распространения радиоволн имеет свой максимум при полном промерзании горных пород. При этом вещественная часть диэлектрической проницаемости мерзлых рыхлых отложений Центральной Якутии принимает минимальное значение по всей толще пород и находится в пределах 4–9 [18]. Т.е. такое состояние условно можно принять как не содержащее влаги (нулевое содержание именно в жидкой фазе). В тот момент, когда породы начинают оттаивать и появляется вода – время задержки сигналов увеличивается. Следовательно, используя разницу между временем задержки сигналов в породах в талом и мерзлом состоянии, можно оценить их влажность. Применительно к данному способу разработана методика оценки средней весовой влажности рыхлых осадочных горных пород в диапазоне $7\% < W < 25\%$. Пределы определяемой влажности установлены при анализе лабораторных данных.

Материалы, по которым определена влажность пород, получены в результате апробации методики в натурных условиях на объектах: участок термометрических наблюдений и отрезок дороги «Вилуйский тракт» г. Якутска (Центральная Якутия). Методика включает следующие этапы:

- проведение георадиолокационных измерений массива горных пород в мерзлом и талом состоянии;
- контрольное бурение с взятием проб влажности для определения коэффициента a ;
- расчет относительного изменения времени задержки георадиолокационных сигналов по выражению (9);
- расчет средней весовой влажности пород по формуле (8) с учетом их вещественного состава по коэффициенту a ;

- визуализация результатов расчета влажности вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горного массива.

Как показано, для определения влажности методика подразумевает бурение в одной контрольной точке для последующего расчета коэффициента a . Этот пункт позволяет существенно повысить достоверность данных. Однако при невозможности бурения коэффициент a подбирается в зависимости от вещественного состава пород, численно из диапазона, который определен экспериментально (от 0,1 до 8). На данный момент лабораторные эксперименты выполнены лишь на двух образцах горных пород: горный песок ($a=0,1$) и речной песок ($a=6,8$), а апробация – на двух участках со смешанным составом ($a=1,1$ и $a=8$). В связи с этим бурение все же остается важным этапом ведения работ при определении влажности по предложенной методике на новых участках.

Результаты и обсуждение

На первом участке апробации георадиолокационные наблюдения выполнялись в окрестности термометрической скважины в период с мая по декабрь, что позволило охватить тепловой режим горных пород от положительных до отрицательных температур (от 11,61 до –5,74 °C). По участку исследований данные получены методикой профилирования георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-400. Температура определена по 6 датчикам (термокоса) в пределах глубин от 0,05 до 2,75 м. Пробы для определения весовой влажности (%) взяты из скважин контрольного бурения в июле: на глубине 1 м – скв. 1 – 7,87, скв. 2 – 6,98, на глубине 1,8 м – скв. 1 – 14,19, скв. 2 – 16,77.

При взятии проб установлено, что на отметке 1,7 м начинается резкое увлажнение пород, которое продолжается до глубины 1,9 м, до многолетней мерзлоты, являющейся в данном случае водоупором. В качестве опорной границы выбрано отражение от кровли влажного слоя, залегающего на многолетнемерзлых породах.

Для анализа и построения графиков выбран диапазон данных с 16 мая по 22 октября, соответствующих талым породам на глубине 0,95 м в окрестности скважины. Столь значительная глубина протайки в мае связана с тем, что на поверхности скважина не имеет термоизоляции и расположена на открытом высоком месте, подверженном интенсивной инсоляции. Следующий температурный датчик расположен на глубине 1,95 м и уже находится в граничной зоне многолетнемерзлых пород.

Значения данных выбраны с отрезка профиля в окрестности скв. 1. По трем соседним точкам

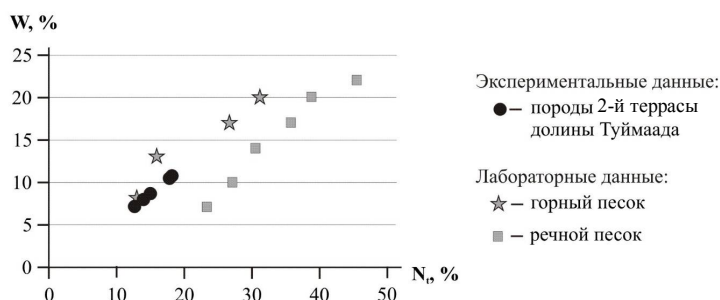


Рис. 1. Результаты применения методики оценки влажности горных пород в естественном залегании и в лабораторных условиях (N_i – относительное изменение времени задержки сигналов; W – влажность)

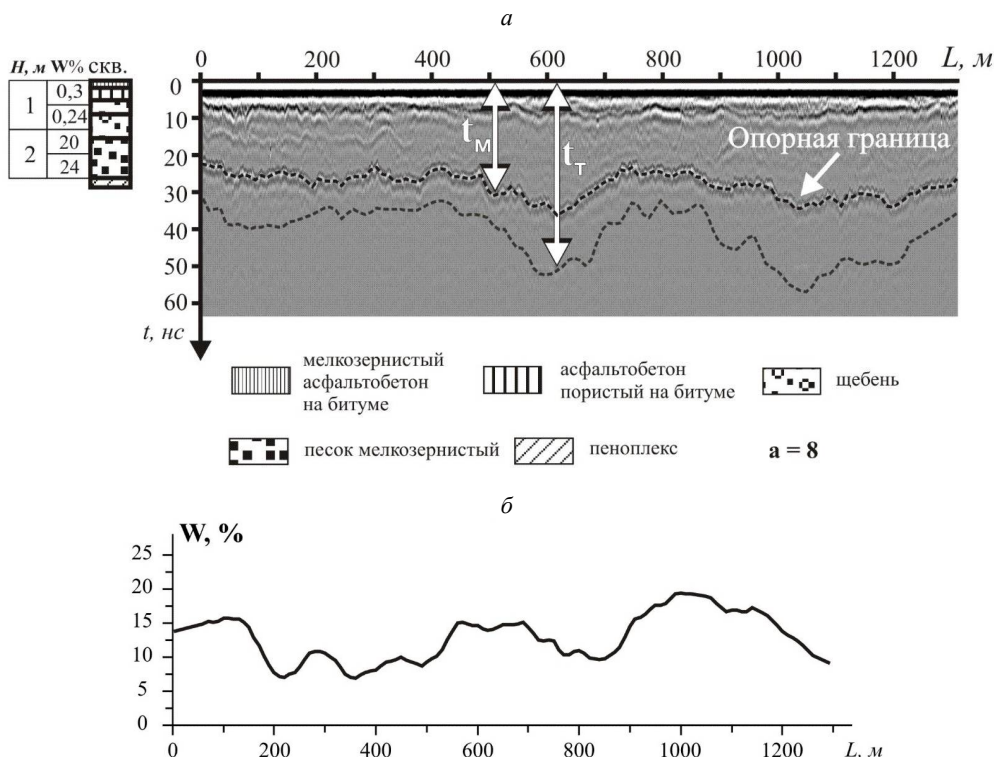


Рис. 2. Пример оценки влажности грунтов основания автомобильной дороги методом георадиолокации (Вилуйский тракт, г. Якутск):

а – выделение опорной границы в мерзлом (t_M) и талом (t_T) состоянии массива горных пород на георадиолокационном разрезе; б – результаты расчета средней весовой влажности (W) вдоль профиля георадиолокационного разреза исследуемого слоя горных пород

зондирования рассчитано среднее значение времени задержки сигнала от опорной границы на глубине 1,7 м. Оценено относительное изменение времени задержки сигналов N_i по формуле (9). Далее, на основе данных по влажности при контрольном бурении определяется коэффициент a (в данном случае $a=1,1$), что позволяет вычислить среднюю весовую влажность для нашего случая по обобщенной формуле (8). Результаты расчетов по объекту представлены на рис. 1 совместно с данными лабораторных исследований по горному ($a=0,1$) и речному ($a=6,8$) песку.

Второй участок апробации предложенной методики оценки влажности пород расположен на

отрезке дороги «Вилуйский тракт» протяженностью 1,3 км. Данные георадиолокации получены в период полного промерзания пород и в период оттайки (рис. 2, а). Распределение влажности вдоль профиля георадиолокационного разреза в изучаемом слое горных пород определяется по формуле (8) во всех точках зондирования с учетом установленных закономерностей (рис. 2, б).

Заключение

Как показывает опыт инженерно-геологических изысканий, развитие неразрушающего контроля и определения свойств горных пород весьма актуально и востребовано в различных

промышленных и сельскохозяйственных отраслях. Применение предложенной методики возможно для дистанционной оценки влажности дисперсных горных пород, грунтовых оснований инженерно-технических сооружений. По результатам апробации установлено, что использование в качестве опорной отражающей границы слоя сезонного протаивания в толще многолетней мерзлоты обеспечивает высококонтрастные сигналы на радарограмме. При этом методика позволяет вести наблюдения за изменением влажности в породах под воздействием различных природно-климатических и техногенных факторов в пределах деятельного слоя горного массива криолитозоны.

Литература

1. Пути повышения эффективности и экологической безопасности открытой добычи твердых полезных ископаемых / [В.И. Ческидов и др.]; отв. ред. В.Н. Опарин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела и [др.]. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 254 с.
2. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с.
3. Федоров В.Н., Федорова Л.Л. Электродинамическое моделирование структурных особенностей массива горных пород россыпных месторождений при георадиолокации // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/2. С. 48–51.
4. 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 // Горн. информ.-аналит. бюл. 2015. № 7. Спец. вып. 30: Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр. С. 325–332.
5. Федорова Л.Л., Федоров М.П., Стручков А.С., Саввин Д.В. Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в подповерхностных грунтах // Горн. информ.-аналит. бюл. 2016. № 8. Спец. вып. 21: Проблемы комплексного освоения георесурсов. С. 154–163.
6. 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. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7572624/> (accessed: 18.01.2017 г.).
7. Lunt I.A., Hubbard S.S. and Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data // Journal of Hydrology. 2005. V. 307, Issues 1–4. P. 254–269. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.014.
8. Laurens S., Balayssac J.P., Rhazi J., Klysz G. and Arlignie G. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: Experimental study and direct modeling // Materials and Structures. 2005. V. 38, no. 283, P. 827–832.
9. Lambot S., Antoine M., van den Bosch I., Slob E.C. and Vanclooster M. Electromagnetic inversion of GPR signals and subsequent hydrodynamic inversion to estimate effective vadose zone hydraulic properties // Vadose Zone Journal. 2004. V. 3, no. 4. P. 1072–1081. DOI:10.2136/vzj2004.1072.
10. Lambot S., Rhebergen J., van den Bosch I., Slob E.C. and Vanclooster M. Measuring the soil water content profile of a sandy soil with an off-ground monostatic ground penetrating radar // Vadose Zone Journal. 2004. V. 3, no. 4. P. 1063–1071.
11. Loeffler O. and Bano M. Ground penetrating radar measurements in a controlled vadose zone: Influence of the water content // Vadose Zone Journal. 2004. V. 3, no. 4. P. 1082–1092.
12. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
13. Huisman J., Sperl C., Bouten W. and Verstraten J. Soil water content measurements at different scales: Accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar // Journal of Hydrology. 2001. No. 245, Issues 1–4. P. 48–58.
14. Topp G.C., Davis J.L. and Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // Water Resour. Res. 1980. No. 16. P. 574–582.
15. Ledieu J., P. De Ridder, P. De Clerck and Dautrebande S. A method of measuring soil moisture by time domain reflectometry // J. Hydrol. (Amsterdam). 1986. No. 88, Issues 3–4. P. 319–328.
16. Herkelrath W.N., Hamburg S.P. and Murphy F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry // Water Resour. Res. 1991. No. 27, P. 857–864.
17. Нерадовский Л.Г. Опыт применения георадиолокации на Северо-Востоке Якутии // Инженерные изыскания. 2013. №2. С. 26–37.
18. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационные исследования многолетне-мерзлых пород. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. С. 26–41.

Поступила в редакцию 20.07.2017