

## ОПЫТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ДИНАМИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ НА АКВАТОРИИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

П. А. Рязанцев<sup>1,2</sup>, А. И. Родионов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии КарНЦ РАН

<sup>2</sup>Петрозаводский государственный университет

Поступила в редакцию 13 января 2015 г.

**Аннотация:** в статье рассматривается опыт применения георадиолокации на акватории Онежского озера. Исследованы особенности обработки и интерпретации полученных данных. Установлено геологическое строение донных отложений в пределах изучаемого участка. Показаны возможности сопоставления георадарограмм и кривых динамических зондирований с целью повышения достоверности конечных результатов.

**Ключевые слова:** георадиолокация, динамические зондирования, донные отложения, инженерно-геологические изыскания, акватория.

### THE PRACTICE OF GROUND PENETRATING RADAR AND DYNAMIC PROBING IN GEOLOGICAL ENGINEERING SURVEY OF THE ONEGA LAKE WATER AREA

**Abstract:** the practice of ground penetrating radar in the water area of Onega Lake is described. The features of processing and interpretation of the obtained data are investigated. The geological structure of sediments within the study area is founded. The comparing possibility GPR image and dynamic probing curves to improve the reliability of final results are presented.

**Key words:** ground penetrating radar, dynamic probing, sediments, geological engineering survey, water area.

#### Введение

Использование дистанционных методов при инженерно-геологических изысканиях является эффективным способом оценки свойств горных пород. На сегодняшний день всё большую сферу применения находят методы геофизики, такие как георадиолокационные зондирования, которые, как показывают исследования различных авторов [1, 2, 3], позволяют получить широкий спектр информации о строении геологической среды, исходя из изменения её диэлектрической проницаемости. Следует отметить, что особое значение георадиолокация приобретает при исследовании грунтов в сложных условиях, в частности при обследовании донных отложениях на акваториях водоёмов.

В ряде практических работ [4, 5] показано, что на основе анализа волновой картины можно идентифицировать границы рыхлых отложений и коренных пород в обводнённой среде с достаточной степенью достоверности. При этом следует понимать, что инженерно-геологические изыскания требуют определения в первую очередь физико-механических показателей грунтов (таких как несущие свойства), от которых получаемый георадарный образ донных отложений может сильно отличаться из-за разной физической природы фиксируемых показателей. На диэлектрическую проницаемость сильно влияет состав и обводнённость пород, тогда как физико-механические свойства определяются не только составом пород, но и крупностью, глинистостью и т.д. Поэтому целью

работы является сопоставление результатов георадиолокации и динамических зондирований в условиях обводнённой среды для определения мощности слабонесущих грунтов.

#### Описание участка работ и методики наблюдений

Рассматриваемый участок расположен на акватории Повенецкого залива Онежского озера и занимает область размером 100 x 300 м, где проводятся инженерно-геологические изыскания сопровождающие строительство отгрузочного терминала. В пределах указанной площади выполнен ряд профилей георадиолокации (рис. 1). Съёмка осуществлялась георадаром «ОКО-2» с антенным блоком АБ-150М, наводным способом, путём буксировки прибора в резиновой лодке, согласно методике, предложенной в [6]. Привязка профилей осуществлялась с помощью GPS навигатора. В задачи георадиолокации входило определение структуры и мощности рыхлых отложений, а также выделение глубины залегания плотных грунтов. По геологическим данным в исследуемой части Онежского озера типовой разрез донных отложений имеет следующую структуру: верхний слой – илы и сапропели мощностью порядка 2 м, далее суглинки и глины мощностью порядка 3 м, их подстилают консолидированные песчано-гравийные отложения [7].

Кроме георадиолокации на участке выполнены динамические зондирования (ДЗ), положение которых привязано к профилям. ДЗ как способ исследования грунтов (согласно ГОСТу 19912-2012) основывается

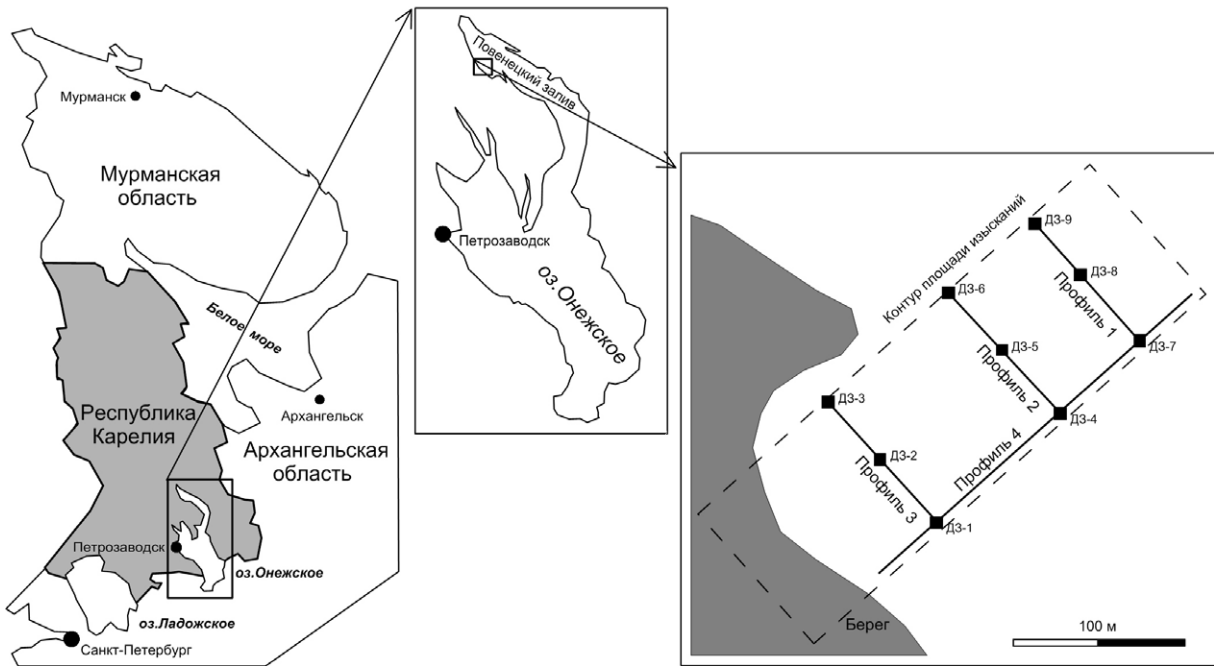


Рис. 1. Схема расположения участка работ.

на выявлении сопротивления грунта, с помощью внедрения в него зонда, испытывающего динамическую нагрузку. ДЗ выполняется путем последовательного забивания свободно падающего молота зонда в грунт, одновременно ведётся замер глубины проникновения зонда после нанесения нескольких ударов. На основе получаемых показателей рассчитывается условное динамическое сопротивление ( $P_d$ ) в безразмерных единицах. Так, например, для проникновения на глубину 0,1 м в ил требуется 1–3 удара при этом  $P_d = 0,3–0,5$ , в суглинки 3–7 м  $P_d = 0,8–2$ , а в плотный песок 20 ударов и более  $P_d = 4–10$ . В рамках комплекса

инженерно-геологических изысканий, ДЗ позволяет получить свойства грунта, такие как плотностные и прочностные характеристики, состав, а также глубину залегания коренных отложений. Результат зондирования выносят на график, в виде непрерывной ступенчатой кривой, на которой наглядно видны изменения динамического сопротивления на определенной глубине.

Выполненная съёмка позволяет характеризовать изменение донных отложений в пределах исследуемого участка на глубину порядка 9 м относительно поверхности воды (рис. 2).

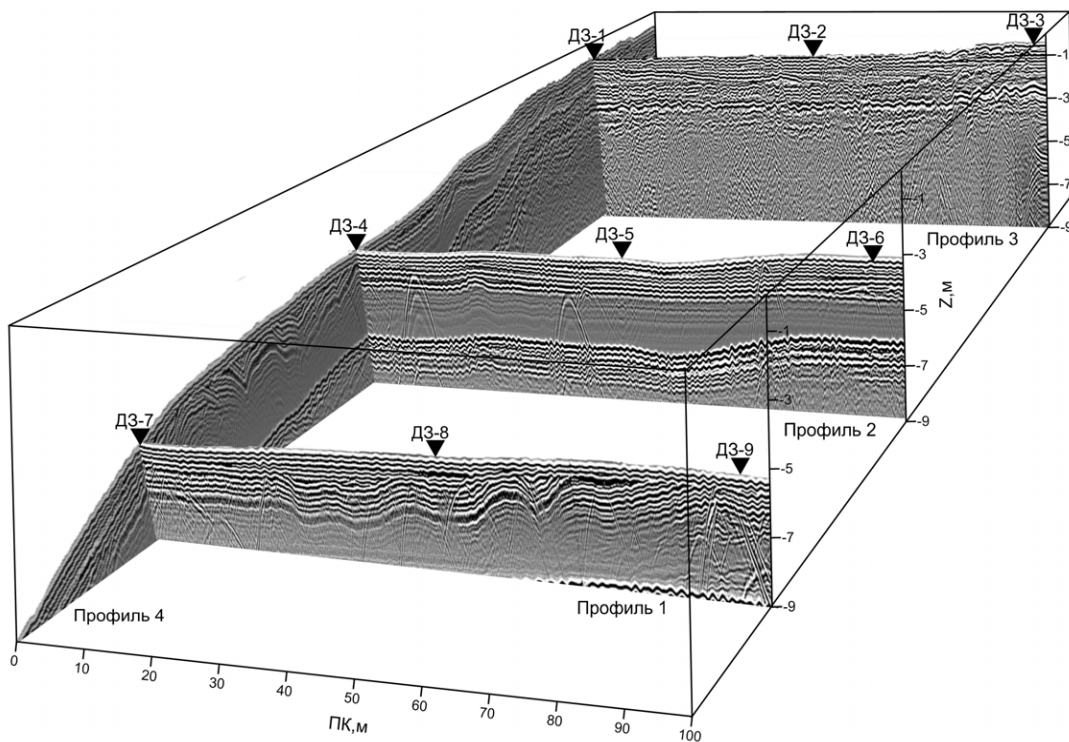


Рис. 2. Объёмная схема расположения профилей георадиолокации и точек ДЗ.

### Результаты исследований

По итогам выполненных полевых наблюдений получен ряд георадарных разрезов, на которых отчётливо прослеживаются оси синфазности, характеризующие границы раздела между различными средами. Следует отметить, что метод георадиолокации рассматривается как высокодетальный, но относительно мало контрастный [2], причём высокая обводненность усугубляет эффект сглаживания. Вследствие чего выделяемые по волновой картине границы соответствуют только резким изменениям диэлектрических свойств. Первая из таких границ относится к разделу вода-дно, вторая илы-суглинки. В свою очередь определение переходных литотипов представляет собой достаточно нетривиальную задачу. В процессе обработки и интерпретации георадарограмм возник ряд осложняющих факторов и эффектов, влияющих на получение качественных результатов.

К наиболее существенным из них относятся:

1. Верхний водный слой – имеет низкое удельное электрическое сопротивление, из-за чего снижается глубинность метода;
2. Кратные и неполнократные волны-помехи – из-за наличия резких отражающих границ образуется набор подобных волн, затрудняющих идентификацию полезного сигнала;
3. Слой суглинков – присутствие такого слоя в разрезе приводит к быстрому затуханию электромагнитной волны, что осложняет выделение слоёв залегающих ниже.

Рассмотрим результаты георадиолокации на примере профиля 4 (рис. 3). На полученной георадарограмме достаточно уверенно выделяются четыре отдельных комплекса, имеющих характерное распределение волнового поля (рис. 3А). Первый комплекс соответствует интервалу переслаивания илов, алевроитов и ленточных глин, что выражается волнистой конфигурацией протяжённых осей синфазности. Второй комплекс выделяется по отсутствию явных осей синфазности и общим затуханием сигнала, что позво-

ляет сопоставить его с толщей суглинков с прослоями ленточных глин. Третий комплекс отвечает подстилающим породам, представленным консолидированной толщей песков с галечником, вследствие чего явные границы не наблюдаются и волновая картина имеет «хаотический» тип поведения. На радарограмме также выделен ряд отражающих границ: вода-дно (при этом хорошо прослеживается изменение морфологии дна), ил-суглинок, суглинок-песок, дополнительно прослеживается дополнительный слой в толще суглинков, который соответствует литологической разности неустановленной природы. Полученная георадарограмма позволяет сделать вывод о том, что мощность рыхлых отложений постепенно нарастает при удалении от берега. При этом слои залегают согласно, без срывов и резких изменений.

Дополнительно, для определения границ исследовались амплитуды отражённых волн (рис. 3Б), которые удобно наблюдать на георадарограмме мгновенных амплитуд [8], полученной при помощи преобразования Гильберта. Такая процедура позволяет рассчитать огибающую исходного сигнала, работа с которой служит средством для уточнения информации, содержащейся в исходном сигнале, и упрощения интерпретации данных. Целесообразно использовать данную операцию при ситуации отсутствия в разрезе четких отражающих границ, неровных и плохо прослеживаемых толщ, а также в случае наличия зон повышенной влажности грунтов и проводящих слоев. Кроме того, преобразование Гильберта позволяет выделить участки, не отличающиеся по амплитуде или частотному спектру, но имеющие заметный фазовый сдвиг, в сравнении с близлежащими областями [1].

Следует отметить, что обработка данных георадиолокации без привлечения дополнительной информации может привести к значительным ошибкам [1], поэтому совместно с георадарной съёмкой выполнялись динамические зондирования. Для удобства комплексной интерпретации использовались отдельные трассы, для которых рассчитана огибающая и выпол-

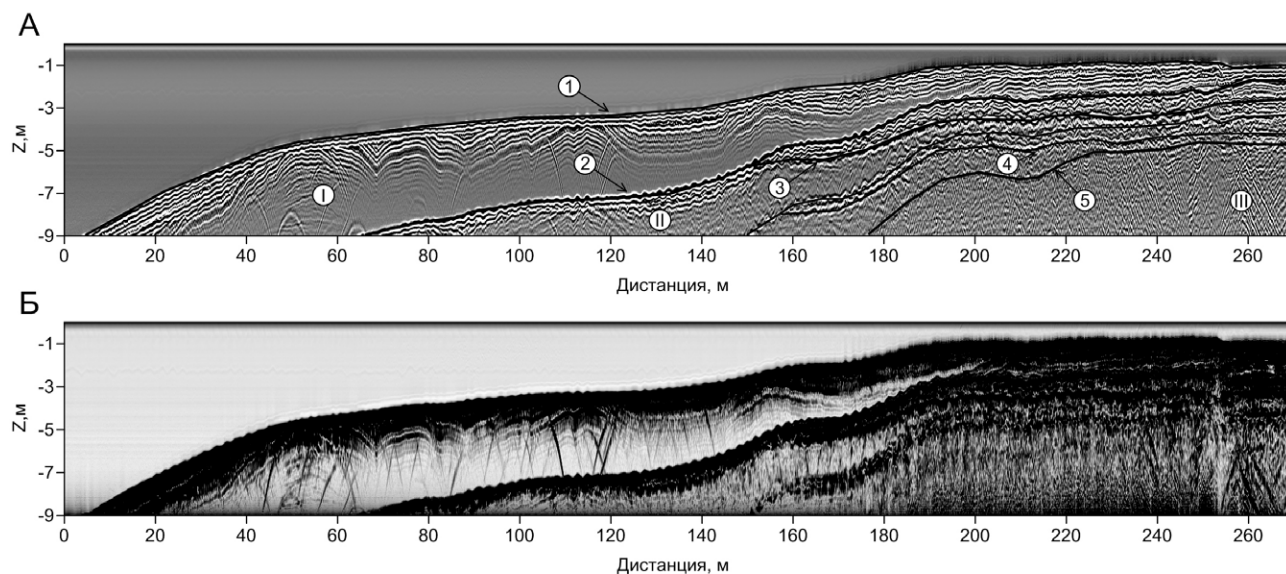


Рис. 3. Георадарограммы по профилю 4. А: обработанная георадарограмма с геологической интерпретацией, где: I – первый георадарный комплекс (илы); II – второй георадарный комплекс (суглинки); III – третий георадарный комплекс (пески); 1 – граница вода-дно; 2 – граница илы-суглинки; 3 – граница неустановленного литотипа; 4 – кратные отражения от границы 2 и 3; 5 – граница суглинки-пески. Б: Георадарограмма мгновенных амплитуд.

ненные на этом же пикете ДЗ. В общем виде полученные кривые по форме обладают слабой корреляционной связью. Кривая ДЗ имеет сложный, дифференцированный вид по сравнению с графиком огибающей георадарного сигнала. Это связано с тем, что исследуемая геологическая толща зачастую имеет слоистую структуру, включающую прослои пород с различными прочностными свойствами. В волновом поле такие отдельные разности не выделяются из-за слабой диэлектрической контрастности и недостаточной разрешающей способности используемого антенного блока.

Вследствие чего целесообразнее проводить сопоставление в рамках интегрального подхода, выделяя некоторые осреднённые интервалы. При этом, на кривой ДЗ такие интервалы следует определять по уровню  $R_d$ , а на огибающей выделять экстремумы их ограничивающие. Такой подход позволяет локализовать слои, отличающиеся как по изменению диэлектриче-

ских, так и физико-механических свойств, а также построить сводную литологическую колонку, описывающую существующую геологическую обстановку.

Результаты сопоставления по одному из профилей показаны на рисунке 4. Как видно, наиболее уверенно выделяется илистый слой мощностью от 1,5 до 2,5 м, характеризующийся высокими амплитудами георадарного сигнала и малыми значениями  $R_d$ . Следующий слой в первом приближении следует рассматривать как суглинки, что видно по относительно низким показателям  $R_d$  и сглаженной форме мгновенных амплитуд, с мощностью в пределах 4–5 м. При этом можно констатировать наличие в нём включений песка и галечника. Последний слой выделяется по резкому скачку показателя  $R_d$ , тогда как по георадарным данным он выделяется слабо, за счёт небольшого пика. Глубина залегания его верхней кромки составляет 5–6 м относительно уровня дна.

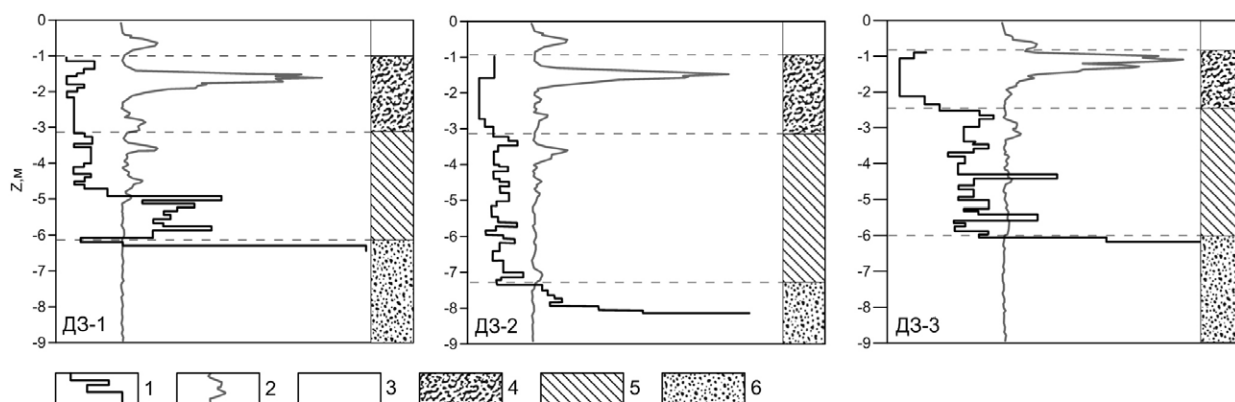


Рис. 4. Сопоставление огибающей георадиолокационного сигнала, сегментированной кривой ДЗ и литологической колонки по профилю 3, где: 1 – кривая ДЗ; 2 – огибающая; 3 – вода; 4 – илы; 5 – суглинки; 6 – песчано-гравийные (моренные) отложения.

### Заключение

В результате выполненных инженерно-геофизических изысканий исследован участок строительства погрузочного причала на Онежском озере. Георадарная съёмка позволила выделить различные литотипы донных отложений, а также определить их морфологию. Была установлена мощность рыхлых отложений, которые рассматриваются как слабонесущие грунты. Комплексная интерпретация данных георадиолокации и динамических зондирований позволила повысить общее качество и достоверность работ. Наряду с этим требуют решения новые задачи по разработке способа сопоставления этих методов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
2. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации. Учебное пособие / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 196 с.

3. Daniels, D. J. Ground penetrating radar / D. J. Daniels. – Cornwall: MPG Books Limited, 2004. – 722 p.
4. Омеляненко, А. В. Особенности георадиолокации обводнённых сред / А. В. Омеляненко, И. И. Христофоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 9. – С. 127–132.
5. Аузин, А. А. Инженерно-геофизические исследования на пресноводных акваториях / А. А. Аузин, С. А. Зацепин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – № 2. – С. 102–109.
6. Методические рекомендации по обследованию водёмов и болот с использованием георадара «ОКО-2». – М.: ООО «Логические системы», 2007. – 29 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.logsyst.ru>
7. Демидов, И. Н. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье / И. Н. Демидов // Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2004. – Вып. 7. – С. 207–218.
8. Ермаков, А. П. Георадиолокационные исследования верхней части разреза при проектировании сейсмических работ в зимнее время / А. П. Ермаков, А. В. Старовойтов, М. Л. Владов // Технологии сейсморазведки. – 2012. – № 2. – С. 89–97.

ФГБУН Институт геологии Карельского научного центра РАН. Рязанцев П. А., младший научный сотрудник  
E-mail: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru); Тел.: +7(906)207-44-56

Петрозаводский государственный университет  
Родионов А. И., студент 5 курса горно-геол. факультета.  
E-mail: [fabian4695@gmail.com](mailto:fabian4695@gmail.com); Тел.: +7(911)415-83-62

Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Ryzantsev P. A., scientific worker  
E-mail: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru); Тел.: +7(906)207-44-56

Petrozavodsk State University  
Rodionov A. I., fifth-year student of Mining and Geological Faculty. E-mail: [fabian4695@gmail.com](mailto:fabian4695@gmail.com); Тел.: +7(911)415-83-62