

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НА ПРЕСНОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ**

А. А. Аузин, С. А. Зацепин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 23 января 2014 г.

Аннотация: *опыт проведения инженерных изысканий на акваториях подтверждает высокий информационный потенциал геофизических методов. При этом наибольшую универсальность и эффективность демонстрируют методы электроразведки, прежде всего – георадиолокационное зондирование.*

Ключевые слова: *инженерные изыскания, электроразведка, георадиолокационное зондирование.*

Abstract: *experience of carrying out of engineering researches about attraction of geophysical methods confirms their high informations potential. The greatest universality and efficiency of electrical exploration, first of all – investigations with Ground Penetrating Radar.*

Key words: *engineering researches, electrical exploration, investigations with Ground Penetrating Radar.*

К настоящему времени геофизические методы исследований уверенно заняли существенную часть рынка услуг в области инженерных изысканий. Однако их возможности нельзя считать до конца исчерпанными, а сферу применения окончательно сформировавшейся.

Важнейшим и принципиальным преимуществом геофизических методов в целом является то, что исключительное разнообразие их физических основ и аппаратурно-методических возможностей реализации позволяет организовать разностороннее изучение объекта исследований и сформировать информативный комплекс методов для решения большинства стоящих перед инженерно-геологическими изысканиями задач. При этом нередко оказывается, что возможность решения многих проблем, связанных с инженерными изысканиями, именно геофизическими методами не имеет альтернативы, в частности при сложных условиях проведения работ (заболоченность, изрезанный рельеф, ограниченное пространство и пр.). По мнению многих специалистов [1, 2], без проведения геофизических исследований невозможно полноценное изучение инженерно-геологических условий строительства или реконструкции сооружений на акваториях морей, озер и рек.

Одним из наиболее эффективных инструментов, привлекаемых для решения самого широкого круга инженерных задач, является электроразведка. Гарантом успешного применения электроразведки являет-

ся характерная для объектов исследований как искусственного, так и естественного происхождения значительная дифференцированность электромагнитных параметров слагающих их сред (прежде всего – удельного электрического сопротивления – ρ и относительной диэлектрической проницаемости – ϵ). Поскольку считается, что у отложений, слагающих верхнюю часть разреза, магнитная восприимчивость очень невысока ($\mu \approx 1$), то возможность влияния этого параметра на распространение электромагнитного излучения, как правило, в расчет не принимается. Однако следует заметить, что неучет возможного присутствия в теле многих искусственных инженерных сооружений, таких как дамбы хвостохранилищ и отстойников на горнодобывающих объектах, поставляющих сырье предприятиям черной металлургии и др., участков с высокой магнитной восприимчивостью, может привести к существенным ошибкам в интерпретации материалов некоторых методов электроразведки, в частности георадиолокации.

Примером успешного применения электроразведки при изысканиях на пресноводных акваториях могут служить работы, выполнявшиеся с целью инженерно-геологической оценки участка, находящегося в непосредственной близости от реконструируемого моста через р. Ока в одном из областных центров России. Основным назначением работ было определение несущей способности грунтов.

Кроме бурения, сопровождавшегося отбором образцов для лабораторного определения их инженерно-геологических характеристик, и статического зондирования, комплекс изысканий включал в себя электро-

разведку методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и георадиолокационное зондирование. При этом геофизические исследования необходимо было выполнить прежде всего на акватории реки, где организация бурения чрезвычайно затруднительна. Схема проведения исследований показана на рис. 1.

Для проведения ВЭЗ на поверхностях водоемов была разработана и изготовлена специализированная электроразведочная плавучая коса, которая обеспе-

чивала возможность проведения электроразведочной симметричной 4-электродной установкой с разносами $AB/2$ от 2,0 до 15,0 м при $MN/2 = 1$ м. Общая длина косы составляет несколько более 30 м. Эта же коса может использоваться и при проведении ВЭЗ 3-электродной установкой с $AB/2 = 6,0; 10,0; 15,0; 21,0$ и 27,0 м при $MN/2 = 3$ м, что обеспечивает достаточную глубинность исследований. Для придания плавучести коса оборудуется съемными поплавками.

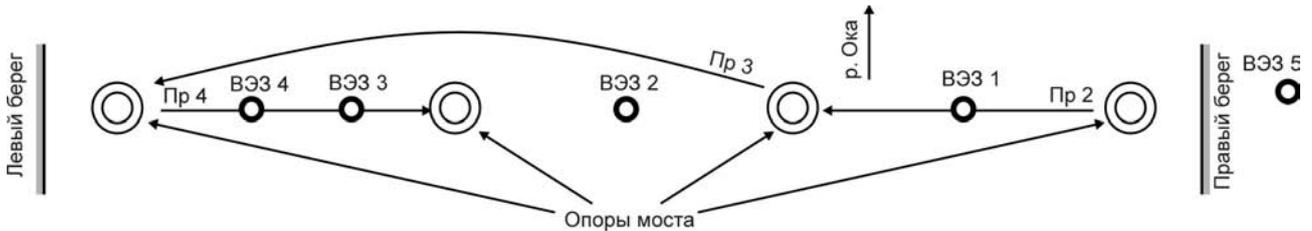


Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований. Показаны положения точек ВЭЗ и георадиолокационных профилей

Дополнительную мобильность косе придает то, что коммутатор с розетками для подключения питающих и измерительных устройств расположен на одном из ее концов (другой конец косы фиксируется в необходимом месте любым подходящим способом), что позволяет проводить исследования с помощью только одного плавсредства, а не 3, как это предусматривается в частности [3].

Материалы параметрического ВЭЗ (ВЭЗ 5 на рис. 1), выполненного вблизи буровой скважины, свидетельствуют, что изучаемый разрез слабо дифференцирован по удельному электрическому сопротивлению (УЭС). В частности, плитчатые, глинистые, влагонасыщенные известняки девонского возраста по УЭС слабо отличаются от перекрывающих их супглинков и супесей (кривая ВЭЗ 5, рис. 2).

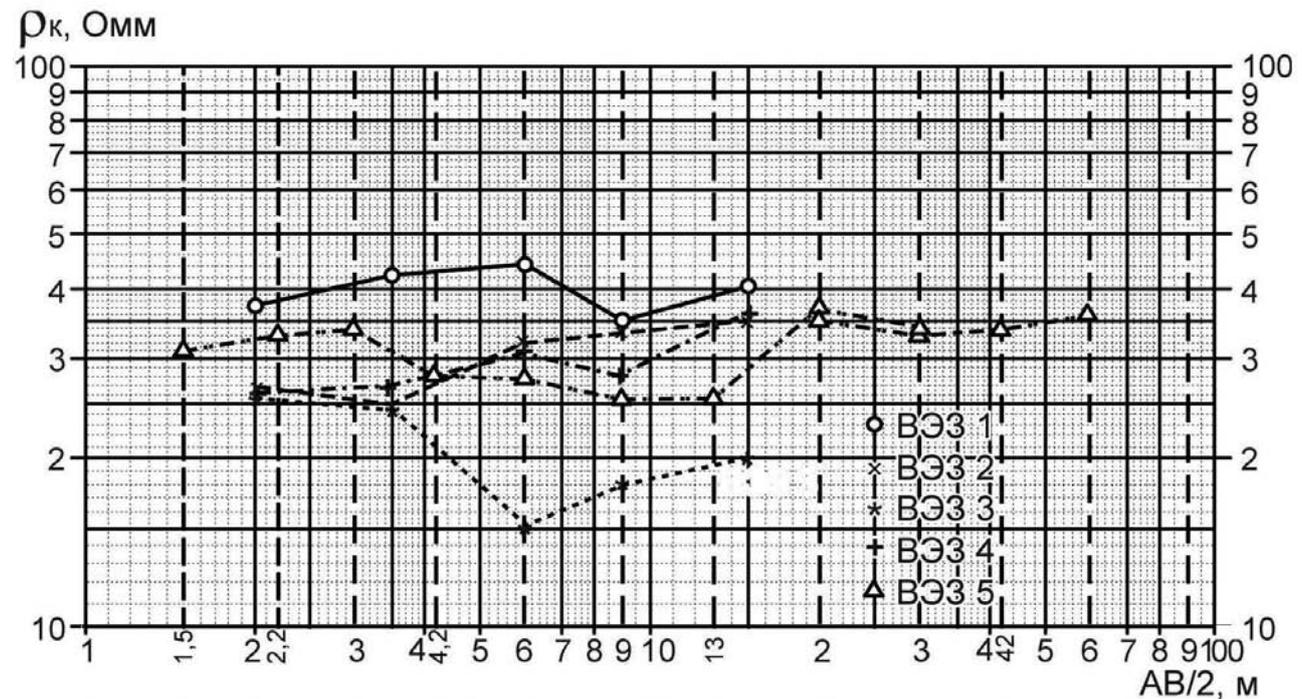


Рис. 2. Кривые ВЭЗ по профилю наблюдений

Материалы ВЭЗ, выполненного с поверхности реки, также представлены на рис. 2. Кривые аквального зондирования (ВЭЗ 1 – ВЭЗ 4) практически однотипны, что свидетельствует о выдержанности геологического строения разреза на исследованной площади. Исключение составляют данные, полученные на точке зондирования ВЭЗ 3, где, начиная с разносов $AB/2 = 6$ м и более, значения кажущихся удельных электрических сопротивлений оказались существенно заниженными, что может свидетельствовать о развитии процессов карстования вблизи соответствующих опор моста. Однако данные георадиолокации указывают на то, что понижение кажущегося УЭС разреза обусловлено присутствием в толще воды вблизи точки ВЭЗ 3 металлической конструкции значительных размеров (рис. 3), а не наличием геоэлектрической неоднородности под речным дном.

Георадиолокационное зондирование выполнялось с целью определения профиля дна реки и выявления в толще воды затопленных объектов, присутствие которых могло осложнить интерпретацию данных ВЭЗ. Оно было проведено на 3 профилях с использованием весельной надувной резиновой лодки. При этом применялся георадар Zond-12e в комплекте с экранированной антенной частотой 500 МГц, которая в процессе проведения исследований буксировалась за основным плавсредством на отдельном плотике. Применение антенны данного типа обеспечивает достаточную помехоустойчивость и требуемую глубинность исследований при сохранении приемлемой разрешающей способности. Исследования были выполнены в режиме непрерывного зондирования, при котором антенна радара в процессе измерений постоянно перемещается по поверхности воды. Такая методика позволяет наиболее надежно выявлять вещественные и физические неоднородности в зондируемых средах. Привязка к местности осуществлялась посредством GPS.

Относительно применимости георадиолокации с поверхности акваторий необходимо заметить, что поскольку информативная составляющая волнового поля, регистрируемого в процессе георадиолокационного обследования природных объектов, формируется в результате отражений электромагнитного излучения от контактов сред, контрастных по диэлектрической проницаемости, то этот метод отличается высокой эффективностью при изучении морфологии дна водоемов. С другой стороны, присутствие в разрезе столь контрастной отражающей границы (ϵ воды принимается равным 81, а ϵ пород верхней части разреза не превышает 10–12 и увеличивается до 20–25 с ростом их влажности) может не позволить исследовать геологическое строение коренных отложений, которые подстилают дно.

Один из полученных в процессе интерпретации результатов исследований георадиолокационных разрезов приведен на рис. 3 (шкала глубин выставлена в соответствии с диэлектрической проницаемостью воды – 81). Данные зондирования свидетельствуют, что дно р. Ока вблизи моста имеет достаточно сложный рельеф – глубины изменяются в пределах от 1,5 до 3,5 м. Кроме того, на дне реки выявлено несколько металлических конструкций, в том числе и значительных размеров. Интересно то, что некоторые фрагменты конструкций приподняты и находятся в толще воды, а не лежат на дне.

Результаты интерпретации материалов вертикального электрического зондирования, выполненной с учетом данных георадиолокации, свидетельствуют об отсутствии под дном реки каких-либо аномальных зон, которые могли быть обусловлены процессами карстования. Необходимо отметить, что без привлечения данных георадиолокационного обследования акватории реки интерпретация результатов ВЭЗ могла быть выполнена ошибочно.

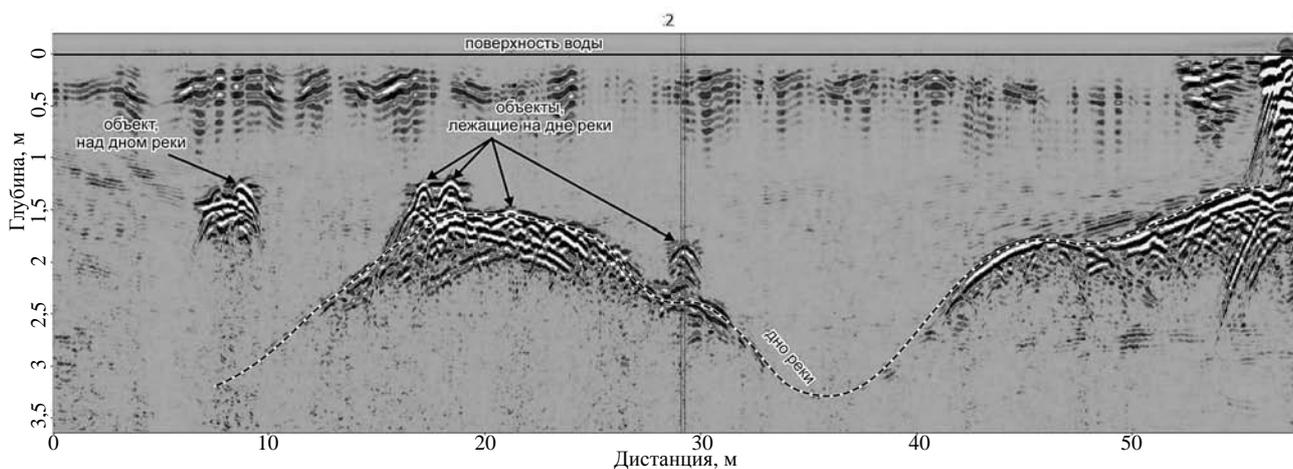


Рис. 3. Георадиолокационный разрез по профилю 3 (антенна 500 МГц)

В качестве другого примера рассмотрим результаты георадиолокационного обследования р. Дон и примыкающего к реке озера. Исследования, проводившиеся вблизи г. Лиски (Воронежская обл.), имели целью определение рельефа дна водоемов и оценки мощности придонных иловых отложений. Такого рода информация была необходима для проектирования строительства водовода, который должен был пересечь обе водные преграды.

Уже на начальном этапе работ, выполнявшихся с экранированной антенной частотой 500 МГц и открытой дипольной частотой 150 МГц, выяснилось, что достигнуть необходимой глубинности исследований при требуемой детальности получаемых материалов удастся лишь при использовании антенны 500 МГц. Радарограммы, полученные с антенной 150 МГц, отличал очень высокий уровень помех, не позволивший реализовать ее потенциально более высокую глубинность. Поэтому основной объем ра-

бот был выполнен с более помехоустойчивой экранированной антенной 500 МГц. В процессе исследований антенна располагалась на дне надувной резиновой лодки, которая перемещалась вдоль капронового каната, натягивавшегося через водные преграды.

Данные георадиолокации озера (рис. 4а) позволяют уверенно определить глубины залегания и морфологию поверхностей рыхлых (иловых) придонных и коренных (материковых) отложений. Глубина залегания иловых отложений в наиболее глубокой части водоема изменяется в пределах 3,6–4,3 м. Шкала глубин на георадиолокационном разрезе выставлена исходя из диэлектрической проницаемости воды ($\epsilon = 81$).

При определении толщины иловых отложений необходимо учитывать, что поскольку скорость распространения электромагнитных волн в илах более чем в два раза превышает таковую в воде, то их фактическая мощность будет как минимум вдвое превы-

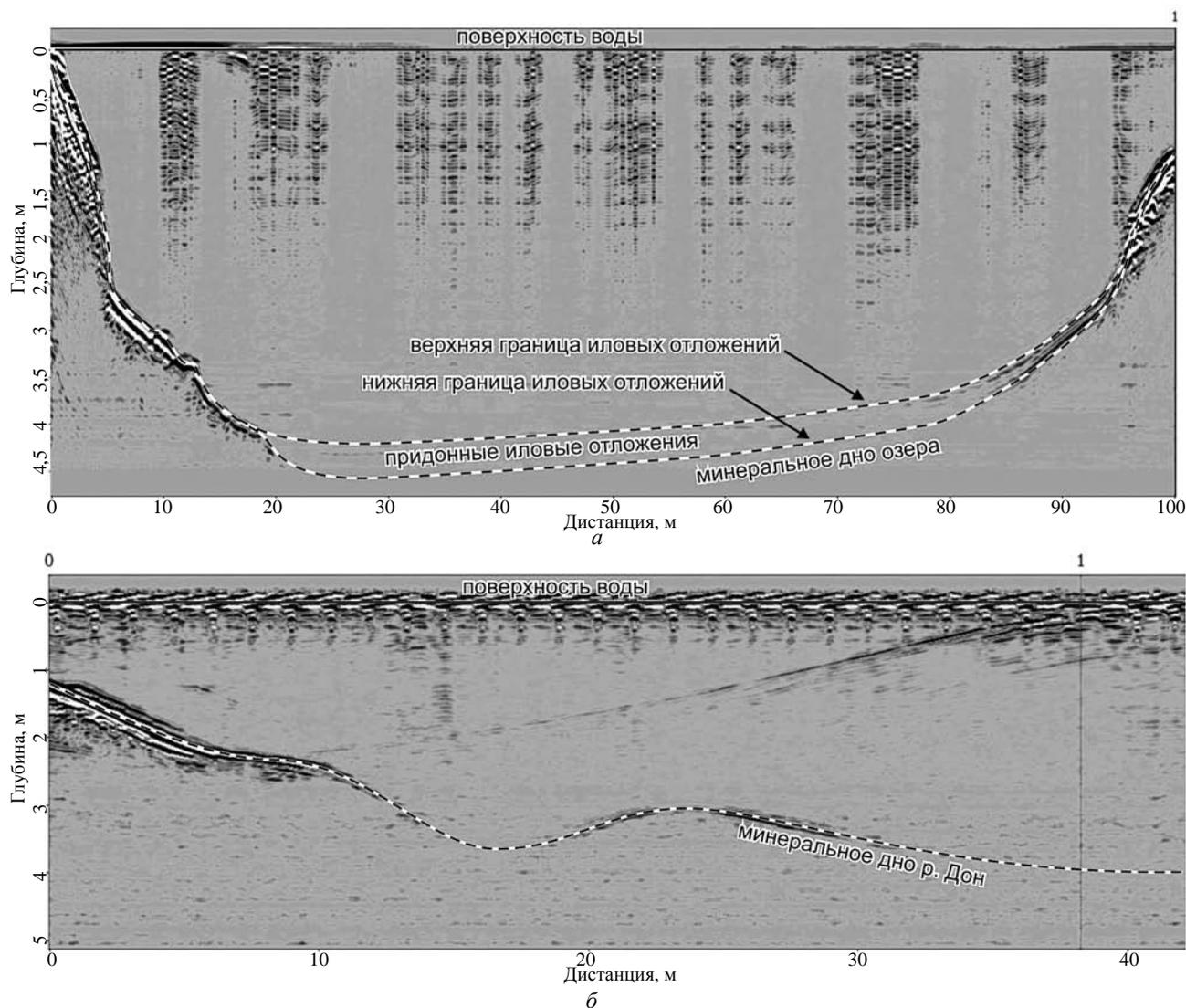


Рис. 4. Георадиолокационные разрезы по профилю, пролегающему по поверхности озера (а), и профилю, проложенному поперек р. Дон (б). Антенна 500 МГц

шать мощность, видимую на георадиолокационном разрезе на рис. 4а. Таким образом, в наиболее глубокой части озера фактическая мощность иловых отложений может достигать величины порядка 1,5 м.

По результатам георадиолокационного обследования дна р. Дон можно сделать заключение об отсутствии иловых отложений на исследованном участке (рис. 4б). Глубины залегания материковых отложений в пределах наиболее заглубленной, судоходной части дна реки составляют 3,2–4,3 м. При этом на некотором удалении от берега наблюдаются локальные, достаточно плавные поднятия дна высотой до 0,5–0,6 м, которые, однако, не должны вызвать критичных деформаций водовода.

Таким образом, результаты георадиолокационного обследования водоемов свидетельствуют, что на дне озера, основным источником питания которого является поверхностный сток с окружающих его склонов, скопилось до 1,5 м иловых отложений, ко-

торые на дне р. Дон, имеющей на данном участке быстрое течение, полностью отсутствуют. Вместе с тем со стороны северного берега реки имеются относительно плавные, локальные поднятия дна, которые не способны привести к критическим деформациям проектируемого водовода. В пределах проектируемой трассы на дне водоемов отсутствуют затопленные объекты, наличие которых могло бы осложнить строительство водовода.

В качестве другого примера рассмотрим результаты георадиолокационного обследования каскада старинных прудов, проведенного в пригородной части г. Воронежа. Обследование имело целью расчленение геологического разреза на отдельные литологические разности, определение толщин льда и слоя воды, а также мощности иловых отложений. Данная информация была необходима для проектирования работ по очистке прудов и реконструкции прилегающей к ним территории.

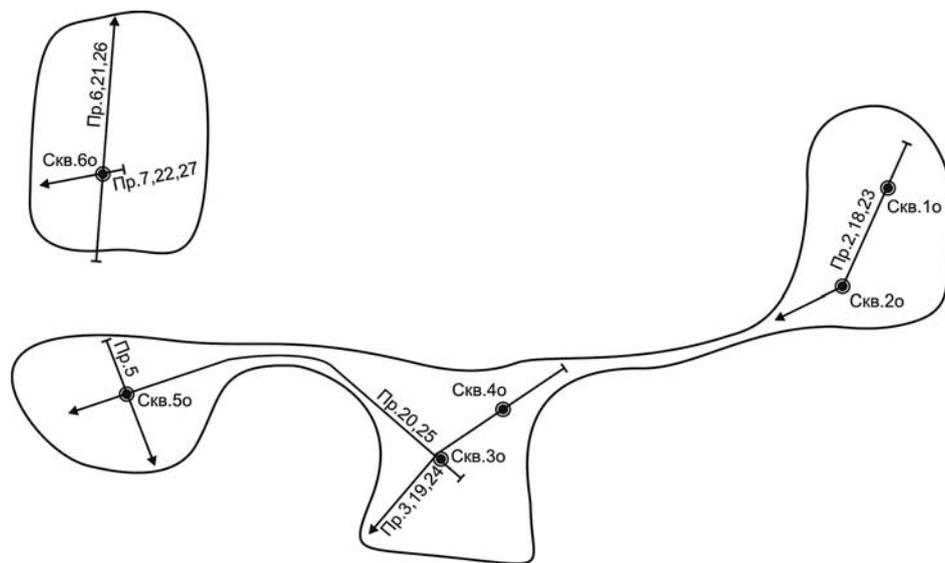


Рис. 5. Схема расположения профилей георадиолокации

Георадиолокация проводилась в зимнее время со льда с использованием экранированных антенн частотой 500 и 900 МГц и открытой дипольной антенны частотой 150 МГц. Использование 3 различных антенн было вызвано разномасштабностью объектов исследования – в пределах от первого десятка сантиметров для ледяного покрова и слоя воды вплоть до 7–10 м применительно к изучению литологического строения разреза. Контуры обследованных прудов с нанесенными на них линиями наблюдений (профилями георадиолокации) и скважинами представлены на рис. 5. Большинство линий наблюдений были пройдены со всеми тремя типами антенн. При этом на профилях 2–6 исследования проводились с антенной 150 МГц, на профилях 18–22 –

с антенной 500 МГц и на профилях 23–27 – с антенной 900 МГц.

Результаты интерпретации данных георадиолокации, выполненной по одной из линий наблюдения с разночастотными антеннами, показаны на рис. 6. Интерпретация осуществлялась с опорой на данные бурения, выполненного со льда ручным мотобуром (глубины скважин не превышали 3,0–3,5 м). Шкалы глубин на георадиолокационных разрезах выставлены исходя из средневзвешенных значений относительных диэлектрических проницаемостей, типичных для сред, слагающих исследуемые интервалы глубин. Материалы георадиолокации позволили детализировать геологическое строение разрезов, в том числе и в пределах глубин, не достигнутых бурением, а также

определить глубины водоемов и толщины льда и иловых отложений в местах, где бурение не проводилось. При этом в некоторых прудах были выявлены локальные объекты, захороненные в илах на глубинах 0,5–1,2 м (это могут быть стволы деревьев, крупные бытовые предметы и пр.).

Результаты георадиолокации, выполненной с антеннами 900 и 500 МГц, практически идентичны, за исключением самой верхней части разреза, где исследования с антенной 900 МГц позволили получить более детальную картину. Наличие в разрезе, начиная с глубины ~1,6–1,7 м, суглинков не позволило реализовать потенциально большую глубинность исследований с антенной, работающей на частоте 500 МГц.

Возможности георадиолокации при изучении процесса осадконакопления в пресноводных бассей-

нах иллюстрируют результаты исследований, выполненных по профилю, проложенному поперек р. Усманка (Воронежская обл.), представленные на рис. 7. Дно реки сложено песками, в толще которых отчетливо прослеживаются несколько палеорусел или их фрагментов. В этом месте река имеет быстрое течение, сильно меандрирует и часто меняет положение своего русла.

На профилях, проложенных на участках реки со слабым течением, на георадиолокационных разрезах уверенно выделяются массивы водорослей, локализованные в толще воды. Подобная информация может представлять интерес для гидрологов и экологов.

Примером результативного обследования искусственных сооружений, выполненного с поверхности водоема, могут служить результаты георадиолокационного зондирования, проводившегося с целью опре-

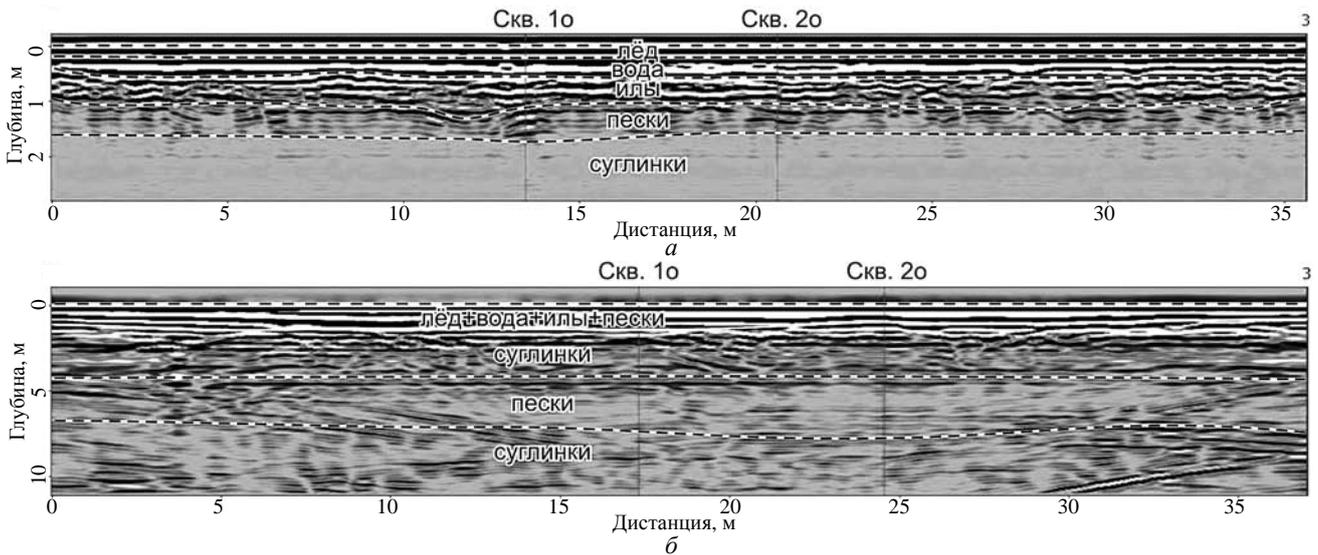


Рис. 6. Результаты георадиолокации по профилям 23 (а) и 2 (б)

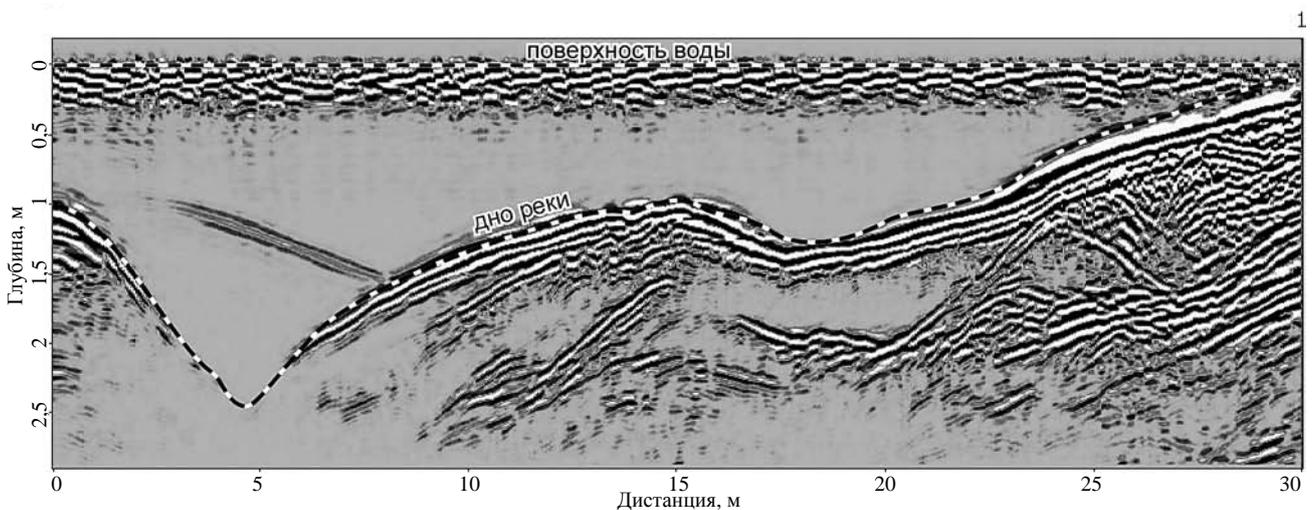


Рис. 7. Результаты георадиолокационного обследования р. Усманка по одному из поперечных профилей

деления геометрических параметров промежуточной опоры реконструируемого моста через водную преграду на трассе М-5 «Урал» в Рязанской области. Схема расположения профилей георадиолокации показана на рис. 8.

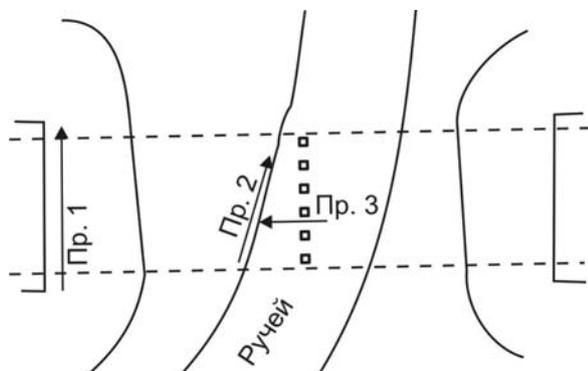


Рис. 8. Схема расположения профилей георадиолокации

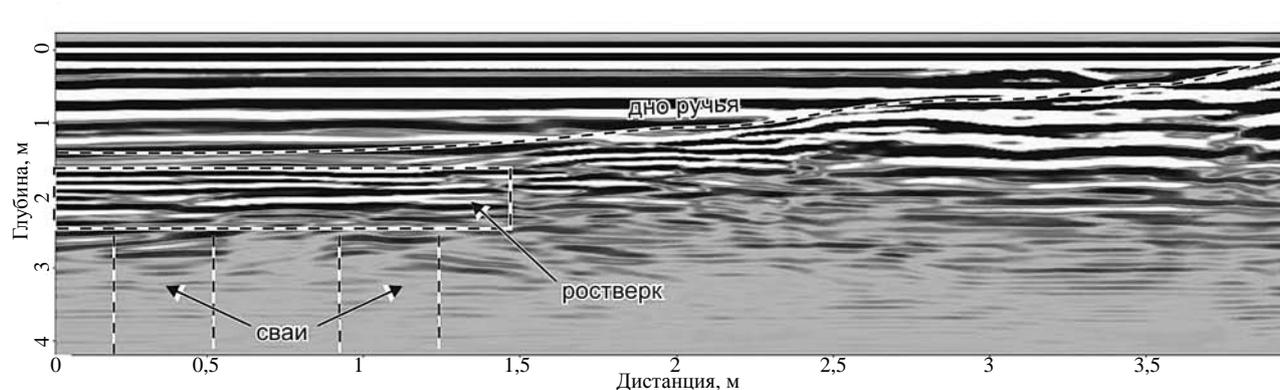


Рис. 9. Результаты георадиолокации по профилю 3. Антенна 500 МГц

Приведенные результаты геофизических исследований свидетельствуют о высокой эффективности электроразведки, применяемой на пресноводных акваториях для решения различных инженерных задач. При этом очень высоким информационным потенциалом и универсальностью обладает георадиолокационное зондирование [1, 4–7]. К основным преимуществам электроразведки, как, впрочем, и большинства других геофизических методов исследований, относятся:

- относительная малозатратность и экспрессность как самих исследований, так и процесса обработки и интерпретации получаемых материалов;
- неразрушающее взаимодействие с изучаемой средой в процессе исследований, позволяющее повторить исследования тем же или иным набором методов в случае получения результатов, имеющих недостаточную информативность или сомнительную достоверность;
- возможность организации долговременных мониторинговых наблюдений;

Промежуточная опора моста представляет собой 6 расположенных в одну линию стоек, покоящихся на заглубленном под дно ручья ростверке, связывающем верхушки забитых в грунт свай.

Для определения геометрических характеристик этой опоры с поверхности ручья были проведены исследования с антенной 500 МГц. Их результаты представлены на рис. 9.

По данным георадиолокации, верх ростверка залегает на глубине ~1,7 м, низ – ~2,5 м. Его ширина составляет около 2 м. Забивные сваи расположены в две линии, ориентированные параллельно стойкам опоры. Глубина погружения свай, оцененная по результатам исследований с антенной 75 МГц (профиль 2 на рис. 8), находится в пределах 9,5–10,5 м.

– возможность проведения геофизических исследований на поверхности земли, на акваториях (в том числе с ледового покрова), в скважинах, в водной и воздушной средах;

– возможность применения бесконтактных способов измерений, в процессе которых геофизические датчики находятся на некотором, часто весьма значительном, удалении от ближайшей к ним поверхности изучаемого объекта, что позволяет организовать проведение измерений «в движении», когда в процессе измерений геофизического параметра датчик поля непрерывно перемещается вдоль поверхности исследуемой среды. Такая возможность позволяет получать информацию высокой степени детальности;

– получаемые в результате измерений геофизические характеристики изучаемых объектов представляют собой некие интегральные, усредненные в пределах определенного объема параметры, в известной мере освобожденные от влияния мелких неоднородностей, носящих «шумовой» характер. В условиях значительной вещественной неоднород-

ности верхней части разреза это обстоятельство часто несет положительный эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богословский В. А. Геофизика / В. А. Богословский [и др.]. – М. : КДУ, 2009. – 320 с.
2. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики / А. А. Огильви. – М. : Недра, 1990. – 501 с.
3. РСН 64-87 «Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Электроразведка». – М. : ПНИИС, 1987. – 42 с.
4. Аузин А. А. Георадиолокационное обследование проблемных участков дорожно-транспортной сети / А. А. Ау-

зин, С. А. Зацепин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2012. – № 2. – С. 242–247.

5. Владов М. Л. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М. : ГДС Продакшен, 1998. – 64 с.

6. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных / А. В. Старовойтов. – М. : Изд-во МГУ, 2006. – 192 с.

7. СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть 6. Правила проведения геофизических исследований». – М. : ПНИИС, 2004.

Воронежский государственный университет

*Аузин А. А., кандидат технических наук, доцент
кафедры геофизики*

E-mail: AAuzin@yandex.ru

Тел.: 8-473-220-83-85

Зацепин С. А., аспирант кафедры геофизики

E-mail: chilavert@inbox.ru

Тел.: 8-920-425-20-13

Voronezh State University

Auzin A. A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Geophysical Department

E-mail: AAuzin@yandex.ru

Tel.: 8-473-220-83-85

Zatsepin S. A., Post-graduate Student of the Geophysical Department

E-mail: chilavert@inbox.ru

Tel.: 8-920-425-20-13