УДК 550.837.76, 556.545, 556.114.5

Н.Ю.БОБРОВ, *канд. физ.-мат. наук*, *доцент*, *nbobrov@bk.ru*,
С.С.КРЫЛОВ, *канд. физ.-мат. наук*, *доцент*, *sskrylov@rambler.ru*,
Е.Ю.КИСЕЛЕВ, *бакалавр*, *ekiselev@bk.ru*,
Г.В.ПРЯХИНА, *канд. геогр. наук*, *доцент*, *g65@mail.ru*,
И.В.ФЕДОРОВА, *канд. геогр. наук*, *доцент*, *umnichka@mail.ru*,
Санкт-Петербургский государственный университет

N.Y.BOBROV, *PhDr. phys.-mat. Sci.*, *Assistant Professor*, *nbobrov@bk.ru*
S.S.KRYLOV, *PhDr. phys.-mat. Sci.*, *Assistant Professor*, *sskrylov@rambler.ru,*
E.Yu.KISELEV, *Bachelor*, *ekiselev@bk.ru,*
G.V.PRIAKHINA, *PhDr. geogr. Sci.*, *Assistant Professor*, *g65@mail.ru*,
I.V.FEDOROVA, *PhDr. geogr. Sci.*, *Assistant Professor*, *umnichka@mail.ru*
Saint-Petersburg State Universuty

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ В ГИДРОЛОГИИ

Георадиолокация является эффективным инструментом при исследованиях пресноводных водоемов. При перемещении георадара по поверхности при помощи маломерного плавсредства возможно определение профиля дна и мощности донных отложений, а также обнаружение затопленных объектов. Новой областью применения георадаров является исследование границы между пресной и соленой водой в устьевых областях рек, впадающих в море. Использование данных об амплитуде отраженного сигнала открывает возможность определения коэффициента поглощения и электропроводности воды, а следовательно, и ее минерализации.

***Ключевые слова*:** георадиолокация, георадар, гидрология, галоклин, электропроводность, минерализация.

APPLICATION OF GEORADIOLOCATION IN HYDROLOGY

Georadiolocation is an effective tool to explore fresh water basins. When georadar is transported along the water surface by a small boat the bottom profile and the thickness of bottom sediments can be determined as well as sunk objects can be discovered. Investigation of a boundary between fresh and saline water in the estuaries of the rivers flown into the sea is a new field of georadars application. There is a possibility to determine damping factor, water electrical conductivity and, hence, water mineralization with the use of reflected signal amplitude.

***Key words*:** georadiolocation, georadar, hydrology, halocline, electrical conductivity, mineralization.

Введение. В последнее десятилетие георадары стали широко применять для решения самых разных геотехнических задач, в частности, они показали свою эффективность при исследованиях пресноводных водоемов. Высокая однородность водной толщи благоприятствует распространению электромагнитных импульсов на большую глубину без существенных искажений и получению четких отражений от дна водоема.

Поскольку диэлектрическая проницаемость воды известна и мало зависит от внешних условий (температуры, минерализации), скорость электромагнитных импульсов в воде можно считать известной, а значит, можно определять глубину водоема с высокой точностью. В этих условиях георадар фактически работает как эхолот. Хорошо выделяются георадаром локальные объекты как на дне водоема, так и в толще донных осадков, поэтому его можно рекомендовать для поиска затопленных объектов, боеприпасов, при экологических исследованиях. Известны примеры применения георадаров при подводных археологических работах.

Метод георадиолокации, позволяющий проводить измерения в движении с борта маломерного плавсредства и получать информацию в реальном режиме времени, может найти применение также при исследованиях в области гидрологии. Изучение водного режима традиционно сопряжено с отбором большого количества проб. Процедура отбора занимает значительное время, что может являться критичным, например, при мониторинговых измерениях, когда требуется отслеживать быстрые изменения параметров водной толщи. Это стимулирует привлечение современных геофизических технологий при гидрологических исследованиях. В статье представлены результаты применения георадиолокации для решения двух гидрологических задач: исследования динамики границы между пресной и соленой водой в устьевой зоне реки, впадающей в море, и оценка минерализации воды в пресноводном озере.

Исследование галоклина в устьевой зоне. Георадары обычно не применяют при исследовании морских акваторий, поскольку в толщу морской воды, проводимость которой велика, радиолокационные импульсы вследствие сильного затухания практически не проникают. Однако в устьевых областях рек, впадающих в море, пресная вода распространяется в поверхностном слое на значительные расстояния, образуя с соленой морской водой достаточно резкую границу, называемую *галоклином*. Благодаря разным значениям минерализации, а следовательно, проводимости $\tilde{\varepsilon}$ и комплексной диэлектрической проницаемости $\tilde{\varepsilon}$ пресной и соленой воды, эта граница, как оказалось, может быть выявлена и исследована при помощи георадиолокации*.

Детальные исследования галоклина проводились летом 2007 г. в устьевой зоне р.Кереть, впадающей в Кандалакшский залив Белого моря. Измерения выполнялись в течение двух дней на четырех фазах приливно-отливного цикла: полная вода, спад уровня, малая вода, нарастание уровня. В устьевой области при помощи вешек и буйков было разбито три профиля – продольный и два поперечных, привязка которых осуществлялась при помощи GPS. Радиолокационное зондирование осуществлялось при помощи георадара «Око» (производство – Россия, ООО «Логис»), использовались антенные блоки АБ-150 и АБ-700 с центральными частотами соответственно 150 и 700 МГц. Антенный блок помещался на дно надувной лодки, буксируемой вдоль профилей на фазе отлива весельной лодкой, в остальное время – надувной мотолодкой. В последнем случае лодка с антенным блоком закреплялась у борта мотолодки, что позволяло наблюдать невозмущенную винтом мотора границу пресной и соленой воды.

Рассмотрим участок радарограммы, полученной с антенным блоком АБ-150 георадара «Око» при прохождении продольного профиля на фазе отлив (рис.1, *в*). Радарограмма не подвергалась предварительной обработке, сигнал прямого прохождения на ней сохранен. При движении измерительной установки вниз по течению (на рисунке – слева направо) в верхней части профиля наблюдаются отражения от дна реки, сопровождающиеся двух- и трехкратными переотражениями, что подтверждается синхронными измерениями глубины эхолотом. Там, где в нижней части водной толщи пресная речная вода вытесняется поступающей со стороны моря более тяжелой морской водой (ок. 345 м от начала профиля), отражения от речного дна пропадают и на радарограмме появляются отчетливые отражения от границы речной и морской воды, причем также можно наблюдать переотражения. При этом в области первого контакта пресной и соленой воды в верхней части течения реки формируется характерная «ступень» галоклина (перепад глубины границы с 1 до 0,5 м).

Интересным свойством границы пресной и соленой воды является инверсия фазы отраженного сигнала по сравнению с отражениями от дна реки. Инверсия проявляется при зондированиях с низкочастотным антенным блоком АБ-150. В точках, отмеченных

* *Бобров Н.Ю.* О возможности применения георадиолокации при гидрологических исследованиях в устьевых зонах рек / Н.Ю.Бобров, В.В.Дмитриев, С.С.Крылов и др. // Вестник СПбГУ. Серия 7. География и геология, 2008. Вып.2. С.76-82.

Bobrov N.Yu. On the possibility of georadiolocation application for hydrological investigations in the river mouth areas / N.Yu.Bobrov, V.V.Dmitriev, S.S.Krylov, T.V.Parshina, G.V.Pryahina, I.V.Fedorova // Vestnik of SPbSU. Series7. Geography and Geology. 2008. Issue 2, pp.76-81.

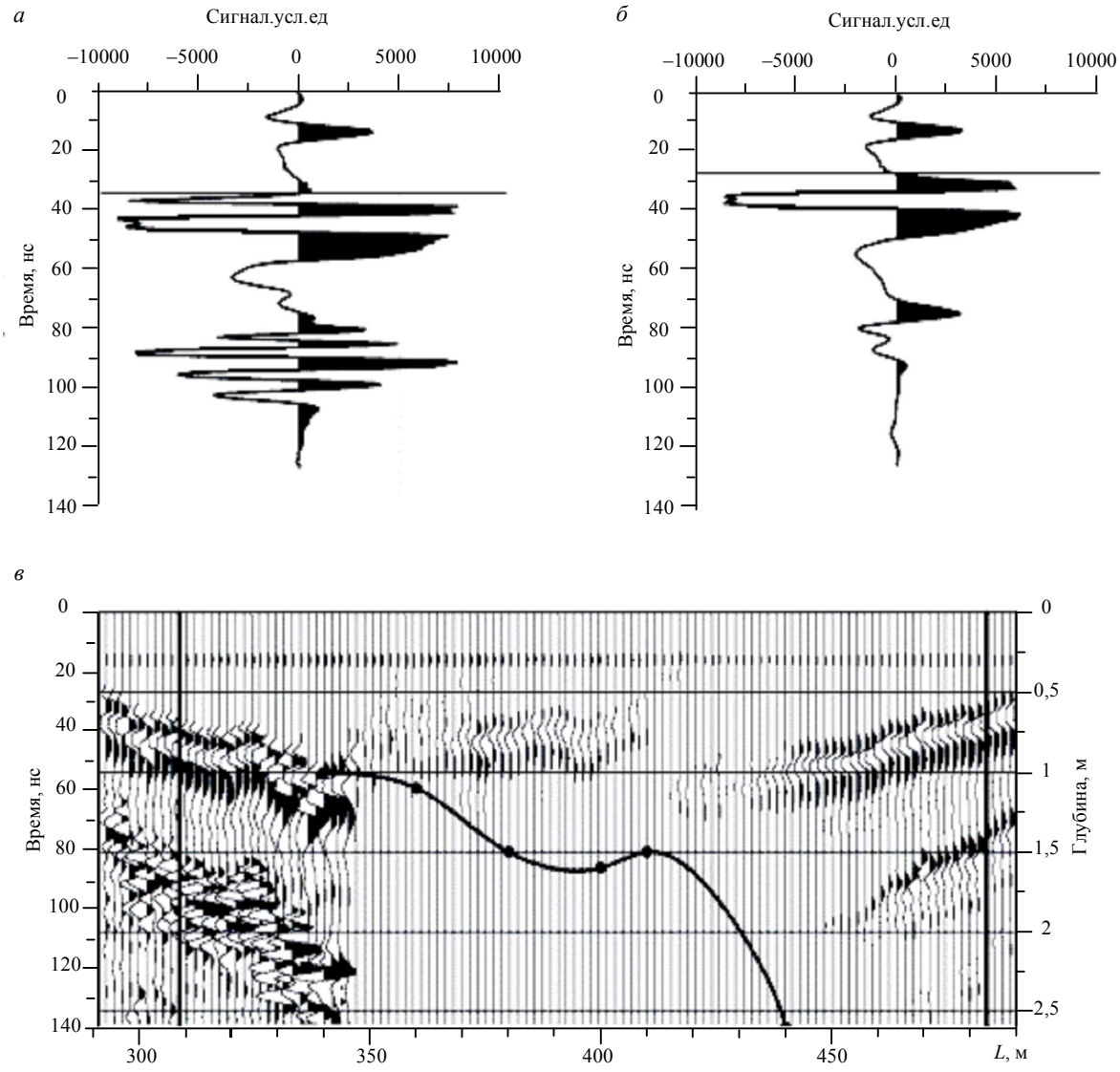


Рис.1. Формирование «ступени» галоклина в устьевой зоне р.Кереть на фазе отлива (продольный профиль): *а* – радиолокационная трасса с отражением от дна реки; *б* – радиолокационная трасса с отражением от границы пресной и соленой воды; *в* – участок радарограммы, полученной с антенным блоком АБ-150; значения глубины по данным эхолота в области, где радиолокационный сигнал не достигает дна, отмечены точками, соединенными сплошной линией

вертикальными линиями на рассматриваемом на рис.1, *в* участке радарограммы (309 и 483 м от начала профиля), были записаны соответственно первая (рис.1, *а*) и вторая (рис.1, *б*) радиолокационные трассы. На первой из них зарегистрирован импульс, отраженный от дна реки, на второй – от границы пресной и соленой воды. Моменты прихода отраженного сигнала («первых вступлений», по терминологии сейсморазведки) отмечены на рис.1, *а* и рис.1, *б* горизонтальными линиями. Видно, что колебания электрического поля в отраженном импульсе в первом и втором случае происходят в противофазе (первый полупериод на первой трассе – отрицательный, на второй – положительный)*. В оптике данное явление известно как *потеря полуволны* при отражении от оптически более плотной среды.

Георадиолокационная съемка позволила проследить за перемещением границы галоклина вверх-вниз по устьевой области в тече-

* Мы не рассматриваем здесь вопрос об изменении формы и спектра излученного импульса при прохождении в среде.

ние приливно-отливного цикла и за изменением ее структуры. Синхронные измерения гидрологических параметров на станциях показали, что на фазах отлива и спада эта граница может быть довольно резкой: при переходе от морской к речной воде в слое толщиной всего около 10 см происходит изменение минерализации более чем на порядок. Исследования показали, что эффективное выделение границы с антенным блоком АБ-700, обеспечивавшим бóльшую разрешающую способность, возможно при минерализации поверхностного «пресноводного» слоя до 1000 мг/л, хотя существенное значение имеет также градиент минерализации.

Оценка минерализации пресной воды. Радиолокационное зондирование позволяет не только определять глубину водоемов и мощности слоев воды с разными физическими свойствами. При использовании данных об амплитудах отраженного сигнала имеется принципиальная возможность оценивать проводимость воды, а значит, и ее минерализацию.

При распространении электромагнитного импульса от дипольного источника в среде амплитуда импульса уменьшается с расстоянием из-за геометрического расхождения фронта волны, а также вследствие омических потерь (за счет токов проводимости). Если ограничиться приближением волновой зоны, считать, что сигнал распространяется ортогонально поверхностям раздела, и учитывать неполное отражение на границе, то амплитуда сигнала, отраженного от нижней границы слоя толщиной h и зарегистрированного на поверхности приемной антенной георадара, будет определяться формулой

$$E = \left|\widetilde{R}\right| E_0 \frac{e^{-k''2h}}{2h}, \qquad (1)$$

где $|\widetilde{R}|$ – амплитуда комплексного коэффициента отражения; $E_0 = \omega\mu P/4\pi$; P – момент генераторного диполя; k'' – мнимая часть комплексного волнового числа $\widetilde{k} = k' + jk''$, называемая *коэффициентом поглощения*; ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$; μ – магнитная проницаемость, для немагнитных сред принимаемая равной магнитной проницаемости вакуума $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м; f – частота электромагнитного поля.

В формуле (1) множитель $1/2h$ определяет изменение амплитуды сигнала вследствие геометрического расхождения, а множитель $e^{-k''2h}$ – закон затухания за счет омических потерь. Коэффициент поглощения зависит от проводимости среды σ, и, если оценить его по данным о затухании сигнала с расстоянием (глубиной), проводимость может быть определена по формуле*

$$\sigma = 2k'' \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon'}{\mu}} \left(1 + \frac{k''^2}{\omega^2\mu\varepsilon_0\varepsilon'}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (2)$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума Ф/м, $\varepsilon_0 = (1/36\pi)\cdot10^{-9}$; ε' – вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

Если прологарифмировать левую и правую части формулы (1), сделав замену $d = 2h$, придем к формуле

$$\ln(Ed) = C - k''d, \qquad (3)$$

где C – константа, зависящая от момента излучающего диполя, частоты и коэффициента отражения на границе.

Построив по данным радиолокационной съемки водоема зависимость $ln(Ed)$ от d, можно оценить коэффициент поглощения k'', который является угловым коэффициентом этой зависимости, а далее по формуле (2) – проводимость воды. Заметим, что применение формулы (3) подразумевает постоянство коэффициента отражения сигнала от дна во всех точках радиолокационного профиля.

В 2006-2007 гг. нами были выполнены георадиолокационные исследования георадаром «Око» с антенным блоком АБ-150 на пресноводном озере Кривое (мыс Картеш, Кандалакшский залив Белого моря). На одном из участков наблюдалось равномерное погружение дна озера примерно от 4,5 до 9 м. Данный участок был выбран в качестве тестового для оценки проводимости воды описанным методом. Длина электромагнитной волны на частоте 150 МГц, распростра-

* *Петровский А.Д.* Радиоволновые методы в подземной геофизике. М.: Недра, 1971. 224 с.

Petrovsky A.D. Radiowave methods in subsurface geophysics. M.: Nedra, 1971. 224 p.

няющейся в пресной воде, составляет около 20 см. Условие волновой зоны, таким образом, выполняется и применение формулы (3) допустимо.

На выбранном участке измерялись амплитуды первых вступлений на всех радиолокационных трассах, удвоенная глубина d вычислялась по времени пробега и контролировалась эхолотом. Всего было проанализировано 372 трассы. В качестве значений E брали максимальные значения отраженного сигнала. Результаты представлены на рис.2. Несмотря на большой разброс значений, связанный с вариациями коэффициента отражения и неровностями дна, данные в целом достаточно хорошо описываются линейной зависимостью (коэффициент корреляции равен 0,95). Оценка угла наклона этой зависимости методом наименьших квадратов дает значение $k'' = 0{,}361 \pm 0{,}012$ м$^{-1}$ и проводимости воды $\sigma = 0{,}0172 \pm 0{,}0006$ См/м (указаны 95-процентные доверительные интервалы). Соответствующее значение удельного электрического сопротивления ($\rho = 1/\sigma$) равно $58{,}1 \pm 1{,}9$ Ом·м, что согласуется с удельным электрическим сопротивлением, рассчитанным по измеренному в лабораторных условиях значению минерализации воды озера Кривое (85 мг/л) – 65 Ом·м при температуре воды 20 °С.

На этих же данных была опробована методика оценки коэффициента затухания по спектральной составляющей импульса, соответствующей основной частоте антенны 150 МГц. В этом случае $\rho = 65{,}4 \pm 6{,}9$ Ом·м. Следует подчеркнуть, что указанная погрешность характеризует не интервал возможных вариаций значений удельного электрического сопротивления воды озера, а прежде всего качество линейной аппроксимации конкретного

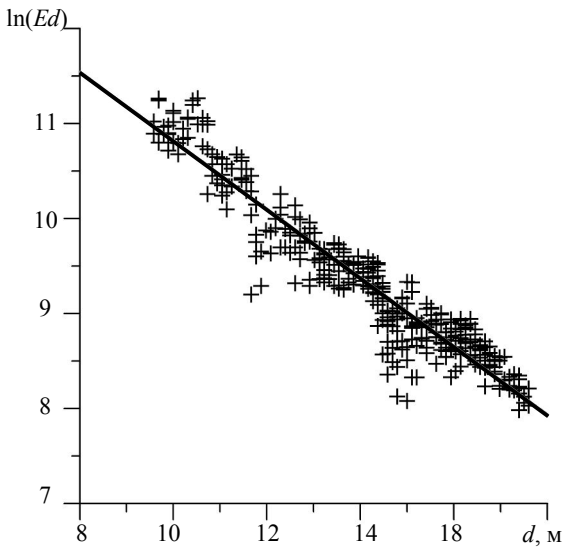


Рис.2. Затухание радиолокационного сигнала с глубиной

ряда данных, полученного на основе исходной радарограммы тем или иным способом.

Заключение. Результаты первых экспериментов показали, что, помимо традиционного применения для обследования дна пресноводных водоемов, георадиолокация может быть эффективным средством в гидрологических исследованиях, в частности при мониторинге устьевых зон. При использовании данных об амплитудах отраженного радиолокационного сигнала возможна оперативная оценка удельного электрического сопротивления и минерализации пресной воды при помощи георадара. Наиболее перспективным представляется применение георадиолокации в комплексе со станционными измерениями минерализации, температуры, скорости и направления течений и других параметров водной толщи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: грант 07-05-00583-а.