

УДЕЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В ВОДЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

С.В. ПОПОВ¹, М.П. КАШКЕВИЧ², В.И. КАШКЕВИЧ³, В.В. ХАРИТОНОВ⁴,
Е.В. ЙОВЕНКО²

¹ — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, e-mail: sporov67@yandex.ru

² — Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, e-mail: m.kashkevich@spbu.ru

³ — ООО «ГеофизПоиск», Санкт-Петербург, e-mail: v.kashkevich@inbox.ru

⁴ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: kharitonov@aari.ru

В настоящей работе обсуждаются результаты определения удельного поглощения электромагнитных волн в пресной воде Ладожского озера методом зондирования наклонной плоскости. В качестве наклонной плоскости использовался лист плоского шифера толщиной 10 мм, установленный в бассейне. Лоцирование осуществлялось с помощью георадаров «ОКО-2» и «Zond 12e». Удельное сопротивление воды при температуре около 24°C составляло 22 Ω·м. По результатам работ установлено, что удельное поглощение электромагнитных волн на частоте 400 МГц составляет 21 дБ/м, на частоте 900 МГц — 38 и 40 дБ/м для разных серий экспериментов и на частоте 1500 МГц — 48 дБ/м.

Ключевые слова: георадиолокация, обработка георадарных данных, Ладожское озеро.

ВВЕДЕНИЕ

Георадарные исследования, направленные на изучение приповерхностного слоя нашей планеты, достаточно активно используются при выполнении научных работ и инженерных изысканий более двух десятилетий. Помимо лоцирования грунта, снежного покрова и ледников (Jo1, 2009; Попов, Эберляйн, 2014; Попов, Лунев, 2016; Попов, Поляков, 2016), они могут успешно использоваться и на пресноводных водоемах. Это продемонстрировали, в частности, работы сотрудников ААНИИ на заре использования радиолокационного метода в геофизике (Богородский и др., 1970а, 1970б). Некоторые антенны современных георадаров, в частности ОКО-2 АБДЛ «Тритон» (рис. 1а), непосредственно ориентированы на лоцирование водной среды. Однако для проведения успешных измерений, особенно связанных с анализом амплитуд отраженных сигналов, необходимо знать вещественную часть диэлектрической проницаемости воды и удельное поглощение электромагнитных волн в ней (т.е. мнимую составляющую).

Первая из указанных величин изучена достаточно хорошо. Она практически не зависит от минерализации и частоты в диапазоне метровых и дециметровых длин волн (Мачерет, 2006), однако изменяется от температуры. В работе (Ray, 1972) при-

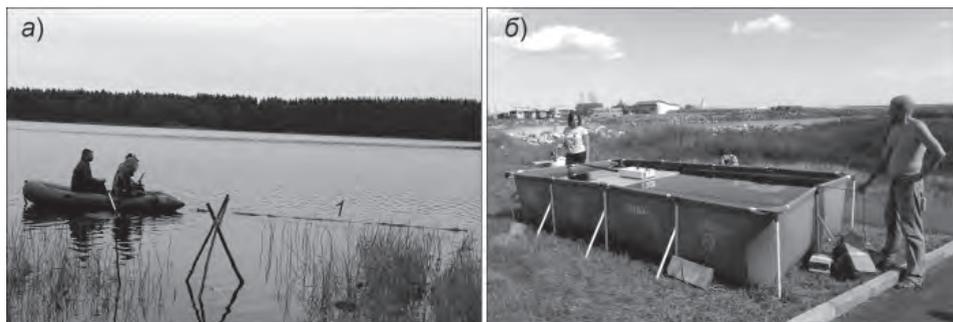


Рис. 1. Рабочие фотографии: *a* — геофизическая съемка с антенной АБДЛ «Тритон»; *б* — выполнение измерений в бассейне; *1* — антенна АБДЛ «Тритон».

водится эмпирическое соотношение зависимости диэлектрической проницаемости воды ϵ_w от температуры T :

$$\epsilon_w = 78,54 \left(1 - 4,579 \cdot 10^{-3} \tilde{T} + 1,19 \cdot 10^{-5} \tilde{T}^2 - 2,8 \cdot 10^{-8} \tilde{T}^3 \right),$$

где $\tilde{T} \equiv T - 25$.

Похожие значения могут быть получены по формуле, приведенной Г.Я. Черняком (1987):

$$\epsilon_w = 80 / [1 + 0,0048(T - 20)].$$

Зависимости $\epsilon_w(T)$ для каждого из приведенных соотношений для метровых и дециметровых волн показаны на рис. 2.

Мнимая часть диэлектрической проницаемости отвечает за поглощение электромагнитных волн в среде. Измерения этой величины для различных материалов и природных сред достаточно малочисленны, причем их востребованность весьма значительна для последующего прикладного использования. В частности, при из-

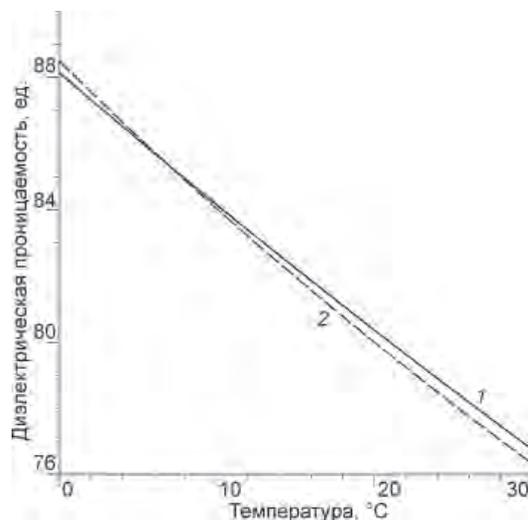


Рис. 2. Зависимость вещественной части диэлектрической проницаемости пресной воды от температуры для различных эмпирических моделей: *1* — по (Ray, 1972); *2* — по (Черняк, 1987).

учении придонной части водоемов и геологической интерпретации полученных данных на основе характера отражений от целевых границ важно знать степень ослабления сигнала в вышележащей среде. В данном случае в воде. С другой стороны, при выполнении не только производственных, но и научных работ не всегда имеется практическая возможность измерений удельного поглощения волн *in situ*. Несмотря на обилие справочной литературы и различных эмпирических зависимостей этой величины от солености и других факторов, разброс значений велик. На это, в частности, указывают сводные графики, приведенные в работе (Богородский и др., 1970а): в наиболее востребованном метровом и дециметровом диапазонах длин волн отличия, полученные по данным разных источников, составляют два порядка. Это, в свою очередь, указывает на важность подобных измерений и последующих обобщений для пресноводных водоемов, значимых с позиций последующего изучения их дистанционными методами. Подобная статистика важна также и для решения фундаментальных вопросов науки, в частности лоцирования подледниковых водоемов (Попов, 2010; Попов и др., 2012; Попов, Попков, 2015).

Для измерения удельного поглощения имеется два основных способа: (1) — измерения *in situ*, (2) — измерение удельной проводимости среды с последующим пересчетом. Первый способ предпочтителен, поскольку позволяет безошибочно определить требуемую величину для конкретной частоты лоцирования. Именно он и использовался в настоящей работе.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Если вещественная часть диэлектрической проницаемости воды без потери точности может быть получена вышеуказанными способами, то ее мнимая часть зависит главным образом от минерализации, т.е. требует более пристального внимания в каждом отдельном случае. С целью изучения данного вопроса в августе 2016 г. на полевой базе «Ладога» ААНИИ была выполнена серия экспериментов. В них использовался каркасный бассейн Intex 28273 размером 450×220×84 см, заполненный пресной водой Ладожского озера с удельным сопротивлением 22 Ω·м (определение выполнено портативным кондуктометром HI 9033) и температурой около 24 °С. Лоцирование осуществлялось на частотах 400 МГц («ОКО-2»), 900 МГц и 1500 МГц («Zond 12e»). Георадар устанавливался на тонкую пенопластовую пластину и с помощью лебедки равномерно перемещался по водной поверхности (рис. 1б).

В ходе экспериментов осуществлялось лоцирование листа шифера, установленного наклонно под углом 18° в бассейне с водой на частотах 400 МГц, 900 МГц и 1500 МГц. Данные обрабатывались в программе matGPR и Geoscan32. На временных георадарных разрезах, представленных на рис. 3, отчетливо наблюдается прямая волна 1 и отражение 2, сформированное ровной поверхностью шифера. Последнее характеризуется постепенным ослаблением с глубиной в связи со значительным удельным затуханием электромагнитных волн в воде. Поскольку выполняется условие зеркальности отражения (величина шероховатости поверхности значительно меньше длины волны зондирующих импульсов в среде), то дифрагированные волны, сформированные поверхностными шероховатостями, отсутствуют. Рельефное отражение 3 связано с поверхностью грунта, на котором установлен бассейн. Дифрагированные волны 4 и 5 сформированы, соответственно, бортами бассейна и краями листа шифера.

Анализ амплитуд отраженного сигнала является классическим способом определения удельного затухания волн в диссипативной среде, каковой является вода.

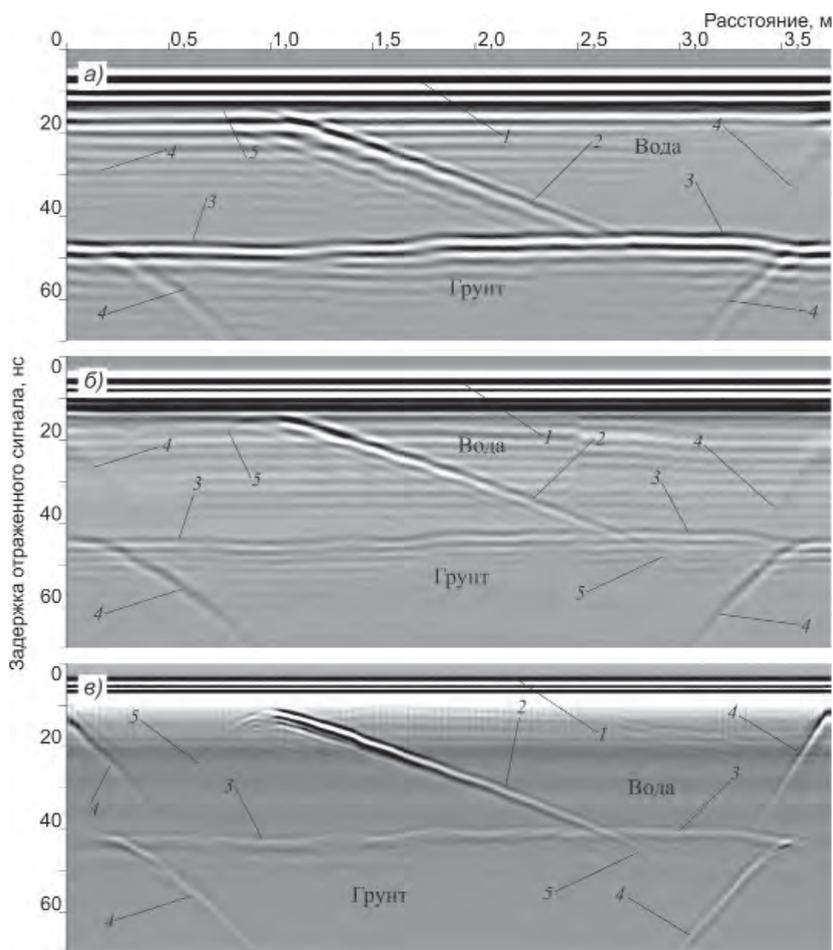


Рис. 3. Временные георадарные разрезы, полученные при лоцировании наклонного листа шифера в водной среде на частотах 400 МГц (а), 900 МГц (б) и 1500 МГц (в): 1 — прямая волна; 2 — отражение от поверхности листа шифера; 3 — отражение от грунта, на котором установлен бассейн; 4 — дифрагированные волны, сформированные краями бассейна; 5 — дифрагированные волны, сформированные краями листа шифера.

Обратимся к уравнению дальности радиолокации, впервые полученному Д. Керром (Керр, 1951):

$$\frac{P_R}{P_T} = \Psi(\alpha) A_r R^2 \frac{\sigma(L) N^2}{(4\pi L^2)^2}, \quad (1)$$

где P_R и P_T — мощности принятого и излученного импульсов, $\Psi(\alpha)$ — диаграмма направленности антенны, A_r — эффективная площадь апертуры приемной антенны, L — половина пути импульса от передающей антенны до приемной, $\sigma(L)$ — эффективная площадь рассеяния, R — коэффициент отражения, и N — поглощение в среде. В случае общей антенны для передачи и приема или их схожести (что реализуется на практике), A_r и $\Psi(\alpha)$ связаны соотношением $\Psi(\alpha) = 4\pi A_r / \lambda_0^2$, где λ_0 — длина волны в той среде, где расположены антенны. Ослабление при распространении волны в

диссипативной среде по мощности при двукратном прохождении составляет $2\xi L$, где ξ — удельное поглощение в среде, выраженное в дБ/м. Кроме того, представим эффективную площадь рассеяния σ в виде круга с эффективным радиусом \mathbb{R} . Тогда $\sigma(L) = \pi[\mathbb{R}(L)]^2$. После соответствующих преобразований (1) получим

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{[\Psi(\alpha)]^2 [\mathbb{R}(L)]^2}{64\pi^2 L^4} \lambda_0^2 R^2 \times 10^{-\frac{L\xi}{5}}. \quad (2)$$

Поскольку мощность сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то соотношение (2) может быть представлено как

$$\frac{A_R}{A_T} = \frac{\Psi(\alpha)\mathbb{R}(L)}{8\pi L^2} \lambda_0 R \times 10^{-\frac{L\xi}{10}}, \quad (3)$$

где A_R и A_T — амплитуда отраженного и излученного импульсов. Прологарифмировав обе части выражения (3) по основанию 10, получим соотношение

$$\lg \left[\frac{A_R}{A_T} \right] = \lg \left[\frac{\Psi(\alpha)}{8\pi} \lambda_0 R \right] + \lg \left[\frac{\mathbb{R}(L)}{L^2} \right] - \frac{L}{10} \xi. \quad (4)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (4) учитывает расхождение фронта электромагнитной волны и радиус эффективной площади рассеяния. Последняя, в нашем случае, определяется радиусом первой зоны Френеля, т.е. $\mathbb{R}(L) \sim \sqrt{L}$. В целом это слагаемое значительно меньше последнего в правой части и изменяется медленнее него при различных L , что позволяет отнести его к разряду констант. Принимая $L = v\Delta\tau/2$, где v — скорость распространения электромагнитных волн в среде, а $\Delta\tau$ — задержка отраженного сигнала от целевой границы (наклонной поверхности шифера), с учетом вышеизложенного получаем

$$20 \lg \left[\frac{A_R}{A_T} \right] = C - v\Delta\tau\xi, \quad (5)$$

где $C \equiv 20 \left\{ \lg \left[\frac{\Psi(\alpha)}{8\pi} \lambda_0 R \right] + \lg \left[\frac{\mathbb{R}(L)}{L^2} \right] \right\}$.

Левая часть выражения (5) представляет собой отношение амплитуд зондирующего и отраженного импульса, выраженное в децибелах. Построим график (рис. 4), по оси абсцисс которого отложим величину задержки отраженного сигнала $\Delta\tau$, а по оси ординат — соответствующее ей отношение амплитуд отраженного сигнала в децибелах для различных частот зондирования. Аппроксимируем каждую серию измерений полиномом первой степени. Тогда коэффициент при линейном члене будет равен $v\xi$, откуда может быть получена величина удельного поглощения электромагнитных волн в среде. Измерения показали, что $v = 3,4$ см/нс ($\epsilon_w = 77,75$). Это вполне соответствует диэлектрической проницаемости воды при температуре около 24°C (рис. 2).

Приведенные на рис. 4 данные показывают, что удельное поглощение электромагнитных волн в воде Ладожского озера на частоте 400 МГц составляет 21 дБ/м; на частоте 900 МГц — 38 дБ/м и 40 дБ/м, для разных серий экспериментов, и на частоте 1500 МГц — 48 дБ/м. Полученные значения не противоречат опубликованным (Богородский и др., 1970а, 1970б).

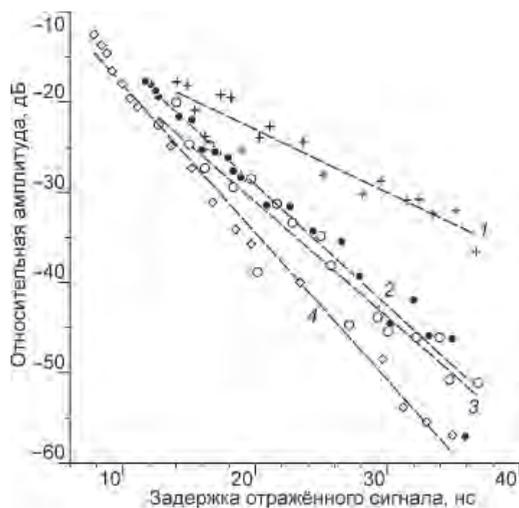


Рис. 4. Зависимость относительных амплитуд отраженного сигнала от задержки при лоцировании наклонного листа шифера в водной среде на различных частотах.

Крестами показаны измерения при лоцировании на частоте 400 МГц, черными и белыми кружками — на частоте 900 МГц, ромбами — на частоте 1500 МГц. Цифрами обозначены линии аппроксимации для данных при зондировании на частотах: 1 — 400 МГц, 2, 3 — 900 МГц, 4 — 1500 МГц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в ходе проделанной работы произведено определение удельного поглощения электромагнитных волн дециметрового диапазона в пресной воде Ладожского озера методом зондирования наклонной плоскости. Как отмечалось выше, полученные значения не противоречат опубликованным данным. К сожалению, авторам не удалось выполнить измерения на более низких частотах: в диапазоне метровых волн, также востребованных в георадиолокации. Авторы надеются провести эти измерения в будущем.

Авторы благодарят руководство ААНИИ за возможность использования полевой базы «Ладога» для выполнения научных исследований, а также сотрудников ААНИИ Е.И. Новохатского и Г.А. Дешевых за помощь в организации работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00579-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Труды ААНИИ. 1970а. Т. 295. С. 116–119.
- Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Радиолокационное зондирование пресной воды // Труды ААНИИ. 1970б. Т. 295. С. 185–187.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Понов С.В. Радиолокационное зондирование неглубоких подледниковых водоемов: теоретические предпосылки и практические результаты // Лед и снег. 2010. № 4 (112). С. 5–14.
- Понов С.В., Лунев П.И. Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 19–27.

Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лед и снег. 2012. № 4 (120). С. 31–38.

Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.

Попов С.В., Попков А.М. Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107–113.

Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и снег. 2014. № 4 (128). С. 95–106.

Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1987. 211 с.

Jol H.M. Ground penetrating radar Theory and applications // Elsevier Science. 2009. 544 p.

Kerr D.E. Propagation of short radio waves. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1951. 728 p.

Ray P.S. Broadband complex refractive indices of ice and water // Appl. Opt. Vol. 11. № 8. P. 1836–1844. doi:10.1364/AO.11.001836

S.V. POPOV, M.P. KASHKEVICH, V.I. KASHKEVICH, V.V. KHARITONOV, E.V. YOVENKO

ABSORPTION OF UHF ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE WATER OF LAKE LADOGA (LENINGRAD REGION)

Measurements of the attenuation of the electromagnetic waves in fresh water of Lake Ladoga by sounding of the inclined plane installed in the pool are discussed in this paper. GPRs “OKO-2” and “Zond 12e” were used in the investigations. The resistivity of the water was 22 $\Omega \cdot \text{m}$ at a temperature of about 24°C. According to the results of the measurements the attenuation of the electromagnetic waves at a frequency of 400 MHz is 21 dB/m; of 900 MHz are 38 dB/m and 40 dB/m for different series of experiments, and at a frequency of 1500 MHz is 48 dB/m.

Keywords: attenuation, GPR technique, processing of GPR data, Lake Ladoga.