

# УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ И ДОБРОТНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Д.А. Лаломов<sup>1</sup>, В.В. Глазунов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Фертонг», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В работе приводятся результаты исследований, целью которых являлось установление зависимости между электропроводностью, минерализацией и параметром добротности, получаемым на основе георадиолокационных данных. Суть исследований заключается в определении перспективы количественной оценки геофизических данных на основе комплексирования электроразведочных методов сопротивления и георадиолокации. В практической части работы описывается методика формирования двухслойной лабораторной баковой георадиолокационной модели и способы измерения ее электрофизических параметров как традиционными геофизическими методами со стандартным оборудованием, так и с помощью вспомогательных измерительных устройств. Теоретическая часть работы посвящена реализации различных подходов к вычислению добротности среды на основе лабораторных георадиолокационных измерений. Экспериментально полученные данные, подтвержденные аналитическими расчетами, указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации. Важным выводом является то, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность.

**Ключевые слова:** георадиолокация, минерализация, электропроводность, добротность, баковая модель, метод спектральных отношений, метод амплитудного спада

**DOI:** <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.11>

**Для цитирования:** Лаломов Д.А., Глазунов В.В. Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных. *Георесурсы*. 2017. Т. 19. № 1. С. 69-77. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.11>

## Введение

Метод георадиолокации является одним из широко используемых методов малоуглубинной электроразведки (Davis, Annap, 1989). Метод позволяет успешно решать как инженерно-геологические, так и геотехнические задачи, связанные с определением пространственных границ между контрастными по своим электрофизическим свойствам горными породами или конструктивными элементами. Между тем, несмотря на доказанную на практике эффективность пространственного определения положения георадиолокационных границ, метод сталкивается с существенными сложностями при определении свойств, изменение которых и является причиной появления на радарограммах ярких осей синфазности. А в случае отсутствия на радарограммах границ практическая эффективность метода резко снижается, хотя георадиограмма и несет в себе огромный объем информации о кинематических и динамических изменениях записи, непосредственно связанных с исследуемой средой и являющихся откликом на изменение ее свойств.

Одним из перспективных направлений исследований в данной области на сегодняшний день является количественная оценка глинистости грунтов в рамках изучения песчано-глинистого геологического разреза на основе комплекса методов сопротивления и георадиолокации с использованием параметра добротности  $Q$ , связывающего различные электрофизические параметры исследуемой среды (Wunderlich, Rabbal, 2013; Glazounov, Lalomov, 2014). Между тем, переход к количественному анализу георадиолокационных данных требует четкого представления о влиянии на измеряемые и рассчитанные на их основе электрофизические параметры не только литологических особенностей исследуемых грунтов, но и такого внешнего фактора, как общая минерализация грунтовых вод.

## Минерализация в методах геоэлектрики

Под минерализацией воды или сухим остатком в гидрогеологии понимается сумма всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ (Климентов, Богданов, 1977). Состав сухого остатка не совпадает полностью с составом веществ, присутствующих в растворе: газы улетучиваются, бикарбонаты переходят в карбонаты, сульфат кальция может осаждаться в виде гипса, поглощающего часть воды, а небольшие количества магния, хлоридов и нитратов могут улетучиться. Тем не менее, по сухому остатку, как и по электропроводности, можно приблизительно оценить точность полученной суммы растворенных твердых веществ. В свою очередь, удельное электрическое сопротивление (УЭС) горных пород определяется в значительной мере минерализацией подземных вод, так как электропроводность у пород в основном ионная (Хмелевской, 1999). Опыт также показывает, что основным фактором, определяющим величину УЭС пород, является удельное сопротивление поровой влаги (Матвеев, Рыжов, 2006).

Сопротивление песчано-глинистой смеси зависит от размеров зерен и капилляров каждого компонента и их пористости, от солёности поровой влаги, процентного соотношения глины и песка, температуры, влажности грунта, ионно-обменной емкости глины (Шевнин и др., 2006). Песок и глина, являющиеся крайними компонентами песчано-глинистого ряда, в условиях различной минерализации грунтовых вод на участке могут иметь схожие значения УЭС. Таким образом, при изучении песчано-глинистых разрезов методом сопротивления учет минерализации грунтов имеет большое значение для корректной интерпретации полученных данных. Петрофизическая связь между минерализацией и удельным электрическим сопротивлением грунта в рамках

метода сопротивления изучена хорошо и подробно описывается в работах В.А. Шевнина и А.А. Рыжова (Шевнин и др., 2006; Матвеев, Рыжов, 2006).

Влияние минерализации воды, насыщающей песчаные грунты, на данные метода георадиолокации, в отличие от метода сопротивления, изучено недостаточно. Известен опыт применения метода георадиолокации Санкт-Петербургским государственным горным институтом для поиска и разведки месторождений песка (Глазунов и др., 2000). Метод был апробирован на нескольких месторождениях песка в Ленинградской области. В пресных водоемах и песках глубинность изучения разреза достигала десятков метров, а на акваториях с повышенной минерализацией воды и в разрезах, содержащих слои глины, глубинность резко сокращалась. Исследования, выполненные на образцах грунта, показали, что с увеличением минерализации воды увеличивается и коэффициент отражения георадиолокационного сигнала от верхней границы образца (Hagrey, Muller, 2000). Причем наиболее отчетливо данный эффект наблюдается при сопоставлении амплитуд частотных спектров отраженных сигналов. В работе (Kiselev, 2009) приводится пример определения электропроводности среды при помощи амплитудного анализа радарных данных на границе галоклина. В данной работе примечательно то, что георадиолокационные отражения наблюдались от границы перехода между пресной и соленой водой. В работе (Садовский и др., 2013) отмечаются существенные расхождения модельных и экспериментальных оценок величины комплексной диэлектрической проницаемости в области высоких значений температуры и солёности электролита, которые наглядно демонстрируют острую нехватку данных систематических лабораторных измерений величины комплексной диэлектрической проницаемости водной среды с повышенным содержанием солей.

### Параметр добротности $Q$ среды в методе георадиолокации

Параметр добротности  $Q$  среды, характеризующий распространение упругих колебаний в диссипативных средах, хорошо известен в сейсморазведке (Боганик, Гурвич, 2006). Он является атрибутом Гильберт-преобразования сейсмической записи и среди прочих нашел свою практическую ценность при литологической интерпретации сейсмических данных еще в начале 80-х годов 20 века (Ампиров, 2008). В георадиолокации параметр добротности  $Q$  также иногда находит свое применение в графе обработки георадиолокационных данных в рамках атрибутного анализа (Tronicke, Vöniger, 2013), хотя связь этого параметра с литологической характеристикой различных грунтов на сегодняшний день изучена недостаточно. С физической точки зрения параметр  $Q$  определяет отношение запасенной энергии системы к потерям энергии за один период колебаний электромагнитной волны (Liu et al., 1998). В георадиолокации параметр  $Q$  используется для характеристики диэлектрических потерь или затухания, и рассеяния электромагнитных волн (Вано, 1996), и может рассматриваться как дополнительный независимый электрофизический параметр для характеристики свойств грунта. Известно, что основной причиной затухания электромагнитной волны в грунте является увеличение

содержания глинистой фракции (Ефимова, 1999), и, как отмечалось выше, схожим образом на затухание георадиолокационного сигнала влияет повышение минерализации грунта (Глазунов и др. 2000). В лабораторных условиях для различных песчано-глинистых грунтов были получены эмпирические зависимости между их глинистостью, влажностью и параметром добротности (Wunderlich, Rabbel, 2013). Вопрос о зависимости между минерализацией воды, насыщающей грунт, и параметром добротности на сегодняшний день разработан недостаточно.

Таким образом, цель данного исследования состояла в установлении степени влияния удельного электрического сопротивления и минерализации на параметр добротности  $Q$  среды, получаемый на основе георадиолокационных данных. В качестве объекта лабораторных исследований использовалась двухслойная баковая модель, состоящая из слоя воды, перекрывающего слой песка с переменной минерализацией в широком диапазоне, и подстилающей их алюминиевой пластины, являющейся абсолютным рефлектором электромагнитных импульсов георадара. После тщательного перемешивания воды с песком параметр добротности  $Q$  слоев модели определялся для различных значений минерализации воды. В качестве измерительного оборудования для определения минерализации и УЭС использовались как стандартные комплекты геофизической аппаратуры, так и вспомогательные устройства.

Параметр добротности  $Q$  каждого из слоев модели независимо определялся двумя различными методами, реализованными как во временной, так и в частотной областях. Полученные результаты сравнивались с аналитической зависимостью, рассчитанной на основании известных формул (Wunderlich, Rabbel, 2013).

Экспериментально полученные данные указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации воды. Важно отметить, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность.

### Условия эксперимента

С учетом рекомендаций, описанных в работе (Судакова, 2009), аналоговая георадиолокационная модель формировалась в стеклянном баке, на дне которого размещалась алюминиевая пластина, являющаяся абсолютным рефлектором электромагнитных импульсов георадара. Модель включала слой воды, перекрывающий слой песка. Антенная система георадара с частотой 1200 МГц располагалась на поверхности модели (Рис. 1).

Эксперимент состоял из пошагового увеличения минерализации воды в баке с последующей регистрацией отраженного георадиолокационного сигнала для заданных значений минерализации. Минерализация воды повышалась за счет добавления в нее хлорида натрия. Повышение минерализации слоя песка достигалось тщательным перемешиванием песка с водой и отстаиванием модели в течение суток. Формируемые модели характеризовались определенными значениями минерализации воды и, соответственно, удельными сопротивлениями воды и песка (Табл. 1).

Несмотря на использование дистиллированной воды, нижний предел минерализации воды после первого

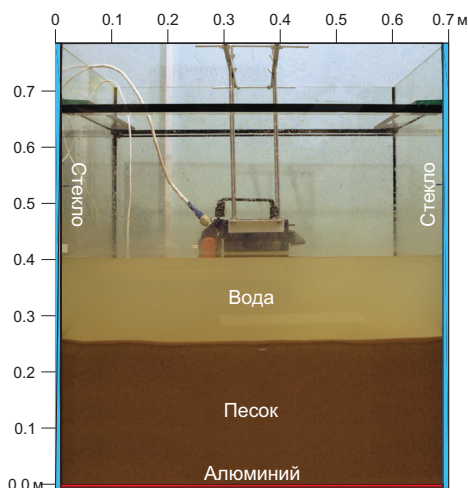


Рис. 1. Двухслойная физическая баковая модель

№ Опыта	Минерализация воды, г/л	УЭС воды, Ом·м	УЭС песка, Ом·м	Температура, °С
1	0.03	152	356	16.7
2	0.07	67	179	16.6
3	0.19	26	73	16.7
4	0.41	12	37	17.0
5	0.66	8	23	16.6
6	2.00	3	8	16.4

Табл. 1. Изменение параметров модели

перемешивания модели составил 0.03 г/л, что было обусловлено изначальным присутствием незначительной концентрации соли в кварцевом песке. Верхний предел минерализации воды составил 2 г/л. Увеличение минерализации выше этого предела характеризовалось полным затуханием электромагнитной волны уже в верхнем слое воды.

В процессе эксперимента проявилось образование взвеси в слое воды после ее перемешивания со слоем песка. Выпадение осадка произошло при переходе минерализации 0.2 г/л. Образовавшаяся в слое воды взвесь представлена глинистыми частицами с примесью растворенной гумусовой органики, что вполне характерно для используемого в опыте кварцевого песка с карьера месторождения «Мураевня» Милославского района Рязанской области.

После достижения определенной солености воды срабатывает геохимический барьер, запускающий механизм флокуляции (Фридрихсберг, 1995), в процессе которого происходит превращение золя в гель и хлопьевидное осаждение. Природным аналогом такого процесса является осаждение мути в дельте рек, впадающих в море. Поверхностный заряд на частицах взвеси препятствует их слипанию и осаждению, при появлении ионов соли заряд компенсируется, частицы слипаются, увеличиваются и выпадают. Пороговое значение солености, после которого процесс начинает существенно ускоряться, разный для разных по составу и концентрации взвесей. В данном эксперименте он составил 0,2 г/л.

Несмотря на побочные эффекты, возникающие при формировании баковой модели, полученная зависимость удельного электрического сопротивления слоев от минерализации воды (Рис. 2) соответствует известной зависимости (Электроразведка ..., 1994).

По полученным зависимостям можно определить эмпирические формулы перехода от минерализации воды к удельному электрическому сопротивлению слоев, которые будут иметь вид для воды:

$$\rho_{\text{воды}} = \frac{4.8}{M}$$

и для песка:

$$\rho_{\text{песка}} = \frac{13.0}{M}, \text{ где } M - \text{ значение минерализации.}$$

Следует отметить, что данные формулы верны только для солености ниже 5 г/л и конкретных рассматриваемых условий, когда в качестве соли выступает NaCl, а средняя температура среды составляет 16.7 °С.

Измерения электропроводности воды выполнены с использованием портативного кондуктометра. Измерения электропроводности песка осуществлены с использованием грунтового четырех электродного резистивиметра закрытого типа (Shevnin et al., 2005).

Пример георадиолокационной записи одного из опытов, где четко видны основные рефлекторы, к которым относятся границы вода-песок и песок-алюминий, представлен на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена совокупность всех полученных в процессе эксперимента георадиолокационных записей в виде объединенных радарограмм, на которых проявилось изменение интенсивности отраженных сигналов, обусловленное повышением минерализации воды.

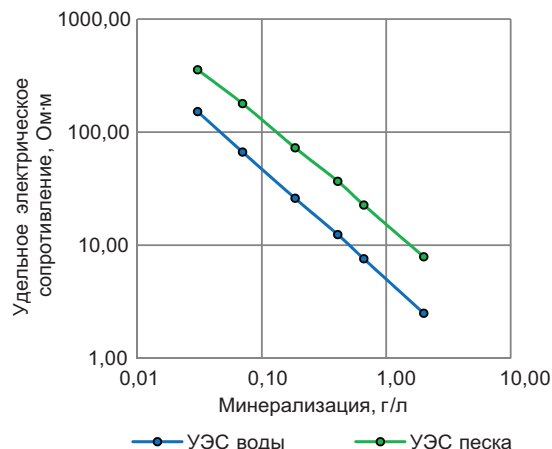


Рис. 2. Изменение УЭС слоев баковой модели с ростом минерализации

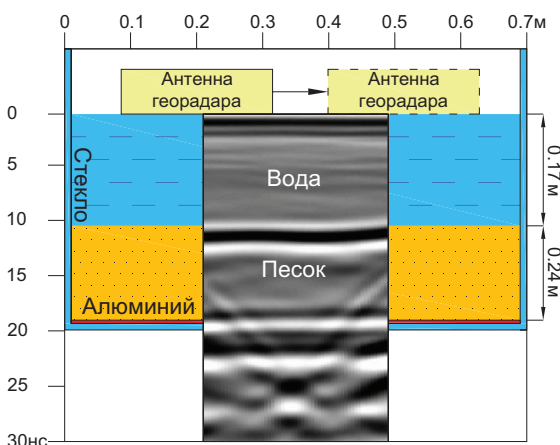


Рис. 3. Пример георадиолокационной записи одного из опытов

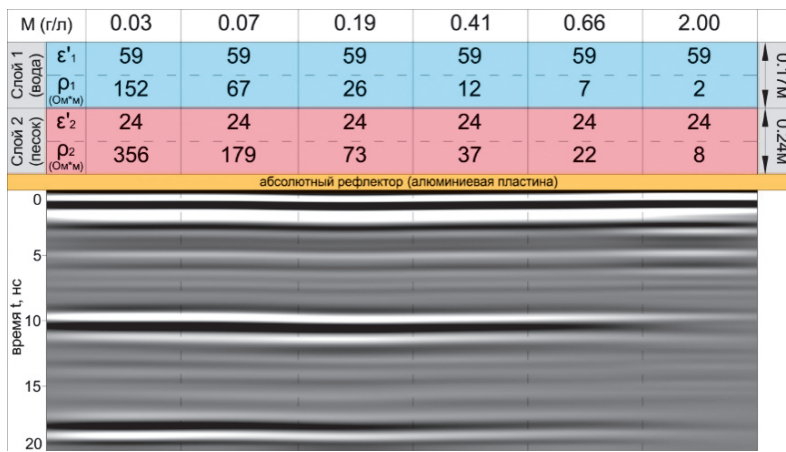


Рис. 4. Изменение интенсивности отраженного сигнала в процессе изменения электрофизических параметров георадиолокационной модели

Значения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  определялись из известного соотношения:

$$\epsilon' = \left( \frac{c \cdot t}{2h} \right)^2, \tag{1}$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $t$  – время пробега волны до отражающей границы и обратно,  $h$  – мощность слоя.

Заметим, что диэлектрическая проницаемость, полученная для верхнего слоя модели, составила 59 единиц, а не 81, как указывается во многих литературных источниках для чистой воды. Эта значительная разница объясняется тем, что в верхнем слое воды образовалась взвесь глинистых частиц, о которой уже упоминалось выше.

Кроме того, важным фактом, наблюдаемым в процессе эксперимента, явилось то, что скорость распространения георадиолокационного сигнала не зависит от электропроводности среды.

Для определения  $Q$  набор трасс, полученных в каждом из экспериментов, усреднялся и преобразовывался методом Гильберта. Результаты преобразований в виде огибающих отраженных сигналов, нормированных по амплитуде прямой волны, приведены на рис. 5.

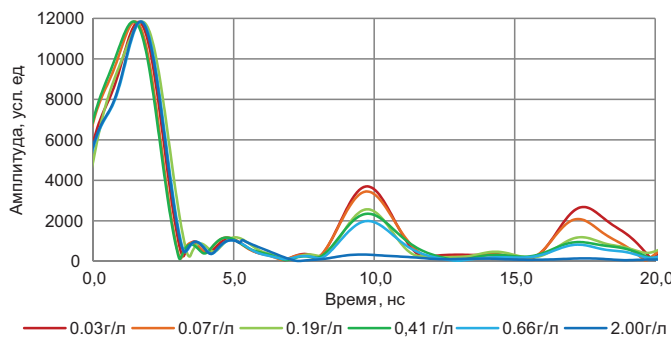


Рис. 5. Огибающие отраженных сигналов, нормированные по амплитуде прямой волны

### Определение параметра добротности $Q$

Аналитическая зависимость, связывающая электропроводность, действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости среды, согласно (Wunderlich, Rabbel, 2013), описывается следующим уравнением:

$$Q = \frac{\omega \epsilon_{ef}(\omega)}{\sigma_{ef}(\omega)} \approx \frac{\omega \epsilon'(\omega)}{\sigma_{DC} + \omega \epsilon''(\omega)}, \tag{2}$$

где  $\epsilon_{ef}(\omega)$  – эффективная диэлектрическая проницаемость,  $\sigma_{ef}(\omega)$  – эффективная проводимость,  $\epsilon'(\omega)$  и  $\epsilon''(\omega)$  – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости соответственно, а  $\sigma_{DC}$  – электрическая проводимость постоянного тока.

Произвести прямые измерения мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$  в условиях описываемого эксперимента не представлялось возможности, поэтому для аналитических расчетов использовались значения  $\epsilon'$ , приведенные в литературных источниках для воды и песка, которые использовались в модели (для воды  $\epsilon'' = 4.86$  (Meissner, Wentz, 2004) и для песка  $\epsilon'' = 1.01$  (Ефимова, 1999)).

На основе выражения (2) и экспериментальных данных получены аналитические зависимости добротности от минерализации для слоев рассматриваемой модели (Рис. 6). Зависимости хорошо аппроксимируются экспоненциальными уравнениями вида  $y = ke^{-\alpha x}$  с различными для каждого из слоев коэффициентами пропорциональности  $k$  и  $\alpha$ , зависящими от свойств среды и коэффициентом детерминации  $R^2 > 0.98$ .

Для определения параметра добротности  $Q$  слоев модели на основе экспериментальных данных использовались существующие в сейсмометрии метод амплитудного спада и метод спектральных отношений (Tonni, 1991).

Одним из самых простых и широко используемых методов определения параметра добротности  $Q$  является метод амплитудного спада, реализуемый во временной области (Tonni, 1991). Параметр добротности рассчитывается из отношения амплитуд сигналов записанных до и после прохождения волны через поглощающую среду:

$$Q = \frac{\omega \Delta x}{2V} \left\{ \ln \left[ \frac{A(x_0)}{A(x_1)} \right] \right\}^{-1}, \tag{3}$$

где  $V$  – скорость волны,  $\Delta x$  – мощность слоя,  $\omega = 2\pi f$  – центральная частота сигнала,  $A(x_0)$  и  $A(x_1)$  – амплитуды исходного и отраженного сигнала соответственно.

В случае метода георадиолокации в качестве исходной амплитуды  $A(x_0)$  обычно используют амплитуду прямой волны, распространяющейся в воздухе.

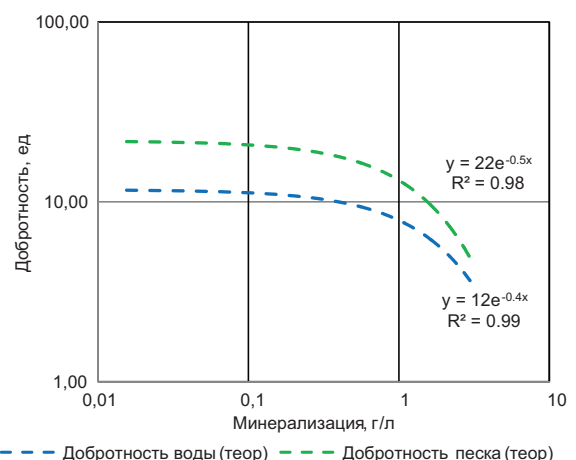


Рис. 6. Теоретические зависимости добротности от минерализации для воды и песка

Скорость прохождения волны определяется из известного соотношения:

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\epsilon'$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости.

Амплитуды сигналов, отраженных от подошв первого и второго слоев, использованные в расчетах, приведены на рисунке 7. Исходный сигнал характеризовался амплитудой прямой волны  $A(x_0) = 11826$  на нулевом расстоянии от антенны  $x_0$  (Рис. 5) и частотой  $f = 1200$  МГц.

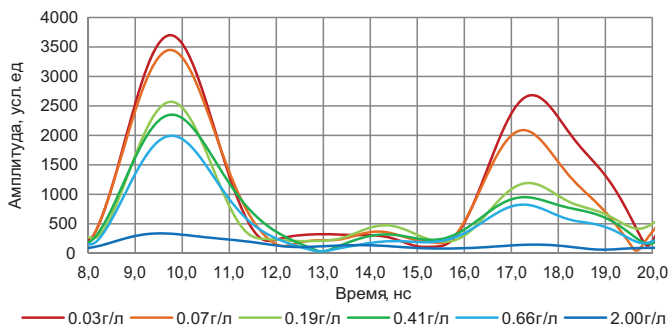


Рис. 7. Отраженные сигналы от границ вода-песок (15 нс) и песок-алюминий (23 нс) после преобразования Гильберта

Общая добротность модели и добротность первого слоя рассчитывались по формуле (3). Добротность второго слоя рассчитывалась с использованием пропорционального выражения:

$$\bar{Q} \cdot \bar{h} = Q_1 \cdot h_1 + Q_2 \cdot h_2 \quad (5)$$

где  $\bar{Q}$  – эффективная (общая) добротность модели мощностью  $\bar{h} = h_1 + h_2$ ,  $Q_1, Q_2$  – добротности первого и второго слоев, а  $h_1, h_2$  – их мощности.

Для контроля определения параметра  $Q_2$  слоя песка двухслойной модели добротность песка дополнительно определялась на однослойной модели водонасыщенного песка при минимальной и максимальной минерализации воды. На рисунке 8 приведены трассы и их огибающие (преобразование Гильберта) для слоя песка, полученные в рамках однослойной модели в конце и в начале

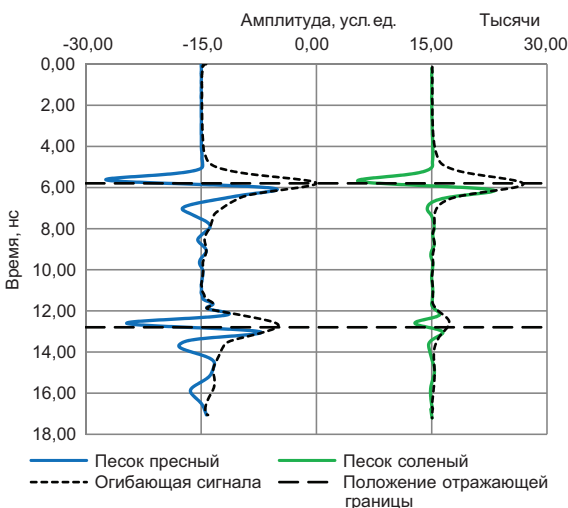
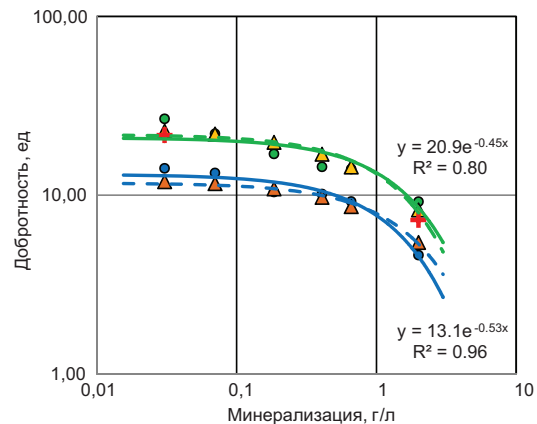


Рис. 8. Георадиолокационные трассы и их огибающие полученные на слое пресного и соленого песка в рамках однослойной модели

эксперимента (при минимальной и максимальной минерализации воды), когда верхний слой воды, перекрывающий песок, сливался из бака.

Как и в случае двухслойной модели, из рисунка 8 видно, что повышение минерализации практически не изменяет скорость распространения георадиолокационного сигнала, а изменяет только амплитуду его отражений.

Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений, в сравнении с аналитическими зависимостями приведены на рисунке 9.



- + Добротность песка (контрольные измерения на однослойной модели)
- Добротность воды (лаб) — — Добротность воды (теор)
- Добротность песка (лаб) — — Добротность песка (теор)

Рис. 9. Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений в сравнении с аналитическими зависимостями (метод амплитудно-го спада)

В качестве второго метода определения  $Q$  использовался метод спектральных отношений. Метод реализуется в частотной области и является достаточно трудоемким, но в тоже время обладает большей точностью, в отличие от методов, реализуемых во временной области (Wunderlich, Rabbel, 2013). Параметр  $Q$  определяется путем сравнения сигналов, преобразованных методом Фурье в частотную область, до и после прохождения через поглощающую среду.

На рисунках 10 и 11 приведены спектры отраженных сигналов от границ вода-песок и песок-алюминий. С повышением минерализации наблюдается снижение центральных частот отраженных сигналов.

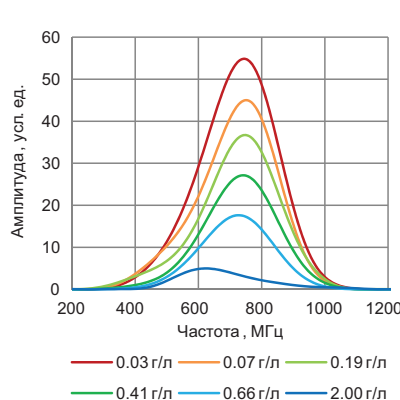


Рис. 10. Спектры отраженных сигналов от границы вода-песок

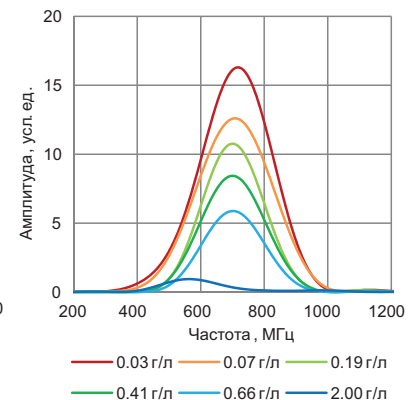


Рис. 11. Спектры отраженных сигналов от границы песок-алюминий

Линейное уравнение, описывающее спектральное отношение отраженного и исходного сигнала для добротности  $Q$ , на основании (Báth, 1974):

$$Q = \frac{\Delta t \omega}{2 \left( \ln \left( \frac{|A_1(\omega_0)|}{|A_0(\omega_0)|} \right) - \ln \left( \frac{|A_1(\omega)|}{|A_0(\omega)|} \right) \right)}, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – разность между временами прихода исходной и отраженной волны,  $\omega = 2\pi f$  – центральная частота сигнала,  $(A_0(\omega))$  и  $(A_1(\omega))$  – частотные спектры исходной и отраженной волны,  $(A_0(\omega_0))$  и  $(A_1(\omega_0))$  – частотные спектры исходной и отраженной волны на нулевой частоте.

Метод спектральных отношений заключается в количественной оценке частотного сдвига максимума амплитуды исходного спектра источника, аппроксимируемого колоколообразной функцией Гаусса (Wunderlich, Rabbel, 2013).

На основании данного подхода параметр добротности  $Q$  рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\gamma^2}{2\pi} \frac{\Delta t}{(f_0 - f_c)}, \quad (7)$$

где  $\gamma$  является шириной кривой исходного спектра источника,  $f_0$  – его центральная частота, а  $f_c$  – центральная частота спектра отраженного сигнала.

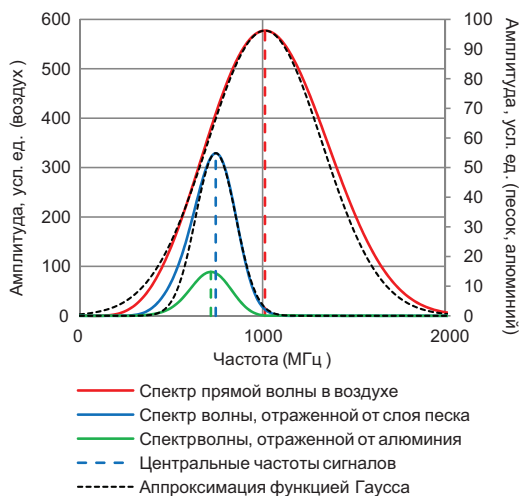


Рис. 12. Частотные спектры отраженных сигналов при минимальной минерализации

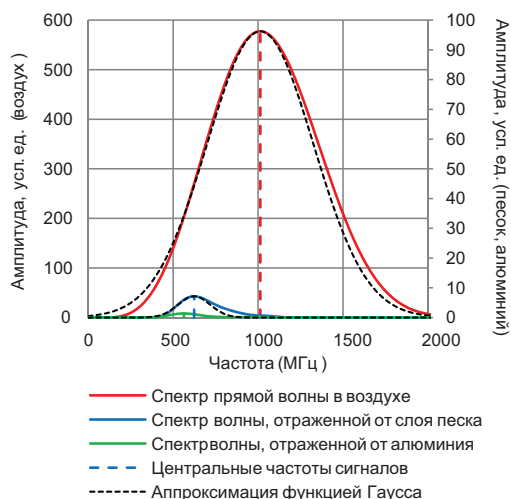


Рис. 13. Частотные спектры отраженных сигналов при максимальной минерализации

Уравнение (7) может быть использовано для оценки параметра  $Q$ , если определены  $f_0$  и  $\gamma$  исходного сигнала в непоглощающей среде.

Отраженные волны, используемые для спектрального анализа, вырезались во временных окнах порядка 4 нс. Исходным спектром при расчетах являлся спектр прямой волны антенны, предварительно полученный в воздухе.

На рисунках 12 и 13 приведены спектры отраженных сигналов в сравнении со спектром прямой волны в воздухе для минимальной и максимальной минерализации. На рисунках наблюдается сдвиг центральных частот спектров отраженных сигналов в сторону низких частот как относительно спектра прямой волны в воздухе, так и от слоя к слою. Кроме того, наблюдается снижение амплитуды спектров.

Сравнение спектров, приведенных на рисунках 12 и 13, показывает, что с увеличением минерализации воды увеличивается и величина частотного сдвига спектров.

На основании полученных частотных спектров отраженных волн методом спектральных отношений вычислены значения параметра добротности  $Q$  для первого слоя модели и совокупности первого и второго слоев (эффективная добротность модели) при различных значениях минерализации. Добротность второго слоя рассчитана по формуле (5).

Значения добротности  $Q$  и удельные электрические сопротивления для воды и песка, полученные в условиях различной минерализации модели, представлены на рисунке 14.

## Результаты

Сравнение результатов определения параметра добротности, полученных методами амплитудного спада и спектральных отношений, показывают, что в общем случае обе лабораторные зависимости хорошо соотносятся между собой и отвечают аналитической зависимости добротности от минерализации в диапазоне от 0.03 до 0.4 г/л (Рис. 9, 14). Зависимость, полученная методом амплитудного спада, хорошо коррелируется с аналитической на всем рассматриваемом диапазоне минерализации. Зависимость, полученная методом спектральных отношений, после перехода значений минерализации воды за пределы 0.4 г/л

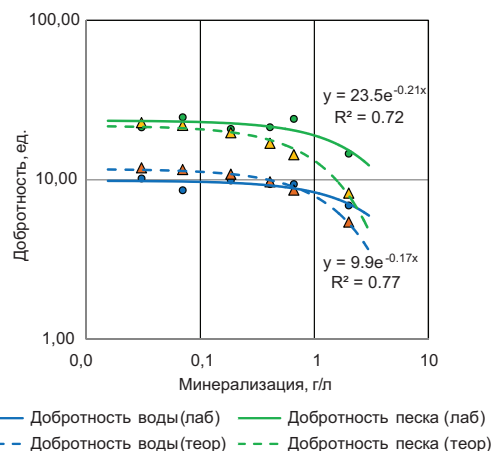


Рис. 14. Графики зависимостей добротности от минерализации, полученные на основании лабораторных измерений в сравнении с аналитическими зависимостями (метод спектральных отношений)

(что при данных значениях электропроводности слоев модели соответствует значениям тангенса диэлектрических потерь  $\tan\delta$  более 0.1) начинает существенно отклоняться от аналитической в сторону увеличения добротности, как для слоя воды, так и для слоя песка. Данный эффект может косвенно указывать на ошибки определения действительной части диэлектрической проницаемости в связи с использованием приближенной аппроксимации малых потерь формулы (4) (Gigoux, Chouteau, 2010).

Тем не менее, зависимость добротности от минерализации, полученная методом амплитудного спада, как уже отмечалось выше, хорошо коррелируется с аналитической на всем рассматриваемом диапазоне минерализации и аппроксимируется экспоненциальными уравнениями с высокой степенью достоверности аппроксимации. Графическое представление результатов данного эксперимента приведено на рисунке 15. Пунктирными линиями показаны зависимости УЭС слоев модели от минерализации, сплошными линиями – зависимости добротности от минерализации.

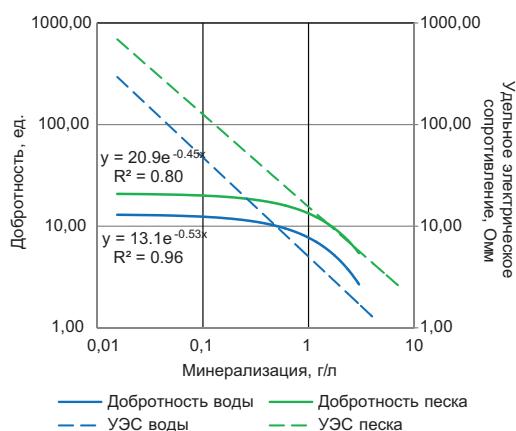


Рис. 15. Графики зависимости удельного электрического сопротивления и добротности от минерализации

Для каждого из слоев полученные соотношения добротности и минерализации лучше всего аппроксимируются экспоненциальной зависимостью. Для слоя воды и слоя песка величина достоверности аппроксимации составляет 0.96 и 0.80 соответственно.

Установлено, что экспериментально полученная зависимость добротности вещества от минерализации воды для каждого из слоев в общей форме описывается следующим уравнением:

$$Q = Q_0 \cdot e^{-kM}, \quad (8)$$

где  $M$  – минерализация,  $Q$  – добротность слоя,  $Q_0$  – начальная добротность слоя, к которой стремится экспериментально полученная добротность при минимальной минерализации,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Заметим, что между  $\sigma$  электропроводностью воды и ее минерализацией  $M$  при температурных условиях, в которых проводился эксперимент ( $t \approx 16.5^\circ\text{C}$ ), имеется следующая линейная зависимость:

$$\sigma \approx \frac{M}{4.8}, \quad (9)$$

Тогда (8) с учетом (9) примет следующий вид:

$$Q \approx Q_0 \cdot e^{-4.8 \cdot k \cdot \sigma}, \quad (10)$$

где  $Q$  – добротность минерализованного вещества, а

$Q_0$  – добротность вещества с нулевой минерализацией,  $M$  – минерализация воды. Для веществ рассматриваемой модели полученные значения коэффициентов  $Q_0$  и  $k$  приведены в таблице 2.

Вещество	$Q_0$	$k$
Вода	13.1	0.53
Песок водонасыщенный	20.9	0.45

Табл. 2. Значения коэффициентов  $Q_0$  и  $k$ .

## Выводы

Экспериментально полученные данные указывают на экспоненциальную зависимость добротности от минерализации с высокой степенью достоверности аппроксимации. Можно отметить, что изменение минерализации влияет на добротность в меньшей степени, нежели на электропроводность.

Данное обстоятельство может являться перспективной предпосылкой для комплексирования методов сопротивления и георадиолокации в условиях, когда низкие сопротивления исследуемых грунтов могут быть обусловлены как их литологическими особенностями, так и минерализацией грунтовых вод.

Кроме того, описанный подход на основе измерения добротности и электропроводности, позволяет производить прямые расчеты мнимой части диэлектрической проницаемости  $\epsilon''$ , которая может являться важным электрофизическим параметром, характеризующим исследуемую среду, в частности, глинистость песчано-глинистого разреза. Кроме того, важным фактом, наблюдаемым в процессе эксперимента, явилось то, что скорость распространения георадиолокационного сигнала не зависит от электропроводности среды.

## Литература

- Ампиллов Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа. М: ООО «Издательство «Спектр». 2008. 384 с.
- Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. Тверь: АИС. 2006. 744 с.
- Глазунов В.В., Ефимова Н.Н., Никифоров А.В. Применение метода георадиолокации для поиска и разведки месторождений песка. *Мат. Междунар. науч.-техн. семинара: Георадары, дороги-2000*. Архангельск: Изд-во АГТУ. 2000. С. 18-23.
- Ефимова Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики. *Автореф. дис. канд. техн. наук*. СПб: 1999. 16 с.
- Климентов П.П., Богданов Г.Я. Общая гидрогеология. М: Недра. 1977. 357 с.
- Матвеев В.С., Рыжов А.А. Геофизическое обеспечение региональных гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и геоэкологических исследований. *Разведка и охрана недр*. 2006. № 2. С. 50-57
- Садовский И.Н. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий. М: ФГБУН ИКИ РАН. 2013. 60 с.
- Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М: Изд-во МГУ. 2008. 192 с.
- Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях. *Автореф. дис. канд. физ. мат. наук*. М: МГУ. 2009. 24 с.
- Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. 3-е изд. СПб: Химия. 1995. 400 с.
- Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна». 1999. 184 с.
- Шевнин В.А., Рыжов А.А., Делгадо-Родригес О. Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений. *Геофизика*. 2006. № 4. С. 37-43.

- Электроразведка методом сопротивлений. Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М. МГУ. 1994. 160 с.
- Bano M. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves. *Geophysical Journal International*. 1996. No. 124. Pp. 279-288.
- Báth M. Spectral Analysis in Geophysics. Elsevier Scientific Publication Company. *Developments in Solid Earth Geophysics*. 1974. V. 7. 563 p.
- Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating Radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 1989. No. 37. Pp. 531-551.
- Giroux B., Chouteau M. Quantitative analysis of water-content estimation errors using ground-penetrating radar data and a low-loss approximation. *Geophysics*. 2010. V. 75. No. 4. Pp. 241-249.
- Glazounov V.V., Lalomov D.A. The combined application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging for the investigation of sand-clay geological cross-section. *10th anniversary Scientific & Practical Conference and Exhibition: Engineering Geophysics*. Gelendzhik, Russia. 2014. DOI: 10.3997/2214
- Hagrey S.A., Muller C. GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*. 2000. No. 48. Pp. 63-85
- Kiselev E.Yu. Estimation of conductivity of the media using GPR data. *EAGE Geophysics 2009*. Session 4. Russia. 2009.
- Liu L., Lane J.W., Quan Y. Radar attenuation tomography using the centroid frequency downshift method. *Journal of Applied Geophysics*. 1998. No. 40. Pp. 105-116.
- Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and seawater from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. No. 9. Pp. 1836-1849.
- Shevnin V., Rodriguez O., Linarez L. et al. Geoelectrical characterization of an oil-contaminated site in Tabasco, Mexico. *Geofisica International*. 2005. No. 44. Pp. 251-263.

- Tonn R. The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods. *Geophysical Prospecting*. 1991. No. 39. Pp. 1-27.
- Tronicke J., Böniger U. GPR attribute analysis: There is more than amplitudes. *First break*. 2013. No. 31. Pp. 103-108.
- Wunderlich T., Rabbel W. Absorption and frequency shift of GPR signals in sandy and silty soils: empirical relations between quality factor Q, complex permittivity and clay and water contents. *Near Surface Geophysics*. 2013. V. 11. No. 2. Pp. 117-127.

## Сведения об авторах

Дмитрий Александрович Лаломов – старший инженер-геофизик, ООО «Фертоинг»

Россия, 196158, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 40-4/А

Тел: +7 (911) 817-76-16, e-mail: lalomov@outlook.com

Владимир Васильевич Глазунов – доктор техн. наук, профессор кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки полезных ископаемых

Санкт-Петербургский горный университет

Россия, 199109, Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, 2

Тел: +7 (981) 164-85-65, e-mail: VVGlazounov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.06.2016;

Принята к публикации 30.11.2016;

Опубликована 30.03.2017

## Establishing the Dependence between the Salinity and Quality Factor Based on GPR Data

D.A. Lalomov<sup>1</sup>, V.V. Glazunov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LLC Fertoing, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

The paper presents the results of research, the purpose of which was to establish the relationship between the electrical conductivity, salinity and quality factor Q obtained on the basis of GPR data. The essence of the research is the determination of prospects for quantitative evaluation of geophysical data based on the aggregation of electro resistance methods and GPR. The practical part of the paper describes the method of forming a two-layer tank GPR laboratory model and ways of measuring its electro-physical parameters using the traditional geophysical methods with standard equipment as well as auxiliary measurement devices. The theoretical part of the paper is devoted to the implementation of various approaches to the calculation of the quality factor Q of the environment based on the laboratory GPR measurements. The experimental data confirmed by analytic calculations evidence the exponential dependence of the quality factor Q on the mineralization. An important conclusion is that the salinity change affects the quality factor Q less than the electrical conductivity.

**Key words:** ground penetrating radar, salinity, electrical conductivity, quality factor Q, tank-model, spectral ratio method, amplitude decay method

### References

- Ampilov Yu.P. Ot Seismicheskoi Interpretatsii k Modelirovaniyu i Otsenke Mestorozhdenii Nefti i Gaza [From Seismic Interpretation to Modeling and Evaluation of Oil and Gas Fields]. Moscow: OOO Izdatelstvo Spektr. 2008. 384 p. (In Russ.)

- Bano M. Constant Dielectric Losses of Ground-Penetrating Radar Waves. *Geophysical Journal International*. 1996. No. 124. Pp. 279-288.
- Báth M. Spectral Analysis in Geophysics. Elsevier Scientific Publication Company. *Developments in Solid Earth Geophysics*. 1974. V. 7. 563 p.
- Boganik G.N., Gurvich I.I. Seismorazvedka [Seismic prospecting]. Tver: AIS. 2006. 744 p. (In Russ.)
- Davis J.L., Annan A.P. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 1989. No. 37. Pp. 531-551.
- Efimova N.N. The Application of Georadiolocation in Solving Problems of Engineering Geophysics. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Abstract Cand. engin. sci. diss.]. St. Petersburg: 1999. 16 p. (In Russ.)
- Электроразведка Методом Сопrotivlenii [Electrical Exploration by Resistance]. Ed. V.K. Khmelevsky & V.A. Shevnin. Moscow: MGU. 1994. 160 p. (In Russ.)
- Fridrikhsberg D.A. Kurs Kolloidnoi Khimii [Course of Colloid Chemistry]. 3 Ed. St. Petersburg: Chemistry. 1995. 400 p. (In Russ.)
- Giroux B., Chouteau M. Quantitative Analysis of Water-Content Estimation Errors Using Ground-Penetrating Radar Data and a Low-Loss Approximation. *Geophysics*. 2010. V. 75. No. 4. Pp. 241-249.
- Glazounov V.V., Lalomov D.A. The Combined Application of Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Imaging for the Investigation of Sand-Clay Geological Cross-Section. *10th anniversary Scientific & Practical Conference and Exhibition: Engineering Geophysics*. Gelendzhik, Russia. 2014. DOI: 10.3997/2214
- Glazunov V.V., Efimova N.N., Nikiforov A.V. Application of the Georadiolocation Method for Prospecting and Exploration of Sand Deposits. *Mat. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Seminara: Georadary, Dorogi-2000*. [Proc. Int. Sci.-Techn. Workshop: Georadars, Roads-2000]. Arkhangel'sk: AGTU Publ. 2000. Pp. 18-23. (In Russ.)
- Hagrey S.A., Muller S. GPR Study of Pore Water Content and Salinity in Sand. *Geophysical Prospecting*. 2000. No. 48. Pp. 63-85
- Khmelevskoi V.K. Geophysical Methods of Studying the Earth's Crust. Book 2: Regional, Exploration, Engineering and Environmental Geophysics.



Dubna: Mezhdunarodnyi universitet prirody, obshchestva i cheloveka «Dubna». 1999. 184 p. (In Russ.)

Kiselev E.Yu. Estimation of Conductivity of the Media Using GPR Data. *EAGE Geophysics*. Session 4. Russia. 2009.

Klimentov P.P., Bogdanov G.Ya. Obshchaya gidrogeologiya [General Hydrogeology]. Moscow: Nedra. 1977. 357 p. (In Russ.)

Liu L., Lane J.W., Quan Y. Radar Attenuation Tomography Using the Centroid Frequency Downshift Method. *Journal of Applied Geophysics*. 1998. No. 40. Pp. 105-116.

Matveev B.C., Ryzhov A.A. Geophysical Providing of Regional Hydrogeological, Engineering-Geological, Geocryological and Geoecological Studies. *Razvedka i okhrana nedr*. 2006. No. 2. Pp. 50-57. (In Russ.)

Meissner T., Wentz F.J. The Complex Dielectric Constant of Pure and Seawater from Microwave Satellite Observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. V. 42. No. 9. Pp. 1836-1849.

Sadovskii I.N. Analiz modelei dielektricheskoi pronitsaemosti vodnoi sredy, ispol'zuemykh v zadachakh distantsionnogo zondirovaniya akvatorii [Analysis of Models of the Dielectric Permittivity of the Water Environment Used in Problems of Remote Sensing of Water Areas]. Moscow: FGBUN IKI RAN. 2013. 60 p. (In Russ.)

Shevnin V., Rodriguez O., Linarez L. et. al. Geoelectrical Characterization of an Oil-Contaminated Site in Tabasco, Mexico. *Geofisica International*. 2005. No. 44. Pp. 251-263.

Shevnin V.A., Ryzhov A.A., Delgado-Rodriges O. Evaluation of Petrophysical Parameters of Soils According to the Method of Resistance. *Geofizika = Geophysics*. 2006. No. 4. Pp. 37-43. (In Russ.)

Starovoitov A.V. Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh [Interpretation of Georadar Tracking Data]. Moscow: MSU Publ. 2008. 192 p. (In Russ.)

Sudakova M.S. Development and Application of the Method of Dielectric Measurements Using Field Georadar in Laboratory Conditions. Avtoref. dis. kand. fiz. mat. nauk [Abstract Cand. phys. and math. sci. diss.]. Moscow: MGU. 2009. 24 p.

Tonn R. The Determination of the Seismic Quality Factor Q from VSP Data: a Comparison of Different Computational Methods. *Geophysical Prospecting*. 1991. No. 39. Pp. 1-27.

Tronicke J., Böniger U. GPR Attribute Analysis: There is more than Amplitudes. *First break*. 2013. No. 31. Pp. 103-108.

Wunderlich T., Rabbel W. Absorption and Frequency Shift of GPR Signals in Sandy and Silty Soils: Empirical Relations Between Quality Factor Q, Complex Permittivity and Clay and Water Contents. *Near Surface Geophysics*. 2013. V. 11. No. 2. Pp. 117-127.

**For citation:** Lalomov D.A., Glazounov V.V. Establishing the Dependence between the Salinity and Quality Factor Based on GPR Data. *Georesursy = Georesources*. 2017. V. 19. No. 1. Pp. 69-77. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.11>

#### About the Authors

*Dmitry A. Lalomov* – Senior Geophysicist, LLC Fertoing Russia, 196158, Saint Petersburg, Pulkovskoe shosse, 40-4/A  
Phone: +7(911)817-76-16  
e-mail: [lalomov@outlook.com](mailto:lalomov@outlook.com)

*Vladimir V. Glazounov* – DSc in Engineering Science, Professor, Chair of Mining Geophysics, Saint Petersburg Mining University  
Russia, 199109, Saint Petersburg, 21-ya liniya, 2  
Phone: +7(981)164-85-65  
e-mail: [VVGlazounov@mail.ru](mailto:VVGlazounov@mail.ru)

*Manuscript received 21 June 2016; Accepted 30 November 2016;  
Published 30 March 2017*