DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

Геология

УДК 550.837

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МЕТОДОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Д.А.ЛАЛОМОВ[1], В.В.ГЛАЗУНОВ[2]
[1] *ООО «Фертоинг», Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Рассматривается способ оценки коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе совместной интерпретации данных комплекса методов инженерной электроразведки, включающего электротомографию и георадиолокацию. Решение этой задачи основано на использовании известных эмпирических связей между мнимой и действительной частями комплексной диэлектрической проницаемости, удельным электрическим сопротивлением и параметром добротности. Приведен пример успешного применения георадиолокации и бесконтактной электротомографии для получения качественных и количественных оценок изменений значения коэффициента фильтрации в дренирующем слое автомобильной дороги. Для получения требуемых оценок необходимо привлекать априорную инженерно-геологическую информацию. Предлагаемый подход позволяет получить непрерывные георадиолокационные и электротомографические разрезы дорожной одежды и ее основания, а также дать оценку состояния грунтов при проведении электроразведочных съемок с поверхности асфальтобетонного покрытия. Даны рекомендации по внедрению разработанной методики комплексных инженерно-геофизических исследований для решения задач проектирования ремонтных работ, авторского надзора и контроля качества автодорожного строительства.

***Ключевые слова*:** георадиолокация; бесконтактная электротомография; комплексная диэлектрическая проницаемость; удельное электрическое сопротивление; добротность; глинистость; коэффициент фильтрации; контроль состояния дорожной одежды

***Как цитировать эту статью*:** Лаломов Д.А. Оценка коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе совместной интерпретации данных методов сопротивления и георадиолокации / Д.А.Лаломов, В.В.Глазунов // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 3-12. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

Введение. Оценка петрофизических параметров грунтов является актуальной задачей при проведении инженерно-геофизических исследований. Количественная петрофизика, основанная на уравнениях Слихтера и Козени – Кармана, широко применяется в основном в нефтегазовой геологии [1]. Возможность получения качественных и количественных оценок фильтрационных и физико-механических свойств грунтов методами инженерной геофизики обоснована теоретически и экспериментально (А.А.Огильви, А.А.Рыжов, В.А.Шевнин, К.В.Титов, М.Л.Владов, В.А.Явна, В.В.Капустин и др.). Основным фактором, ограничивающим определения этих параметров на практике, является необходимость проведения большого объема лабораторных измерений для получения корреляционных зависимостей, связывающих геофизические и петрофизические параметры для конкретного участка исследований.

Достоинства методов инженерной геофизики связаны с возможностью получения экспресс-оценки величин и характера изменений петрофизических параметров грунтов в естественном залегании. Особое значение при проектировании, строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, особенно автомобильных дорог, имеет определение коэффициента фильтрации песков, слагающих искусственные насыпи и дренирующий слой основания дорожной одежды.

В дорожном строительстве к коэффициенту фильтрации строительных материалов, который характеризует их водопроницаемость, предъявляют особые требования, так как этот параметр прямо определяет качество песка и возможности его применения для строительства насыпей [3, 7, 8, 10, 11]. Низкое значение коэффициента фильтрации песка указывает на повышенное содержание глинистых примесей, что существенно ограничивает возможность эффективного использования такого материала для дорожного строительства.

Существующие способы определения коэффициента фильтрации опираются на применение хорошо отработанных лабораторных методов испытаний образцов, методика проведения которых регламентирована нормативными документами. Недостатки использования этих методов связаны, прежде всего, с трудоемкостью их проведения и необходимостью опробования грунтового массива с помощью скважин. Методика отбора образцов, сопряженная с локальными раз-

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

рушениями поверхностных покрытий, не позволяет выполнить непрерывное изучение пространственного распределения значений коэффициента фильтрации в грунтовом массиве и получить образцы песка в ненарушенном сложении.

С помощью методов инженерной геофизики появляется возможность существенно дополнить информацию, получаемую методами лабораторного анализа, и, тем самым, минимизировать влияние перечисленных недостатков на результаты инженерно-геологических исследований. Применение комплекса методов инженерной электроразведки, включающего георадиолокацию и электротомографию, обеспечивает непрерывное изучение геологического разреза и получение качественных и количественных оценок фильтрационных свойств песков. Количественные оценки требуют привлечения априорной геологической или технической информации о строении и свойствах изучаемого геологического разреза или геотехнического сооружения.

Материалы и методы. Водопроницаемость грунтов зависит от множества факторов, что не позволяет в точной аналитической форме выразить зависимость коэффициента фильтрации (K_f) от параметров того или иного грунта [4].

Многочисленные экспериментальные данные показали, что фундаментальный закон Дахнова – Арчи, описывающий эти зависимости, справедлив для пород, не содержащих заметного количества тонкодисперсной (глинистой) фракции. Это существенно ограничивает возможность его практического использования, так как одним из основных факторов, влияющих на значение коэффициента фильтрации грунтов, является содержание глинистых частиц [4, 9, 15].

Добавление к песку 10 % глинистых частиц снижает водопроницаемость более чем на 50 % [4].Карьерный песок, широко используемый в производстве бетонов и строительных смесей, подсыпке дорог и фундаментов, характеризуется значениями коэффициента фильтрации от 0,5 до 7 м/сут.

Существует ряд зависимостей, связывающих коэффициент фильтрации K_f с содержанием глинистых частиц C [9, 18]. Для практических целей используется обобщающая их аппроксимация В.А.Шевнина [17]:

$$K_f = C^{-2} \cdot 7{,}2 \cdot 10^{-4}. \quad (1)$$

Формальная аналогия между геофильтрационным полем в пористой среде и полем постоянного электрического тока является предпосылкой для существования устойчивых связей между параметрами, определяющими проницаемость дисперсных пород, и их электропроводностью [9]. Однако эта связь оказывается весьма сложной, так как зависит от совокупности факторов, к числу которых, в первую очередь, относятся размер и форма зерен, слагающих грунт, общая пористость, конфигурация порового пространства, минерализация воды, температура, состав цемента породы и многие другие факторы.

Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии, в условиях маломинерализованных вод, сравнительно стабильной корреляционной связи удельного электрического сопротивления (УЭС) и коэффициента фильтрации. На ограниченных участках УЭС песчано-глинистых пород обычно монотонно увеличивается с ростом K_f. Причем изменение минерализации подземных вод может коренным образом изменить характер этой связи, поэтому более обосновано использование вспомогательного параметра – относительного сопротивления, учитывающего УЭС поровой влаги [5, 9, 13].

Несмотря на ряд ограничений для практического использования, обобщающей методикой определения коэффициента фильтрации на сегодняшний день является подход, основанный на измерениях УЭС грунта и минерализации грунтовых вод [12, 15].

В качестве альтернативы существующей на сегодняшний день методике определения коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов рассмотрим подход, который основан на определении параметра добротности Q песчано-глинистых грунтов по данным георадиолокации. Параметр Q определяет отношение запасенной энергии системы к потерям энергии за один период колебаний электромагнитной волны [16]. В георадиолокации параметр Q используется для характеристики диэлектрических потерь или затухания и рассеяния электромагнитных волн [14] и может рассматриваться как дополнительный независимый электрофизический параметр для характеристики свойств грунта. Известно, что основной причиной затухания электромагнитной волны в грунте является увеличение содержания именно глинистой фракции [6].

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.3*

Корреляционные зависимости между глинистостью и соотношением действительной ε' и мнимой ε'' частями диэлектрической проницаемости [20]

$$C = \sqrt[0,15]{\frac{\varepsilon'' + 0,23}{0,19\varepsilon'}}, \tag{2}$$

а также между глинистостью, добротностью и влажностью θ

$$C = \sqrt[0,16]{\frac{28,2}{Q\theta^{0,1}}} \tag{3}$$

позволяют с учетом (1) получить зависимость, связывающую отношение действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости с коэффициентом фильтрации:

$$K_f = \frac{1}{\sqrt[0,15]{\left(\frac{\varepsilon'' + 0,23}{0,19\varepsilon'}\right)^2}} 7,2 \cdot 10^{-4}. \tag{4}$$

Выражение коэффициента фильтрации через параметр добротности и влажности с учетом выражений (1) и (3) будет записываться следующим образом:

$$K_f = \frac{1}{\sqrt[0,16]{\left(\frac{28,2}{Q\theta^{0,1}}\right)^2}} 7,2 \cdot 10^{-4}. \tag{5}$$

Зависимости (2) и (3), полученные в работе [20] и переработанные с учетом соотношения (1), для образцов с различными коэффициентами фильтрации приведены на рис.1.

Из рис.1, *а* видно, что соотношение мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости будет зависеть от изменения как влажности, так и коэффициента фильтрации, который, в свою очередь, контролируется содержанием глинистых частиц. Причем изменение влажности отражается в большей степени на действительной части комплексной ди-

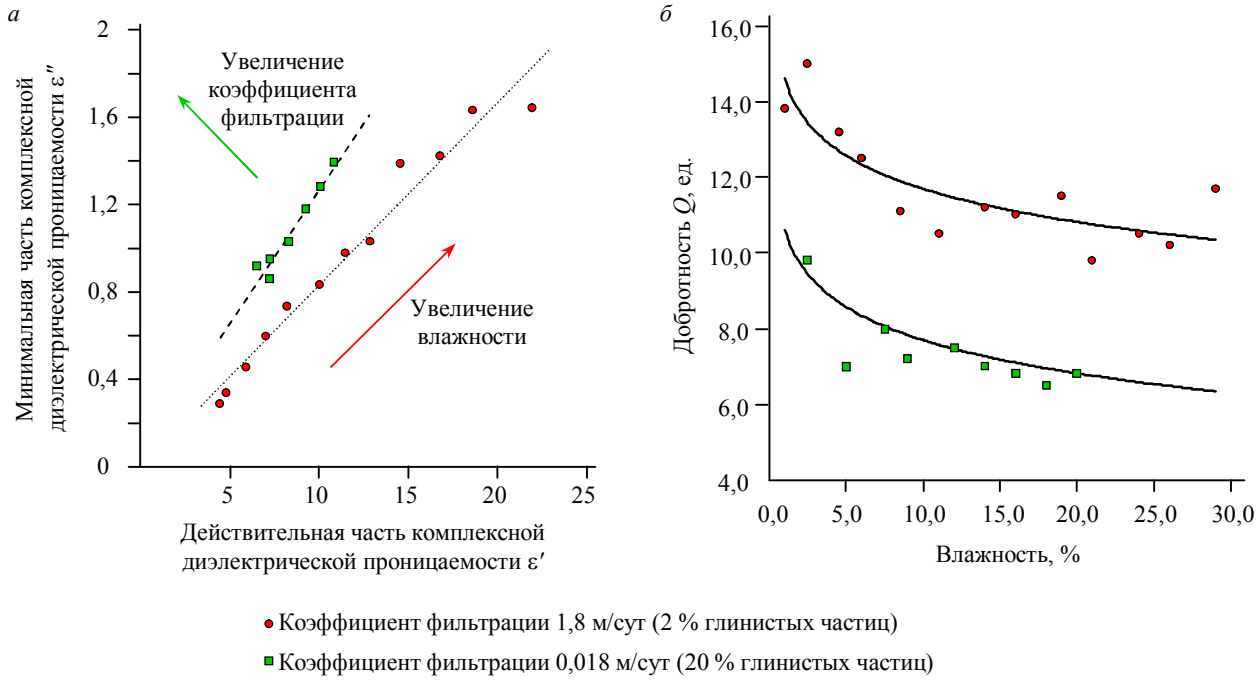


Рис.1. Соотношение мнимой и действительной частей диэлектрической проницаемости (*а*) и добротность в зависимости от влажности (*б*) для образцов с различными коэффициентами фильтрации

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

электрической проницаемости, а изменение коэффициента фильтрации – на ее мнимой части. Из рис.1, *б* следует, что при одинаковой влажности образцов большей добротностью Q будет обладать песок, коэффициент фильтрации которого будет выше.

Связь параметра добротности, электропроводности и действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости описывается следующими уравнениями:

$$\sigma_{ef}(\omega) \approx \sigma_{DC} + \omega\varepsilon''(\omega) \tag{6}$$

и

$$\varepsilon_{ef}(\omega) \approx \varepsilon'(\omega), \tag{7}$$

из которых следует [17]

$$Q = \frac{\omega\varepsilon_{ef}(\omega)}{\sigma_{ef}(\omega)} \approx \frac{\omega\varepsilon'(\omega)}{\sigma_{DC} + \omega\varepsilon''(\omega)}, \tag{8}$$

где $\sigma_{ef}(\omega)$ – эффективная проводимость; σ_{DC} – электрическая проводимость постоянного тока; $\varepsilon'(\omega)$ и $\varepsilon''(\omega)$ – действительная и мнимая части комплексной относительной диэлектрической проницаемости соответственно; $\varepsilon_{ef}(\omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая, что угловая частота $\omega = 2\pi f$, удельное электрическое сопротивление $\rho = 1/\sigma_{DC}$ и диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, из (8) получим

$$\varepsilon'' \approx \frac{\varepsilon'}{Q} - \frac{1}{\rho f \cdot 2\pi\varepsilon_0}, \tag{9}$$

где f – частота.

Тогда, подставив (9) в (4), получим формулу, пригодную для практических расчетов:

$$K_f \cong \frac{1}{\sqrt[0{,}15]{\left(\dfrac{\rho f \cdot 2\pi\varepsilon_0\varepsilon' - Q + 0{,}23Q\rho f \cdot 2\pi\varepsilon_0}{Q\rho f \cdot 2\pi\varepsilon_0 \cdot 0{,}19\varepsilon'}\right)^2}} 7{,}2 \cdot 10^{-4}. \tag{10}$$

Преимуществом выражения (10) является его комплексность, характеризующаяся зависимостью коэффициента фильтрации от целого ряда измеряемых электрофизических параметров. Значения ε', f определяются на основе метода георадиолокации, значения ρ – на основе метода сопротивлений. Для песка с заданными свойствами зависимость параметра добротности от коэффициента фильтрации и его относительное изменение $\partial Q/\partial K_f$ проиллюстрированы рис.2.

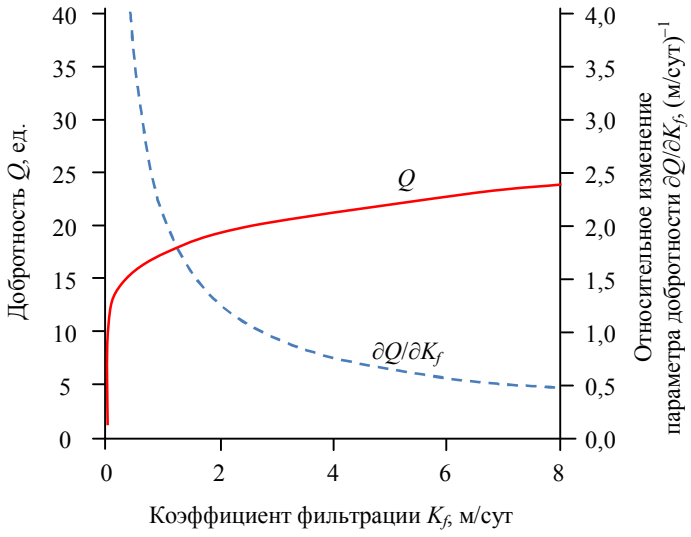


Рис.2. Зависимость параметра добротности Q от коэффициента фильтрации на частоте $f = 1$ гГц для песка со значениями $\varepsilon' = 4$; $\rho = 900$ Ом·м и относительное изменение параметра добротности $\partial Q/\partial K_f$

Граница перехода через значение коэффициента фильтрации 3 м/сут, между водопроницаемым и сильноводопроницаемым грунтом [2], характеризуется устойчивым ростом параметра добротности от 15 до 25 ед. и его высокой чувствительностью к изменению коэффициента фильтрации в диапазоне от 1 до 10 м/сут.

Для выполнения расчетов по формуле (10) необходимо определить параметр добротности Q. Одним из самых простых и широко используемых методов определения параметра добротности Q является метод амплитудного спада, реализуемый во временной области [19]. Параметр

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

добротности рассчитывается из отношения амплитуд сигналов, записанных до и после прохождения волны через поглощающую среду:

$$Q = \frac{\omega \Delta x}{2V} \left\{ \ln \left[\frac{A(x_0)}{A(x_1)} \right] \right\}^{-1}, \quad (11)$$

где $\omega = 2\pi f$ – центральная частота сигнала; Δx – мощность слоя; V – скорость волны; $A(x_0)$ 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. Скорость прохождения волны определяется из известного соотношения

$$V \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}, \quad (12)$$

где c – скорость света в вакууме; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости, которая определяется на основании априорной геологической информации или данных георадиолокационного зондирования.

В случае двухслойной модели среды общая добротность модели и добротность первого слоя рассчитываются по формуле (11). Добротность второго слоя определяется с помощью выражения:

$$\overline{Q} \cdot \overline{h} = Q_1 h_1 + Q_2 h_2, \quad (13)$$

где $\overline{Q}$ – эффективная (общая) добротность двухслойной модели мощностью $\overline{h} = h_1 + h_2$; Q_1, Q_2 – добротность первого и второго слоев; h_1, h_2 – их мощность.

Для многослойных моделей используется аналогичный подход при условии, что известны амплитуды отраженных сигналов, ограничивающие подошву и кровлю слоя, добротность которого нужно определить.

Таким образом, определение параметра добротности по известной методике на основе метода сопротивления и георадиолокации с использованием эмпирической зависимости (10), полученной на основе (1), (2) и (8), позволяет определить коэффициент фильтрации песчано-глинистого грунта с использованием априорной информации о глубине расположения границ h_i.

Объект исследований. Опробование предлагаемой методики изучения фильтрационных свойств песков по данным комплексного применения методов георадиолокации и электротомографии песков выполнено на интервале автомобильной дороги сразу после завершения ее строительства.

Структура и геометрические параметры конструктивных слоев дорожной одежды на обследованном участке, в соответствии с проектной и исполнительской документацией, представлены в следующем виде: асфальтобетон $h_1 = 0{,}21$ м; щебеночный слой $h_2 = 0{,}40$ м; дренирующий слой песка мелкозернистого $h_3 = 0{,}45$ м; щебеночный слой $h_4 = 0{,}15$ м; геотекстиль и георешетка $h_5 = 0{,}05$ м.

Нижняя часть земляного полотна, расположенная под геотекстилем, отсыпана песком мелким, которым подстилают глинистые грунты естественного происхождения. На обследованном интервале дороги в основании земляного полотна была обнаружена линза торфяных отложений. По данным исполнительской документации, слой торфа был удален лишь частично, что привело к просадке грунтов земляного полотна в процессе строительства.

Геофизические съемки методами георадиолокации и электротомографии выполнены по профилю, проложенному по асфальтобетонному покрытию. Центральная часть профиля была совмещена с интервалом просадки земляного полотна.

Георадиолокационное профилирование выполнено с аппаратурой «Zond-12e» (производство НПФ «Радарные системы», г. Рига). Для изучения разреза дорожной одежды проводилась двухчастотная съемка на центральных частотах зондирующих импульсов 500 и 1000 МГц. Использование двух частот обеспечило зондирование разреза на разные глубины с различным пространственным разрешением. Съемка выполнялась по стандартной методике георадиолокационного профилирования.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

Метод электротомографии выполнен с аппаратурой БИКС (производство ОАО «СКБ сейсмического приборостроения», г. Саратов) в режиме многоразносного профилирования с бесконтактной дипольной осевой установкой на частоте 16,5 кГц. Размеры измерительного и питающего емкостных диполей равны 1,25 м. Расстояния между центрами диполей составляли: 1,25; 2,5; 3,75; 5; 10; 15 м.

Результаты исследований. На георадарограмме, полученной с антенной 1000 МГц, отчетливо проявились яркие и протяженные оси синфазности, контролирующие границы между слоями дорожной одежды, представленными асфальтобетоном, гравием, песком, полимерной георешеткой и геотекстилем (рис.3). Согласно исполнительской документации, поверхность георешетки и геотекстиля расположена горизонтально и на постоянной глубине. Однако на георадарограмме ось синфазности, соответствующая волне, отраженной от этой поверхности, ступенчато погружается в районе ПК1+60. Динамические атрибуты волнового поля позволяют связать это искривление оси синфазности с изменением скорости распространения электромагнитных импульсов в дренажном слое. Скорость в первом интервале (0-50 м) больше, чем во втором (50-100 м), что может быть связано с увеличением влажности песка в пределах второго интервала. На это указывает изменение длины волны, структуры и интенсивности волнового электромагнитного поля (рис.3).

Таким образом, на временном разрезе на первом интервале ПК1+00 – ПК1+50 слой дренирующей песчаной подушки сжимается. На интервале ПК1+50 – ПК2+00 данный слой, напротив, расширяется и создается впечатление, что в районе ПК1+70 – ПК 1+80 происходит просадка основания дорожной одежды.

Между тем все этапы строительства данного участка автодороги были подробно отражены в исполнительной документации, из которой следовало, что геометрия слоев дорожной одежды строго отвечает проектной документации. Кроме того, георадиолокационные исследования проводились сразу после завершения строительства, и за такой короткий период просадка основания дорожной одежды могла произойти с низкой вероятностью.

На основании данной информации выполнена послойно-интервальная интерпретация, которая заключалась в том, что значение диэлектрической проницаемости задавалось каждому интервалу выделенного слоя так, чтобы переход из временного вертикального масштаба в глубинный сохранил геометрию дорожной одежды без деформаций ее основания. Результаты послойно-интервальной интерпретации приведены на рис.4.

На основе многоразносного бесконтактного электропрофилирования рассчитана электротомографическая модель, представленная на рис.5. Модель хорошо отражает строение основных слоев дорожной одежды и ее основания. Дорожная одежда характеризуется высокими

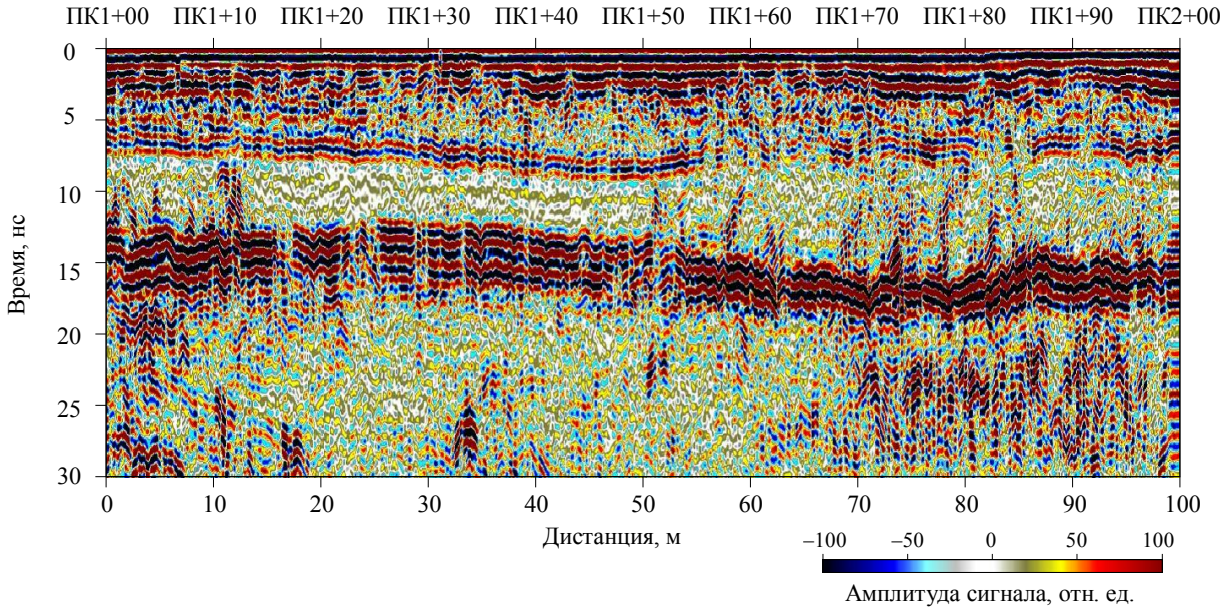


Рис.3. Временной георадиолокационный разрез на частоте 1000 МГц

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

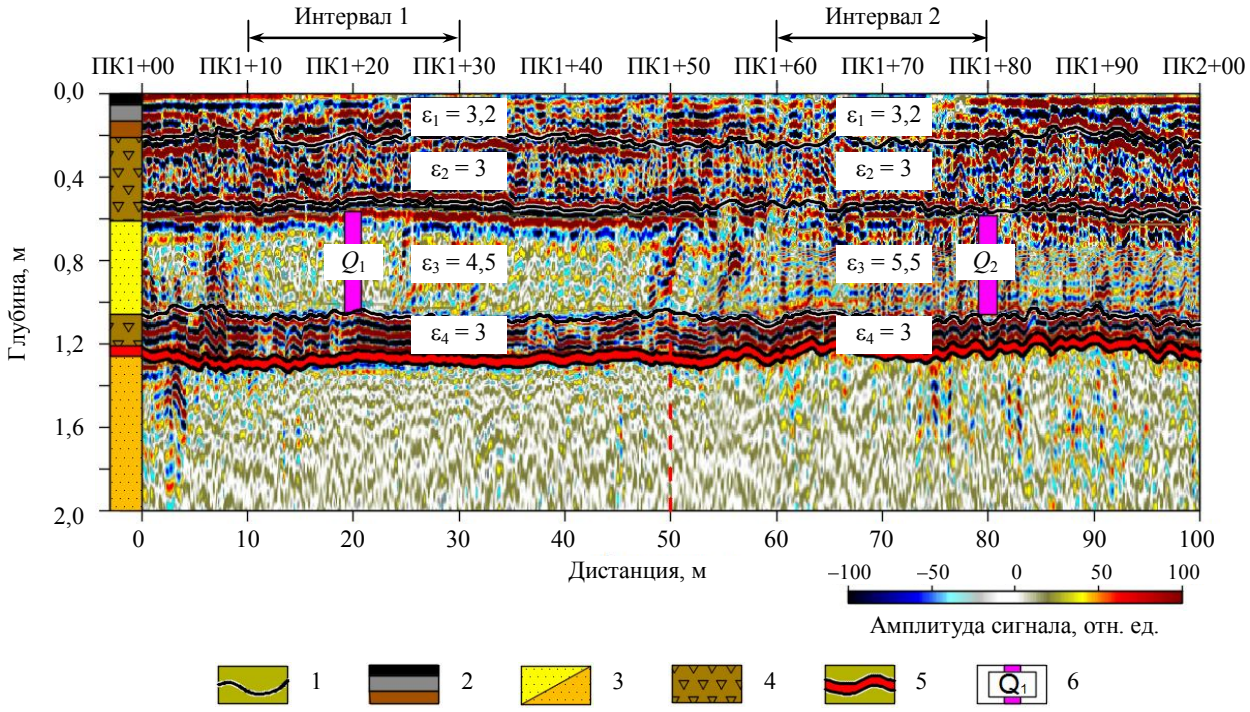


Рис.4. Строение верхней части дорожной одежды по данным георадиолокации

1 – установленные границы по данным георадиоразведки; 2 – асфальтобетон; 3 – песок мелкий; 4 – щебень гранитный; 5 – полимерная георешетка, геотекстиль; 6 – интервалы определения параметра добротности *Q*

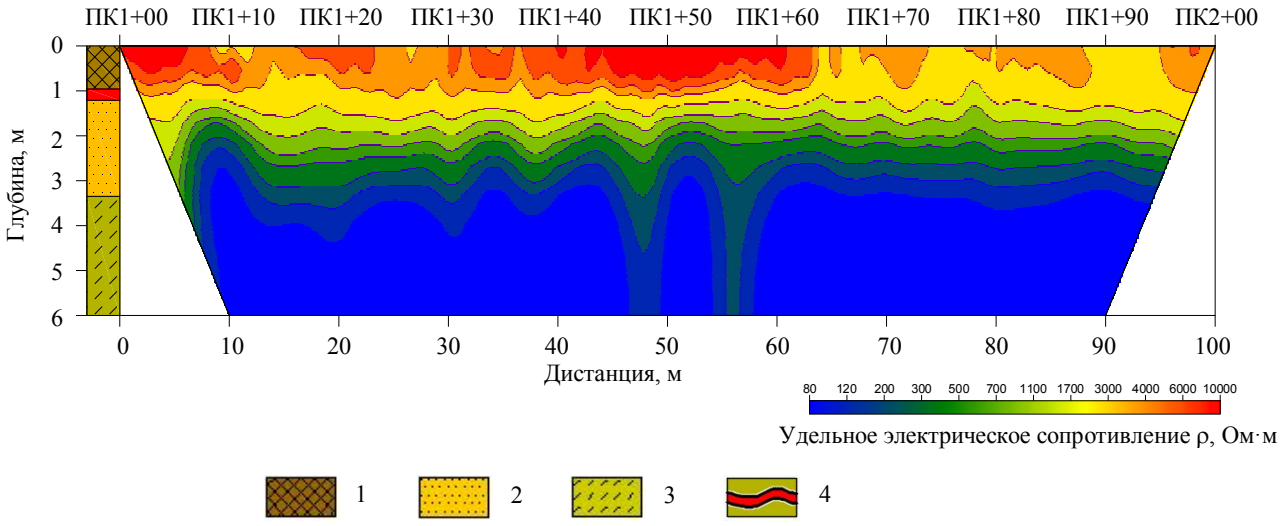


Рис.5. Модель распределения УЭС по результатам 2D-инверсии

1 – дорожная одежда; 2 – земляное полотно; 3 – естественные грунты основания; 4 – полимерная георешетка, геотекстиль

значениями УЭС, земляное полотно – средними значениями УЭС, естественные грунты основания – низкими значениями УЭС. Недостатком модели является гладкое распределение УЭС, которое не дает возможности однозначно провести геоэлектрические интерпретационные границы, а позволяет только предположить их пространственное расположение.

Интегральные значения УЭС для выделенных слоев автодороги получены в режиме 1D-инверсии с закрепленными границами, установленными по данным георадиолокации (рис.6).

Значения УЭС по каждому из рассматриваемых интервалов получены на основе осреднения трех соседних наблюденных кривых дипольных электрических зонирований (ДЭЗ). Осредненные трехслойные кривые ДЭЗ типа *Q* и соответствующие им модели УЭС приведены на рис.7.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

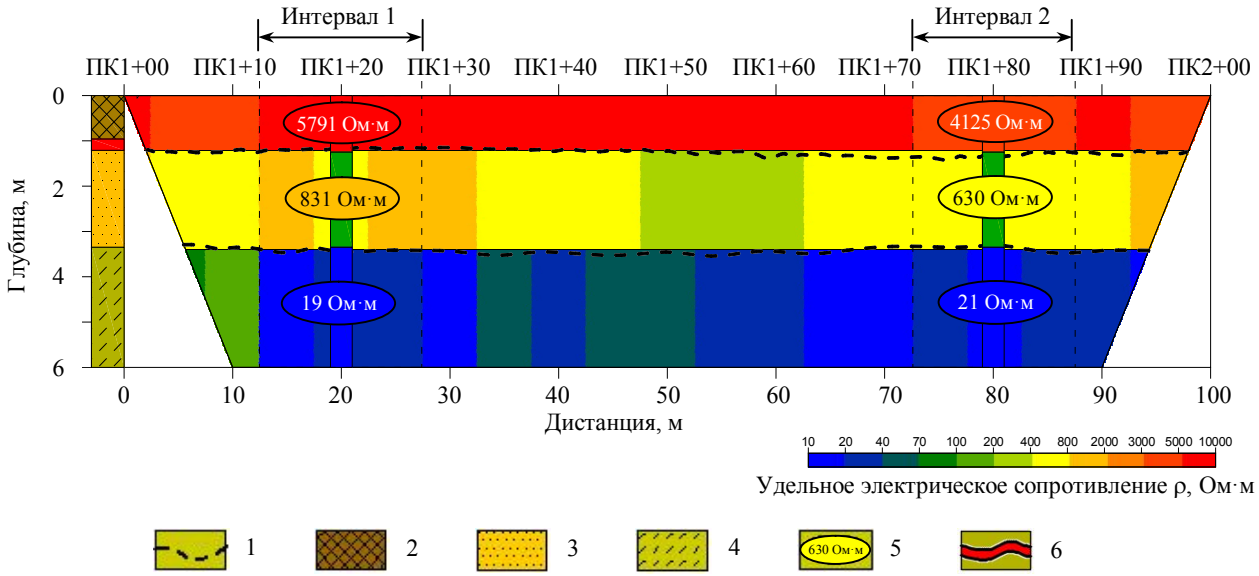


Рис.6. Модель распределения УЭС по результатам 1D-инверсии с закрепленными георадиолокационными границами и интервальной интерпретацией УЭС

1 – установленные границы по данным геолокации; 2 – дорожная одежда; 3 – земляное полотно; 4 – естественные грунты основания; 5 – значение УЭС; 6 – полимерная георешетка, геотекстиль

Для определения параметра добротности Q выбраны два интервала слоя песка в районе ПК1+20 и ПК1+80, которые, как видно на радарограмме, существенно отличаются между собой по волновой картине. По каждому из интервалов была получена осредненная трасса (рис.8, *а* и *б*), на основе которой и производились дальнейшие расчеты электрофизических и петрофизических параметров. Результаты расчетов представлены в таблице.

Расчет электрофизических параметров и полученные на их основе петрофизические характеристики для песка дорожного покрытия показали, что первый интервал в районе ПК1+20 характеризуется высокими значениями УЭС и добротности, что отражается на полученном в результате расчетов незначительном содержании глинистых частиц и, как следствие, высоким для интервала коэффициентом фильтрации – 4,4 м/сут. Второй интервал в районе ПК1+80 характеризуется меньшими значениями УЭС и добротности относительно первого интервала, что находит отражение в увеличении содержания глинистых частиц и значительно меньшем коэффициенте фильтрации – 1,4 м/сут.

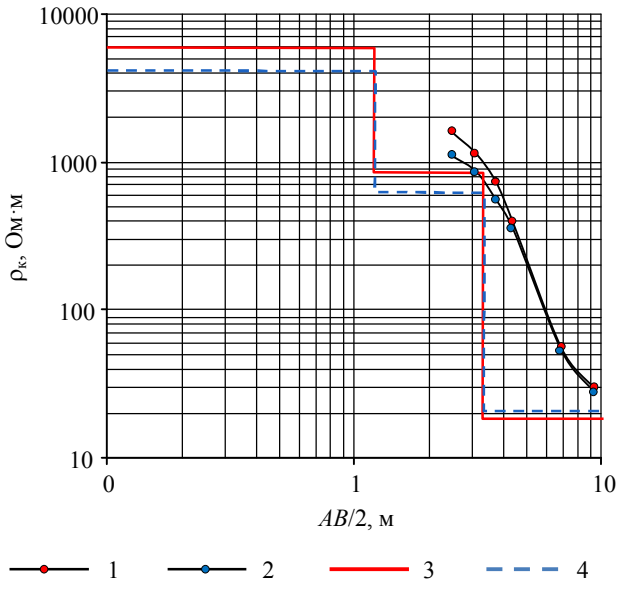


Рис.7. Осредненные кривые ДЭЗ и полученные на их основе модели УЭС для интервалов 1 и 2

$\rho_к$ – кажущееся удельное электрическое сопротивление; AB – разнос питающей линии

1, 2 – осредненная кривая ДЭЗ на интервале соответственно 1 и 2; 3 – модель УЭС на интервале 1 (невязка подбора 8 %); 4 – модель УЭС на интервале 2 (невязка подбора 7 %)

Лабораторные анализы коэффициента фильтрации дренирующей песчаной подушки, взятой из бровки автодороги, показали значения $K_f = 3{,}5$ м/сут. Данное значение существенно отличается от значений K_f, рассчитанных по данным георадиолокации и электротомографии. Отличие лабораторных данных от геофизических указывает, что пески в процессе строительства могли быть загрязнены. Стоит отметить, что исследованные интервалы существенно отличаются по своим электрофизическим и петрофизическим свойствам. Полученные на основе геофизических исследований данные позволяют охарактеризовать слой дренирующей песчаной подушки на втором интервале в районе

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.3

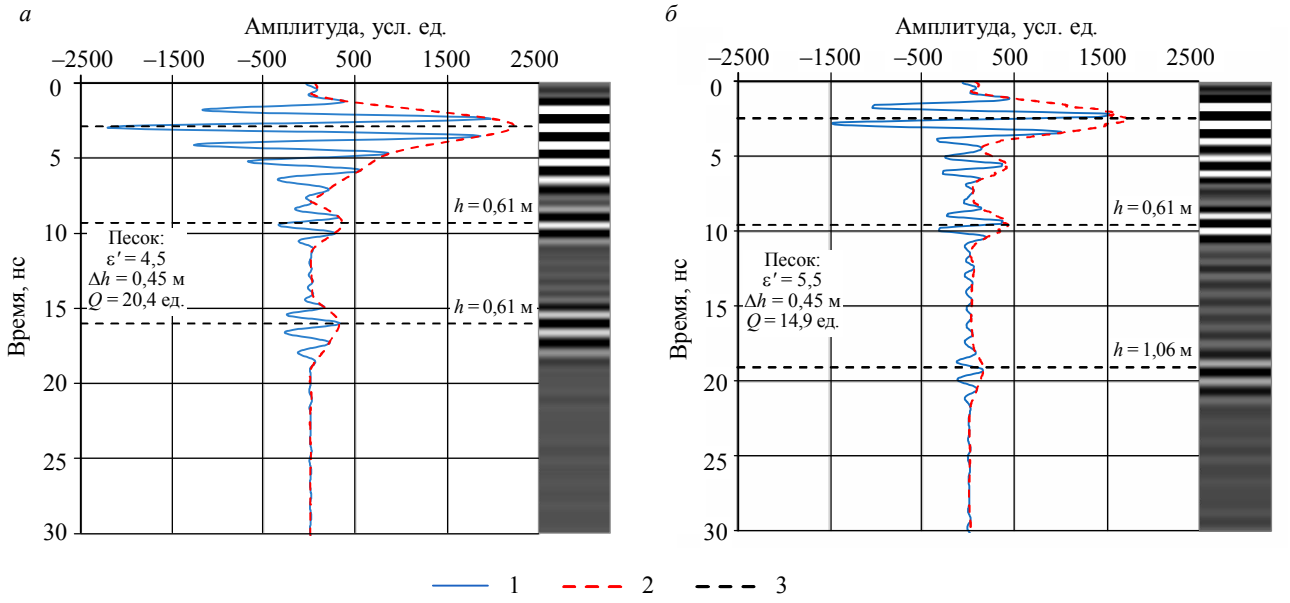


Рис.8. Осредненные трассы с параметрами расчетов интервалов 1 (*а*) и 2 (*б*)
1 – осредненная трасса; 2 – огибающая сигнала; 3 – положение отражающих границ

ПК1+80 как более влажный (пониженные значения УЭС, повышенные значения ε′) и менее водопроницаемый (повышенная глинистость C, пониженный коэффициент фильтрации K_f) относительно первого интервала.

Измеренные электрофизические и рассчитанные на их основе петрофизические параметры слоя дренирующей песчаной подушки для двух интервалов

Параметр	Интервал 1	Интервал 2
ε′	4,5	5,5
ρ, Ом·м	5791	4125
Q, ед.	20,4	14,9
K_f, м/сут	4,4	1,4

Несмотря на то, что получены численные значения коэффициента фильтрации и глинистости для слоя песка, нужно учитывать эмпирический характер зависимостей на основе которых они были рассчитаны, и относиться к ним не как к количественному определению данных параметров, а как к их относительной качественной оценке.

Заключение. Рассмотрен альтернативный подход к оценке коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе комплекса методов сопротивления и георадиолокации. Определение содержания глинистых частиц, которое контролируется петрофизической взаимосвязью между мнимой и действительной частями диэлектрической проницаемости и удельным электрическим сопротивлением, связанными через параметр добротности и полученными на основе методов сопротивления и георадиолокации, позволяет оценить коэффициент фильтрации песчано-глинистых грунтов. Несомненным преимуществом данного подхода по отношению к уже существующему является высокая разрешающая способность данных метода георадиолокации, позволяющая оценивать петрофизические параметры достаточно тонких грунтовых прослоев. Недостатком является ограниченность применения, которая заключается в необходимости наличия на радарограммах ярких отражающих георадиолокационных границ и хорошо выдержанной прямой волны, что возможно только при работе в условиях идеального соприкосновения антенны с исследуемой поверхностью.

Практический пример использования методов георадиолокации и бесконтактной электротомографии показал эффективность данного комплекса в условиях работы на асфальтовом покрытии. Георадиолокационные исследования, выполненные по стандартной методике, позволили с высокой степенью детальности охарактеризовать строение как дорожного покрытия, так и грун-

тов основания. Электротомографические исследования, выполненные с бесконтактной индукционной электроразведочной аппаратурой, использование которой на асфальтовом покрытии автодорог не является традиционным, также показали свою эффективность. Электротомографическая модель высокого разрешения отразила все основные элементы строения дорожной одежды и земляного полотна автодороги. Полученные независимыми геофизическими методами данные характеризуют количество слоев дорожного покрытия и их геометрические соотношения и хорошо согласуются между собой и с данными, представленными в проектной документации. Также на основе экспресс-оценки удалось установить изменения коэффициента фильтрации слоя песка дорожного покрытия и дать его относительные количественные характеристики для разных участков автодороги.

Таким образом, рассмотренный комплекс методов георадиолокации и бесконтактной электротомографии может быть рекомендован для решения задач авторского надзора и контроля качества автодорожного строительства.

Благодарность. *Авторы признательны коллективу компании «ИнжГеофизика» (Санкт-Петербург) и ее генеральному директору А.И.Куликову за оказанное содействие в выполнении полевых работ и предоставленную геофизическую аппаратуру.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гиматудинов Ш.К.* Физика нефтяного и газового пласта: Учебник. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1971. 312 с.
2. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
3. ГОСТ 25607-2009. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
4. Грунтоведение / Под ред. В.Т.Трофимова. 6-е изд. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
5. *Дахнов В.Н.* Электрическая разведка в нефтяной промышленности СССР. М.: ГОНТИ, 1939. 244 с.
6. *Ефимова Н.Н.* Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики. Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Санкт-Петербург. горный ин-т. СПб, 1999. 16 с.
7. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. ВСН 46-83. М.: Транспорт, 1985. 318 с.
8. Методические рекомендации по осушению земляного полотна и оснований дорожных одежд в районах избыточного увлажнения и сезонного промерзания грунтов. М.: Союздорнии, 1974. 108 с.
9. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики: Учебник для вузов / Под ред. В.А.Богословского. М.: Недра, 1990. 501 с.
10. Рекомендации по осушению дорожных одежд и верхней части земляного полотна автомобильных дорог / Министерство строительства и эксплуатации автомобильных дорог РСФСР. М., 1970. 30 с.
11. Рекомендации по расчету дренажных дорожных конструкций. ОДМ 218.2.055-2015. М.: Росавтодор, 2015. 83 с.
12. *Шевнин В.А.* Картирование методом сопротивлений нефтяных загрязнений геологической среды / В.А.Шевнин, О.Делгадо, А.А.Рыжов // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 27-32.
13. *Archie G.E.* The Electric Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics // Trans. Am. Inst. Mining and Met. Eng. 1942. Vol. 146. N 1. P. 54-62.
14. *Bano M.* Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves // Geophysical Journal International. 1996. N 124. P. 279-288.
15. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data / V.Shevnin, O.Delgado-Rodríguez, A.Mousatov and A.Ryjov // Geofisica Internacional. 2006. Vol. 45. N 3. P. 195-207.
16. *Liu L.* Radar attenuation tomography using the centroid frequency downshift method / L.Liu, J.W.Lane, Y.Quan // Journal of Applied Geophysics. 1998. N 40. P. 105-116.
17. *Scheers B.* Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar, with Application to the Detection of Anti Personnel Landmine (Thesis (PhD)). Royal Military Academy (RMA), Dept. of Electricity and Telecommunications. Brussels, 2001. 281 p.
18. *Slater L.* Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments / L.Slater, D.Lesmes // Wat. Resour. Res. 2002. Vol. 38. Iss. 10. P. 31-1-31-13.
19. *Tonn R.* The determination of the seismic quality factor Q from VSP data: A comparison of different computational methods // Geophysical Prospecting. 1991. N 39. P. 1-27.
20. *Wunderlich T.* 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 / T.Wunderlich, W.Rabbel // Near Surface Geophysics. 2013. Vol.11. N 2. P. 117-127.

***Авторы*: Д.А.Лаломов**, *канд. геол.-минерал. наук, старший инженер-геофизик, lalomov@outlook.com* (*ООО «Фертоинг», Санкт-Петербург, Россия*), **В.В.Глазунов**, *д-р техн. наук, профессор, VVGlazounov@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).
Статья принята к публикации 29.12.2016.