

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СКВАЖИННЫХ РАДИО- ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КАЧЕСТВА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОЙ ЗАВЕСЫ ИЗ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ

## ПАНОВ В.С.

Геофизик ООО «Радионда СПВ», аспирант  
Российского государственного  
геологоразведочного университета им. С.  
Орджоникидзе (РГГРУ), г. Москва,  
v.panov@radionda.ru

## PANOV V.S.

Geophysicist of the «Radionda SPV» LLC,  
postgraduate student of the Ordzhonikidze  
Russian State Geological Prospecting  
University, Moscow, v.panov@radionda.ru

**Ключевые слова:** буронабивная свая;  
водонасыщенность; противofильтрационная  
завеса; грунтоцементная свая; каротаж;  
радиоволновые методы; скважина; стена в  
грунте; томография.

**Аннотация:** описанные в статье геофизические  
измерения проводились в специальных  
скважинах в пределах противofильтрационной  
завесы из грунтоцементных свай (стены в  
грунте). Комплекс скважинных методов  
включал односкважинное радиоволновое  
профилирование, радиоволновую  
геоинтроскопию и гамма-каротаж. Самыми  
низкими электрическими сопротивлениями и  
наиболее высокими величинами  
диэлектрической проницаемости обладали  
пористые обводненные участки стены.  
Полученные результаты позволяют  
рекомендовать включение радиоволновых  
методов наряду со стандартными  
акустическими в комплекс работ по  
исследованию таких  
противofильтрационных завес.

**Key words:** bored pile; water saturation;  
groundwater cutoff; soil-cement pile; well logging;  
radiowave methods; borehole; slurry wall;  
tomography.

**Abstract:** the geophysical measurements  
described in the paper were carried out in special  
boreholes drilled within a groundwater cutoff of  
soil-cement piles (a slurry wall). The well survey  
complex of methods included one-borehole  
radiowave profiling, radiowave geointroscopy and  
gamma-ray logging. Porous water-saturated  
zones of the slurry wall had the lowest resistivities  
and the highest dielectric permeability values. The  
obtained results permit to recommend including  
radiowave methods along with standard acoustic  
ones into the survey complex on investigation of  
such sort of groundwater cutoffs.

## A CASE STUDY OF USING BOREHOLE RADIOWAVE METHODS FOR QUALITY CONTROL OF GROUNDWATER CUTOFF OF SOIL-CEMENT PILES

### Введение

При строительстве крупных инженерных сооружений для ограничения доступа подземных вод к фундаменту по его контуру устанавливают замкнутые противofильтрационные завесы (ПФЗ), подошву которых заглубляют в пласт-водоупор.

Противofильтрационная завеса представляет собой стену, получившуюся в результате изготовления нескольких рядов секущих грунтоцементных свай (ГЦС). Для этого поэтапно бурится «внахлест» несколько рядов

скважин, в которые под большим давлением с помощью вращающегося монитора закачивается цемент. Смешиваясь с окружающими разрушенными породами, цемент образует ГЦС. Готовая грунтоцементная свая неоднородна, ее физико-механические и прочностные характеристики в разных интервалах определяются геологическим разрезом и технологией строительства. Подобрать методику сооружения ГЦС и оценить качество ПФЗ необходимо до начала строительства котлована под фундамент.

Надежность противofильтрационной завесы зависит от ее сплошности и прочностных характеристик, а также от степени проницаемости для грунтовых вод. Повышенная проницаемость может быть обусловлена как расхождением стволов скважин на глубине, так и плохим затвердеванием грунтоцементной смеси. Поскольку тело завесы полностью находится в грунте, для контроля ее состояния используются дистанционные геофизические методы. Стандартными при изучении ПФЗ являются акустические и ультразвуковые методы, решающие задачи определения прочностных характеристик исследуемой среды.

Электрические характеристики (электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость) весьма чувствительны к изменению пористости и водонасыщенности пород, что обуславливает перспективность их изучения при исследовании противofильтрационных завес. Хорошими перспективами обладают скважинные радиоволновые методы, позволяющие изучать распределение электрических свойств как по глубине, так и по латерали в пространстве между двумя пробуренными скважинами.

С целью оценки возможностей названных методов ООО «Радионда» были проведены опытные работы на одной из строительных площадок в г. Москве, результаты которых и рассматриваются в настоящей статье.

#### Характеристика объекта исследований

В геологическом отношении разрез на участке работ сложен разнозернистыми песками и моренными суглинками. Водоупором, в который заглубляется противofильтрационная завеса, служат юрские глины. По данным бурения кровля глин отмечается на глубине 21 м, уровень грунтовых вод в скважинах — на глубине 8 м.

Схема рассматриваемой противofильтрационной завесы показана на рис. 1. Скважины под установку грунтоцементных свай были пробурены в три ряда. Диаметр этих скважин составил 800 мм, длина — 27,5 м, расстояние между их рядами — 500 мм, между центрами — 700 мм. Общая ширина стены была равна примерно 1,5 м. С внутренней ее стороны до глубины 22 м был установлен ряд буронабивных свай (БНС) — обсаженных металлом зацементированных стволов скважин, служащих для укрепления стенок будущего котлована.

Для проведения исследований в стене по ее оси были устроены так называемые трубы доступа — скважины глубиной 22 м и диаметром 90 мм, обсаженные полиэтиленовыми трубами, пробуренные для проведения акустических исследований. Расстояние между скважинами 1 и 3 составило 1,9 м, между скважинами 2 и 3 — 1,1 м. Ближайшее расстояние от рабочей скважины до БНС было равно 0,7 м.

До начала работ гарантировать полное отсутствие влияния металла БНС на уровень измеряемых полей было невозможно, поэтому скважину 4 было решено удалить от буронабивных свай, чтобы после сравнения результатов по всем скважинам выяснить степень влияния этого металла.

Также на участке работ были расположены гидрогеологические скважины, обозначенные синим цветом на рис. 1 и буквой «Г» в названиях. Стволы гидрогеологических скважин были оборудованы металлической сеткой-фильтром, препятствующей проведению в них электромагнитных исследований.

#### Методика проведения исследований

Для надежного решения поставленных задач был определен комплекс методов, включающий каротаж ОРВП-МЧ (многочастотное односкважинное радиоволновое профилирование), межскважинное просвечивание методом радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ) и гамма-каротаж (ГК).

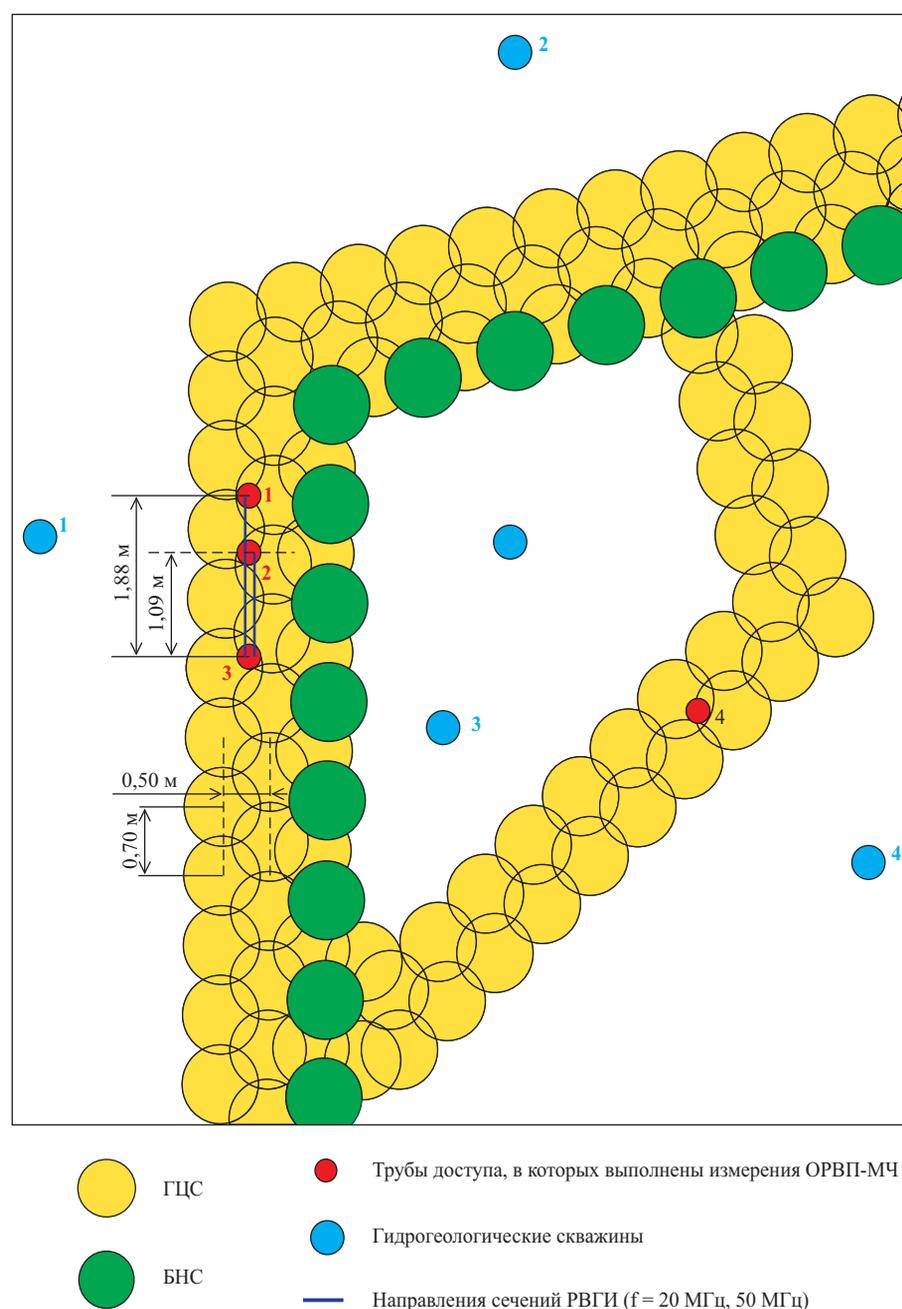


Рис. 1. Схема участка исследований

Метод односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП) предназначен для исследования электрических характеристик околоскважинного пространства, таких как кажущееся сопротивление ( $\rho_k$ ) и диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ). В песчано-глинистом разрезе эти параметры определяются величиной глинистости и водонасыщенностью (значение  $\rho_k$  обратно пропорцио-

нально глинистости и обводненности,  $\epsilon$  — прямо пропорционально).

В методе ОРВП излучатель, нагруженный на осевую электрическую антенну, создает в среде переменное электромагнитное поле. На некотором фиксированном расстоянии от излучателя, называемом разномом установки, находится приемник, также имеющий осевую электрическую антенну. В при-

емнике детектируется сигнал, пропорциональный осевой компоненте амплитуды напряженности электрического поля. Глубинность метода ОРВП зависит от разнома установки. Его величина составила 1,20 и 2,25 м.

Каротаж выполнялся аппаратурой ОРВП-40 производства ООО «Тулский геофизический центр» [1]. В качестве рабочих были выбраны частоты 1,25;

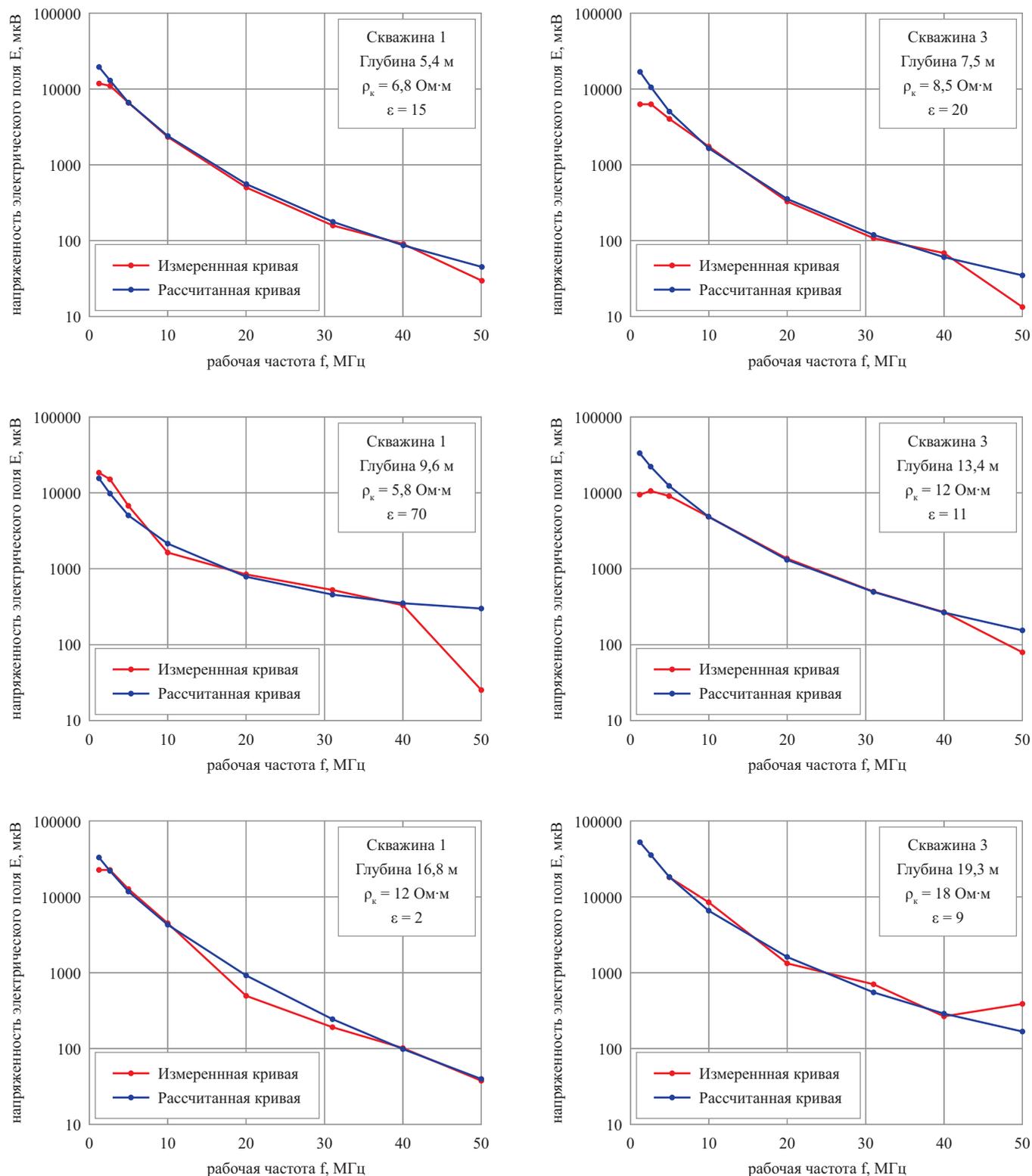


Рис. 2. Сопоставление измеренной и рассчитанной кривых зависимости напряженности электрического поля  $E$  от рабочей частоты  $f$  для скважин 1 и 3.  $\rho_k$  — рассчитанное кажущееся сопротивление, Ом·м;  $\epsilon$  — рассчитанная величина диэлектрической проницаемости, отн. ед.

2,5; 5; 10; 20; 31; 40; 50 МГц. Измерения проводились в сухих скважинах, что при обработке позволило использовать формулы расчета сопротивлений и диэлектрической проницаемости для однородной среды (правильность использования формул для однородной среды при интерпретации данных ОРВП в сухих скважинах была теоретически обоснована профессором кафедры геофизики Российского государственного геологоразведочного университета им. С. Орджоникидзе д.ф.-м.н. А.Д. Каринским). Для каждой точки подбирались теоретическая зависимость напряженности электрического поля от частоты, наилучшим образом совпадающая с измеренной. Сопротивление  $\rho$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  теоретической зависимости принимались за характеристики среды. Таким образом, во всем интервале измерений были определены обе величины ( $\rho_k$  и  $\epsilon$ ) по каждой скважине. На рисунке 2 приведены частотные зависимости для трех выборочных глубин в скважинах 1 и 3.

Радиоволновая геоинтроскопия предназначена для определения эффективных сопротивлений ( $\rho_{эф}$ ) в межскважинном пространстве. Метод РВГИ основан на изучении интенсивности поглощения энергии радиоволн породами, расположенными на трассе распространения волн от излучателя к приемнику. Породы, обладающие более низкими эффективными сопротивлениями и более высокими значениями диэлектрической проницаемости, ха-

рактеризуются более сильным поглощением радиоволн.

Измерения РВГИ проводятся верным способом (томографическая съемка), при котором положения излучателя в одной скважине фиксируются, а в другой скважине, в которой находится приемник, производятся измерения с заданным шагом по всему рабочему интервалу. Затем излучатель перемещается в следующий пункт, фиксируется в нем, и повторяются измерения по второй скважине. Анализ совокупности данных, получаемых путем многократного просвечивания объема горных пород радиоволновым полем дипольного источника, позволяет определять электрические свойства пород в естественном залегании и их распределение в изучаемом объеме среды.

В каждой точке измерения в файл записывается величина, пропорциональная осевой компоненте напряженности поля, а на каждой стоянке излучателя — ток на входе излучающей антенны. Это дает возможность после объединения файлов излучателя и приемника привести все результаты измерений к одним условиям излучения.

При измерениях использовалась аппаратура РВГИ-2007 производства ООО «Тульский геофизический центр» [1] с антеннами излучателя и приемника длиной 0,6 м.

### Выбор параметров измерений

На рисунке 3, а представлены совмещенные диаграммы кажущихся сопро-

тивлений по всем скважинам, в которых проводились измерения ОРВП. Средний уровень  $\rho_k$  в разных скважинах примерно одинаков, вне зависимости от их удаленности от БНС. Это позволяет утверждать, что металлические буронабивные сваи на результаты каротажа ОРВП не влияют. Отсутствие влияния металла БНС на результаты измерений можно объяснить низким сопротивлением цемента, которое в значительной мере снижает глубинность исследований.

Еще одно доказательство отсутствия влияния БНС на результаты измерений было получено в результате использования установок с двумя разносами. При этом принципиальных различий в формах кривых  $\rho_k$  не было отмечено. Уровень рассчитанных сопротивлений для большого разноса несколько выше, чем для малого, тогда как в случае влияния металла меньшие сопротивления были бы зафиксированы именно на большом разносе, обладающем большей глубинностью. Для интерпретации использовались результаты измерений, полученные при разносе 2,25 м.

Данные каротажа характеризуют лишь околоскважинное пространство ПФЗ. Для оценки распределения электрических свойств стены в межскважинном пространстве был использован метод радиоволновой геоинтроскопии.

Измерения РВГИ проводились в сечениях скважин 1-3 и 2-3 с шагом по скважине 1 м (см. рис. 1). Перед началом измерений необходимо было оценить радиус зоны, существенной для

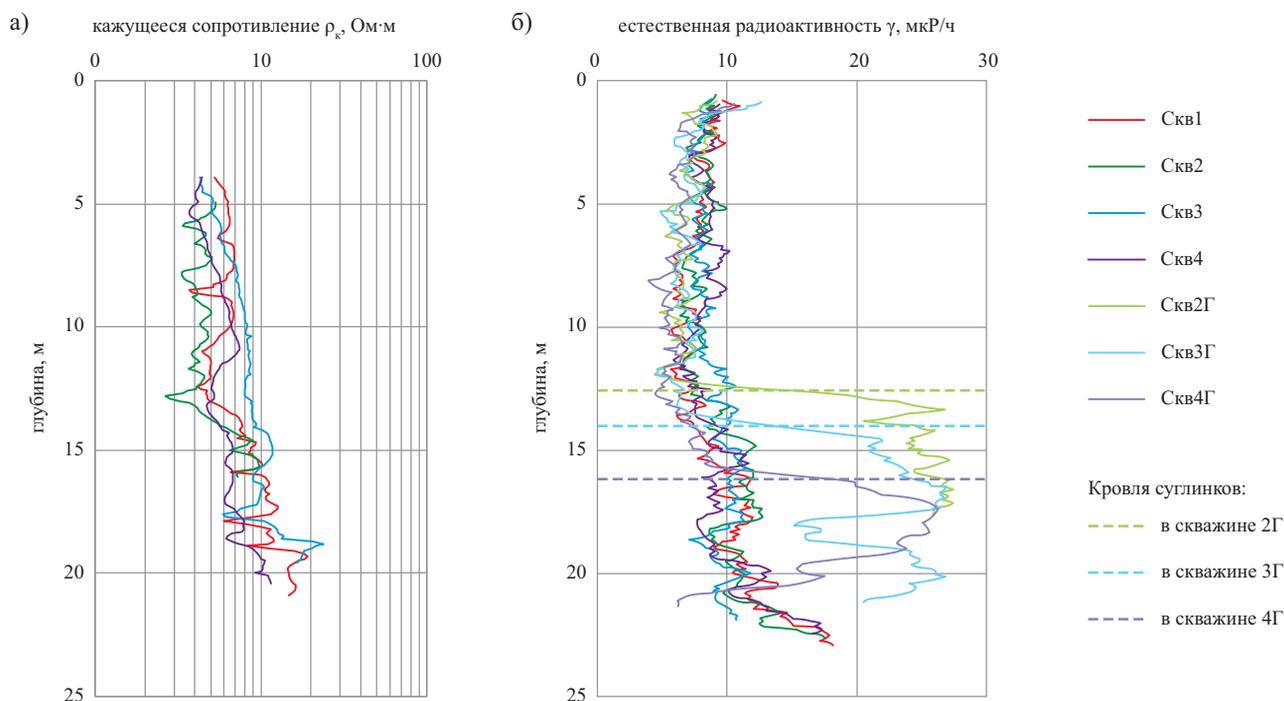


Рис. 3. Диаграммы зависимости от глубины ( $H$ ): а — кажущегося сопротивления  $\rho_k$  (по данным ОРВП-МЧ в скважинах 1, 2, 3, 4); б — гамма-активности  $\gamma$ , мкР/ч (по данным гамма-каротажа в скважинах 1, 2, 3, 4, 2Г, 3Г, 4Г)

Таблица

Геотехнологические параметры РВГИ				
Параметр	Частота электромагнитного поля $f$ , кГц			
	20	50	20	50
Удельное электрическое сопротивление среды $\rho$ , Ом·м	25	25	25	25
Длина волны $\lambda$ , м	3,1	1,7	3,1	1,7
Расстояние между скважинами, м	1,9	1,9	1,1	1,1
Диаметр зоны Френеля $d_f$ , м	1,7	1,3	1,3	1,0
Минимальный размер объекта $m$ , м	0,5	0,4	0,4	0,3
Точность локализации кромки выделяемого объекта $\delta$ , м	0,2	0,1	0,1	0,1

распространения электромагнитной волны (зоны Френеля), и подобрать такие параметры исследований, при которых металл буронабивных свай не оказывал бы существенного влияния на получаемые результаты [2]. Диаметр зоны Френеля  $d_f$  (м) рассчитывается по следующей формуле:

$$d_f = \sqrt{\frac{R}{2}},$$

где  $\lambda$  — длина волны, м, являющаяся функцией частоты и электромагнитных параметров среды;  $R$  — расстояние между излучателем и приемником, м.

При заданных расстояниях между скважинами необходимо подобрать величину  $\lambda$  так, чтобы зона Френеля охватывала лишь цементную часть стены и при этом чтобы сохранялись условия волновой зоны.

Принимая во внимание близкие расстояния между скважинами и относительно низкие сопротивления изучаемого разреза (25 Ом·м), из диапазона частот была выбрана самая верхняя —

50 МГц. Для оценки влияния БНС при измерениях на частоте 50 МГц в тех же сечениях были проведены измерения на частоте 20 МГц. На рисунке 4 представлены геоэлектрические разрезы между скважинами 1 и 3, полученные при измерениях на двух указанных частотах. Как видно из рисунка, общий уровень сопротивлений для 20 МГц ниже, чем для 50 МГц, что объясняется попаданием металла буронабивных свай в зону Френеля более низкой частоты.

Как и должно быть, детальность измерений увеличивается с увеличением рабочей частоты. На рисунке 5 изображены области исследования методом РВГИ, ограниченные зонами Френеля, а в таблице представлены геотехнологические параметры измерений на обеих частотах для двух длин сечений.

### Результаты работ

На рисунке 6 представлен геоэлектрический разрез в сечении скважин 1-3 на частоте 50 МГц, совмещенный с диаграммами каротажа ОРВП по сква-

жинам 1, 2, 3 и вычисленными значениями диэлектрической проницаемости (эти цифры показаны зеленым цветом). В нижней части разреза (в интервалах глубин 14,0-18,5 м в скважине 1 и 17,8-20,0 м в скважине 3) отмечается высокоомный слой ( $\rho_k$  возрастает до 24 Ом·м). Выше этого слоя значения кажущегося сопротивления падают до 5 Ом·м. При этом внутри этой области выделяются субгоризонтальные локальные неоднородности, в которых сопротивление составляет 4 Ом·м.

Геоэлектрический разрез РВГИ хорошо согласуется с данными многочастотных измерений ОРВП. Видно, что положение верхней кромки высокоомной области хорошо совпадает с графиками  $\rho_k$  по данным ОРВП, в том числе и по скважине 2. Отметим, что значения сопротивления  $\rho_{эф}$ , вычисленные по результатам РВГИ, всегда закономерно выше значений  $\rho_k$  по данным ОРВП, что связано с анизотропностью изучаемого разреза. В интервалах высокого сопротивления в нижней части разреза вычисленные значения  $\epsilon_{эф}$  составляют 2-9 отн. ед., тогда как в верхней низкоомной части они выше 15, а иногда и до 70 отн. ед.

Электромагнитные свойства пород могут определяться как их обводненностью, так и глинистостью. Низкими сопротивлениями и высокими значениями диэлектрической проницаемости характеризуются глинистые и водонасыщенные интервалы. При понижении водонасыщенности и глинистости происходит увеличение  $\rho$  и снижение  $\epsilon$ .

Чтобы установить, с чем связано изменение сопротивлений и диэлектрической проницаемости, дополнительно был проведен гамма-каротаж (ГК), ре-

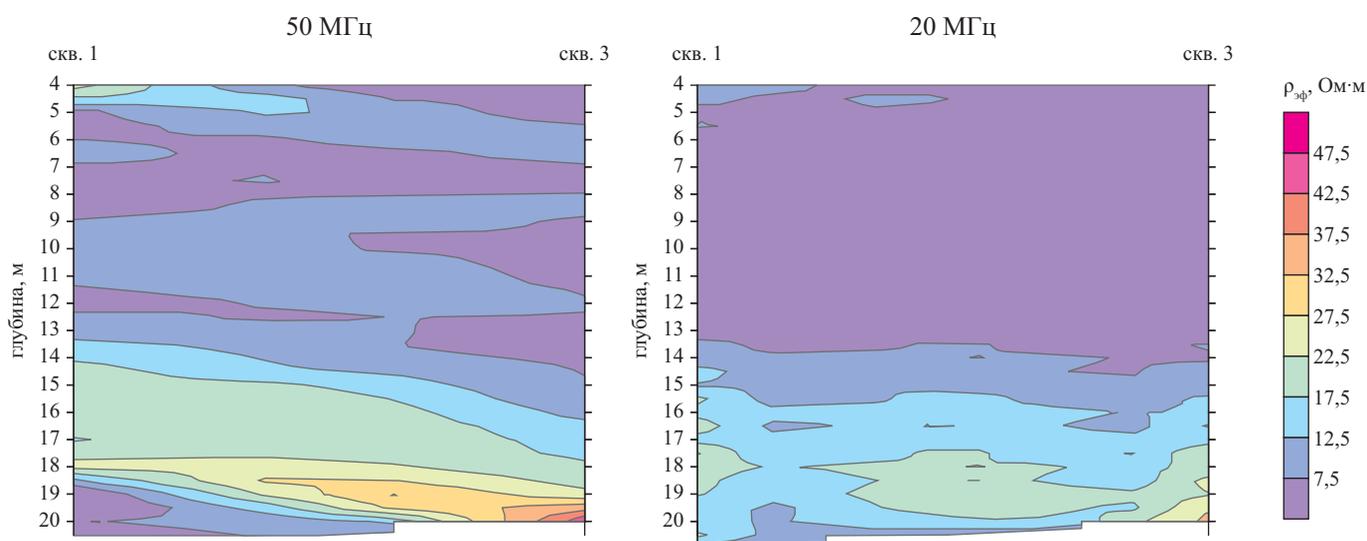
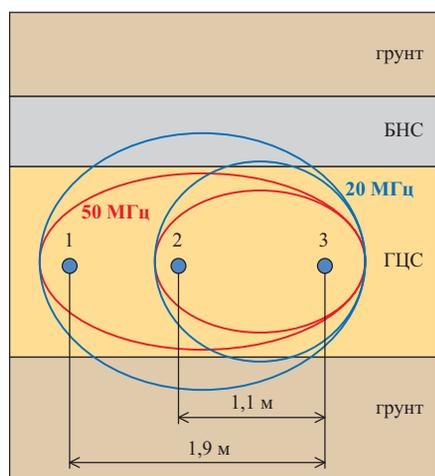


Рис. 4. Сравнение геоэлектрических разрезов РВГИ между скважинами 1 и 3, полученных при измерениях на частотах 50 и 20 МГц.  $\rho_{эф}$  — эффективное сопротивление, полученное по данным РВГИ



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

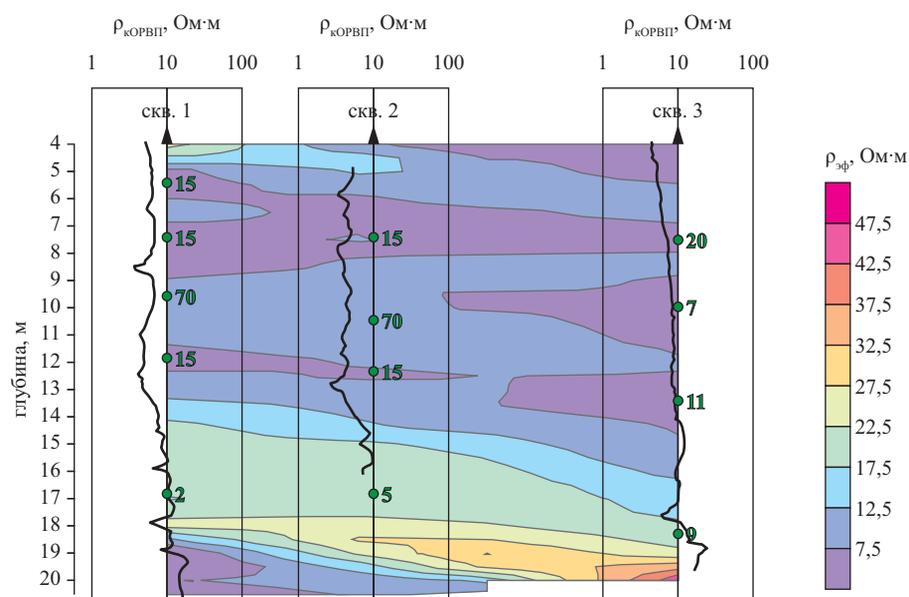
- Зоны Френеля на частоте  $f = 50$  МГц
- Зоны Френеля на частоте  $f = 20$  МГц

**Рис. 5.** План областей исследований при межскважинных измерениях

зультаты которого представлены на рис. 3, б. Известно, что измеряемая методом ГК гамма-активность  $\gamma$  прямо пропорциональна глинистости. На кривых ГК в гидрогеологических скважинах хорошо выделяется граница перехода высоких значений  $\gamma$  к низким вверх по скважине, являющаяся кровлей суглинков и подошвой толщи песков. Глубина этой границы варьирует (на рис. 3, б для всех гидрогеологических скважин она выделена пунктиром). В трубах доступа значения гамма-активности в интервале расположения песков совпадают с таковыми для гидрогеологических скважин, а в интервале расположения суглинков они значительно снижаются, что указывает на практически полный вынос глинистого материала при сооружении стены ПФЗ. Однако в трубах доступа также достоверно выделяются два слоя, граница между которыми совпадает с границей, выделенной с помощью электрических методов. Нижний слой имеет повышенные значения  $\gamma$ , а верхний — пониженные.

Результаты гамма-каротажных исследований позволяют утверждать, что уровни сопротивлений и диэлектрической проницаемости определяются именно обводненностью изучаемой толщи, так как в интервале с повышенной гамма-активностью значения  $\rho$  увеличиваются, а величины  $\epsilon$  снижаются. В интервале же с низкими значениями  $\gamma$  уровень  $\rho$  падает, а значения  $\epsilon$  возрастают.

По совокупности представленных данных в исследованном блоке проти-



**Рис. 6.** Геоэлектрический разрез между скважинами 1 и 3 на частоте 50 МГц, совмещенный с диаграммами каротажа ОРВП и результатами количественной интерпретации диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  (глубина, на которой рассчитывалась  $\epsilon$ , и ее значения показаны зеленым цветом).  $\rho_k$  — кажущееся сопротивление, измеренное методом ОРВП;  $\rho_{эф}$  — эффективное сопротивление, полученное методом РВГИ

вофильтрационной завесы из грунтоцементных свай нижний интервал разреза с относительно высоким сопротивлением и пониженными значениями диэлектрической проницаемости соответствует низкой влагонасыщенности. Полученные характеристики близки к параметрам слабовлажного бетона. В верхней части разреза показания электрических методов определяются высокой влагонасыщенностью среды. Внутри этой области отмечаются локальные сильно обводненные линзы. Подобный интервал выделен и в призабойной части скважины 1.

### Заключение

По результатам выполненных работ были сделаны следующие выводы:

- грунтоцемент исследуемой ПФЗ обладает крайне низкими значениями сопротивлений;
- в пределах грунтоцементной стены по значениям сопротивления и диэлектрической проницаемости были выделены целые слои, наличие которых, видимо, обусловлено технологией строительства ГЦС;

- повышенные значения кажущихся удельных электрических сопротивлений  $\rho_k$  и пониженные величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  соответствуют более плотным и менее водонасыщенным участкам стены, а низкими  $\rho_k$  и высокими  $\epsilon$  отмечаются влагонасыщенные пористые проницаемые участки.

Результаты выполненных исследований позволяют для определения качества сооружения противофильтрационной завесы из грунтоцементных свай наряду с акустическими рекомендовать скважинные радиоволновые методы. В таком комплексе акустические методы служат для установления прочностных характеристик ПФЗ, а радиоволновые — для определения водонасыщенности стены (характеристики, зависящей от пористости и проницаемости изучаемого массива). Радиоволновые исследования должны включать метод ОРВП на частотах 1,25-50 МГц с расстояниями 1,20 и 2,25 м и межскважинные измерения РВГИ на частотах 50 и 20 МГц при расстояниях между скважинами не более 2 м и могут быть дополнены измерениями гамма-каротажа.

### Список литературы

1. Истратов В.А., Остапчук С.И., Скринник А.В., Перекалин С.О. Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 1 (15). С. 20-26.
2. Петровский А.Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2001.