

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА «СКРЫТЫХ» РАБОТ И МОНИТОРИНГА ПРИ КРУПНОМ ГОРОДСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

USING A COMPLEX OF GEOPHYSICAL AND GEOTECHNICAL METHODS FOR ORGANIZATION OF QUALITY CONTROL OF «HIDDEN» WORKS AND MONITORING DURING LARGE-SCALE URBAN CONSTRUCTION

ЧЕРНЯКОВ А.В.

Президент ООО «НПО «КОСМОС»,
д.т.н., г. Москва

БОГОМОЛОВА О.В.

Вице-президент ООО «НПО «КОСМОС»,
к.х.н., г. Москва

КАПУСТИН В.В.

Начальник геофизического отдела
«НПО «КОСМОС», к.ф.-м.н., г. Москва,
1391854@mail.ru

ИСТРАТОВ В.А.

Генеральный директор ООО «Радионда»,
к.т.н., г. Москва, radionda@radionda.ru

БОБАЧЕВ А.А.

Доцент геологического ф-та МГУ
им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н., г. Москва,
bobachev@rambler.ru

CHERNYAKOV A.V.

The president of the «KOSMOS» LLC Scientific Production Association, doctor of science (Technics), Moscow

BOGOMOLOVA O.V.

The vice-president of the «KOSMOS» LLC Scientific Production Association, candidate of science (Chemistry), Moscow

KAPUSTIN V.V.

The head of the Geophysics Department of the «KOSMOS» LLC Scientific Production Association, candidate of science (Physics and Mathematics), Moscow

ISTRATOV V.A.

The general director of the «Radionda» LLC, candidate of science (Technics), Moscow, radionda@radionda.ru

BOBACHEV A.A.

An associate professor of the geological faculty of Lomonosov Moscow State University, candidate of science (Physics and Mathematics), Moscow, bobachev@rambler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Ограждение котлована; скважинная акустика;
радиоволновая геонтроскопия; скважинная
электротомография; скважинная георадиолокация;
«скрытые» работы; контроль качества.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена возможность использования комплекса геофизических методов для контроля качества «скрытых» работ при крупном городском строительстве. Применение комплекса акустических и электромагнитных методов показано на примере решения задачи о контроле качества ограждающих конструкций котлованов смешанного типа, выполняемых на основе комбинации буронабивных и грунтоцементных свай. Представлены основные требования к геофизическим методам, используемым при таких работах.

KEY WORDS

Shoring of excavation; borehole acoustics; radio wave geointroscopy; borehole electrotomography; borehole georadiolocation; «hidden» works; quality control.

ABSTRACT

The article considers the possibility of using a complex of geophysical methods for quality control of «hidden» works during large-scale urban construction. Applying a complex of acoustic and electromagnetic methods are shown by the example of solving the problem of quality control of excavation shorings of a mixed type based on combination of bored and soil-cement piles. The basic requirements for the geophysical methods used for such sort of works are presented.

Строительство крупных объектов во многих случаях связано с устройством в грунтовом массиве различного рода сооружений. Это могут быть фундаментные части зданий, подземные паркинги, тоннели и другие объекты.

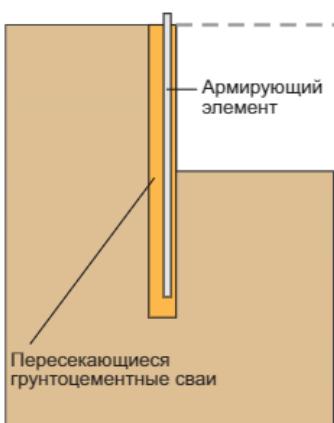
Современные строительные технологии предоставляют возможность сооружать под землей массивы с заданными свойствами, искусственные основания, фундаменты, сваи различных типов, противоводофильтрационные завесы, ограждающие конструкции котлованов и многое другое [2]. В результате применения этих технологий появляется проблема контроля качества так называемых «скрытых» работ. Дело в том, что при использовании ряда способов подземного строительства создаются объекты, доступ к которым и контроль которых традиционными методами в значительной степени затруднены. В зарубежной и отечественной строительной практике применяются специальные методы исследования и определения свойств таких объектов [5–12, 16, 17 и др.].

Естественно, что при большом количестве типов подземных сооружений и технологий строительства комплекс методов, применяемых при контроле проведения «скрытых» работ, очень многообразен, но единого мнения о том, какой метод или их комплекс позволяет достоверно оценить свойства объекта, не существует.

В данной статье будет рассмотрено применение комплекса геофизических и геотехнических методов для контроля качества ограждающих конструкций котлованов. Типов таких конструкций довольно много [14], поэтому обсудим лишь те из них, которые наиболее часто встречались в практике НПО «Космос» в последнее время.

При наличии котлованов глубиной до 5–7 м ограждение их стен может быть выполнено из армированных вертикальных грунтоцементных свай. В сухих грунтах эти сваи могут устраиваться в один ряд с забиркой между ними при разработке грунта или «в полтора ряда», а в обводненных грунтах — в два и более рядов для обеспечения водонепроница-

МЕЛКИЕ КОТЛОВАНЫ



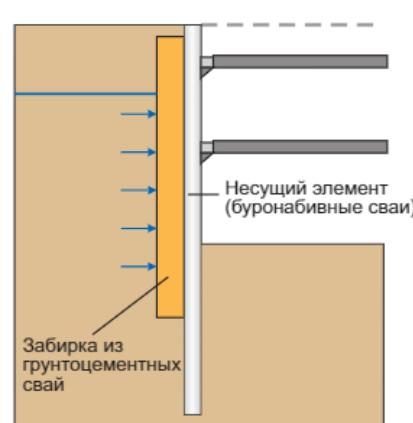
Ограждение из отдельно стоящих грунтоцементных свай (сухие грунты)



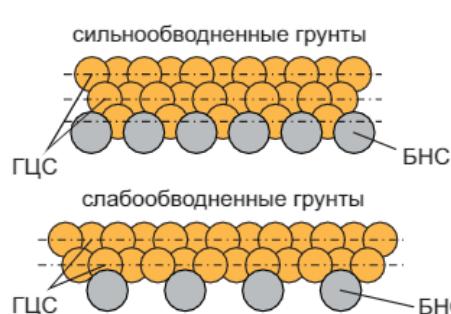
Ограждение из пересекающихся грунтоцементных свай (обводненные грунты)



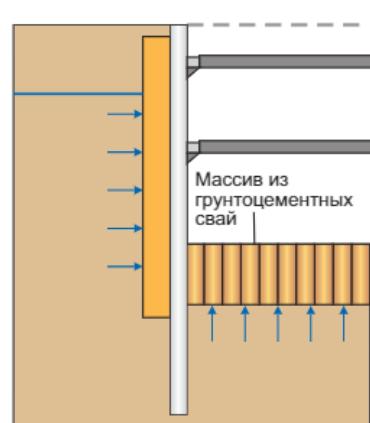
ГЛУБОКИЕ КОТЛОВАНЫ



Ограждение из буронабивных свай с забиркой из грунтоцементных свай



ЛОТКОВАЯ ПРОБКА



Массив из пересекающихся грунтоцементных свай



Рис. 1. Варианты использования технологии jet grouting для создания ограждающих конструкций котлованов

ности ограждения. Подобный тип конструкций позволяет исключить использование тяжелого технологического оборудования, что крайне важно при работе вблизи зданий, и существенно ускорить процесс устройства ограждения.

Конструкция ограждения глубокого (глубиной более 10 м) котлована формируется из отдельно стоящих буровабивных свай в сочетании с массивом из нескольких рядов (как правило, двух) вертикальных грунтоцементных свай (рис. 1). В сухих и слабообводненных грунтах буровабивные сваи могут устанавливаться с существенным зазором между ними: шаг свай (межосевое расстояние) может достигать 2 м. В обводненных грунтах буровабивные сваи располагаются с минимальным межосевым расстоянием.

Рассмотрим актуальность применения рассмотренной конструкции ограждения применительно к глубоким котлованам, вскрываемым в водонасыщенных грунтах. Традиционно используемые конструкции ограждения стен котлованов (шпунтовые

ограждения, «стены в грунте», буросекущие сваи) имеют ряд существенных недостатков. Шпунт не может быть использован в условиях плотной городской застройки, так как он слишком податлив и имеет недостаточную несущую способность при больших величинах бокового давления грунта. «Стена в грунте» не всегда хорошо формируется в условиях водонасыщенных песков и в особенности текучих супесей и суглинков. Буросекущие сваи имеют тенденцию к расхождению на большой глубине, и их устройство требует соблюдения жесткого регламента производства работ (разбуривание свай первого этапа должно производиться не позднее определенного времени после их изготовления), который крайне трудно или невозможно выполнить при значительной длине свай.

В отличие от традиционных конструктивных решений применение ограждения (рис. 2) на основе сочетания буровабивных и грунтоцементных свай позволяет:

ЖУРНАЛ

**о людях
о землетрясениях
о неустойчивых склонах и оползнях
о вулканах
о наводнениях и ураганах
...
о прогнозировании и предупреждении ЧС
о важности работы изыскателей**

ЖУРНАЛ геоРиск

**тел./факс: +7 (495) 366-2684, 366-2095
e-mail: pr@pniiis.ru**

Подписывайтесь, это поможет общаться с заказчиками

- создавать ограждения котлованов любой глубины и в любых типах грунтов;
- строить ограждения котлованов любой конфигурации в плане;
- выполнять ограждения в случаях невозможности выноса коммуникаций из зоны строительства;
- строить не только вертикальные, но и наклонные ограждения, в том числе веерного типа;
- легко устранять обнаруженные дефекты ограждений путем устройства дополнительных грунтоцементных свай.

Горизонтальная плита из массива вертикальных секущих грунтоцементных свай, устроенная в котловане, позволяет:

- существенно снизить водоприток со стороны дна котлована;
- обеспечить возможность применения в котловане технологического оборудования;
- достичь требуемой устойчивости грунта в основании будущего сооружения;
- уменьшить глубину ограждающих конструкций стен котлована, так как исключается необходимость доведения низа ограждения до водоупора, что является одновременно и мероприятием по исключению барражного эффекта.

Вертикальные грунтоцементные сваи могут быть использованы также и для улучшения характеристик (лечения) ограждений:



Рис. 2. Пример использования комбинированной ограждающей конструкции

- «стен в грунте» (путем обработки зон стыков между секциями);
- из буросекущих свай (путем создания противофильтрационной завесы в зоне возможного расхождения свай);
- из шпунта для снижения деформируемости ограждения.

После краткого рассмотрения основных видов ограждающих конструкций, изготавливаемых по комбинированной технологии, следует отметить, что объект, подлежащий контролю, состоит как минимум из четырех материалов — бетона, грунтоцемента, армирующих металлических конструкций и вмещающих грунтов. И для каждого вида материала требуются свои методы исследований.

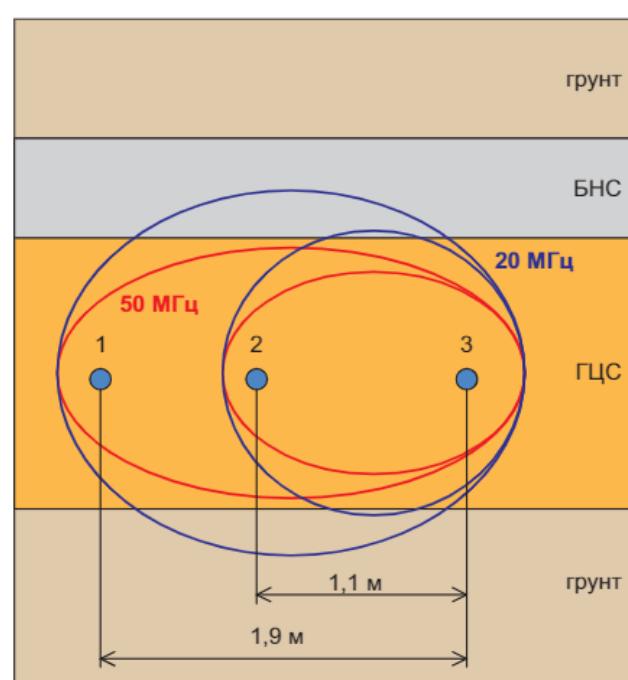
Контроль качества подобных сооружений фактически заключается в сопоставлении определенных в ходе исследований параметров сооружений с их проектными величинами. Контролируемыми параметрами при этом являются следующие характеристики:

- прочностные (предел прочности на одноосное сжатие, модуль деформации);
- деформационные (модуль упругости, модуль сдвига, коэффициент Пуассона);
- геометрические;
- проницаемость;
- показатели состава грунта (влажность, глинистость).

На практике применяются два типа контроля: (1) выборочный, когда контролируется от 2 до 10% объема сооружения; (2) сплошной, применяемый в тех случаях, когда контроль первого типа дал отрицательный результат.

Организация выборочного контроля «скрытых» работ, как правило, планируется на стадии проектирования сооружения. Методы контроля делятся на прямые и косвенные. К прямым методам контроля относятся испытания статическими и динамическими нагрузками, комплекс буровых и лабораторных исследований с целью определения несущей способности, прочностных и деформационных характеристик объекта, а также комплекс гидрогеологических исследований для оценки проницаемости и фильтрующей способности ограждений (на взгляд авторов, он в настоящее время еще недостаточно отработан для практического приме-

нения). Как известно, данные методы дорогостоящи и трудоемки и не позволяют осуществлять большой объем исследований. Поэтому для крупных объектов наряду с ними применяются косвенные методы (в основном геофизические, позволяющие оценить перечисленные выше параметры создаваемых объектов). Возможность определения физико-механических свойств грунтов косвенными методами базируется в основном на установлении корреляционных зависимостей между их геофизическими и физико-механическими параметрами путем испытаний в строительных лабораториях, натурных испытаний и сопоставлении полученных результатов с данными геофизических наблюдений. Для бетонных массивов подобные зависимости установлены давно [15] и широко используются на практике. Что касается свойств грунтоце-



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- Зоны Френеля на частоте $f = 50 \text{ МГц}$
- Зоны Френеля на частоте $f = 20 \text{ МГц}$

Рис. 3. Размеры области исследований при проведении радиоволнового просвечивания. БНС — буронабивные сваи; ГЦС — грунтоцементные сваи; 1, 2, 3 — наблюдательные скважины

ментных массивов, то их изученность гораздо слабее. Это связано с тем, что данная технология недавно вошла в практику строительных работ. Как показывает опыт применения геофизических методов, точность определения физико-механических характеристик грунтов с помощью корреляционных зависимостей, установленных для грунтов, составляет в среднем 10–15%.

Косвенные методы обычно используются совместно с прямыми, причем последние позволяют создать сеть эталонных (опорных) точек, к которым привязываются данные косвенных методов.

Рассмотрим по отдельности возможности применяемых геофизических методов, которые в приложении к задачам обследования строительных конструкций и геотехнических сооружений часто называют методами неразрушающего контроля. Поскольку рассматриваемые ограждающие конструкции состоят из комбинации железобетонных и грунтоцементных свай, применяемые методы необходимо рассматривать отдельно исходя из различных свойств материала. Так как обследуемые сооружения имеют конечные размеры, то необходимо, чтобы применяемые методы давали возможность исследования локального объема среды и чтобы влияние других объектов было минимальным. При использовании волновых полей (ультразвуковых, акустических или электромагнитных) это реализуется благодаря выбору рабочей частоты: в зависимости от увеличения (или уменьшения) частоты уменьшается (увеличивается) объем среды, свойства которого

влияют на кинематические и динамические параметры проходящих волн (рис. 3).

К примеру, подбирая центральную частоту акустического импульса, возбуждаемого в водонаполненной скважине, находящейся внутри грунтоцементной сваи, можно добиться того, что на свойства распространяющейся вдоль сваи гидроволны будут влиять в основном параметры материала сваи. Для методов, в основе которых лежат потенциальные поля (электроразведочные методы), используется дистанционный принцип — изменение области исследования в зависимости от расстояния между источником и точкой измерения.

Основные способы обследования свай с применением волновых методов можно найти в работах [8, 9]. Для оперативного обследования железобетонных свай в зарубежной и отечественной практике применяются ультразвуковой метод наблюдения во внутренних точках свай CHUM (Cross-Hole Ultrasonic Monitor) и поверхностный метод PIT (Pile Integrity Testing), или SIT (Sonic Integrity Testing). Причем во многих странах имеются государственные стандарты, регламентирующие применение этих методов. В нашей стране подобные стандарты отсутствуют.

Метод ультразвукового просвечивания CHUM хорошо известен во всем мире. Как показано в работе [18], он позволяет эффективно находить дефекты размером более 10% от поперечного сечения сваи. Для проведения работ в сваи устанавливают трубы, прикрепленные к арматурному каркасу и погружаемые в процессе бетонирования.

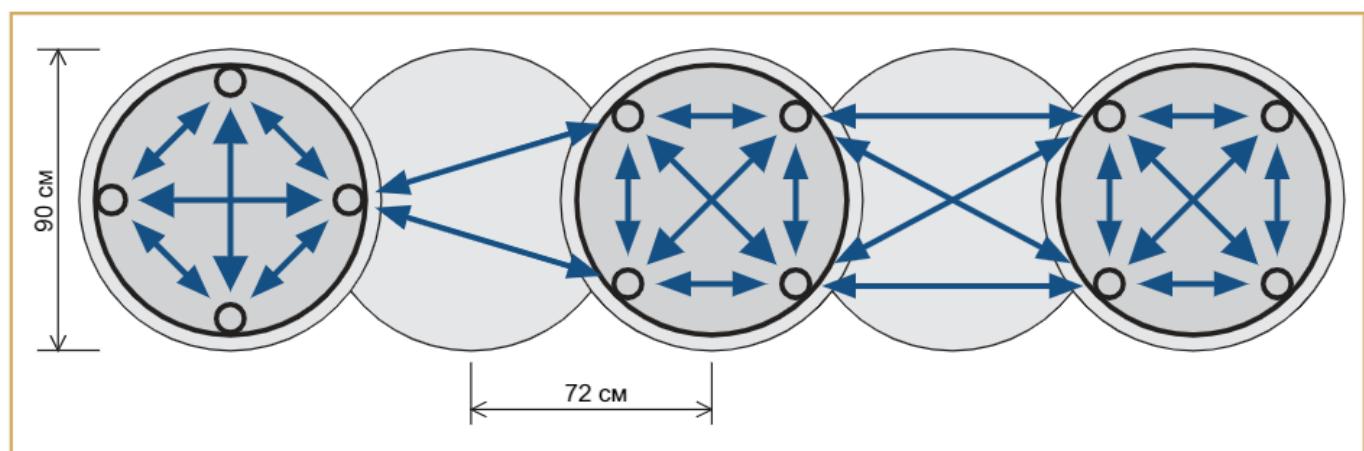


Рис. 4. Схема наблюдений для межскважинного просвечивания ограждающей конструкции из буросекущих свай. Окружностями показаны поперечные сечения свай, кружками — наблюдательные трубы в сваях, жирными стрелками — направления ультразвукового просвечивания между трубками

Для обследования ограждающих конструкций из буросекущих свай можно использовать схему наблюдений, представленную на рис. 4 [24].

Современные технологии позволяют проводить скважинные ультразвуковые исследования в непрерывном режиме, получая изображение среды вдоль ствола скважины со сколь угодно малым шагом.

На рисунке 5 представлен пример данных, полученных при межскважинном ультразвуковом пропсвечивании модельной сваи. Положение дефектов, известное заранее, подтвердились ультразвуковыми измерениями.

Схемы наблюдений в двух и более скважинах позволяют применять алгоритмы томографической обработки данных с построением двух- и трехмерных моделей сваи [19]. Благодаря этому можно получить до-

стверную пространственную привязку дефектов в свае. Кроме того, более высокие частоты ультразвука обеспечивают гораздо лучшую разрешающую способность по сравнению с акустическим методом. Таким образом, ультразвуковой скважинный метод является эффективным средством для диагностики бетонных свай. Он позволяет обнаруживать дефекты размером более 10–15% от поперечного сечения сваи и производить пространственную привязку этих дефектов.

Однако, как и в случае с другими неразрушающими методами, данный метод имеет свои ограничения применимости, связанные в первую очередь с высоким затуханием в бетоне волн ультразвукового диапазона частот, а также зачастую с невозможностью устройства наблюдательных скважин внутри объекта исследований.

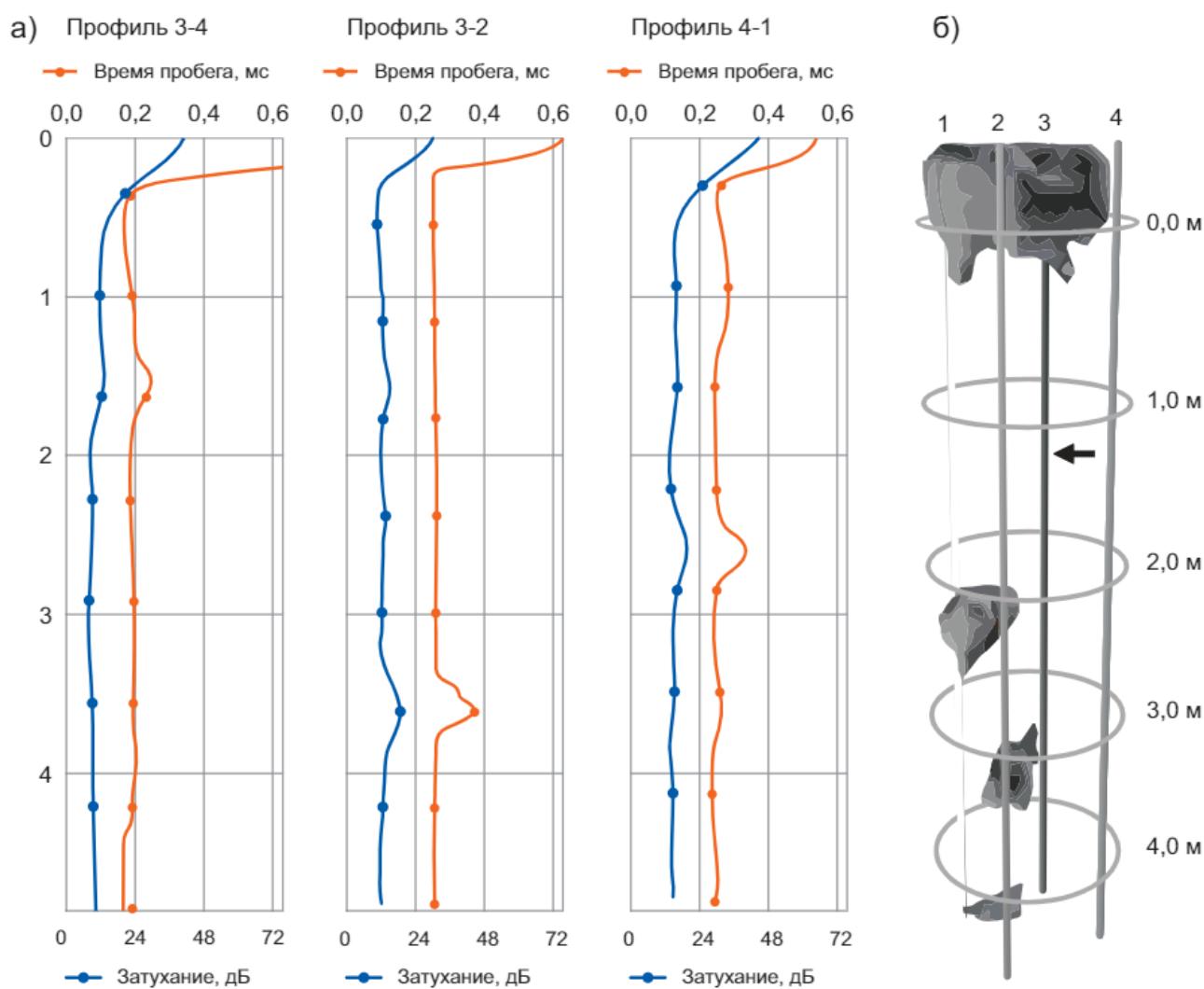


Рис. 5. Пример данных, получаемых при межскважинных ультразвуковых исследованиях:
а — полевые данные с графиками, отображающими время первого вступления и затухание,
б — визуализация трехмерной межскважинной томографии

В связи с этим более широкое применение для контроля качества буронабивных свай получил поверхностный акустический метод SIT — наиболее производительный и простой в использовании. Его целесообразно применять в тех случаях, когда необходимо провести оперативную диагностику достаточно большого количества свай и есть свободный доступ к их оголовкам. При этом сейсмоприемники устанавливаются на оголовок, и на нем производится возбуждение акустических волн.

В практике работ НПО «Космос» при контроле качества изготовления буронабивных свай применяется модифицированный вариант метода SIT, который обладает более широкими возможностями и надежностью получаемых результатов (рис. 6). Его подробное описание можно найти в работах [6, 9, 10, 16]. Применяя возбуждения различных мод колебаний, можно получить информацию не только о дефектах в свае, но и о состоянии вмещающего ее грунтового массива, в частности грунтоцементного.

Для контроля качества грунтоцементных свай и массивов специально для НПО «Космос» на кафед-

ре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ была разработана методика на основе многоволновых скважинных акустических наблюдений. Она включает акустические наблюдения в околоскважинном пространстве (дифференциальный и потенциальный каротаж) и межскважинное томографическое просвечивание (рис. 7). Подробное описание данной методики и способов оценки прочностных характеристик грунтоцементного массива можно найти в работе [17]. Возможности ультразвукового метода для исследования грунтоцементных массивов оказались недостаточными ввиду высокого затухания ультразвука и технической сложности организации ультразвуковых наблюдений.

Применение скважинных акустических методов позволяет определять сплошность и однородность грунтоцементных свай и массивов, эффективные диаметры одиночных свай, деформационные и прочностные характеристики грунтоцемента (рис. 8), наличие проницаемых зон (зон с подвижным флюидом).

Вполне естественно, что для большей достоверности и полноты получаемой информации необхо-

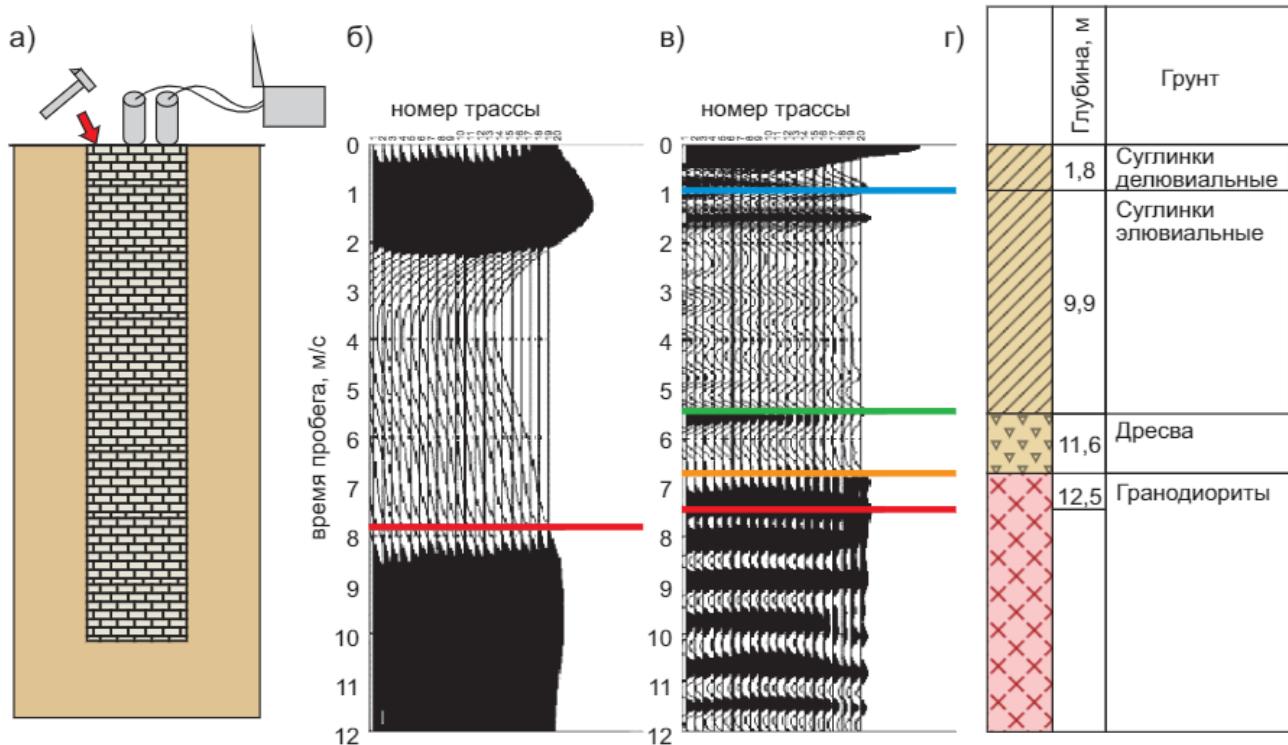


Рис. 6. Схема расположения источника колебаний и сейсмоприемников на оголовке сваи (а); б, в — трассы акустических колебаний, полученные при ударе резиновым и металлическим молотком соответственно; г — литологическая колонка (г. Асбест)

димо использовать комплекс методов. Для исследования грунтоцементных свай и массивов грунтоцемента может быть предложен комплекс методов, включающий:

- скважинную акустику;
 - скважинную георадиолокацию;
 - радиоволновое просвечивание;
 - скважинную электротомографию;

- гамма-каротаж, радиоволновое профилирование скважины, индукционный каротаж.

Следует отметить одну из примечательных особенностей данного комплекса: для проведения работ могут быть использованы одни и те же наблюдательные скважины (НС), которые устраиваются сразу после изготовления грунтоцементной сваи. После извлечения монитора из незастывшей грунтоцемент-

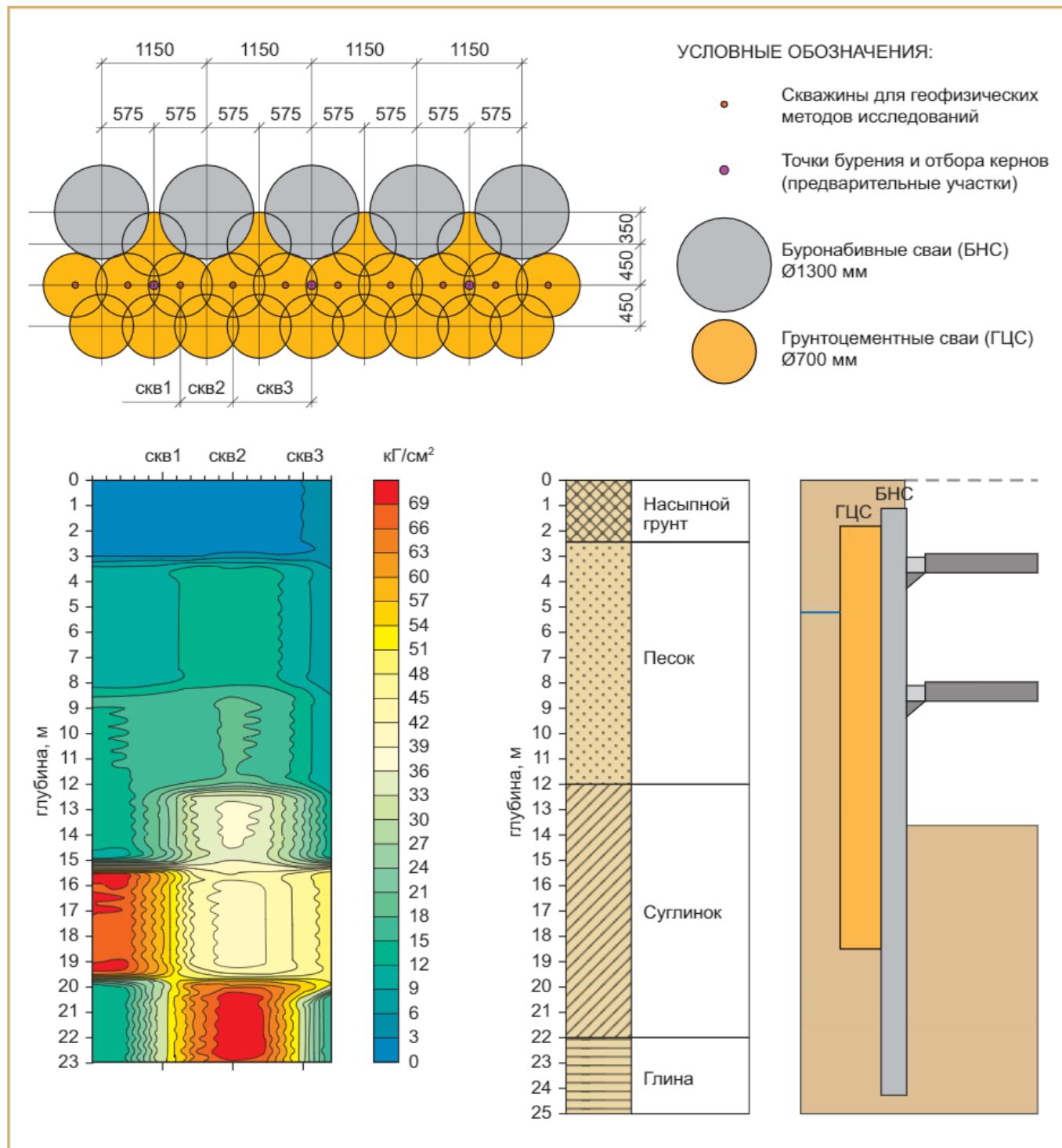


Рис. 7. Результаты межскважинной акустической томографии (значения предела прочности на одноосное сжатие в створе скважин 1, 2, 3 на экспериментальном участке 1 (г. Москва))

ной сваи в оставшееся технологическое отверстие могут быть погружены пластиковые трубы, которые и образуют НС. Данное обстоятельство предоставляет возможность довольно простой технической реализации сети НС на исследуемом объекте.

Скважинная георадиолокация проводится с целью обследования околоскважинного пространства, определения геометрических характеристик свай и массивов, сплошности свай, обнаружения водонасыщенных участков (рис. 9).

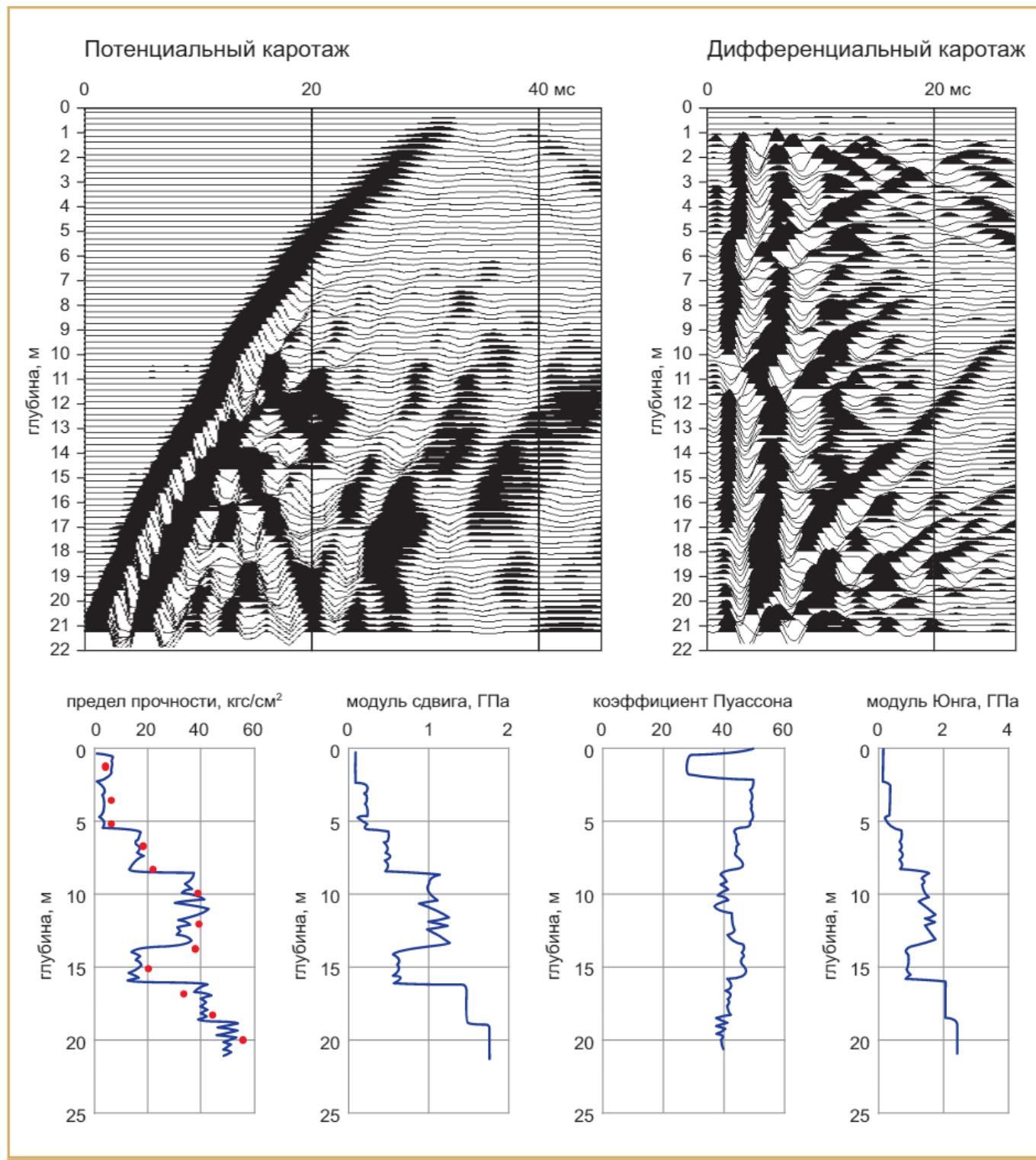


Рис. 8. Волновое поле и результаты определения прочностных и деформационных характеристик с помощью многоволновых акустических наблюдений в грунтоцементной свае (наблюдательная скважина 3). На диаграмме предела прочности вынесены результаты лабораторных испытаний керна

При обнаружении водонасыщенных участков данные георадиолокации необходимо сопоставлять с результатами акустических работ с целью определения проницаемых участков в грунтоцементном массиве (на них могут быть нарушены защитные свойства противофильтрационных завес и ограждающих конструкций).

К сожалению, используемые в отечественной практике георадары (в отличие от зарубежных) не позволяют проводить межскважинные томографические наблюдения в широком диапазоне частот. Поэтому для выполнения межскважинной томографии в настоящее время может применяться многочастотное радиоволновое просвечивание [3, 4, 13].

Метод радиоволнового просвечивания основан на зависимости интенсивности поглощения энергии радиоволн от электрических характеристик грунтов, расположенных на трассе их распространения. По-

роды, обладающие более низкими значениями электрического сопротивления ρ и диэлектрической проницаемости ϵ_0 , характеризуются более высоким поглощением радиоволн. Разработанная в ООО «Радионда» современная модификация этого метода получила название «радиоволновая геонитроскопия межскважинного пространства». Она основана на специальном анализе данных многочастотных радиоволновых измерений в вариантах односекважинного профилирования (ОРВП) и межскважинного просвечивания.

Радиоволновая геонитроскопия (РВГИ) — это способ «визуализации» внутреннего строения геологической среды в пространстве между скважинами, который позволяет дистанционно определять электрические свойства грунтов в их естественном залегании и распределение этих характеристик в изучаемом объеме среды с требуемой детальностью.

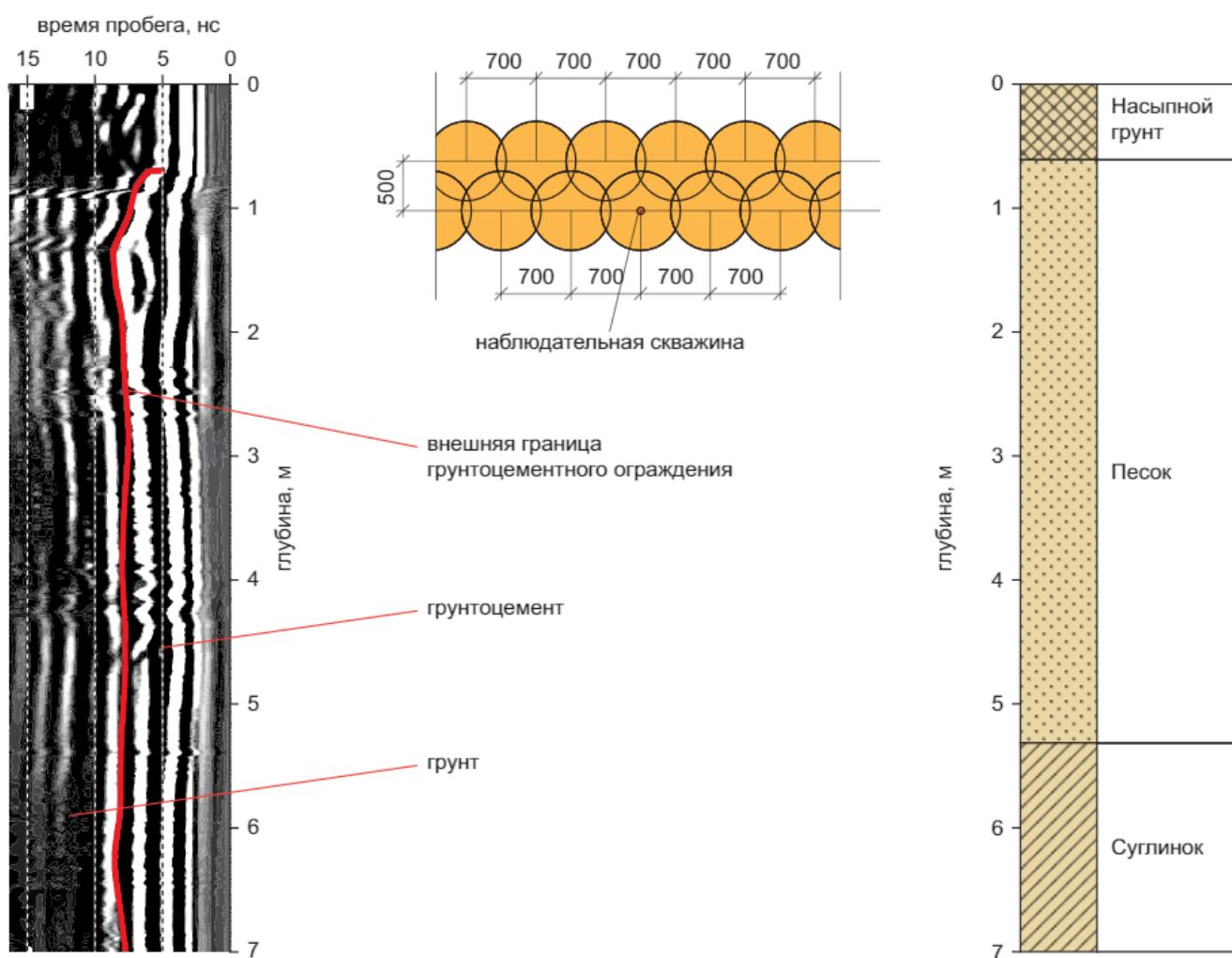


Рис. 9. Результаты георадарного исследования грунтоцементной сваи (г. Москва). Горизонтальная ось — время пробега электромагнитного импульса, нс; вертикальная ось — глубина от поверхности, м

для выявления и локализации неоднородностей (рис. 10).

Опыт совместного применения акустических и радиоволновых методов показывает, что распределение электрических свойств хорошо согласуется с распределением упругих свойств, полученным в результате многоволновых акустических наблюдений в межскважинном и околоскважинном пространстве и характеризующим прочностные свойства грунтоцементного материала. Технология проведения акустических наблюдений аналогична технологии радиоволновой геонитрекции. Отличие заключается лишь в типе используемых волн.

В комплексе с акустическими методами данные радиоволновых исследований дают возможность получить более детальную, полную и надежную характеристику физико-механических и противофильтрационных свойств, сплошности и однородности противофильтрационных завес и ограждений из грунто-

цементных свай и осуществлять контроль качества их строительства.

Совместное применение акустических и электромагнитных методов позволяет получить характеристики упругих и электромагнитных свойств среды. При использовании акустических методов непосредственно определяются такие параметры среды, как скорость продольных, поперечных волн, гидроволн. Электромагнитными методами определяется диэлектрическая проницаемость и эффективная проводимость среды, зависящая от частоты гармонического поля.

Использование постоянного тока позволяет надежно определять электрическую проводимость среды в отличие от электромагнитных методов, в которых проводимость проявляется совместно с диэлектрической проницаемостью. Кроме того, постоянный ток позволяет получать информацию о поляризуемости среды. В связи с этим существующий

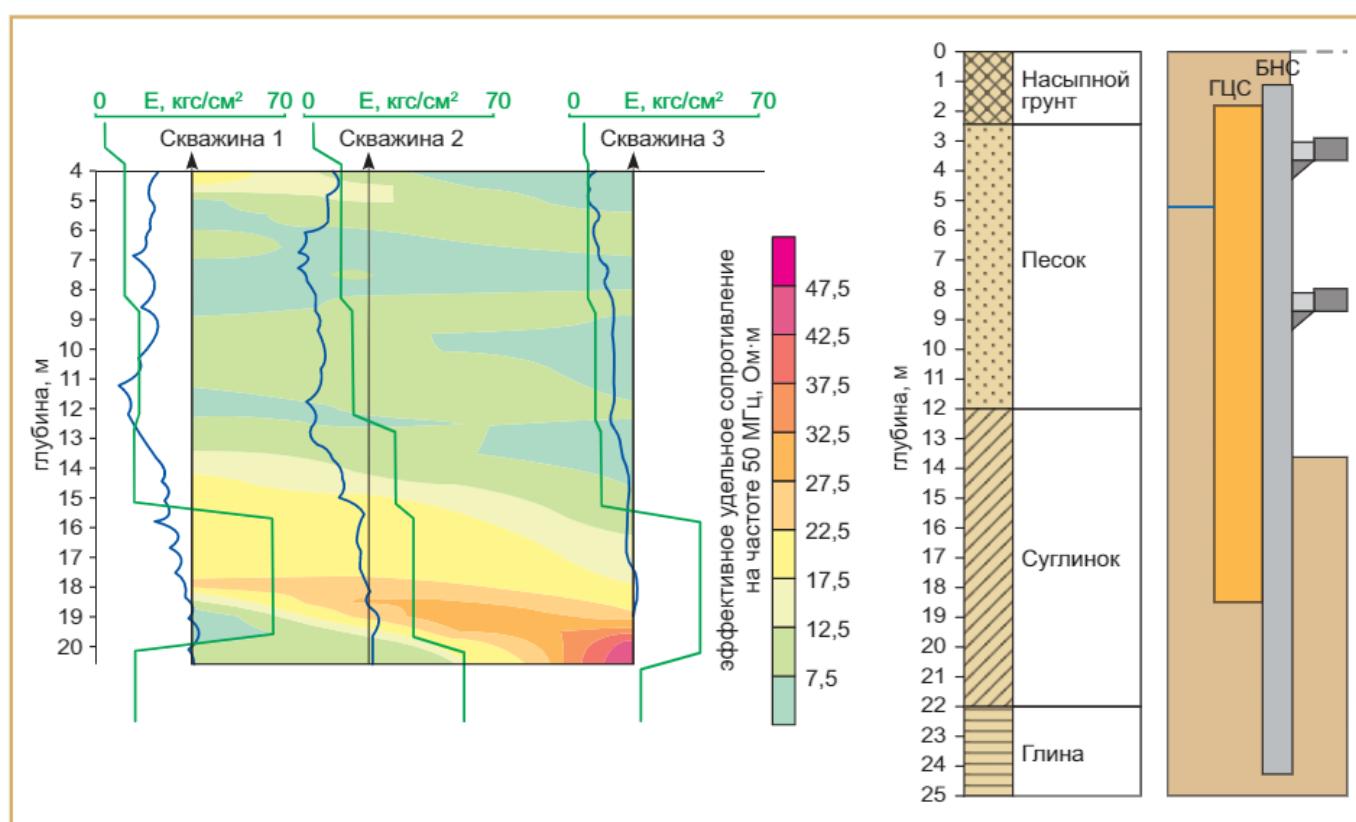


Рис. 10. Результаты томографического просвечивания грунтоцементного массива (геоэлектрический разрез по данным просвечивания методом радиоволновой геонитрекции между скважинами 1–3 на частоте 50 МГц, совмещенный с результатами акустического каротажа и односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП)). Вертикальная ось — глубина, м; R — предел прочности на одноосное сжатие; $\rho_{\text{эфф}}$ — эффективное удельное сопротивление, полученное по результатам многочастотного ОРВП; цветовая шкала — эффективное удельное сопротивление на частоте 50 МГц

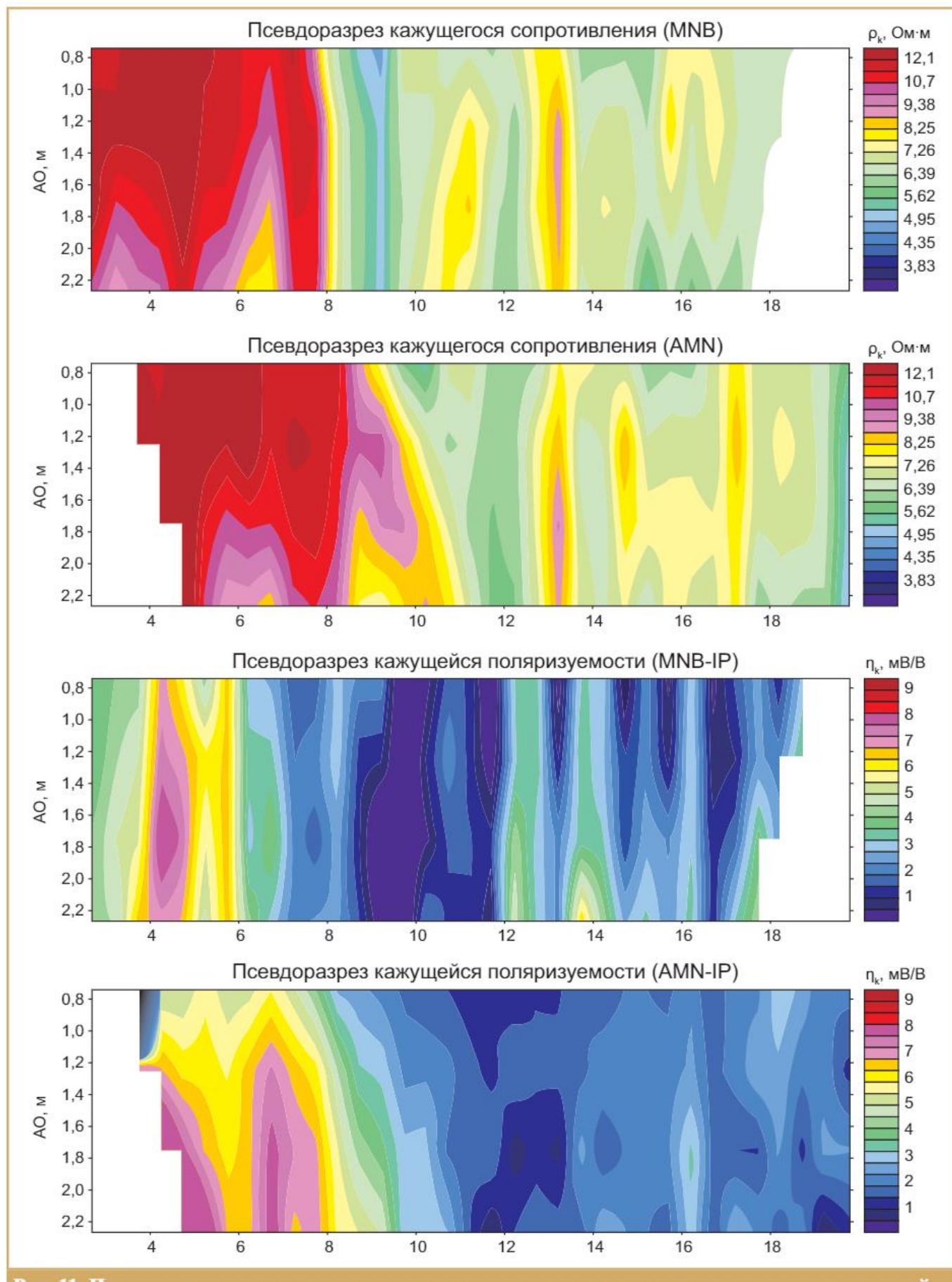


Рис. 11. Псевдоразрезы кажущегося удельного сопротивления ρ_k и поляризуемости η_k встречной и прямой трехэлектродных установок вдоль скважины в грунтоцементной свае. По оси X — глубина приемного диполя, м

комплекс исследований логично дополнить методом сопротивлений и вызванной поляризации. Метод сопротивлений можно применять в различных модификациях. Простейший вариант — это каротаж скважины. Более современный метод — электротомография в односкважинном или межскважинном варианте.

Методика электротомографии [1] изначально использовалась в поверхностном варианте и представляла собой вертикальные электрические зондирования с частым шагом и с интерпретацией в рамках двумерных моделей. Для получения высокого разрешения на глубине используются измерения в скважине. В отличие от электрического каротажа при электротомографии используется неподвижная многоэлектродная коса, опущенная в скважину [19]. Это позволяет проводить комплекс измерений с использованием разных установок, получать информацию об удельном сопротивлении на разных расстояниях от скважины и изучать строение разреза между скважинами [20].

Для контроля качества противофильтрационной завесы были выполнены однократные наблюдения в двух скважинах, пробуренных в массиве из секущих грунтоцементных свай на расстоянии 1 м друг от друга. Измерения проводились с электроразведочными косами с шагом 0,5 м в интервале глубин от 2 до 20 м. Авторы использовали комбинированную трехэлектродную установку с разносами АО от 0,75 до 2,25 м. Небольшой интервал разносов применялся для того, чтобы зона исследования оставалась в пределах массива грунтоцементных свай. Для измерений использовалась электроразведочная станция SYSCAL Pro Switch 72 (производства французской компании IRIS Instruments).

На расстоянии менее 1 м от скважин находился ряд буронабивных свай. Чтобы оценить его влияние, использовались измерения при различных разносах. Кроме того, применялся метод вызванной поляризуемости (так как металл обладает высокой поляризуемостью). Результаты измерения по одной скважине показаны на рис. 11.

Полученные в результате измерений данные имеют невысокий контраст. Значения кажущегося удельного электрического сопротивления меняются от 5 до 15 Ом·м. Его величины для разных разносов различаются между собой мало. Уровень поляри-

зуемости — меньше 1% (менее 10 мВ/В). Это указывает на то, что арматурный каркас буронабивной сваи слабо влияет на результаты электрометрических наблюдений.

Кроме односкважинных было выполнено более 1000 межскважинных измерений при различных положениях приемных и питающих электродов с дипольной и трехэлектродной установкой. Такой объем данных позволил использовать программу 2D инверсии Res2dinv (производства малазийской компании Geotomo Software). В результате был получен геоэлектрический разрез грунтоцементного массива, показанный на рис. 12.

Особенностью проведения скважинных электротомографических исследований является то, что данные работы можно проводить только в необсаженных скважинах. Однако это обстоятельство компенсируется невысокой стоимостью электроразведочных кос, что позволяет оставлять их в скважине. Кроме того, перспективным направлением является мониторинг грунтоцементного массива. Используя возможность постоянного размещения электроразведочных кос в скважинах и возможность проведения многоканальной регистрации, можно организовать систему непрерывного мониторинга грунтоцементного массива. В этом случае можно наблюдать динамику изменения удельного сопротивления по мере набора прочности грунтоцементного массива и его поведения на разных этапах строительства сооружения.

При изучении поведения искусственно закрепленных грунтов в большинстве случаев полезно проводить сравнение свойств природного и измененного грунтового массива. Рассмотренные выше геофизические методы позволяют проводить подобное сравнение при производстве наблюдений в исходном и измененном массиве грунта. В приложении к способу струйной цементации это дает «увидеть», как исходные (реликтовые) свойства и строение природного массива выражены в массиве с измененными свойствами. Рассмотрим это на конкретном примере.

В процессе струйной цементации грунтов происходит их частичное или полное замещение цементным раствором. При наличии в разрезе глинистых грунтов они замещаются цементным раствором частично. «Увидеть» качественный характер

произошедшего замещения можно, проведя наблюдения с помощью электротомографии или, что значительно проще, с помощью гамма-каротажа (рис.13). Из сравнения представленных на рис. 13 графиков явно видно, что естественный гамма-фон в грунтоцементном массиве понижен. Это свидетельствует о значительном замещении глинистого материала цементным раствором при проведении струйной цементации.

Суммируя все вышесказанное, можно констатировать, что на этапе строительства ограждающей конструкции рассмотренный комплекс методов позволяет организовать систему контроля качества. Его выбор и состав необходимо производить исходя из инженерно-геологических условий и типа ограждающей конструкции.

На следующем этапе строительства — вскрытии котлована и строительстве сооружения — на передний план выходит мониторинг ограждающей конструкции и грунтового массива за ней. Поскольку в данной работе рассматриваются проблемы устойчивости ограждающих конструкций, мониторинг грунтового основания сооружения и самого сооружения выходит за ее рамки.

При проектировании и строительстве глубоких котлованов международные и российские нормы предписывают проведение мониторинга [21–23]. Комплексный геотехнический мониторинг включает в себя:

- наблюдения за деформациями ограждающей конструкции;
- наблюдения за деформациями грунта за ограждением;

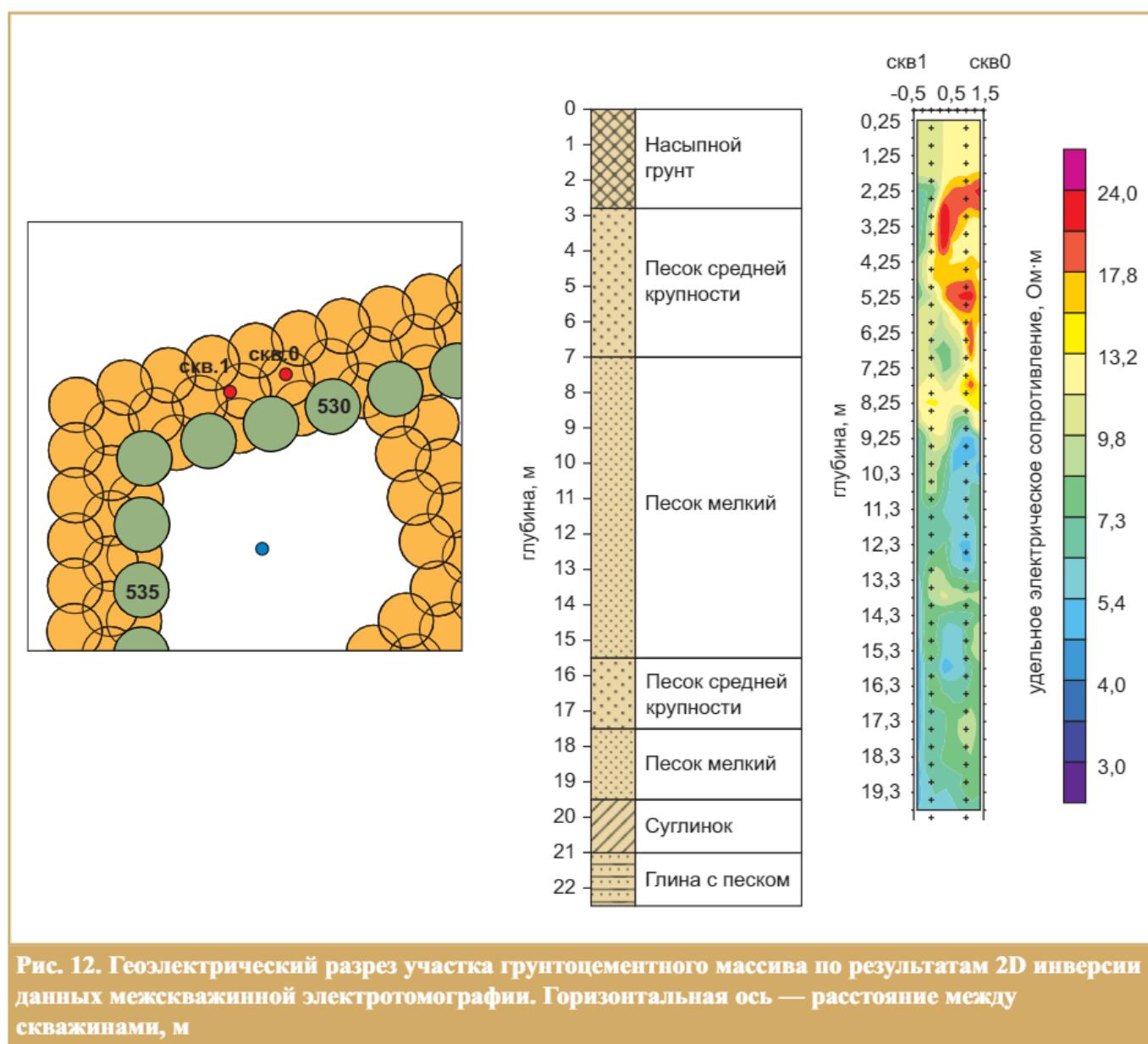


Рис. 12. Геоэлектрический разрез участка грунтоцементного массива по результатам 2D инверсии данных межскважинной электротомографии. Горизонтальная ось — расстояние между скважинами, м.

- наблюдения за распределением напряжений от давления грунта и грунтовых вод;
- наблюдения за распределением напряжений в распорной конструкции;
- определение влияния котлована на окружающую застройку;
- определение уровня вибрационных полей при проведении работ в котловане.

Одним из самых важных элементов комплексного геотехнического мониторинга является контроль нагрузок и деформаций системы крепления котлована вследствие выемки грунта. Основными инструментами для мониторинга этих деформаций являются инклинометрические системы для измерения углов наклона (рис. 14). В предварительно встроенную в стенку котлована трубу опускается датчик, который измеряет ее наклон относительно вертикали. Такие измерения производятся с регулярными интервалами и в связи со значительными этапами строительства, например при большом объеме выемки грунта, работе тяжелой строитель-

ной техники в непосредственной близости от крепления котлована и т.д.

Для контроля нагрузки производится измерение силы, действующей на распорки котлована, с помощью тензометрических датчиков, или динамометров. За пределами котлована производится измерение уровня грунтовых вод для оценки опасности осадок грунтов и связанного с этим возможного влияния на соседние здания. Одновременно с этим целесообразно производить измерения вибрационных полей, появляющихся при движении транспорта и работе строительной техники и создающих дополнительные нагрузки на грунты и ограждающие конструкции.

Рассмотренный выше комплекс геофизических методов может быть использован в период разработки котлована и строительства сооружения в режиме мониторинга. Одним из необходимых условий применимости геофизических методов для исследования подобных конструкций является возможность локализации области наблюдения в пределах их раз-

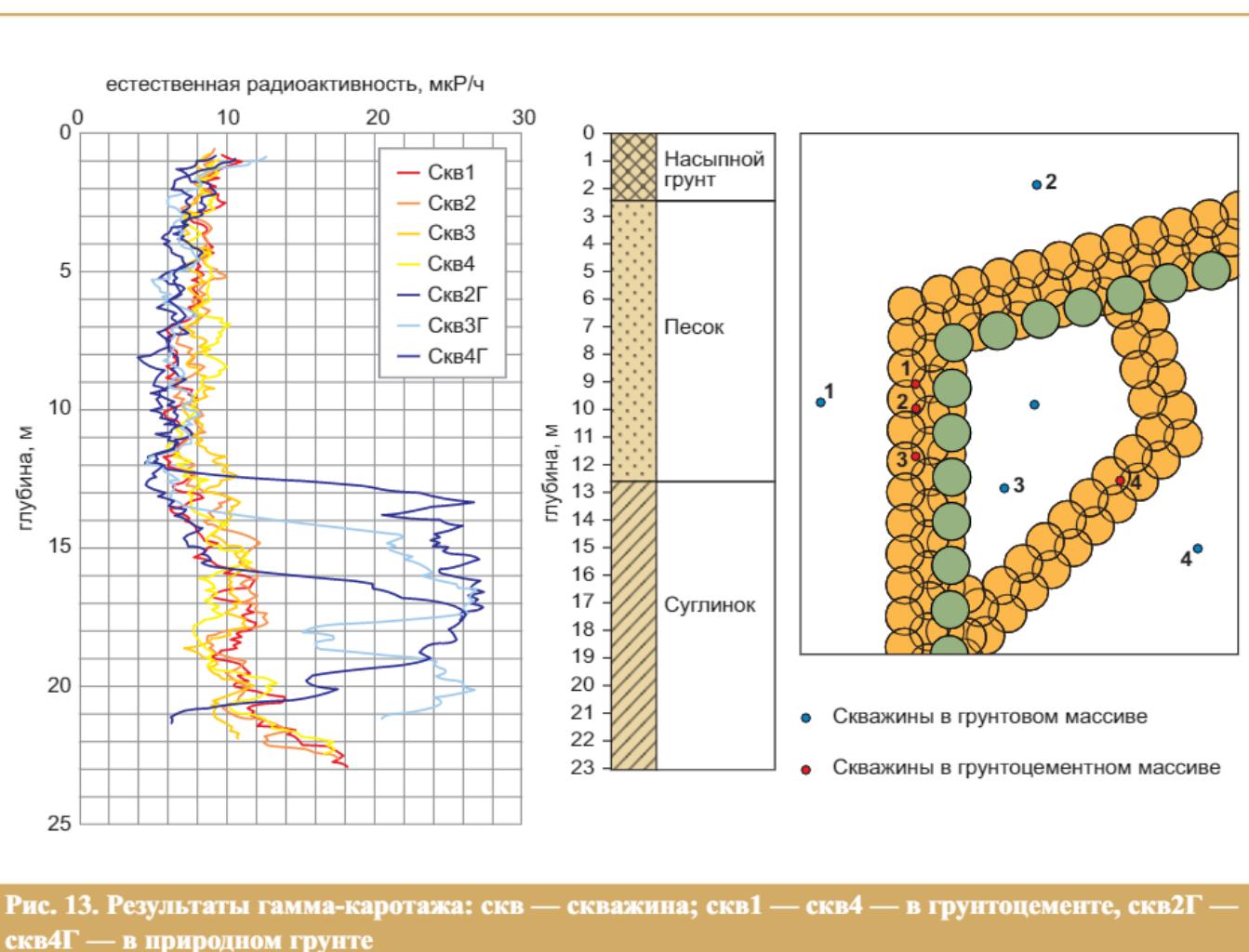


Рис. 13. Результаты гамма-каротажа: скв — скважина; скв1 — скв4 — в грунтоцементе, скв2Г — скв4Г — в природном грунте

меров. Это может быть достигнуто благодаря применению методов, использующих волновые и потенциальные физические поля с возможностью управления их локализацией. Механизм локализации области наблюдения в зависимости от типа поля основан на рассмотренных выше частотных или дистанционных принципах.

Применение методов на основе использования электромагнитных и упругих полей позволяет получить более полную и достоверную информацию о строении и свойствах изучаемой среды и построить более детальную интерпретационную модель.

Сопоставляя данные геотехнических и геофизических наблюдений, можно не только наблюдать за происходящими процессами, но и в ряде случаев устанавливать причины происходящих деформаций. Таким образом, предлагаемый комплекс геофизических и геотехнических методов позволяет осуществлять контроль при создании ограждающих конструкций, состоящих из комбинации железобетонных и грунтоцементных свай, начиная с опытно-методических работ по выбору регламента производства свай применительно к существующим инженерно-геологическим условиям и заканчивая мониторингом строящегося сооружения.

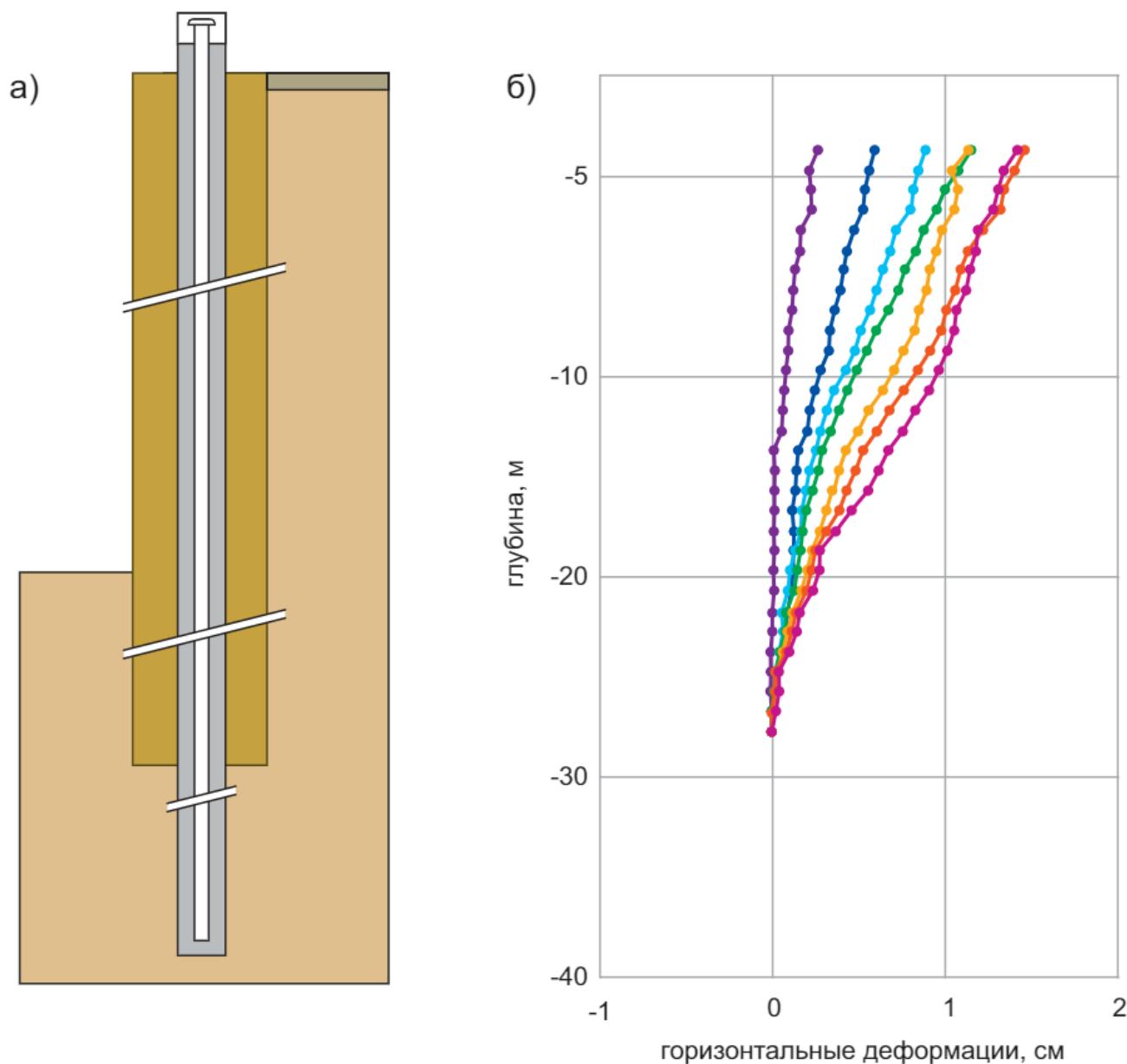


Рис. 14. Схема конструкции инклинометрической системы (а) и пример результатов инклинометрических измерений (б)

Список литературы

1. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Электротомография — высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе // Инженерная геология. 2007. № 8. С. 31–35.
2. Брод И.И. Струйная технология. М.: АСВ, 2004. 448 с.
3. Истратов В.А. Радиоволновые исследования межскважинного пространства // Инженерные изыскания. 2008. № 8. С. 80–85.
4. Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. Объемное геоэлектрическое картирование подземного пространства методом радиоволновой геонитроскопии // Подземное пространство мира. М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 1997. № 3. С. 12–17.
5. Капустин В.В. Акустические методы контроля качества свайных фундаментных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 12. С. 12–16.
6. Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай // Инженерные изыскания. 2011. № 11. С. 10–15.
7. Капустин В.В. Методика изучения особенностей распространения акустических волн в бетонных сваях с использованием методов численного моделирования // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2008. № 3. С. 65–70.
8. Капустин В.В. Применение волновых методов для определения длины свай // Технологии сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113–117.
9. Капустин В.В., Парфенов Е.А., Драницын А.В. Применение акустических методов неразрушающего контроля для исследования свай и свайных конструкций // Сборник научных трудов НИИОСП. М.: Изд-во НИИОСП, 2011. Вып. 100. 418 с.
10. Капустин В.В., Ушаков А.Л. Применение акустических методов при исследовании сложных свайных конструкций // Геофизика. 2011. № 6. С. 65–70.
11. Капустин В.В., Ушаков А.Л., Бакайкин Д.В. Применение акустических методов для обследования строительных конструкций // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 25–28.
12. Капустин В.В., Хмельницкий А.Ю., Бакайкин Д.В. О возможности использования неоднородных электромагнитных волн для исследования фундаментных конструкций // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2011. № 1. С. 52–55.
13. Панов В.С. Опыт применения межскважинного радиоволнового просвечивания при исследовании основания мостовых опор // Инженерные изыскания. 2012. № 5. С. 42–49.
14. Петрухин В.П., Колыбин И.В., Разводовский Д.Е. Ограждающие конструкции котлованов, методы строительства подземных и заглубленных сооружений // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. XII: Строительство подземных сооружений. 2008. С. 212–219.
15. Судаков В.В. Контроль качества и надежность железобетонных конструкций. Л.: Стройиздат (Ленинград. издание), 1980. С. 168.
16. Хмельницкий А.Ю., Владов М.Л., Капустин В.В. Экспериментальное исследование влияния вмещающего грунта на распространение акустических волн в свайных конструкциях // Инженерные изыскания. 2012. № 6. С. 16–22.
17. Черняков А.В., Богомолова О.В., Капустин В.В., Владов М.Л., Калинин В.В. Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации // Технологии сейсморазведки. 2008. № 3. С. 97–103.
18. Amir J.M., Amir E.I. Capabilities and limitations of cross hole ultrasonic testing of piles / Proceedings of the Conference on Contemporary topics in deep foundation. Orlando: ASCE GSP, 2009. P. 1–8.
19. Daily W., Owen E. Cross-borehole resistivity tomography // Geophysics. 1991. V. 56. № 8. P. 1228–1235.
20. Deceuster J., Delgrange J., Kaufmann O. 2D cross-borehole resistivity tomographies below foundations as a tool to design proper remedial actions in covered karst // Journal of Applied Geophysics. 2006. V. 60. № 1. P. 68–86.
21. Katzenbach R., Hoffmann H., Vogler M., Moormann C. Costoptimized foundation systems of high-rise structures, based on the results of actual geotechnical research // Proceedings of the International Conference on trends in tall buildings. Frankfurt on the Main, 2001. P. 421–443.
22. Katzenbach R., Moermann Ch. Erstellung einer 20-m tiefen hochhaus-baugruben im Frankfurter ton nach der methode der modifizierten deckelbauweise / Baugruben in Locker und Festgestein: 3 Stuttgarter Geotechnik-Symposium, 24 Juni 1997. Hrsg.: P.A. Vermeer. S. 127–151.
23. Katzenbach R., Weiclle A., Ramm H. Geotechnical basics in modelling of the soil-structure interaction due 10 ‘he Sustainable Re-use of Historical Foundations and Structures // Proceedings of the International Geotechnical Conference «Reconstruction of Historical Cities and Geotechnical Engineering». St. Petersburg, 2003. V. 1. P. 85–94.
24. Niederleithinger E., Hübner M., Amir J.M. Crosshole sonic logging of secant pile walls — a feasibility study // Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP). Keystone, 2010. P. 1–10.