

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

5/2013

ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

**ПЕРВАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ»**

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ СКВАЖИННОЙ СЕЙСМОАКУСТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАКАРСТОВАННОСТИ И СУФФОЗИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВ НА ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

POSSIBILITIES OF A COMPLEX OF METHODS OF BOREHOLE SEISMO-ACOUSTICS AND ELECTROMETRY FOR ASSESSING KARST DEVELOPMENT DEGREE AND SUFFUSION INSTABILITY OF SOILS IN BUILT UP AREAS

КАПУСТИН В.В.

Технический директор ООО «НИИ Геотех», 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 факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н., г. Москва, bobachev@rambler.ru

KAPUSTIN V.V.

The technical director of the «NII Geotech» LLC, candidate of science (Physics and Mathematics), Moscow, 1391854@mail.ru

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 the Lomonosov Moscow State University, candidate of science (Physics and Mathematics), Moscow, bobachev@rambler.ru

Ключевые слова: карст; суффозия; картаж малоуглубленных скважин; акустическая томография; электромагнитная томография; скважинная электротомография.

Key words: karst; suffusion; shallow well logging; acoustic tomography; electromagnetic tomography; borehole electrotomography.

Аннотация: в статье привлекается внимание специалистов к необходимости широкого применения методов скважинной геофизики при изысканиях на застроенных территориях. Освещаются возможности комплекса методов скважинной сейсмоакустики и электрометрии при оценке закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов на таких участках.

Abstract: the article invites of specialists' attention to the necessity of wide application of borehole geophysical methods for surveys in build-up areas. It elucidates possibilities of a complex of methods of borehole seismo-acoustics and electrometry for assessing karst development degree and suffusion instability of soils in such areas.

Карстовые процессы связаны с растворением карбонатных пород, суффозионные — с механическим выносом мелких фракций подземными водами из песчаных, глинистых, суглинистых грунтов и трещиноватых известняков. Эти процессы часто стимулируются нарушением геодинамического

режима, изменением уровня грунтовых вод в результате откачек и проявляются на поверхности в виде западин, трещин, воронок и т.п. Они приводят к опаснейшим и трудно прогнозируемым явлениям на территориях городов — к образованию глубоких провалов, неравномерному оседанию отдельных

участков поверхности земли и самих сооружений.

В зависимости от причины их развития карстовые и суффозионные процессы относятся к группам природных и природно-техногенных процессов. Оседание грунта над разрыхленной карстовой погребенной полостью про-

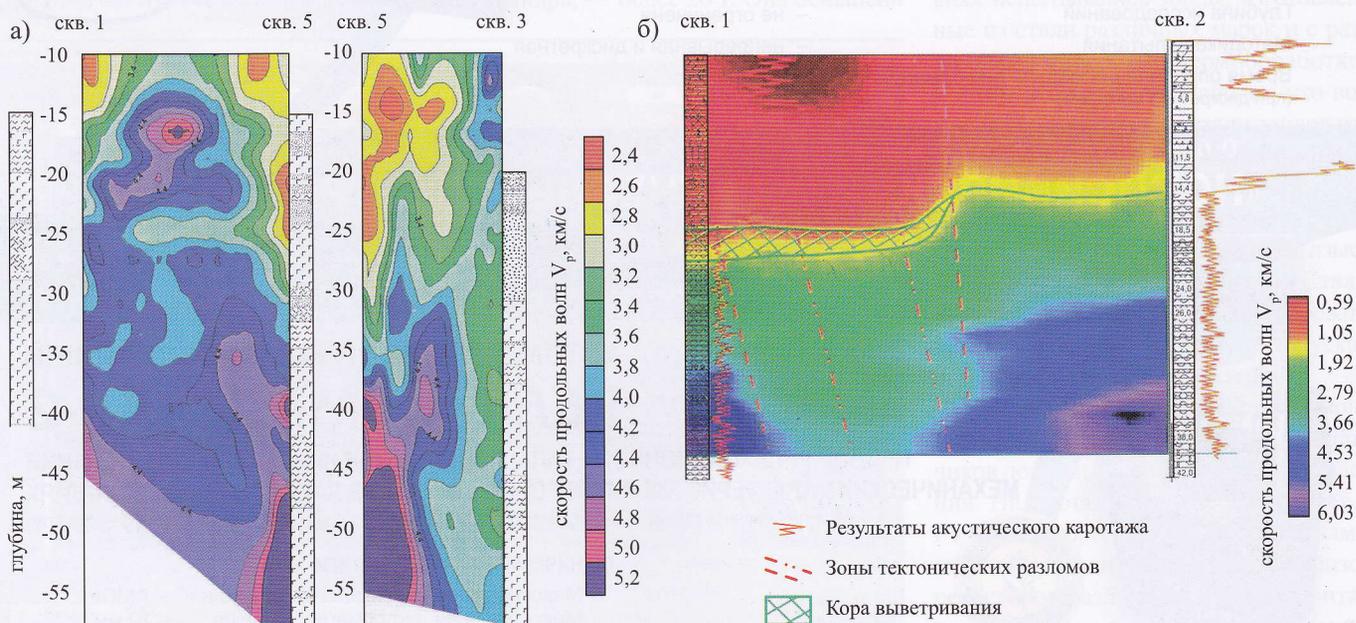


Рис. 1. Примеры решения задачи томографического обращения [3] при произвольном задании стартовой модели (а) и при использовании дополнительной информации (б)

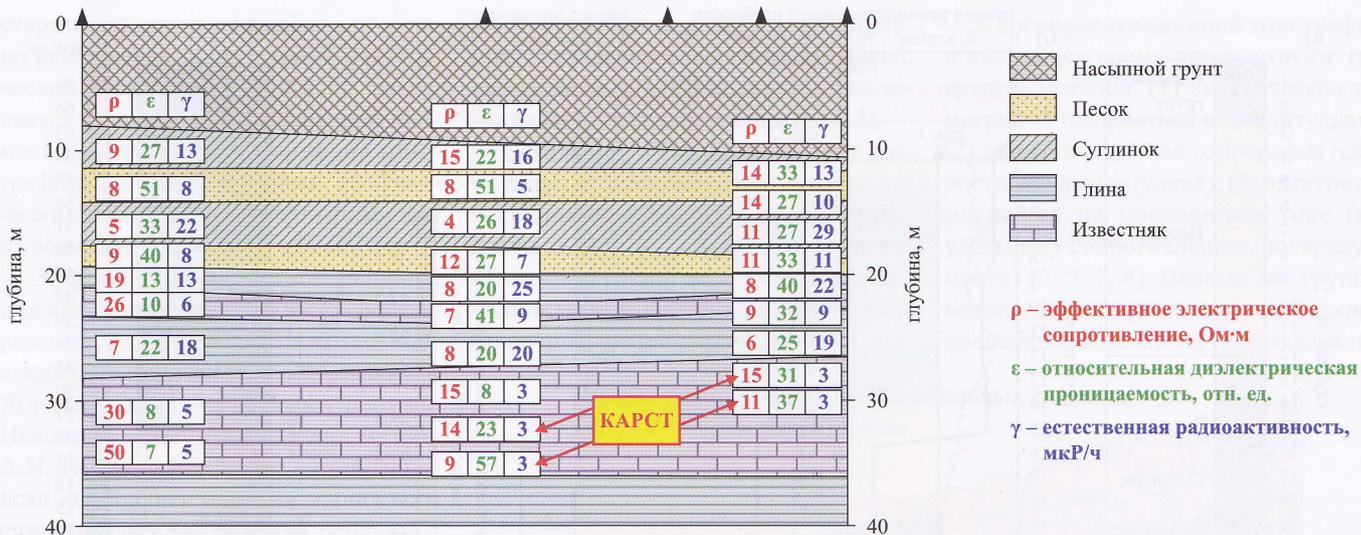


Рис. 2. Литологическое расчленение разреза по комплексу методов каротажа (гамма-каротажа, односкважинного многочастотного радиоволнового профилирования)

исходит как от собственного веса, так и от веса зданий и сооружений. Суффозия развивается и в естественных (в местах выхода на поверхность подземных вод на склонах берегов рек, в оврагах), и в техногенных условиях. Так, суффозионные провалы могут быстро образовываться при крупных авариях водопроводов, при постоянных утечках малого объема из водопроводов и канализационных сетей.

Для изучения закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов применяется комплекс инженерно-геологических, гидрогеологических, геоморфологических, геофизических и других методов. Комплекс геофизических исследований при этом обычно включает сейсморазведку, электротметрию, георадиолокацию, скважинные методы. Эти исследования могут быть

наземными, скважинными и в варианте «скважина — поверхность».

Цели настоящей статьи — привлечь внимание специалистов к необходимости широкого применения методов скважинной геофизики при изысканиях на застроенных территориях и рассмотреть возможности комплекса методов скважинной сейсмоакустики и электротметрии при оценке закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов на таких участках.

Проведение геофизических работ в наземном варианте на застроенных территориях, как правило, сталкивается с серьезными техническими трудностями. К ним относятся: недостаток площади для проведения работ, сильная неоднородность верхней части разреза, недостаточная разрешающая способность наземных методов при глубо-

ком залегании карстующихся пород, высокий уровень помех и др. Наземные методы в условиях плотной застройки применяются в основном в случае неглубокого залегания карстующихся пород либо для изучения процессов суффозии, в том числе техногенной. Поэтому предпочтение в большинстве случаев отдается скважинным исследованиям или варианту «скважина — поверхность». Если исследованию подлежат грунты, находящиеся непосредственно под существующим сооружением, то скважинные методы чаще всего являются единственно возможным вариантом их исследования.

Для изучения неоднородных сред, к которым можно отнести карстующиеся грунты, подверженные суффозии, применяются геофизических исследования, в основе которых лежат методы

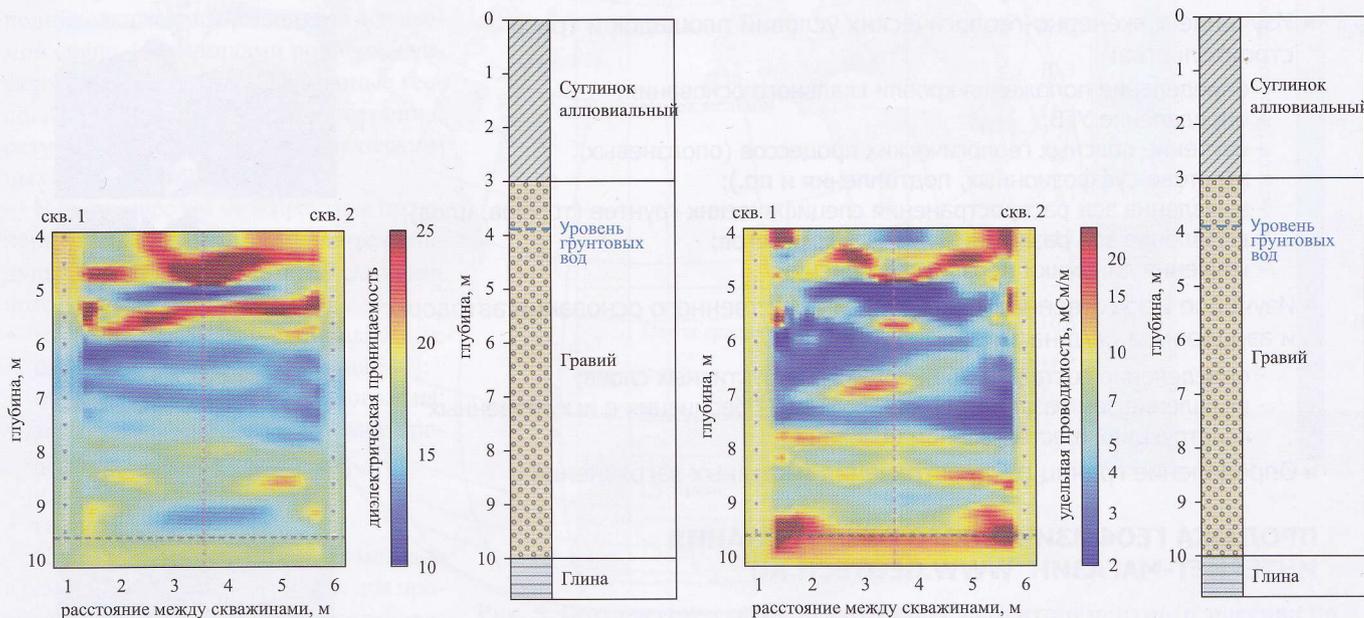


Рис. 3. Результаты скоростной (диэлектрическая проницаемость) и амплитудной (эффективная проводимость) томографии в толще водонасыщенного гравия

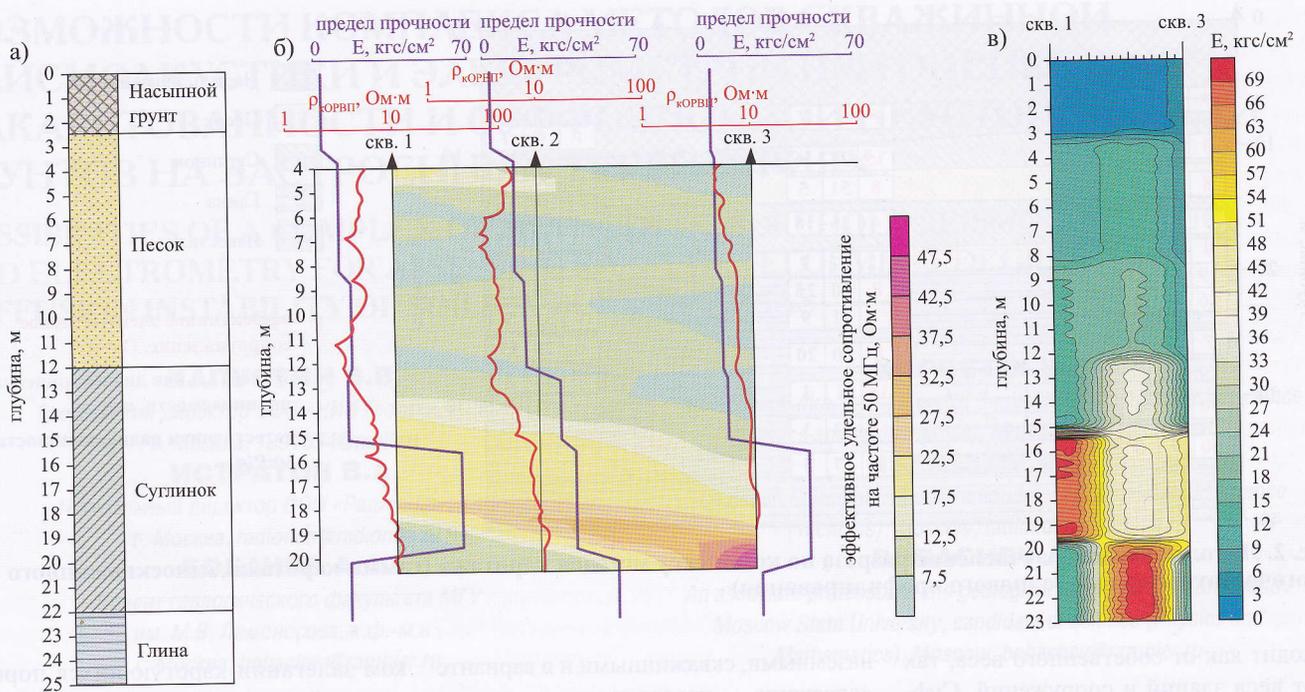


Рис. 4. Литологическая колонка (А) и результаты исследований противофильтрационной завесы, выполненной в данном месте способом струйной цементации, методами электромагнитной (Б) и акустической (В) томографии. H — глубина; $\rho_{корв}$ — кажущееся сопротивление по данным односкважинного радиоволнового профилирования; E — предел прочности на одноосное сжатие; $\rho_{эфвг}$ — эффективное сопротивление по данным радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства

вычислительной (компьютерной) томографии [4]. Математической особенностью задач томографии является их принадлежность к классу некорректно

(по Адамару) поставленных задач [1]. Это означает, что достаточно близкие между собой исходные данные могут привести к довольно сильно различаю-

щимся решениям. В приложении к геофизике некорректность постановки задачи томографии может привести к тому, что при произвольном задании

ГЕОТЕХ

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ

- Изучение инженерно-геологических условий площадок и трасс строительства:
 - определение положения кровли скального основания;
 - определение УГВ;
 - изучение опасных геологических процессов (оползневых, карстово-суффозионных, подтопления и пр.);
 - выявление зон распространения специфических грунтов (торфов, илов);
 - выявление зон развития таликов и криопегов;
 - изучение динамики мерзлотных явлений.
- Изучение искусственных покрытий и естественного основания автодорог и аэродромов, ж/д насыпей:
 - определение состава и мощностей конструктивных слоев;
 - выявление зон разуплотнения, просадок, обводнения в искусственных конструкциях и естественном основании.
- Определение границ распространения нефтяных загрязнений.

**ПРОДАЖА ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН WWW.GEOTECH.RU**

www.geotech.ru, info@geotech.ru, (495) 641-2-641

Москва, 2-я ул. Энтузиастов, д.5, стр.39



стартовой модели может быть получено решение, не допускающее геологической интерпретации (рис. 1). Это является серьезной проблемой при применении методов компьютерной томографии для межскважинных геофизических наблюдений. Рассмотрим один из возможных способов ее решения.

Эффективным средством решения подобных задач является метод регуляризации А.Н. Тихонова, развитый впоследствии Филлипсом, Арсениным, Ягломом, Тананой и многими другими. Исходной предпосылкой для метода А.Н. Тихонова [6] служит алгоритм поиска квази-решения путем априорного сужения класса возможных решений.

В основе метода сейсмической томографии лежат две базовые математические задачи [3, 4] — прямая и обратная. Их корректное решение принципиальным образом влияет на качество получаемых моделей. Решение прямой задачи должно обеспечивать точное и эффективное лучевое трассирование (ray-tracing) в сложнопостроенных моделях среды, описывающих реальные геологические объекты, как в двумерном, так и в трехмерном случае. Решение обратной задачи также должно содержать ограничения на выбор искомого решения в соответствии с классом допустимых геологических моделей. При адекватном выборе стартовой модели некоторые ее параметры могут быть закреплены, то есть не будут изменяться в ходе итерационного подбора, что в значительной мере дополнительно регуляризирует процесс решения задачи. Для того чтобы реализовать этот принцип, то есть сузить класс используемых моделей, требуется дополнительная информация об изучаемой среде. Источниками подобной информации могут быть: априорные геологические данные, данные бурения, результаты каротажей и околоскважинных наблюдений.

В настоящее время в практике инженерных изысканий применяются следующие виды изучения околоскважинного пространства:

- многоволновая скважинная акустика;
- скважинная георадиолокация [10];
- односкважинная электротомография;
- многочастотное радиоволновое профилирование скважины [9];
- индукционный каротаж;
- гамма-каротаж.

Применение комплекса этих методов в скважинах, предназначенных для проведения томографических исследований, позволяет получить дополнительную информацию о строении изучаемого

разреза и определить ограничения, накладываемые на класс моделей, используемых для решения задачи томографического обращения (рис. 2).

Скважинные наблюдения дают возможность оценить прочностные и деформационные свойства пород, содержание глинистого компонента, наличие зон с повышенной пористостью (кавернозностью) и проницаемостью, участков повышенного обводнения и др.

В арсенале скважинной томографии в настоящее время присутствуют три группы методов: (1) акустическая томография (скоростная и амплитудная); (2) электромагнитная томография (скоростная и амплитудная); (3) электротомография на постоянном токе (по удельному сопротивлению, поляризуемости) [2, 5, 7, 8]. Первые две группы методов основаны на волновых полях, последний основан на использовании

Схема расположения наблюдательных скважин в грунтоцементном массиве

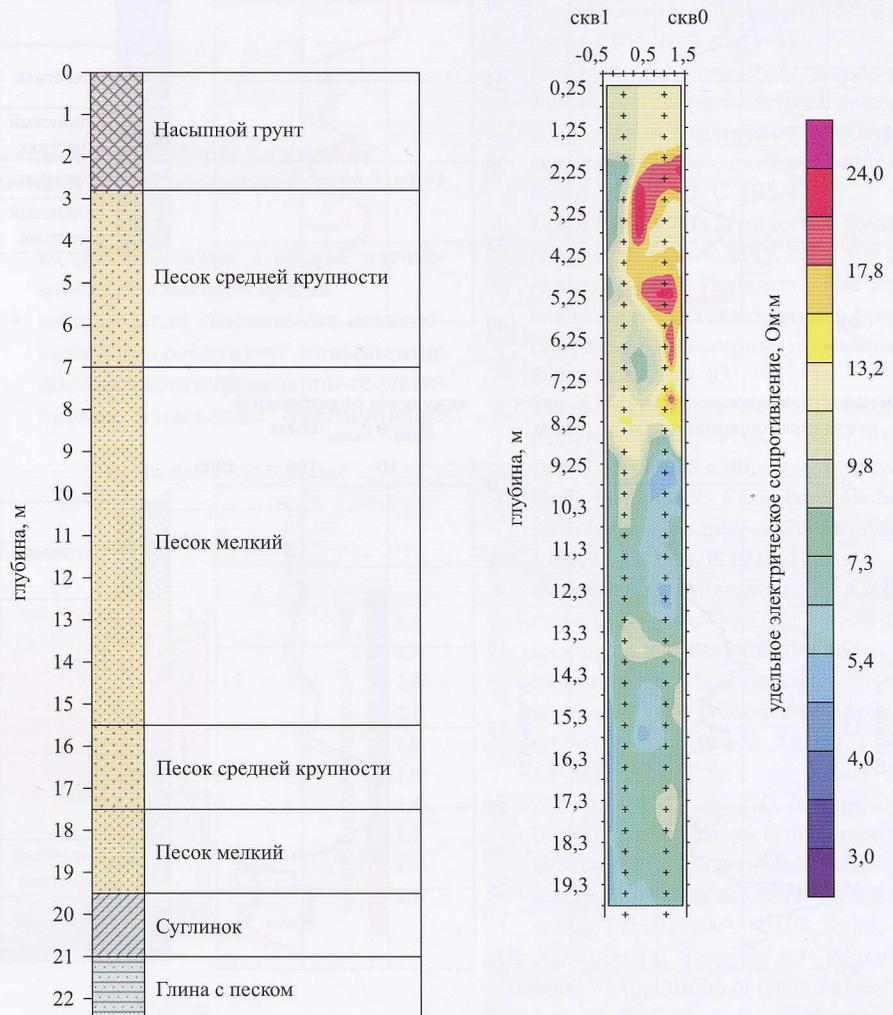
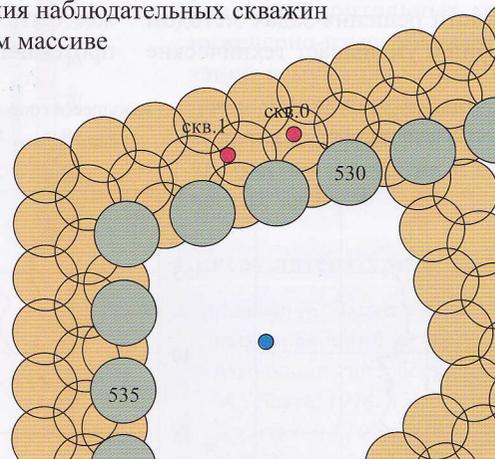


Рис. 5. Геoeлектрический разрез участка грунтоцементного массива по результатам 2D-инверсии данных межскважинной электротомографии: горизонтальная ось — расстояние; скв. — скважина

квазистационарных электромагнитных полей. Подобный комплекс позволяет оценить целый набор свойств среды: скорость распространения упругих волн и их поглощение, диэлектрическую проницаемость, удельное сопротивление на постоянном и переменном токе, поляризуемость. Таким образом, при проведении работ тремя методами могут быть получены шесть видов томограмм. Естественно, что данное обстоятельство значительно расширяет возможности решения задач методом томографии и уменьшает технические

трудности, возникающие при решении задач инверсии (рис. 3). Пример, представленный на рис. 3, показывает, что водонасыщенный гравий, который априорно можно считать однородной средой, на самом деле является неоднородным по параметрам диэлектрической проницаемости и проводимости. Это может быть объяснено различной пористостью, водонасыщенностью или глинистостью грунтовой толщи. Неоднородность данных параметров может быть причиной либо следствием протекающей суффозии.

Пример, представленный на рис. 4, демонстрирует применение акустической, радиоволновой и электротомографии для определения сплошности грунтоцементной противофильтрационной завесы, предотвращающей фильтрацию и суффозионные выносы в котлован. На этом рисунке приведен геоэлектрический разрез, построенный по данным радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства (РВГИ) и разрез предела прочности на одноосное сжатие, полученный по результатам акустической томографии. Рядом со скважинами нанесены диаграммы каротажа.

На рисунке 5 приведены результаты 2D-инверсии данных межскважинной электротомографии.

Применение комплексных скважинных и томографических наблюдений позволяет получить приемлемую геологическую модель при решении задачи инверсии (рис. 6).

Проведенные в скважинах каротажные работы позволяют в значительной степени детализировать данные бурения.

Далее рассмотрим результаты томографического радиоволнового и акустического просвечивания в створе между скважинами.

Вследствие влияния анизотропии и осреднения уровень электрических сопротивлений по результатам РВГИ всегда выше, чем по данным каротажа. На геоэлектрическом разрезе, представленном на рис. 7, видно, что основные горизонты (пески, глины, известняки) коррелируют между скважинами. Глинисто-мергелистый интервал на глубине 28,3-29,7 м является локальной неоднородностью, не протягивающейся в межскважинное пространство. Напротив, глинисто-мергелистые породы в интервале 32,2-35,6 м протягиваются на значительное расстояние от скважины 15 к скважине 11.

По данным акустических каротажных и акустической томографии были построены геоэлектрический и скоростной разрезы по профилю между скважинами 15 и 11 (рис. 8). Полученный скоростной разрез показывает существенную неоднородность слоя известняков и согласуется с разрезом электрических сопротивлений по результатам РВГИ. В интервале от 32,0 до 38,0 м вблизи скважины 15 отмечается наличие локальной области, заполненной рыхлым глинистым материалом.

На основании вышеизложенного могут быть сделаны следующие выводы:

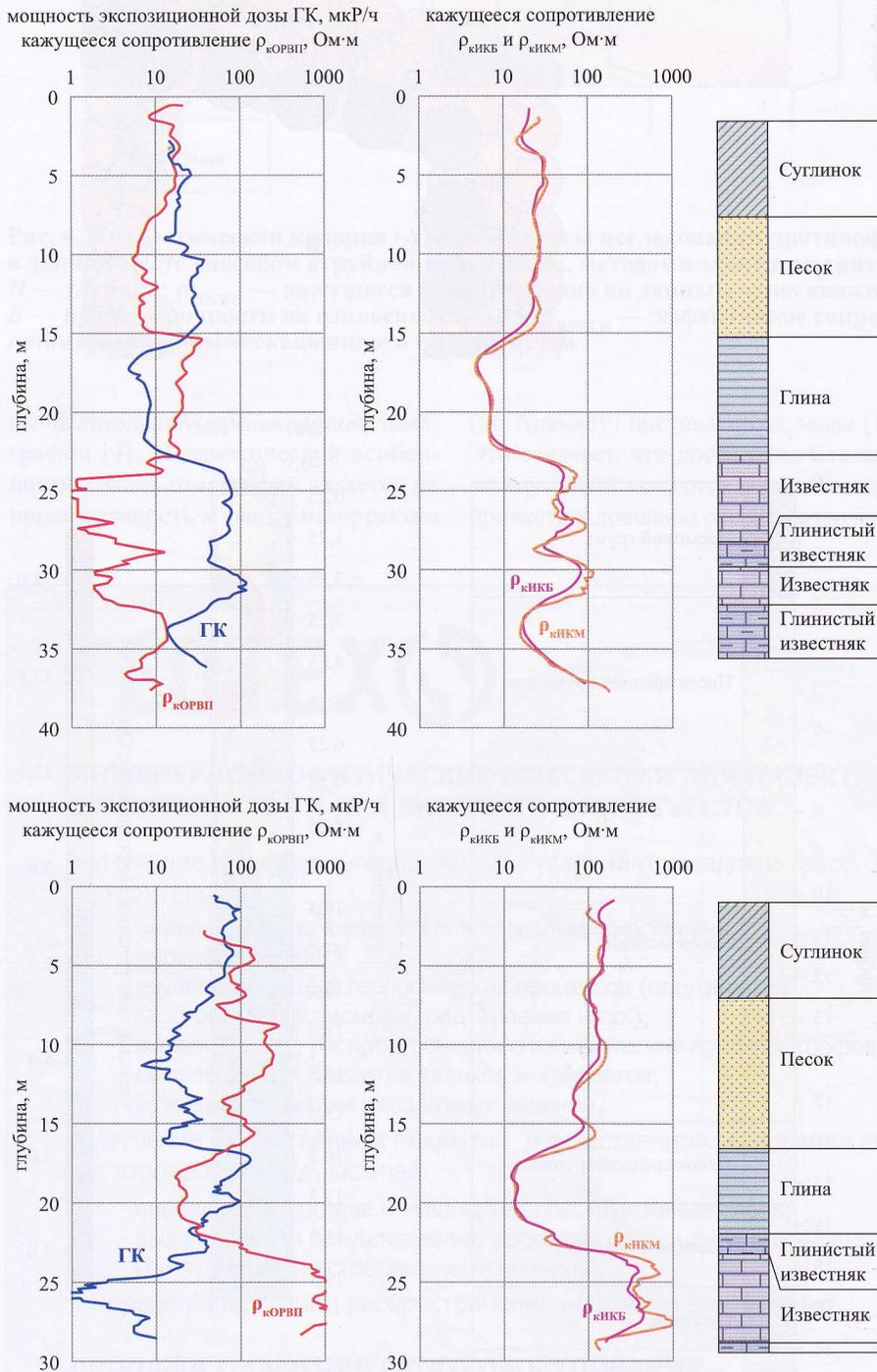


Рис. 6. Результаты односкважинного радиоволнового профилирования (кажущееся сопротивление $\rho_{корвп}$), гамма-каротажа (мощность экспозиционной дозы ГК) и индукционного каротажа с двумя зондами (кажущееся сопротивление $\rho_{кикб}$ и $\rho_{кикм}$) в скважинах 15 и 11

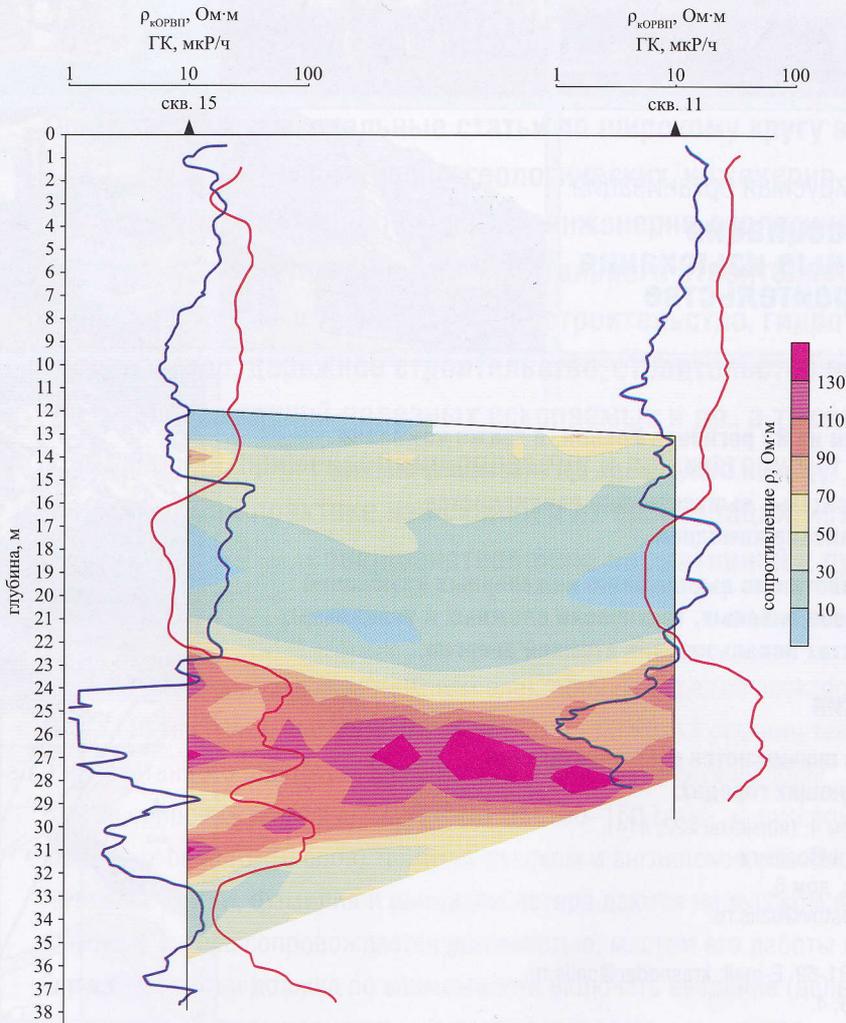


Рис. 7. 2D геоэлектрический разрез между скважинами 15 и 11 по данным РВГИ: ρ — сопротивление, Ом·м; ГК — мощность экспозиционной дозы, мкР/ч

- комплекс скважинных методов сейсмоакустики и электрометрии позволяет получить необходимый и достаточный набор физических параметров, характеризующих свойства грунтов в естественном залегании и их распределение в объеме изучаемой геологической среды.
- комплексные скважинные исследования способствуют повышению достоверности инженерно-геологических изысканий, увеличивают

разрешение получаемых результатов по глубине по сравнению с наземными методами и могут эффективно использоваться для оценки закарстованности и суффозионной неустойчивости грунтов на застроенных территориях.

- для совершенствования и широкого внедрения комплекса методов скважинной геофизики для решения указанных проблем необходимо участие и поддержка заинтересованных строительных компаний, инженерно-изыскательских организаций и муниципальных структур для выполнения опытно-методических работ и решения ряда методических, аппаратурных и технологических задач.

Список литературы

1. Адамар Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа. М.: Наука, 1978. 351 с.
2. Бобачев А.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Электротомография — высоко-разрешающая электроразведка на постоянном токе // Инженерная геология. 2007. № 8. С. 31–35.
3. Болгаров А.Г., Рослов Ю.В. Межскважинная сейсмическая томография для решения инженерно-геологических задач // Технологии сейсморазведки. 2009. № 1. С. 105–111.
4. Ефимова Е.А. Сейсмическая томография. М.: Изд-во МГУ, 2005. 129 с.
5. Истратов В.А. Радиоволновые исследования межскважинного пространства // Инженерные изыскания. 2008. № 4. С. 78–83.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 285 с.
7. Daily W., Owen E. Cross-borehole resistivity tomography // Geophysics. 1991. V. 56. № 8. P. 1228–1235.
8. Deceuster J., Delgranche I 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.
9. Istratov V.A., Frolov A.D. Radio wave borehole measurements to determine in situ the electric property distribution in a massif // Journal of Geophysical Research. Planets. 2003. V. 108. № E4.
10. Kapustin V.V., Semeikin N.P., Monakhov V.V. Application of borehole penetrating radar for surveying underground engineering structures // First break. 2009. V. 27. P. 87–90.

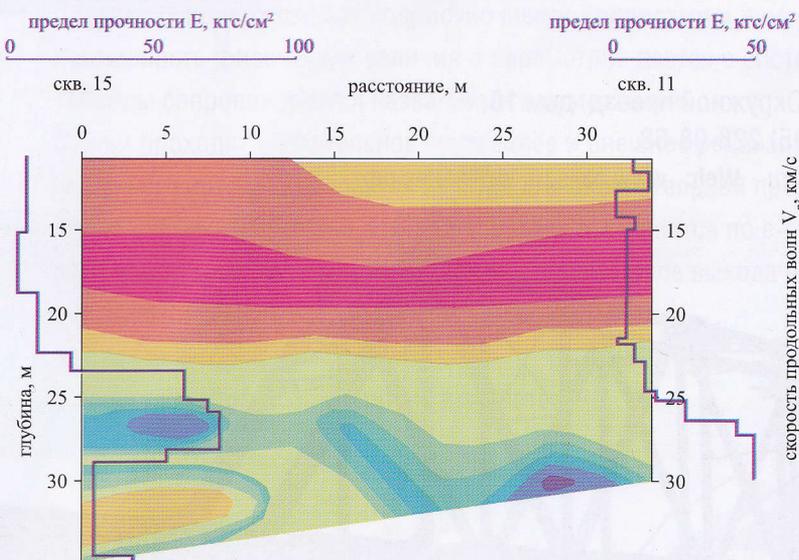


Рис. 8. Скоростной разрез, построенный по результатам акустической томографии, и графики предела прочности на одноосное сжатие, полученные по данным многоволновых скважинных акустических наблюдений