

---

**Труды  
Международной конференции**

**ГЕОТЕХНИКА.  
ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ  
И СООРУЖЕНИЙ**

---

**Санкт-Петербург, 2001**

застройки строительные организации не уделяют должного внимания проведению геотехнического мониторинга, в лучшем случае ограничиваясь геодезическими наблюдениями.

2. Геотехнический мониторинг не должен оставаться средством констатации свершившегося факта влияния строительства на окружающую застройку. Мониторинг предназначен для профилактики негативных техногенных воздействий на ранних стадиях их проявления, еще не выразившихся в осадках соседних зданий и сооружений.
3. Для успешного развития инструментального мониторинга качества возведенных конструкций необходима разработка отечественной и приобретение зарубежной контрольно-измерительной аппаратуры, рекомендованной ведущими научными геотехническими центрами.
4. Требуется внести коррективы в действующую в строительстве нормативную литературу, нацеленные на ужесточение требований по объему и составу геотехнического мониторинга.

Практика сложной реконструкции в Петербурге свидетельствует о том, что объемное геотехническое сопровождение (мониторинг), как правило, заказывают и осуществляют ведущие зарубежные фирмы. Эти требования выставляют им страховые компании, и качество такого сопровождения влияет на величину выплат по страховке. После реализации нескольких неудачных проектов по возведению зданий в плотной городской застройке и потерь за счет расселения деформированных соседних зданий дальновидные инвесторы стали финансировать работы по мониторингу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Ulitsky V., Shashkin A.* Geotechnical survey in soft soils for reconstruction purposes/Proceed. of the Fourteenth Intern. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng. Hamburg 1997.

*А.Д. Фролов, В.А. Истратов, М.Г. Лысов,  
С.И. Остатчук, С.О. Перекалин*  
ООО "Радионда LTD"

### РАДИОВОЛНОВАЯ ГЕОИНТРОСКОПИЯ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И МОНИТОРИНГА ГРУНТОВ ПОД СООРУЖЕНИЯМИ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Решение ряда инженерно-геологических задач, например, выявление неоднородностей геологического разреза, пльвунов, карстовых полостей и др., оценка состояния грунтов в основании сооружения или на глубоких горизонтах, где разрешающей способности наземных методов недостаточно, возможно с применением волновых геофизических методов исследования межскважинного пространства.

Весьма перспективным для геомониторинга подземной среды является метод радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства (РВГИ). Используя достаточно широкий диапазон радиочастот и малогабаритные скважинные установки с благоприятной поляризацией гармонического поля, можно настраивать измерительно-обрабатывающую систему на решение конкретной задачи в различных геоэлектрических и технологических условиях [1,2]. Это позволяет при минимальном количестве скважин проводить детальное изучение строения и оценку состояния горных пород непосредственно под объектами, выявлять и оконтуривать слабоконтрастные геологические неоднородности небольших размеров, а также изучать динамику инженерно-геологических процессов во времени.

#### Краткая характеристика технологии РВГИ

Метод РВГИ основан на зависимости интенсивности поглощения энергии радиоволн породами, расположенными на трассе распространения волны, от их эффективных электрических характеристик: удельного сопротивления  $\rho$ , и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Физико-геологический анализ данных, получаемых путем многократного просвечивания исследуемых горных пород радиоволновым полем дипольного источника, позволяет определять электрические свойства грунтов в естественном залегании и их распределение в изучаемом объеме среды. Метод позволяет работать в породах с



удельным электрическим сопротивлением от 20 Ом и выше в достаточно низкоомных средах при диапазоне радиочастот 1 - 30 МГц, обеспечивающем наибольшую разрешающую способность при локализации неоднородностей. При расстоянии между скважинами от 5 м до 80 м минимальный размер выявляемой неоднородности составляет соответственно от 1 до 15 м. Контрастность электрических свойств неоднородности относительно вмещающей среды, достаточная для ее уверенного обнаружения и локализации, составляет 1:2.

Схема измерений «веерным способом» (рис.1) обеспечивает наиболее полное и равномерное изучение межскважинного пространства и позволяет исследовать неоднородности геологической среды под разными углами. При обработке полученных таким образом данных используются специально разработанные алгоритмы и способы анализа радиоволновой картины, которые учитывают как дифракционные эффекты и пространственные характеристики радиоволнового поля, так и электрическую анизотропию вмещающей среды. Результатом РВГИ является объемная карта  $\rho$ , или  $\epsilon$ , пород, позволяющая выделять и оконтуривать геологические неоднородности исследуемой среды.

Технология РВГИ включает следующие основные элементы:

- расположение изыскательских скважин по оптимальной с инженерно-геологических и геофизических позиций сети;
- геологическое описание скважин, отбор и исследование керна;
- обсадка ствола полиэтиленовыми трубами;
- гамма-каротаж и односкважинное радиопрофилирование;
- межскважинные радиоволновые исследования во всех сечениях, по сети скважин;
- построение объемной геоэлектрической карты и ее комплексная инженерно-геологическая интерпретация.

#### Скважинная радиоволновая аппаратура

Скважинная цифровая радиоволновая аппаратура серии "РВГИ-2" разработана ООО «Радионда LTD» и предназначена для излучения и детального измерения напряженности высокочастотного гармонического электромагнитного поля. Аппаратура включает скважинный приемник и передатчик с электрическими (или магнитными) дипольными антеннами, которые опускаются в соседние скважины на одножильном каротажном кабеле. Чтобы исключить антенный эффект кабеля, скважинные приборы имеют автономные

источники питания и присоединяются к кабелю через диэлектрические вставки с оптическим каналом и блоками оптико-электрического преобразования. Приемник, как и передатчик, имеют процессор и АЦП, что позволяет вести двусторонний обмен информацией с поверхностью: передавать на поверхность данные измерений в цифровом виде и получать команды управления. Такая идеология построения аппаратуры позволяет, кроме измерения электрического (или магнитного) поля в точке приема и тока в передающей антенне, осуществлять дистанционное согласование скважинной антенны с передатчиком и управлять мощностью и режимами излучения. Запись данных и формирование команд скважинным устройствам производится с помощью бортового компьютера. Важно отметить, что цифровая фильтрация измеряемого гармонического сигнала обеспечивает точность и надежность измерений в условиях высокого уровня электромагнитных помех. Функциональная схема аппаратуры изображена на рис. 1. Для инженерно-геологических изысканий разработан специальный вариант аппаратуры с короткими ( $\approx 2-3$  м) дипольными антеннами.

Ниже приводятся ее основные технические характеристики:

рабочие частоты:	0,061; 0,156; 0,625; 1,25; 2,25; 4,5; 31,0 МГц
чувствительность приемника не хуже:	0,5 мкВ
динамический диапазон:	110 дБ
мощность передатчика:	1-10 Вт
скорость записи:	600 м/час
диаметр скважинных приборов:	38 мм

#### Методика измерений и обработки

Измерения напряженности поля выполняются обычно веерным способом, при котором с каждой стоянки передатчика в одной скважине проводятся измерения поля по всему рабочему интервалу в другой скважине (см. рис.1). Шаг измерений при точечной записи  $\square 1,0$  м, а при непрерывной записи  $\square 0,1$  м. Так как вблизи границы "земля-воздух" возникает боковая волна, которая распространяется вдоль земной поверхности и практически не несет информации об электрических свойствах межскважинного пространства, то возникает ограничение на минимально допустимую глубину исследований. В зависимости от расстояния между скважинами, электрического сопротивления пород и рабочей частоты она составляет от 3 м до 8 м.

По данным измерений напряженности поля ( $E_i$ ) при различных положениях приемного и излучающего диполей (т.е. при различных углах  $\alpha$  направления радиопросвечивания) вычисляются значения



кажущихся коэффициентов поглощения:

$$k''_{k(\alpha)} = 1/R \{ \ln(E_0 \cdot F(Q)/E_i \cdot R) \}$$

где  $E_0$  – коэффициент измерительной установки,  $R$  – расстояние между пунктами излучения и приема,  $F(Q)$  – функция, учитывающая взаимное расположение излучающего и приемного диполей в пространстве,  $\kappa'$  (Нп/м) – коэффициент поглощения радиоволн [3], зависящий от частоты электромагнитного поля и электрических свойств среды:

$$k'' = \omega \left\{ \frac{\mu \epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{1}{\rho \omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}},$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – рабочая частота электромагнитного поля,  $k = k' + ik''$  – комплексное волновое число.

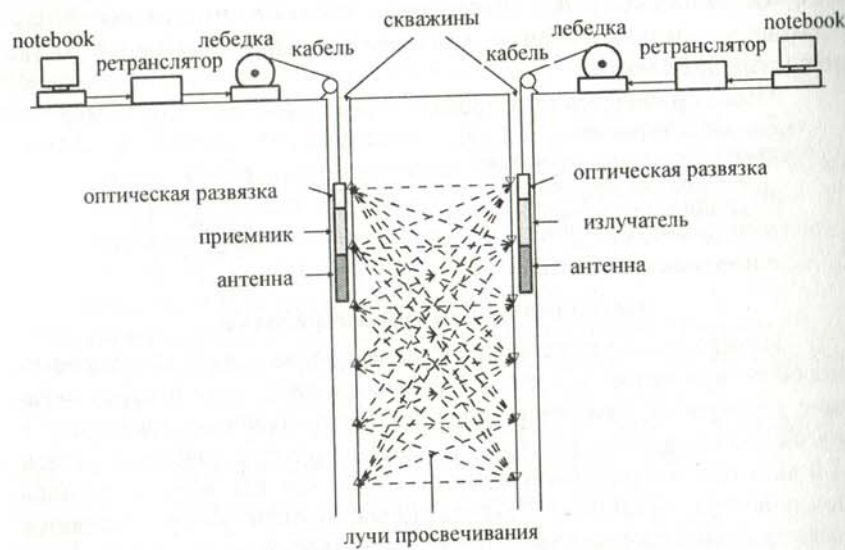


Рис.1 Схема измерительной установки и система наблюдений методом РВГИ.

По диаграммам угловой зависимости коэффициентов поглощения определяется коэффициент анизотропии среды и вносится соответствующая поправка в значения параметров интерпретации, которыми могут быть  $k''_k$  либо  $\rho_z$  или  $\epsilon_z$ . При межскважинных исследо-

ваниях в низкоомных осадочных породах, когда выполняются условия для квазипроводящей среды, по измерениям на одной оптимальной рабочей частоте можно рассчитать значения  $\rho_z$ . Если расстояние между скважинами и электрическое сопротивление пород позволяют провести измерения на достаточно высокой частоте, обеспечивающей условия преобладания токов смещения, то параметром интерпретации будет и эффективная диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon_z$ . Для расчета этих параметров необходимо количественное определение коэффициента измерительной установки, который зависит от величины тока в излучающей антенне и эффективных высот излучающей и приемной антенн. Управление излучателем, измерение и запись выходного тока позволяет контролировать устойчивость этого коэффициента и, при необходимости, вносить соответствующую поправку при обработке результатов.

Обработка данных проводится с помощью разработанного в «Радионда LTD» специального пакета программ «ПО ОРВП-РВГИ», который содержит алгоритмы прямых расчетов электрических характеристик среды по полным формулам измеряемых компонент электромагнитного поля. Система компьютерной обработки данных предусматривает жесткий "входной" контроль измеренных значений, выявление и устранение ошибок записи, а также оценку устойчивости основных технических параметров аппаратуры. По совокупности всех данных и с учетом пространственных характеристик поля методом волнового восстановления строится компьютерная объемная геоэлектрическая карта участка, которая может быть представлена набором горизонтальных сечений и произвольно ориентированных вертикальных разрезов с изолиниями  $\rho_z$  и  $\epsilon_z$ . Как показали результаты экспериментальных работ, на этих сечениях отчетливо проявляются морфологические особенности строения разреза, тектонические нарушения, оконтуриваются участки трещиноватых и водонасыщенных пород.

### Примеры применения РВГИ

Метод РВГИ был применен на участке одной из линий Московского метро, где в период пробной эксплуатации наблюдались значительные просадки путевых тоннелей. Геологический разрез в этом районе представлен флювиогляциальными разнородными песками и суглинками, которые подстилаются юрскими глинами на глубине 26 м от поверхности. Особенностью участка является наличие на глубине 16,5-18 м слоя суглинка, мощность которого изменя-



юрских глин составляет 20-30 Ом.м. В этом же интервале (10-40 Ом) изменяется сопротивление водонасыщенных песков и галечников. Электросопротивление грунтов существенно снижается с увеличением их водонасыщенности и глинистости. Поэтому, в исследуемом разрезе трудно выделить контрастный и, главное, устойчивый по электросопротивлению маркирующий горизонт. В этой роли может быть использована только кровля известняков ратмировской толщи. Межскважинные радиоволновые измерения были выполнены «веерным способом» [1] в интервале глубин 5-27 м с шагом перемещения приборов по стволам каждой из скважин 0.5-1м. Для построения геоэлектрической карты участка в качестве основной была выбрана частота 2.25 МГц. Измерения проведены симметрическими электрическими антеннами с длиной плеча 2 м (приемные) и 3 м (излучающие). Всего было обследовано 11 пар скважин. Обработка данных была проведена с помощью алгоритма волнового восстановления. В результате обработки составлена объемная карта геоэлектрического строения исследованного блока грунтов. Карта представляет собой совокупность горизонтальных и вертикальных сечений с изолиниями значений электрических сопротивлений. Фрагменты этой карты в виде горизонтального сечения по кровле ратмировских известняков на отметке 109 м и вертикального разреза по линии скв.7-8 приведены соответственно на рис.3а,б. На рис.3а ясно видна закономерность изменения электрических свойств по латерали. Общей тенденцией является приуроченность области наиболее низких сопротивлений к контуру устоя моста. Наилучшим образом горизонт ратмировских известняков выделяется на вертикальных разрезах. На разрезе (рис.3б) он отмечается субгоризонтальными изолиниями электросопротивлений со значениями выше 50 Ом. Изолинии на разрезе отмечают локальные неоднородности, в особенности в интервале между скв. 2-5. Основным фактором, понижающим сопротивление всех грунтов от песчано-галечных до известняков и глин, является повышение водонасыщенности грунтов. Зоны повышенной водонасыщенности выделяются в пределах песчано-галечниковых отложений, слабо прослеживаются в глинах, а на горизонте известняков Сзгт проявляются субвертикальным участком изолиний пониженного сопротивления и как бы соединяют горизонт глин Сзпв с горизонтом красных глин, залегающим под известняками. Закономерное понижение электросопротивления по всему разрезу свидетельствует о вероятной проницаемости глинистой толщи для грунтовых вод на этом участке, что позволяет предположить здесь зону, благоприятную для

развития карстово-суффозионного процесса. Форма изолиний электросопротивления на планах, построенных на отметках 106 и 109 м

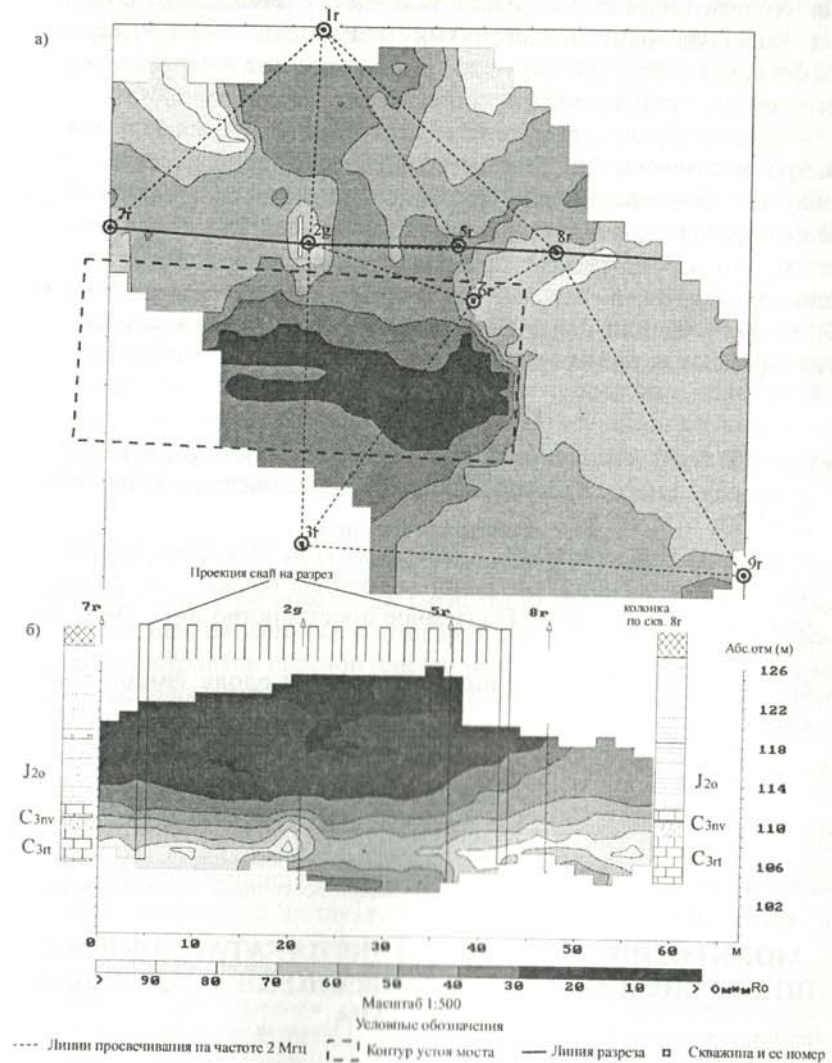


Рис.3 Фрагменты 3D-геоэлектрической карты эффективных сопротивлений. РВГИ на частоте 2,25 кГц. Участок берегового устоя моста выезда на Рижское шоссе. а - горизонтальное сечение по горизонту известняков Сзгт на отметке 109м. б - вертикальный разрез по линии



ется от 0,3 до 1,0 м. При инженерно-геологических изысканиях по трассе тоннелей, проведенных на глубину 12-14 м, этот слой под трассой не был изучен. На гидрогеологические условия участка оказывает также влияние расположенный в 100 м от правого тоннеля искусственный пруд, поверхность которого на несколько метров превышает уровень заложения тоннелей. На период строительства уровень грунтовых вод был понижен на 2-3 метра ниже лотковой части тоннелей, а после отключения системы откачки уровень восстановился.

Для определения причины просадок было пробурено 5 скважин глубиной 28 м с обсадкой пластиковыми трубами. Межскважинные радиоволновые исследования на частоте 4,5 МГц были выполнены в восьми сечениях веерным способом [1] с шагом перемещения приборов 1 м. На рис.2 представлены фрагменты построенной по результатам РВГИ трехмерной геоэлектрической карты в виде горизонтального плана на глубине 14 м и вертикального разреза по линии скв. 1-2-3, которые позволили прояснить ситуацию. Во первых,

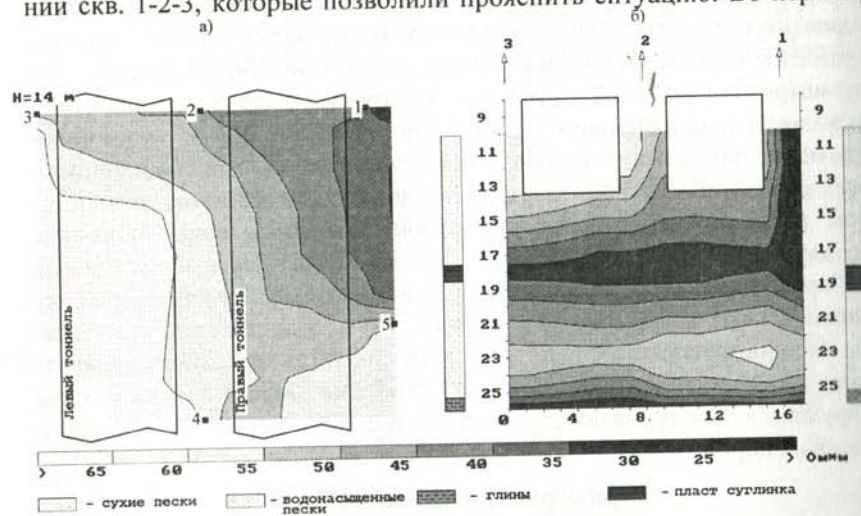


Рис.2 Фрагменты 3D-геоэлектрической карты эффективных сопротивлений. РВГИ на частоте 4,5 МГц. Участок метрополитена. а – горизонтальное сечение на глубине 14 м. б - вертикальный разрез по линии скважин № 3-2-1

следует отметить, что по данным РВГИ на глубине 17-19 м (рис.2б) аномалией низких сопротивлений (□30-25 Ом·м) четко выделяется слой суглинка с переменной мощностью, являющийся водоупорным горизонтом, под которым оказались напорные грунтовые воды. Во

вторых, понижение электрического сопротивления грунтов (переход на рисунке к темным тонам) связано с повышенной водонасыщенностью песков, причем изолинии сопротивления четко оконтуривают в правой части (рис.2а,б) так называемую "гидрогеологическую воронку", локализирующую в пространстве под тоннелями фильтрационное окно в суглинке. Разгрузка напорных вод в этом месте и связанная с ней суффозия песчаных грунтов под основанием тоннелей (в особенности под правым) и явилась основной причиной их просадок. Наибольшие просадки до 180 мм имели место как раз для правого тоннеля. Из этого примера также следует то, что система межскважинных радиоволновых исследований вполне позволяет проводить режимные наблюдения и контролировать изменение гидрогеологической обстановки.

В качестве второго примера объемного радиоволнового геоэлектрического картирования приведем некоторые результаты работ методом РВГИ по обследованию участка берегового устоя крупного моста через р. Москва при выезде на автодорогу Москва-Рига. Исследования были предприняты с целью выяснения причин установленного смещения мостовых опор в сторону реки. В частности, одна из основных задач состояла в выявлении участков карстовых проявлений и картировании кровли известняков ратмировской свиты  $C_{3rt}$ , залегающих в основании разреза. Выше по разрезу располагаются низкоомные глины каменноугольного и юрского возраста. Мощность этого слоя изменяется от 7 до 12 м. Слой перекрыт аллювиальными отложениями четвертичного возраста мощностью 5-8 м, представленными переслаиванием песчаного и гравийного грунтов. Уровень грунтовых вод находится на глубине 6 м. Геологические колонки по скважинам 7 и 8 приведены на рис.3б. Участок крайне неудобен для обследования наземными геофизическими методами, так как большая его часть скрыта под устоем моста, а остальная представляет собой насыпь с углами склонов около  $20^\circ$ .

Для дополнительного обследования участка было пробурено 9 скважин, план расположения которых с контуром устоя моста и результатами интерпретации межскважинных наблюдений приведен на рис.3. Определение электрических характеристик грунтов в естественном залегании проведено по данным односкважинных многочастотных радиоволновых измерений. Наиболее высокими значениями (□80 Ом·м) отличаются известняки ратмировской толщи. Наименьшим электросопротивлением (□15 Ом·м) обладают пестроцветные глины неверовской толщи. Среднее значение сопротивления плотных



юрских глин составляет 20-30 Ом.м. В этом же интервале (10-40 Ом) изменяется сопротивление водонасыщенных песков и галечников. Электросопротивление грунтов существенно снижается с увеличением их водонасыщенности и глинистости. Поэтому, в исследуемом разрезе трудно выделить контрастный и, главное, устойчивый по электросопротивлению маркирующий горизонт. В этой роли может быть использована только кровля известняков ратмировской толщи. Межскважинные радиоволновые измерения были выполнены «веерным способом» [1] в интервале глубин 5-27 м с шагом перемещения приборов по стволам каждой из скважин 0.5-1м. Для построения геоэлектрической карты участка в качестве основной была выбрана частота 2.25 МГц. Измерения проведены симметрическими электрическими антеннами с длиной плеча 2 м (приемные) и 3 м (излучающие). Всего было обследовано 11 пар скважин. Обработка данных была проведена с помощью алгоритма волнового восстановления. В результате обработки составлена объемная карта геоэлектрического строения исследованного блока грунтов. Карта представляет собой совокупность горизонтальных и вертикальных сечений с изолиниями значений электрических сопротивлений. Фрагменты этой карты в виде горизонтального сечения по кровле ратмировских известняков на отметке 109 м и вертикального разреза по линии скв.7-8 приведены соответственно на рис.3а,б. На рис.3а ясно видна закономерность изменения электрических свойств по латерали. Общей тенденцией является приуроченность области наиболее низких сопротивлений к контуру устоя моста. Наилучшим образом горизонт ратмировских известняков выделяется на вертикальных разрезах. На разрезе (рис.3б) он отмечается субгоризонтальными изолиниями электросопротивлений со значениями выше 50 Ом. Изолинии на разрезе отмечают локальные неоднородности, в особенности в интервале между скв. 2-5. Основным фактором, понижающим сопротивление всех грунтов от песчано-галечных до известняков и глин, является повышение водонасыщенности грунтов. Зоны повышенной водонасыщенности выделяются в пределах песчано-галечниковых отложений, слабо прослеживаются в глинах, а на горизонте известняков Сзгт проявляются субвертикальным участком изолиний пониженного сопротивления и как бы соединяют горизонт глин Сзпв с горизонтом красных глин, залегающим под известняками. Закономерное понижение электросопротивления по всему разрезу свидетельствует о вероятной проницаемости глинистой толщи для грунтовых вод на этом участке, что позволяет предположить здесь зону, благоприятную для

развития карстово-суффозионного процесса. Форма изолиний электросопротивления на планах, построенных на отметках 106 и 109 м

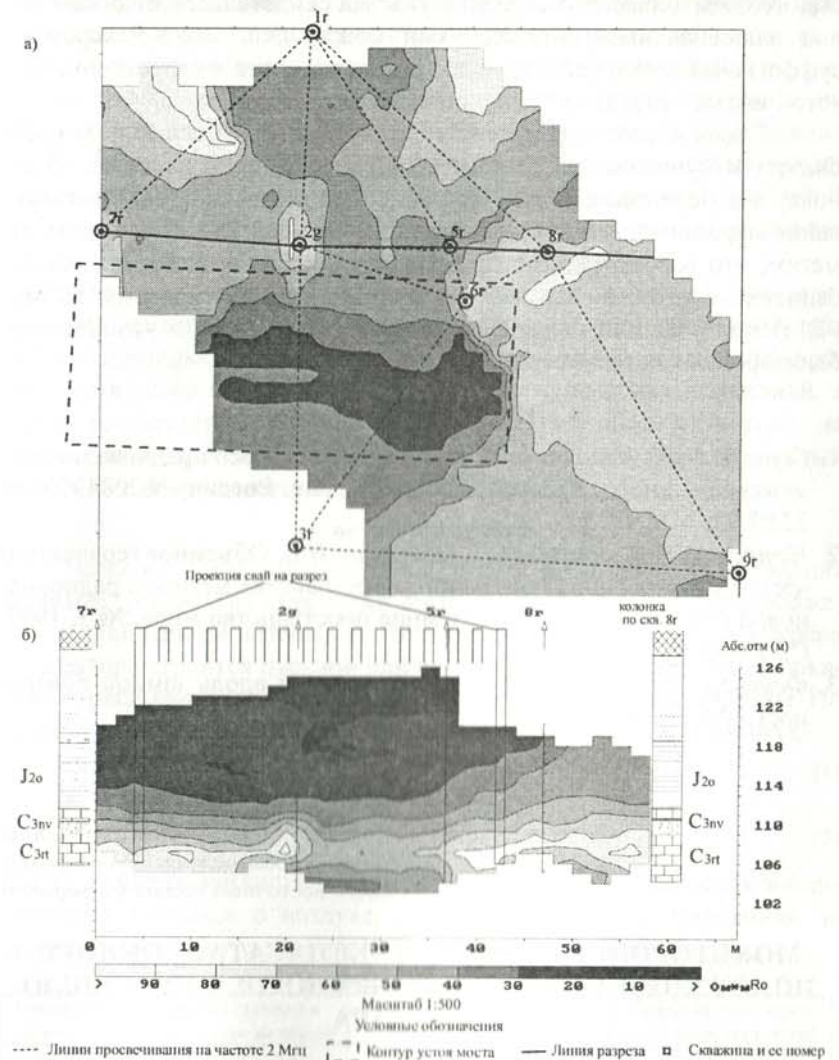


Рис.3 Фрагменты 3D-геоэлектрической карты эффективных сопротивлений. РВГИ на частоте 2,25 кГц. Участок берегового устоя моста въезда на Рижское шоссе. а - горизонтальное сечение по горизонту известняков Сзгт на отметке 109м. б - вертикальный разрез по линии



толщи ратмировских известняков, также не исключает наличия диагональных к оси устоя зон трещиноватости. Выявления особенностей геоэлектрического строения участка свидетельствует о наличии под аллювиальными отложениями между скв. №2-1-5 карстово-суффозионных явлений в грунтах, развивающихся в направлении под устоем моста, что и является причиной его смещения.

Таким образом, полученные методом РВГИ данные позволили быстро и существенно уточнить инженерно-геологическую обстановку под береговым устоем моста, что весьма важно для проектирования мероприятий по укреплению его основания. В заключение отметим, что рассмотренные примеры (и имеющиеся другие данные) свидетельствуют о высокой эффективности применения метода РВГИ при решении инженерно-геологических задач в условиях урбанизированных территорий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Б.Ф., Истратов В.А., Лысов М.Г. Способ радиоволнового межскважинного просвечивания. Патент России №2084930 от 22.07.93.
2. Истратов В.А., Лысов М.Г., Чибрикин И.В. Объемное геоэлектрическое картирование подземного пространства методом радиоволновой геонитроскопии. / Подземное пространство мира. № 3, 1997. С.37 – 42.
3. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1961.

Чжао Маоцай

Харбинский промышленный университет  
и Северо-восточный лесной университет

### МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПОЛОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРА

#### Введение

При сооружении и эксплуатации автомобильных дорог применяются разные способы мониторинга качества их строительства и эксплуатационного состояния. Одним из основных мероприятий для

контроля качества строительства и эксплуатационного состояния автомобильных дорог является мониторинг плотности и толщины земляного полотна. Вместе с тем, одним из серьезных недостатков традиционных методов является сложность контроля. До последнего времени контроль осуществлялся с помощью бурения скважин (согласно государственным нормам) и проходки шурфов на всю мощность уплотненного полотна с отбором монолитов для определения необходимых характеристик грунтов. Этот процесс весьма трудоемок и требует значительных затрат времени и физических усилий. В то же время такие тесты приводят в определенной степени к повреждению земляного полотна.

Поэтому, начиная с 1995 г. проводятся исследования для определения качества и эксплуатационного состояния автомобильных дорог с помощью георадара (тип SIR-10H). Одним из основных преимуществ этого метода является простота проведения испытаний, а так же то обстоятельство, что в отличие от традиционных методов на экране монитора георадара точно фиксируется почти непрерывный разрез и не повреждается земляное полотно.

#### Состав георадара

Георадар - это комплексная система, в состав которой входят монитор, устройство обработки сигналов и данных, электроснабжение, и специальная антенна. В итоге измерений георадаром на экране индикатора строится цветной или черно-белый разрез, который показывает расположение объектов по глубине по маршруту антенны. По разрезу и формулам (1) и (2) определяются тип и размеры объекта.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

$$d = v \times t / 2 \quad (2)$$

где  $v$  - скорость зондирующего импульса в среде,  $c$  - скорость зондирующего импульса в воздухе,  $\epsilon_r$  - диэлектрическая постоянная,  $t$  - время регистрации отраженного импульса,  $d$  - глубина объекта.

#### Значение параметров

Наименование среды	Диэлектрическая постоянная величина	Коэффициент электрической проницаемости	Скорость зондирующего импульса (м/нс)
воздух	1	0	0,3
вода	80	0,5	0,033
бетон	4-6	0,01-1	0,12-0,13
грунт	5-40	2-1000	0,06
битум	4	0,02-1	0,13-0,18