

*В городских условиях данные наземных геофизических методов на глубоких горизонтах не обеспечивают требуемой детальности и надёжности исследований, так как осложнены высоким уровнем технических и геологических помех. В этом случае целесообразно использование изыскательских скважин для применения геофизических методов исследования околоскважинного и межскважинного пространства. Перспективным для создания технологии геомониторинга подземной среды является метод радиоволновой*

*геоинтроскопии межскважинного пространства.*

*Применение электромагнитных методов исследования межскважинного пространства позволяет при минимальном количестве скважин проводить надёжное изучение геологического разреза и оценку состояния горных пород на глубоких горизонтах и непосредственно под объектами, выявлять слабоконтрастные геологические неоднородности небольших размеров, а также изучать динамику гидрогеологических процессов во времени.*

# РАДИОВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖСКВАЖИННОГО ПРОСТРАНСТВА

**ВЯЧЕСЛАВ ИСТРАТОВ**

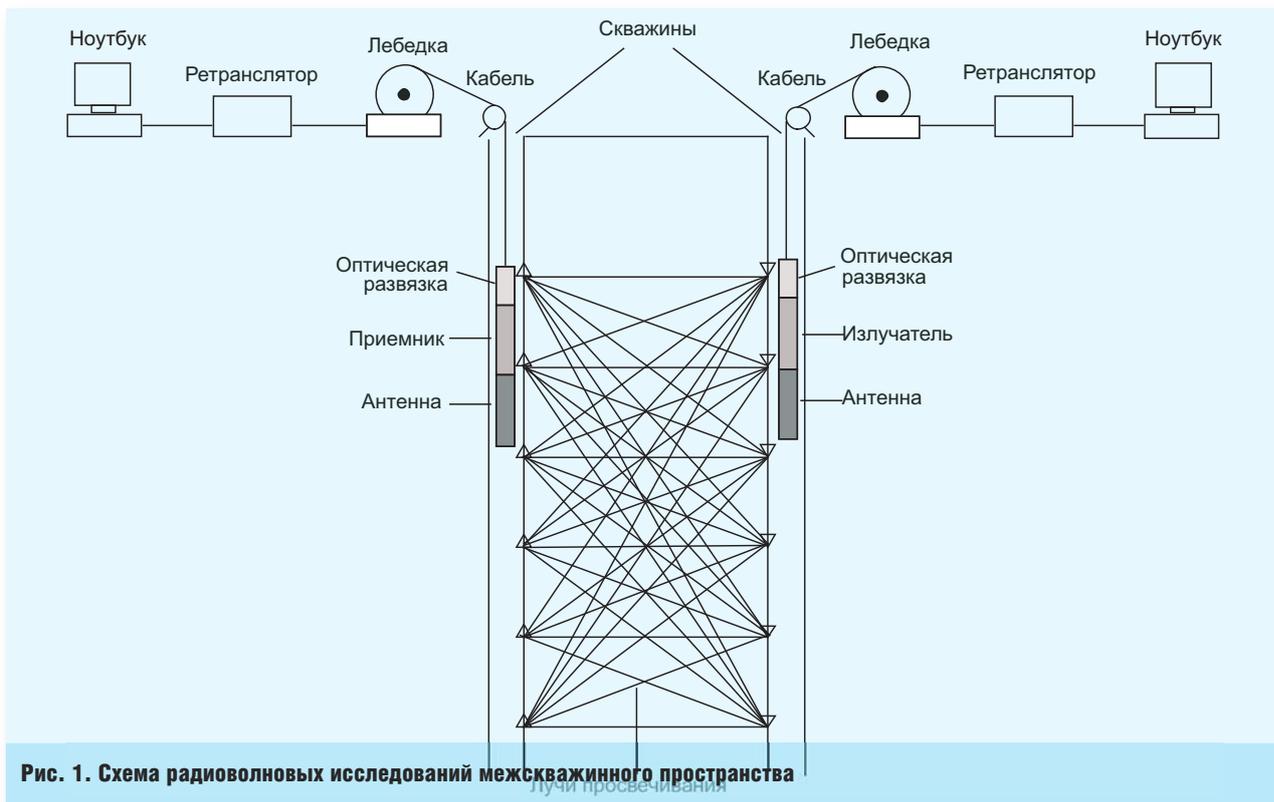
Генеральный директор ООО «Радионда LTD»

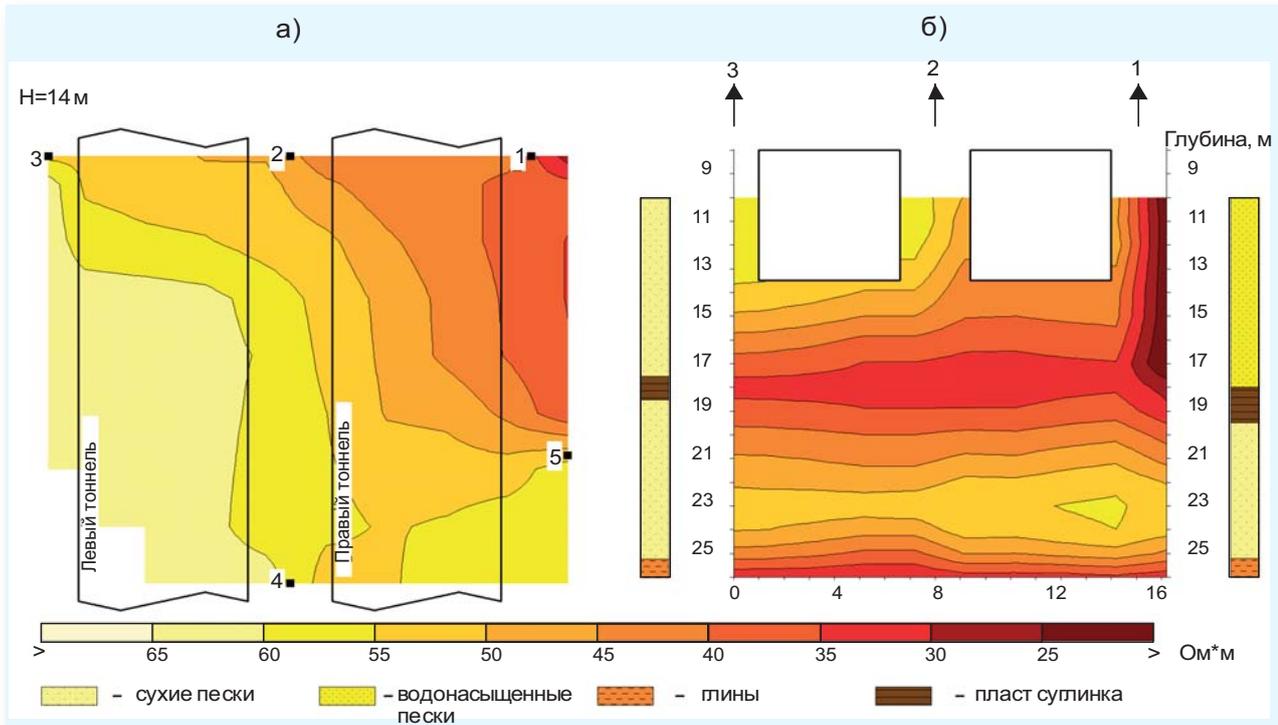
Современное градостроительство непрерывно увеличивает нагрузку на геологическую среду, что приводит к изменению естественного гидрогеологического режима и интенсивному развитию карстово-суффозионных процессов. Это требует совершенствования способов оценки состояния грунтов на глубоких горизонтах и контроля процессов взаимодействия существующих объектов с геологической средой. Сложность контроля таких процессов заключается в том, что

их зарождение и первоначальное развитие происходит на глубинах 20 м и более, превышающих так называемую «активную зону», где обычно проводятся инженерно-геологические изыскания. При ограниченном числе скважин по данным каротажа и анализам проб удаётся установить только общую картину напластования грунтов и получить средние оценки их физико-механических свойств по образцам. Это не позволяет полностью исключить вероятность наличия в

интервалах между скважинами таких опасных для строительства неоднородностей, как карстовые полости, суффозионные воронки или локальные очаги плавучих грунтов. С другой стороны, значительная часть изыскательских скважин (более 50%) вскрывает неизменённые породы и новой геологической информации не содержит.

В городских условиях данные наземных геофизических методов на глубоких горизонтах не обеспечивают требуемой детальности и





**Рис. 2. Фрагменты 3D геоэлектрической карты РВГИ под туннелями Московского метро: а) горизонтальное сечение на глубине 14 м, б) вертикальное сечение по линии скважин 1-2-3**

надёжности исследований, так как осложнены высоким уровнем технических и геологических помех. В этом случае целесообразно использование изыскательских скважин для применения геофизических методов исследования околоскважинного и межскважинного пространства. Перспективным для создания технологии геомониторинга подземной среды является метод радиоволновой геоинтроскопии (РВГИ) межскважинного пространства.

### РВГИ

Метод РВГИ основан на зависимости интенсивности поглощения энергии радиоволн породами, расположенными на трассе распространения волны, от их электрических характеристик: удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ). Анализ данных, получаемых путём просвечивания под разными углами межскважинного пространства полем дипольного источника, позволяет определять электрические свойства грунтов в естественном залегании и их распределение в изучаемом объёме среды. В результате обработки данных получается трёхмерная карта распределения в пространстве значений эффектив-

ного электрического сопротивления пород.

Для измерений используется достаточно широкий диапазон радиочастот (0,02–30,0 МГц), малогабаритные скважинные установки (1,5–3,0 м), электрические антенны. Скважинные приборы, управляемые с помощью бортового компьютера по оптическому каналу, позволяют настраивать измерительную систему на решение конкретной задачи в различных геоэлектрических и технологических условиях.

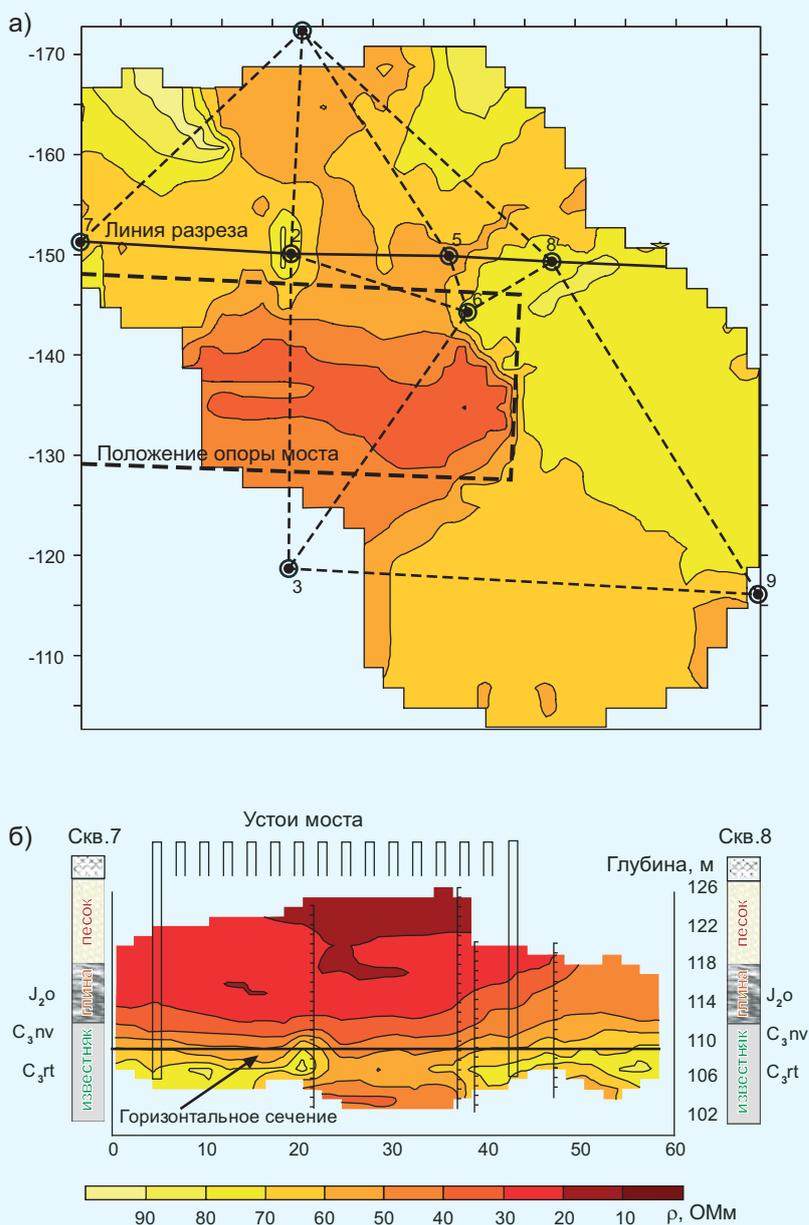
Наибольшее распространение получила методика «верных» наблюдений, при которой измерения с помощью приёмной дипольной антенны осуществляются вдоль ствола одной скважины при каждой последовательной установке излучающей дипольной антенны в других скважинах («томографическая съёмка»). Аппаратура РВГИ-07 позволяет регистрировать в скважине амплитуду осевой компоненты электрического поля на фиксированной рабочей частоте в диапазоне 0,02–30 МГц, а также величину тока в излучающей антенне. Рабочая частота и размеры электрических антенн выбираются таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить необходимую дальность исследований, а с другой —

разрешающую способность, необходимую для выделения объекта поисков.

Цифровая фильтрация измеряемого гармонического сигнала обеспечивает точность и надёжность измерений в условиях высокого уровня электромагнитных помех.

Наиболее эффективное применение метода возможно в породах с электрическим сопротивлением от 10 Ом·м и выше при расстоянии между скважинами до 80 м. Размер выявляемой неоднородности от 1 до 6 м. Контрастность электрических свойств неоднородности относительно вмещающей среды составляет 1:1,5.

При межскважинных исследованиях в низкоомных породах по измерениям на одной рабочей частоте можно рассчитать значения эффективных сопротивлений. Если расстояние между скважинами и сопротивление пород позволяют провести измерения на высокой частоте, обеспечивающей условия преобладания токов смещения, то параметром интерпретации являются также значения эффективной диэлектрической проницаемости. При обработке полученных данных используются алгоритмы, учитывающие волновые и дифракционные эффекты электромагнитного поля



**Рис. 3. Фрагменты 3D геоэлектрической карты РВГИ в основании устоя моста: а) горизонтальное сечение на глубине 108м, б) вертикальное сечение по линии скважин 7-8**

на неоднородностях, а также электрическую анизотропию среды.

Технология РВГИ предусматривает проведение изысканий в два этапа. На первом этапе скважины равномерно располагаются на исследуемой площади на расстоянии максимальной эффективной дальности РВГИ. На время исследований проводится обсадка стволов скважин полиэтиленовыми трубами, которые впоследствии извлекаются. В скважинах проводятся межскважинные и скважинно-наземные радиоволновые исследования, а также каротаж, видеокаротаж, отбор и исследование образцов. По результа-

там этих работ строится 3D геоэлектрическая карта с выделением участков, содержащих геологические неоднородности. Затем при необходимости можно провести детальные исследования этих участков с бурением контрольных скважин и измерениями РВГИ на максимально высокой частоте. По завершении работ определяются экспериментальные зависимости между электрическими характеристиками грунтов и их физико-механическими свойствами. Обобщающим результатом радиоволновой геоинтроскопии участка является детальная трёхмерная карта значений

удельного электрического сопротивления грунтов, на которой оценивается пространственная изменчивость свойств грунтов, локализуются неоднородности геологического строения и их потенциальная опасность для строительства и эксплуатации объекта. В отдельных скважинах полиэтиленовые трубы могут не удаляться, что позволяет использовать их в качестве контрольных для режимных наблюдений (мониторинга) за состоянием грунтов, в том числе непосредственно под сооружением.

**Практическое применение**

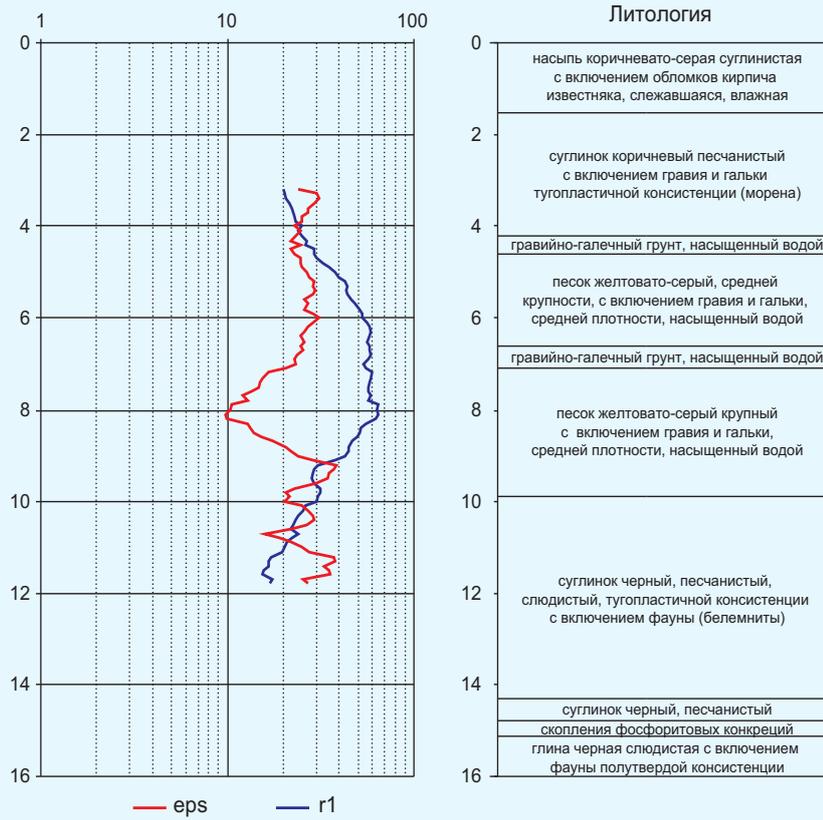
На рис. 2 приведены результаты исследований, полученные на одной из линий Московского метрополитена, где в период пробной эксплуатации наблюдались интенсивные (до 180 мм) просадки правого тоннеля. Особенностью участка является наличие на глубине 16,5–18 м пласта суглинка мощностью до 1,0 м, который при инженерно-геологических изысканиях на глубину до 14 м не был выделен.

Для определения причины просадок было пробурено 5 скважин глубиной 28 м с обсадкой пластиковыми трубами. Межскважинные исследования были выполнены в 8 сечениях «верным» способом на частоте 4,5 МГц с шагом перемещения приборов 1 м. На рис. 2 а, б представлены фрагменты трёхмерной геоэлектрической карты в виде горизонтального плана на глубине 14 м и вертикального разреза по линии скважин 1–2–3.

Понижение электрического сопротивления грунтов связано с повышенной водонасыщенностью песков и имеет гидрогеологическую природу. По карте изолинии сопротивления выделяется «гидрогеологической воронки», локализирующая в пространстве под тоннелями фильтрационное окно в пласте суглинков. Разгрузка напорных вод в этом месте и связанная с этим суффозия песчаных грунтов под основанием тоннелей и явились основной причиной их просадок. Система межскважинных наблюдений позволяет проводить режимные наблюдения и контролировать изменение гидрогеологической обстановки.

На рис. 3 приведены результаты работ по обследованию участка бе-

a)



б)

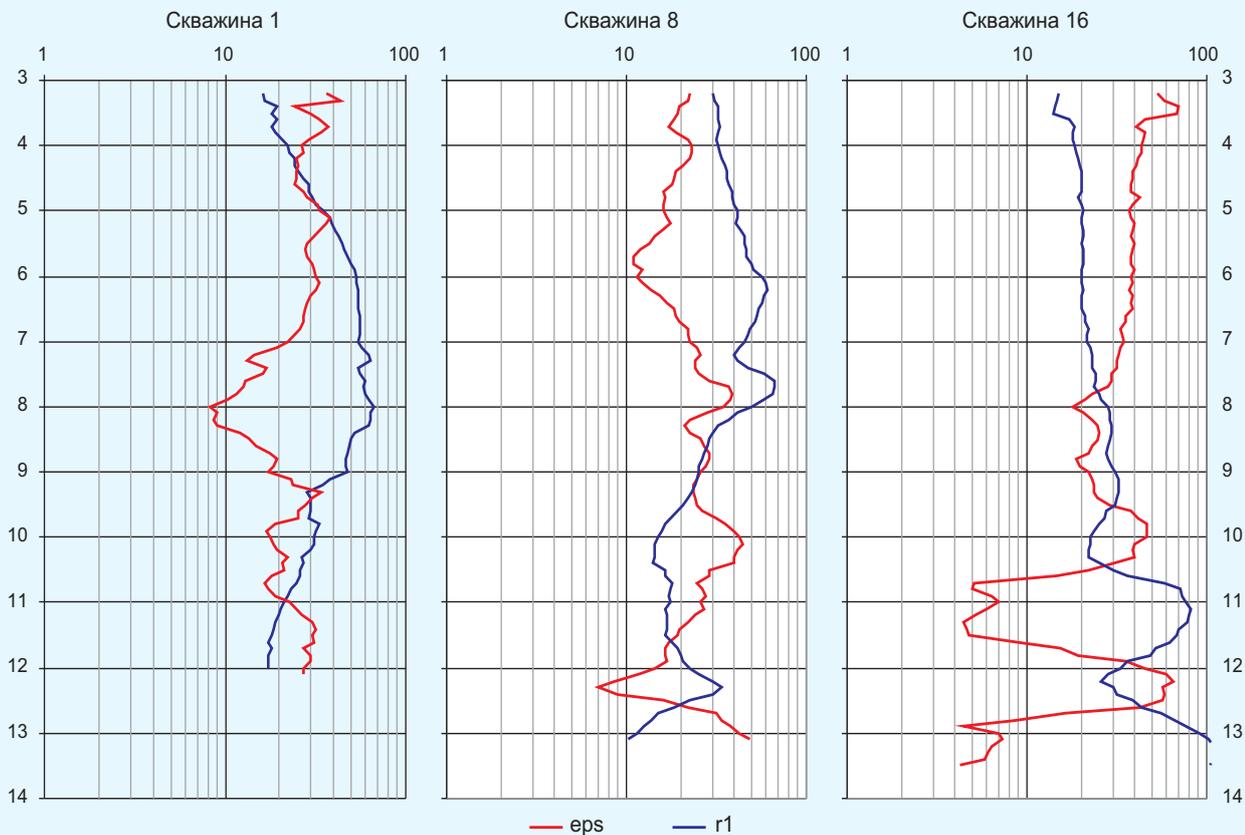


Рис. 4. Диаграммы электрокаротажа методом ОРВП

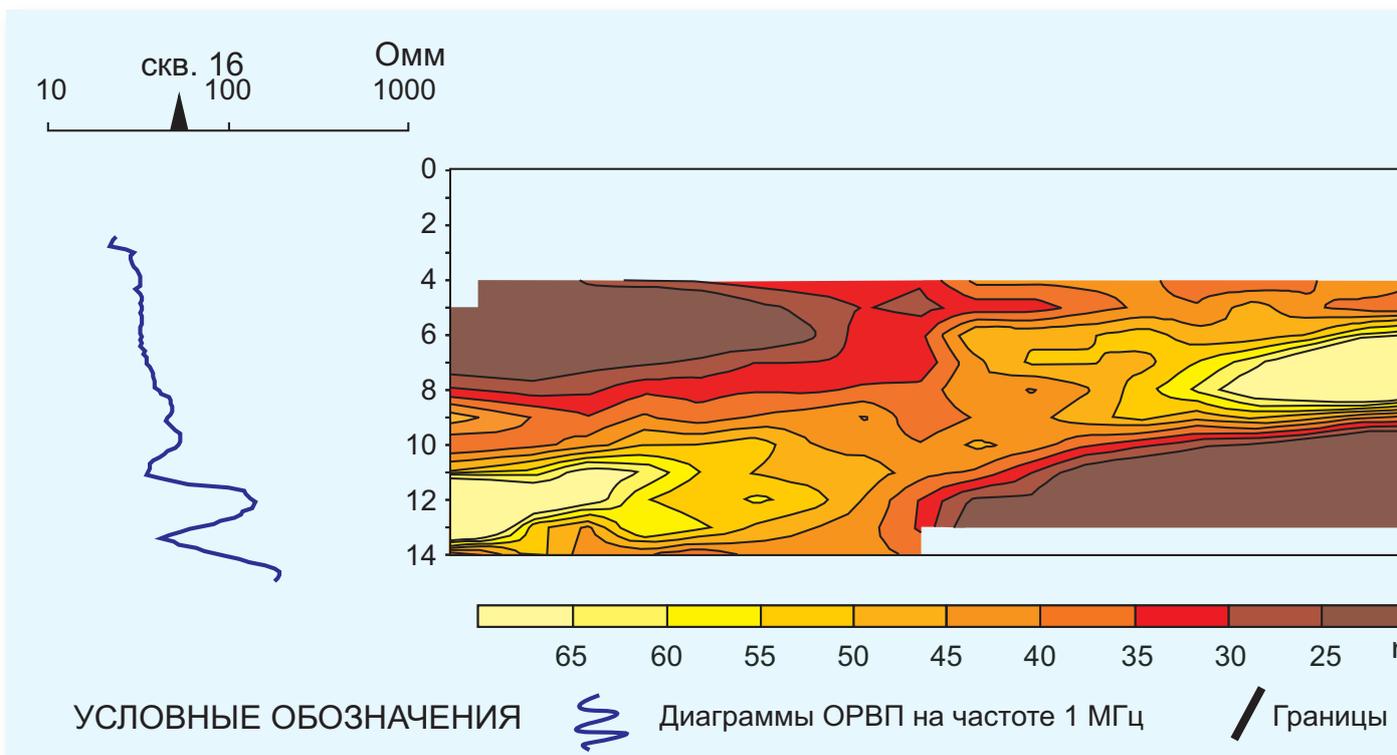


Рис. 5. Геотограмма РВГИ по линии скважин 8-16

регового устоя моста через реку Москву автодороги Москва — Рига с целью выяснения причин смещения мостовых опор в сторону реки. В частности, одна из основных задач заключалась в выявлении участков карстовых изменений и картировании кровли известняков ратмировской свиты С3rt, залегающих в основании разреза. Уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине 6 м. Геологические колонки по скважинам 7 и 8 приведены на рисунке. Участок крайне неудобен для обследования наземными геофизическими методами, так как большая его часть скрыта под устоем, а остальная представляет собой насыпь с углами склонов около 20°. Для обследования участка было пробурено 9 скважин.

Межскважинные РВГИ-измерения выполнены на частоте 2,25 МГц «веерным» способом в интервале глубин 5–27 м с шагом 0,5 м. Фрагменты 3D геоэлектрической карты приведены в виде горизонтального сечения по кровле ратмировских известняков на отметке 109 м и вертикального сечения по линии скважин 7–8 (рис. 3).

На плане ясно видна закономерность изменения электрических свойств по латерали. Общей тенденцией является приуроченность области наиболее низких сопротивле-

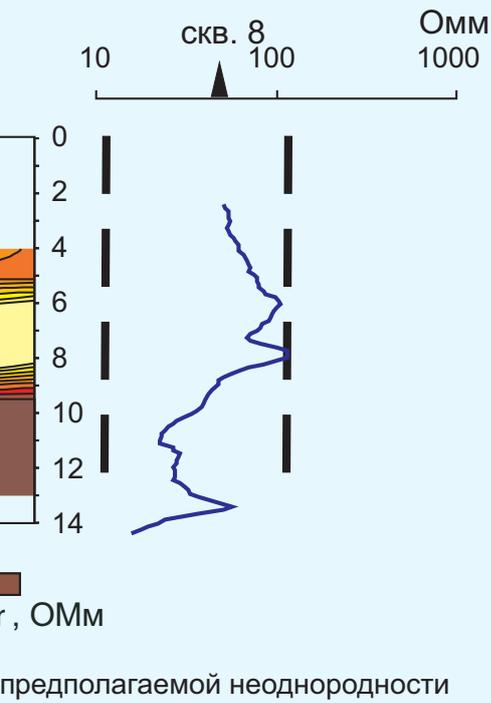
ний к контуру устоя. На разрезе изолинии сопротивления заметны локальные неоднородности в интервале между скважинами 2–5. Основным фактором, понижающим сопротивление всех грунтов — от песчано-галечных до известняков и глин, является их водонасыщенность. Поэтому области аномально пониженного сопротивления могут быть интерпретированы как зоны повышенной водонасыщенности грунтов разного состава. Закономерное понижение электросопротивления по всему разрезу свидетельствует о повышенной водонасыщенности грунтов и вероятной проницаемости глинистой толщи для грунтовых вод на этом участке. Анализ карты изолиний сопротивления и форма выделенных неоднородностей позволяют предположить, что здесь находится зона, благоприятная для развития карстово-суффозионного процесса. Выявленные особенности геоэлектрического строения участка свидетельствуют о наличии под аллювиальными отложениями между скважинами 2–1–5 карстово-суффозионных изменений в грунтах, развивающихся под устоем моста, что и является причиной его смещения.

Радиоволновые исследования (РВГИ-ОРВП) были проведены в

трёх скважинах, пробуренных в подвалах политехнического музея с целью изысканий под будущую реконструкцию здания. При этом были получены опорные данные по электрическим свойствам грунтов и фундаментам здания для более достоверной интерпретации георадиолокационных исследований, а также оценки структуры геоэлектрических разрезов грунтов в основании здания.

В каждой скважине проводился электрический картаж методом односкважинного радиоволнового профилирования (ОРВП) с аппаратурой ОРВП-04 (ООО «Радионда LTD»). Использовалась дипольная установка с расстоянием между излучателем и приёмником — 2 м. Запись осуществлялась непрерывно с квантованием по глубине 0,1 м. Измерения проводились на двух частотах — 1,25 МГц и 31 МГц, что позволило вычислить не только эффективное электрическое сопротивление по стволу скважины, но и эффективную относительную диэлектрическую проницаемость.

Межскважинные измерения РВГИ были выполнены по «веерной» методике с шагом 1 м на частоте 625 кГц с объёмными монопольными антеннами длиной 2 м. Данные измерений были обработаны по ал-



горитмам томографического восстановления с размером элементарной ячейки 2x1 (2 м — по горизонтали, 1 м — по вертикали).

На рис. 4 приведены диаграммы ОРВП по скважине 1. Синим цветом показано эффективное электрическое сопротивление, красным — расчётное значение эффективной относительной диэлектрической проницаемости. Диапазон изменения эффективных сопротивлений составляет 10–70 Ом•м, диэлектрической проницаемости 5–40.

Как видно на диаграммах рис. 4, выполнить надёжную корреляцию пластов между скважинами только на основании данных каротажа практически невозможно. Так, геоэлектрические разрезы скважин 1 и 8 имеют три общие черты: (1) верхний низкоомный горизонт в интервале 3–5 м обладает эффективным сопротивлением 15–20 Ом•м и повышенной диэлектрической проницаемостью порядка 20–30; (2) высокоомный горизонт в интервале 5–9 м обладает эффективным сопротивлением до 70 Ом•м и в целом пониженной диэлектрической проницаемостью; (3) нижний низкоомный горизонт глубже 9 м обладает эффективным сопротивлением около 15–20 Ом•м. При этом грунтовые воды зафиксированы на глубине 3 метра.

Скважина 8 отличается неоднородностью высокоомного горизонта по диэлектрической проницаемости и наличием в ней высокоомного пропластка в интервале 11,5–12,5 Ом•м.

Зафиксированные уровни сопротивлений позволяют связать более высокоомные слои с песчанистыми толщами, а понижение сопротивления трактовать как увеличение содержания глинистого элемента. Такая интерпретация подтверждается приблизительной колонкой по скважине 1, где в районе отметок 5–9 м расположен песчанистый пласт.

Существенно отличается от описанных выше геоэлектрический разрез скважины 16, которая на интервале исследований является безводной. Условно толщу вблизи скважины 16 можно разбить на две области: (1) верхнюю, до 9,5 м, где эффективное сопротивление монотонно растёт с 15 до 25 Ом•м, а диэлектрическая проницаемость монотонно падает с 60 до 20, и (2) нижнюю (ниже 9,5 м), высокоомную, с сопротивлениями порядка 80–100 Ом•м, состоящую из нескольких мелких электрически контрастных пропластков. Низкоомный пропласток в интервале 11,8–12,7, видимо, является линзой глины, так как не проявляется при межскважинном просвечивании.

На рис. 5 изображена геотограмма сопротивлений в сечении скважин 16–8, построенная по данным межскважинных исследований на частоте 625 кГц. Она в основном совпадает с диаграммами сопротивлений, полученных по данным ОРВП. Области низких сопротивлений, зафиксированные по данным ОРВП, не коррелируют в межскважинном пространстве. Отсутствие воды в скважине 16 может объясняться наличием вертикального элемента конструкции фундамента, расположенного между скважинами. Характер полученного геоэлектрического разреза (почти шахматная структура) позволяет предположить, что в сечении скважин 16–8 находятся помещения, скорее всего засыпанные грунтом. Возможно также, что на этом участке была произведена замена грунта до строительства здания. Следует отметить, что ограниченное количество исследованных скважин резко снижает ин-

терпретационные возможности, но при увеличении исследуемых скважин можно добиться высокой однозначности выявления межскважинных объектов, в том числе и искусственного происхождения (невывявленные подвалы, колодцы и т.д.).

В сечении скважин 1–8 сигнал между ними не был получен даже на частоте 61 кГц. Этот факт не может быть объяснён просто затуханием в породах, вскрытых скважинами 1 и 8. Причиной такого аномально высокого поглощения может являться расположенная в межскважинном пространстве неоднородность достаточно большого размера и низкого сопротивления (вероятнее всего негеологической природы).

Несмотря на ограниченный объём проведённых радиоволновых исследований, следует отметить их очевидную целесообразность. Полученные с их помощью опорные сведения по проводимости и диэлектрической проницаемости грунтов основания здания позволили провести более уверенную интерпретацию георадиолокационных данных. Кроме того, сама возможность получения информации о наличии и свойствах грунтов и объектов в межскважинном пространстве является весьма важной для изысканий в условиях ограниченной и редкой сети разведочных выработок (шурфов и скважин).

### Высокая точность, минимальный объём

Применение электромагнитных методов исследования межскважинного пространства позволяет проводить надёжное изучение геологического разреза и оценку состояния горных пород на глубоких горизонтах и непосредственно под объектами, выявлять слабоконтрастные геологические неоднородности небольших размеров, а также изучать динамику гидрогеологических процессов во времени.

При строительстве и эксплуатации объектов высокой ответственности (например, высотные здания, путевые тоннели и т.п.) инженерно-геологические изыскания необходимо проводить на глубину, гарантирующую получение максимально полного объёма информации о геологическом строении и гидрогеологическом режиме территории.