

**КОЛЕСНИКОВ В.П.**

Профессор кафедры геофизики геологического факультета  
Пермского государственного национального исследовательского  
университета (ПГНИУ), д.т.н., г. Пермь, vp@dom.raid.ru

**ПРИГАРА А.М.**

Главный геофизик  
ООО «НИПППД «Недра»»,  
к.т.н., г. Пермь,  
prandra@gmail.com

**ТАТАРКИН А.В.**

Заместитель начальника отдела геофизических исследований  
ООО «НИПППД «Недра»»,  
г. Пермь, vsto08@mail.ru

**ФИЛИМОНЧИКОВ А.А.**

Инженер ОГИ ООО «НИПППД «Недра»»,  
г. Пермь, fil.shurka@mail.ru

**KOLESNIKOV V.P.**

A professor of the geophysics department  
of the geology faculty of Perm State National Research University,  
doctor of technical sciences, Perm, vp@dom.raid.ru

**PRIGARA A.M.**

The chief geophysicist of the «Nedra» Research, Design and Production  
Enterprise for Environmental Protection Ltd., candidate  
of technical sciences,  
Perm, prandra@gmail.com

**TATARKIN A.V.**

The deputy chief of the Geophysical Research Department of the  
«Nedra» Research, Design and Production Enterprise for Environmental  
Protection Ltd., Perm, vsto08@mail.ru

**FILIMONCHIKOV A.A.**

An engineer of the Geophysical Research Department of the «Nedra»  
Research, Design and Production Enterprise for Environmental  
Protection Ltd., Perm, fil.shurka@mail.ru

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОДРАБОТАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

### ENGINEERING-GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS UNDER CONDITIONS OF UNDERMINED AREAS

**Ключевые слова:** инженерно-геофизические исследования; подработанная территория; сейсморазведка; электроразведка; электромагнитное зондирование; съемка техногенного электромагнитного поля.

**Key words:** engineering-geophysical investigations; undermined territory; seismic exploration; electrical exploration; electromagnetic sounding; man-made electromagnetic field survey.

**Аннотация:** в статье описаны результаты исследований грунтового основания сооружения, находящегося на территории шахтной отработки месторождения. Для этих целей использован комплекс, включающий набор традиционных и нетрадиционных геофизических методов: инженерной сейсморазведки, электроразведки, георадиолокационного зондирования, съемки техногенного электромагнитного поля и тепловизионной съемки. Выполнена оценка физических и физико-механических свойств грунтов. Даны рекомендации, необходимые проектной организации для дальнейшей оценки технического состояния рассматриваемой территории и разработки плана мероприятий по обеспечению надежности строительных конструкций.

**Abstract:** the article describes research results of the ground base of a structure in an undermined territory. A survey complex including a set of conventional and unconventional methods (engineering seismics, electrical exploration, georadar sounding, man-made electromagnetic field survey, thermal imaging survey) was used for these purposes. Physical and mechanical properties of the soils are estimated. Some necessary recommendations are given to the design enterprise to continue assessing the technical state of the territory and develop the measures to ensure the building structures reliability.

**Введение**

Одной из актуальных задач при эксплуатации зданий и сооружений является обеспечение их безопасного функционирования. Степень риска при этом зависит от целого ряда геологических факторов — литологического состава пород, их прочностных свойств, степени активности геологических процессов, гидрогеологических условий и др. Особую важность

данная задача приобретает при строительстве и эксплуатации объектов, расположенных на территориях шахтной отработки месторождений, где обеспечение безопасности требует сведений о физических свойствах грунтов, не только непосредственно подстилающих фундаменты, но и залегающих до глубины выработанного пространства, способных приводить к деформациям земной поверхности.

Одним из путей решения связанных с этим задач является создание и развитие рациональных геофизических технологий.

Целью данного исследования было изучение возможностей комплекса взаимодополняющих геофизических методов, нацеленного на получение необходимой информации о структурных, физико-механических и гидрогеологических особенностях исследуе-



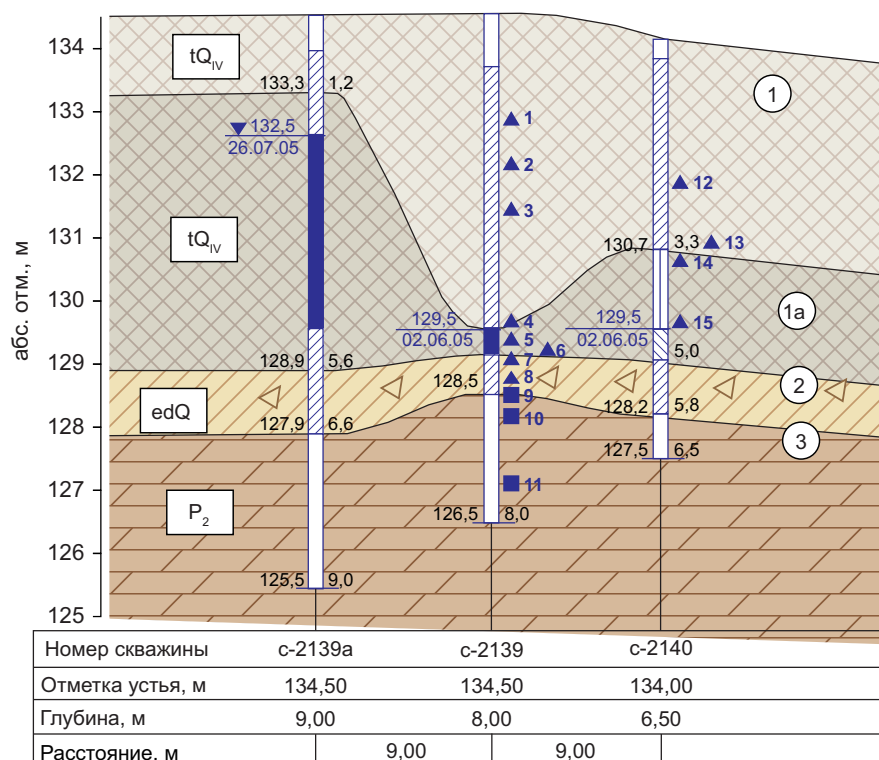
**Рис. 1.** Фотографии бокового фасада бассейна «Дельфин» (а) и сквозной трещины во внутренней части здания (б)

мой геологической среды в условиях подработанной территории Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС).

Эта работа была выполнена на примере обследования основания фундамента бассейна «Дельфин» в г. Соликамске, расположенного на территории ВКМКС. Использованный комплекс геофизических методов включал инженерную сейсморазведку, георадарное зондирование, вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), метод естественного поля (ЕП), а также нетрадиционные методы — исследования глубинной части разреза с применением техногенных электромагнитных полей (ТЭМП) [1] и тепловизионной съемки. Первые четыре метода нацелены на изучение разреза до глубины 15–25 м, метод ТЭМП — на оценку состояния надпродуктивной толщи ВКМКС, включая водозащитную толщу (породы, залегающие на глубинах 100 м и более, предотвращающие попадание воды в горные выработки), тепловизионная съемка — на состояние конструкции здания.

#### Объект исследований

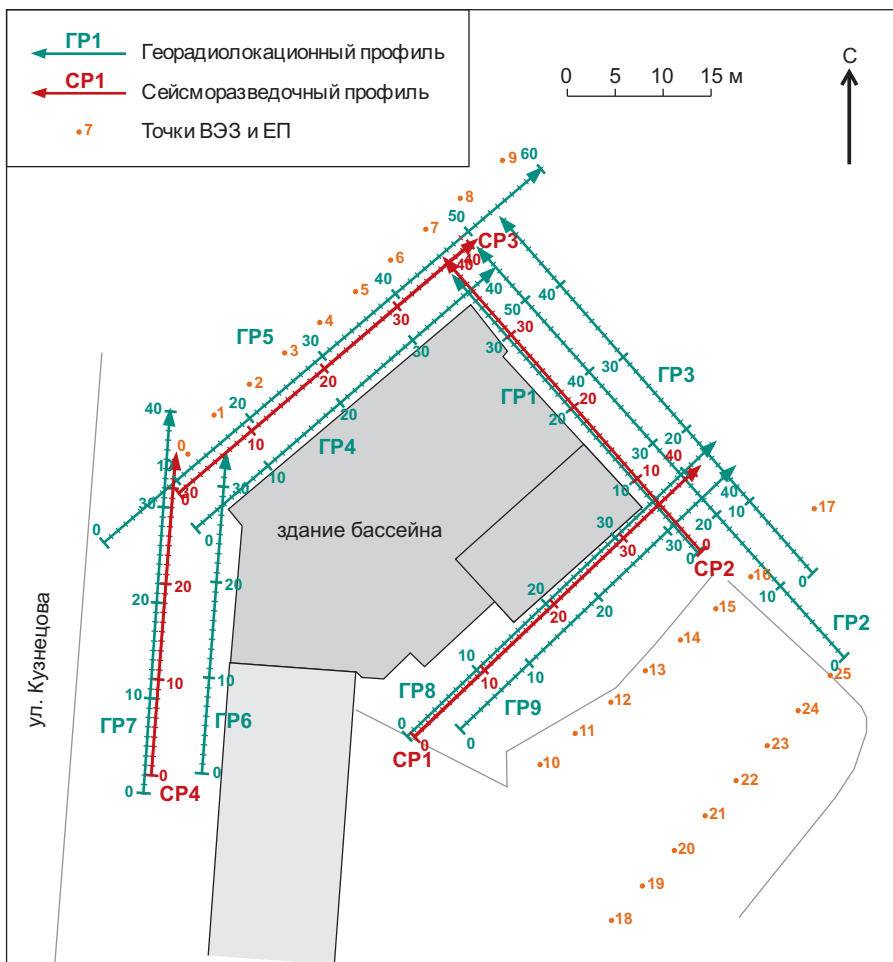
Рассматриваемый объект расположен в пределах зоны влияния выработанного пространства рудников ОАО «Сильвинит» (ныне ОАО «Урал-



#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

- 1) Насыпной грунт: с поверхности до глубины 0,3–0,6 м – асфальт, бетон; с глубины 0,3–0,6 м – песок мелкий, коричневый, влажный, с прослойками суглинка, со строительным мусором (древесина, кирпич, стекло). Давность отсыпки более 10 лет
  - 1а) Насыпной грунт: суглинок коричневый от полутвердой до текучепластичной консистенции, с прослойками песка мелкого, влажного, ниже уровня грунтовых вод насыщенного водой, с прослойками супеси от пластичной до текучей консистенции, со строительным мусором (обломки кирпича, щебень мергеля, стекло, древесина), в с-2139 – супесь серая текучая. Давность отсыпки более 10 лет
  - 2) Суглинок серовато-зеленый мягкопластичный с дресвой и щебнем мергеля до 25%
  - 3) Мергель полускальный, сильновыветрелый, сильнотрещиноватый, в с-2139а в кровле слоя – мергель очень низкой прочности, сильновыветрелый, сильнотрещиноватый, по трещинам глинистый материал
  - Литологическая граница
  - 1) Номер инженерно-геологического элемента
  - tQ<sub>IV</sub> Стратиграфический возраст и генетический индекс
  - ▲12 Инженерно-геологическая скважина, снесенная на линию профиля; справа – глубина залегания подошвы слоя или забоя скважины, м, слева – абсолютная отметка подошвы слоя или забоя скважины, м
  - 11 Место отбора пробы нарушенной структуры, ее номер
  - 11 Место отбора пробы ненарушенной структуры, ее номер
  - ▼132,5 / 26.07.05 Вверху – установившийся уровень грунтовых вод, внизу – дата замера
- Состояние грунтов:
- | Средней степени водонасыщения | Пески          |         | Суглинки, супеси |                 |
|-------------------------------|----------------|---------|------------------|-----------------|
|                               | водонасыщенные | текучие | тугопластичные   | мягкопластичные |
|                               |                |         |                  |                 |

**Рис. 2.** Геологический разрез территории бассейна «Дельфин»



**Рис. 3. Схема расположения профилей геофизических наблюдений**

калий»). К 2003–2004 годам в здании бассейна имелся целый ряд нарушений целостности конструкций, ставивших под вопрос его дальнейшую судьбу. В 2004 году ООО «Астарта» выполнило его техническое обследование и разработало рабочий проект по капитальному ремонту, согласно которому здание и было отремонтировано.

В 2006 году ОАО «Галургия» выполнило экспертизу рабочего проекта, согласно результатам которой решения, предложенные ООО «Астарта» в

рабочем проекте, были признаны недостаточными для решения задач по укреплению конструкций бассейна. В экспертном заключении также было указано на необходимость проведения детального технического обследования.

В 2010 году в здании по-прежнему присутствовали трещины, в том числе сквозные, с неизученной динамикой развития (рис. 1).

В геологическом отношении разрез территории бассейна представлен отложениями четвертичной (насыпными



**Рис. 4. Процесс выполнения полевых сейсморазведочных исследований**



**Рис. 5. Подготовка к выполнению полевых георадиолокационных исследований**

грунтами, эллипсовидно-делювиальными суглинками) и пермской (мергелями полускальными сильновыветрелыми и сильнотрещиноватыми) систем (рис. 2). В пределах участка изысканий по архивным данным было выделено четыре инженерно-геологических элемента (ИГЭ) (см. рис. 2).

**Методы, аппаратура, программное обеспечение**

В число использованных геофизических методов вошли: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), сейсморазведка по методике общей глубинной точки (МОГТ), георадарное зондирование, метод естественного поля (ЕП), глубинные исследования водозащитной толщи подработанного пространства (см. введение) с использованием техногенных электромагнитных полей (ТЭМП). В качестве параметрического материала, необходимого для контроля и повышения достоверности интерпретации, использовались результаты бурения трех инженерно-геологических скважин. При выполнении исследований применялся ряд аппаратурно-программных комплексов, в том числе собственной разработки, — АМС-1, ТЭМП-1, «Зонд». Схема расположения профилей геофизических наблюдений приведена на рис. 3.

Вертикальное электрическое зондирование проводилось с использованием аппаратуры АМС-1, позволяющей вести цифровую регистрацию сигнала с заданным соотношением «сигнал — помеха» и проводить визуальный контроль измерений. С учетом застройки территории были отработаны три профиля с помощью трехэлектродной установки с максимальным полуразносом (АВ/2), равным 25 м. Результаты зондирования были обработаны и проинтерпретированы в системе программ «Зонд», в результате чего была построена геоэлектрическая модель исследуемой площади [2, 5].

Для сейсморазведочных исследований использовалась телеметрическая сейсмостанция IS-128. В ходе полевых работ (рис. 4) была выполнена регистрация продольных и поперечных волн по методике общей глубинной точки. Всего было отработано четыре профиля с шагом между пунктами приема и возбуждения 1 м и максимальным удалением пункта возбуждения от пункт приема 48 м. Для возбуждения упругих колебаний использовалась кувалда.



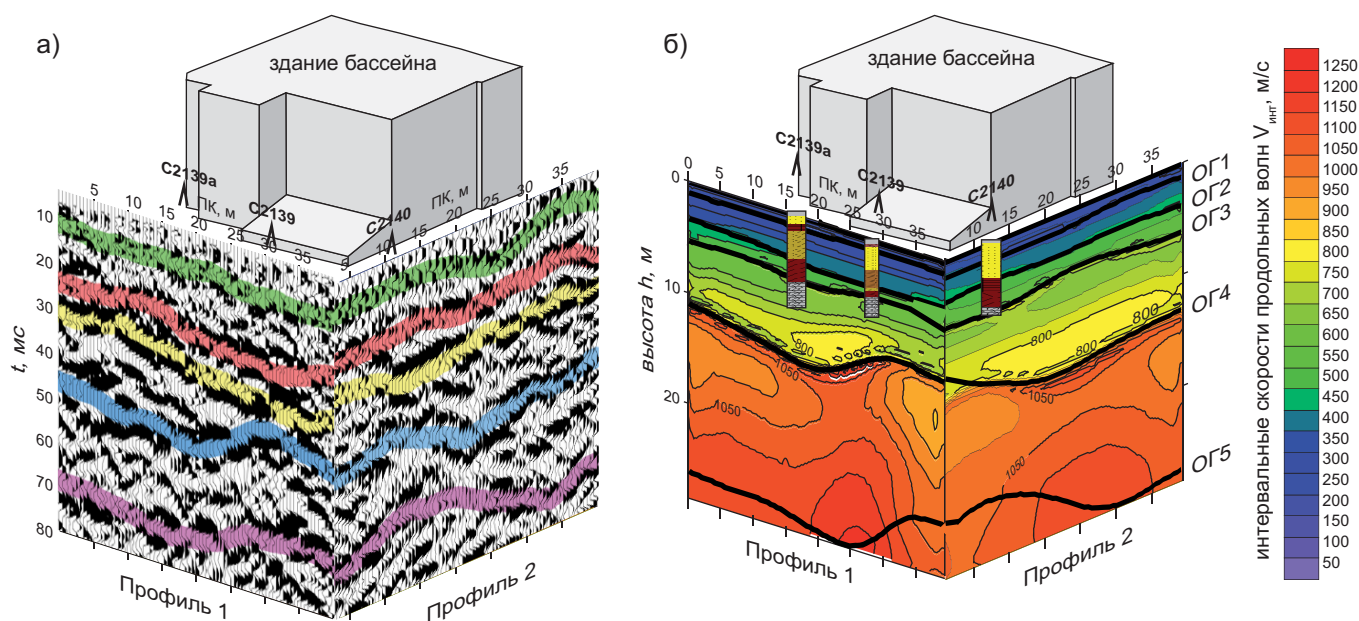


Рис. 6. Объемное представление: а — временного разреза, полученного по методу общей глубинной точки; б — геосейсмического разреза по продольным волнам. С2139а, С 2139, С2140 — инженерно-геологические скважины; ОГ1–ОГ5 — отражающие горизонты;  $V_{инт}$  — интервальные скорости продольных волн, м/с; над разрезами серым цветом показано здание бассейна.

Результаты полевых измерений обрабатывались и интерпретировались с помощью программного продукта OpendTest, позволяющего выполнять фильтрацию данных, строить временные и глубинные разрезы, вычислять трансформанты волнового поля и поля скоростей. Регистрация продольных и поперечных волн позволила в процессе интерпретации на основе СНиП [7] получить сведения о физико-механических свойствах

(ФМС) грунтов. Были вычислены такие ФМС, как модуль Юнга (динамический модуль упругости), коэффициент Пуассона, модуль всестороннего сжатия, модуль сдвига, соотношение скоростей продольных и поперечных волн.

Метод георадиолокационного зондирования был реализован на основе комплекса Mala Geoscience ProEx. Полевые наблюдения выполнялись с неэкранированной антенной 50 МГц

с шагом 0,2 м (рис. 5). Результаты полевых наблюдений обрабатывались с использованием программы RadExplorer с целью прослеживания отражающих границ и выделения зон повышенного затухания амплитуд, ассоциируемых с участками повышенной влажности или глинистости грунтов [1].

Регистрация естественного поля выполнялась АМС-1 по методике градиента потенциала с использованием

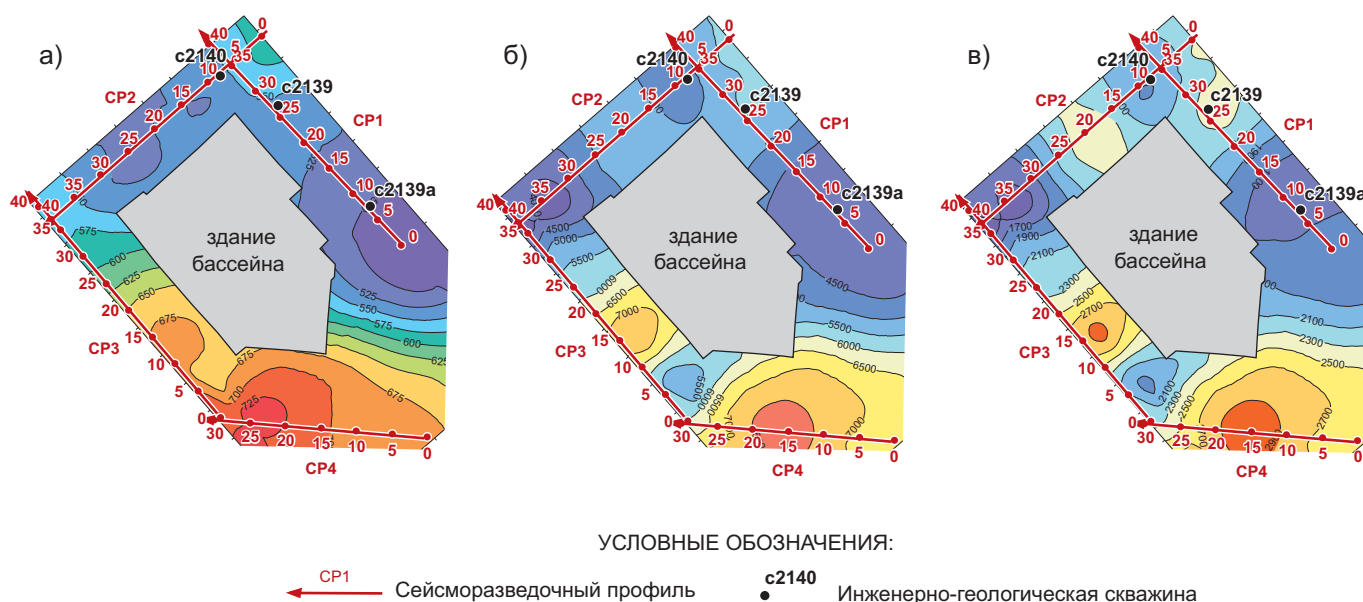


Рис. 7. Карты интерпретационных параметров для третьего геосейсмического слоя: а — интервальных скоростей продольных волн, м/с (оттенки синего цвета — минимальные значения, зеленого — средние, красного — максимальные); б — модуля Юнга, кг/см<sup>2</sup> (оттенки синего цвета — минимальные значения, желтого — средние, красного — максимальные); в — модуля сдвига, кг/см<sup>2</sup> (оттенки синего цвета — минимальные значения, желтого — средние, красного — максимальные)

неполяризующихся электродов ЭНЕС-1. Расстояние между электродами составило 10 м. По аномалиям на графиках ЕП были выделены зоны оттока и притока грунтовых вод [8].

Для реализации метода техногенных электромагнитных полей использовался комплекс ТЭМП-1, который представляет собой многоканальную цифровую аппаратуру, позволяющую одновременно записывать данные с

трех электрических и трех магнитных датчиков [3]. Шаг между пикетами составил 50 м.

Для обработки результатов полевых измерений использовалась программа ТЭМП. Она позволяет оперативно выполнять выборку амплитуд сигналов с заданными характеристиками и сохранять результаты для их последующей обработки в системе «Зонд».

### Результаты исследований

По материалам сейсмического зондирования были получены разрезы и карты, отображающие изменение скоростных свойств пяти основных геосейсмических слоев, залегающих до глубины 25–30 м. Первые четыре геосейсмических слоя ассоциируются с инженерно-геологическими элементами 1, 1а, 2, 3 (см. рис. 2). Пятый сверхгеосейсмический слой не был вскрыт

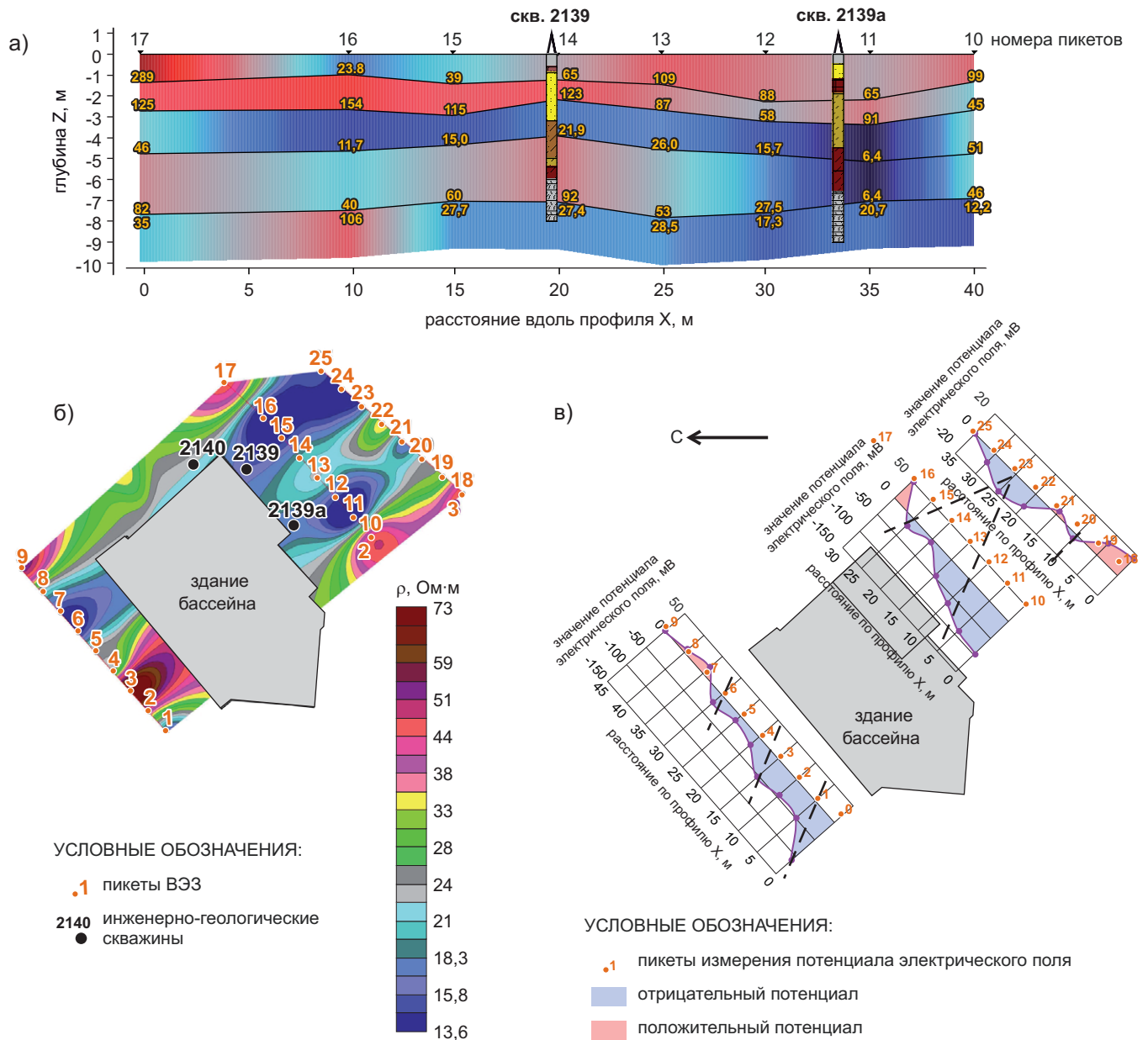


Рис. 8. Материалы для совместного анализа: а — разрез удельного электрического сопротивления, Ом·м, по второму профилю (горизонтальная ось — расстояние вдоль профиля; цифры черного цвета на глубине 0 м — номера пикетов; красные цифры — номера инженерно-геологических скважин, снесенных на профиль; цветовая заливка: синий цвет — минимальные сопротивления (от 6,4 Ом·м), голубой цвет — сопротивления средней величины (порядка 40 Ом·м), красный цвет — максимальные сопротивления (до 289 Ом·м); б — карта удельного электрического сопротивления, Ом·м, для третьего геоэлектрического слоя (замкнутый контур, залитый белым цветом, — здание бассейна в плане; цифры красного цвета — номера инженерно-геологических скважин, цифры черного цвета — номера пикетов ВЭЗ; в — «карта графиков» потенциала естественного электрического поля (замкнутый контур, залитый серым цветом, — здание бассейна в плане; оси ординат на графиках — значение потенциала электрического поля, мВ; оси абсцисс на графиках — расстояние по профилю, м; голубым цветом залиты части графиков с отрицательным потенциалом, красным цветом — с положительным потенциалом; фиолетовые цифры — номера пикетов измерения потенциала электрического поля)

Таблица

Пределы изменений физико-механических свойств грунтов						
Параметр	Пределы	Слой				
		1	2	3	4	5
Модуль Юнга, МПа	мин.	19,6	101	309	863	1873
	макс.	184,0	360	775	1765	3138
Модуль сдвига, МПа	мин.	6,86	35,3	111	765	736
	макс.	83,40	167,0	304	324	1383
Коэффициент Пуассона, усл. ед.	мин.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,14
	макс.	0,44	0,44	0,39	0,34	0,33

при бурении, поэтому его литологический состав определен предположительно.

Анализ полученных материалов (рис. 6) показал наличие горизонтальной и вертикальной изменчивости разреза, вызванной изменением лито-

логического состава грунтов и их физических свойств. Наибольшая дифференциация по скоростным свойствам отмечена в пределах первого геосейсмического слоя, сложенного насыпными грунтами, в том числе строительным мусором. Нижележа-

щая часть разреза характеризуется сравнительно умеренной изменчивостью упругих свойств грунтов с рядом разуплотненных зон, закономерно прослеживаемых в пределах исследуемого участка.

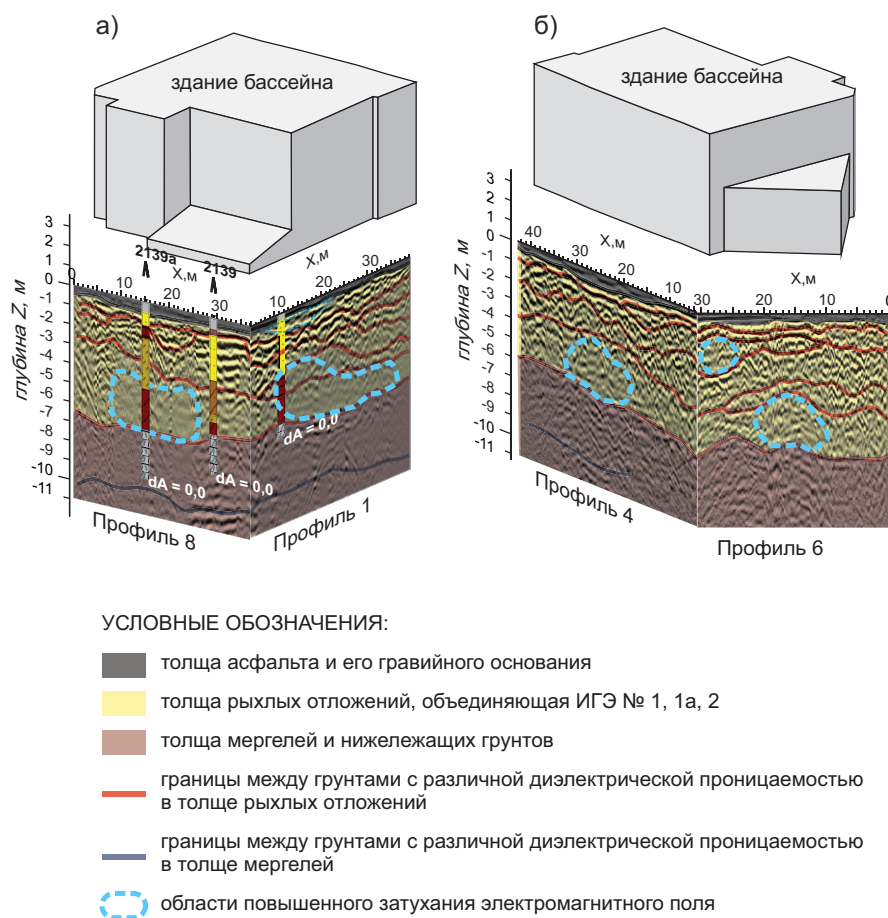
Оценка динамического модуля деформации, модуля сдвига и коэффициента Пуассона (рис. 7), выполненная на основе полученных значений продольных и поперечных скоростей для всех выделенных горизонтов, показала, что в целом физико-механические свойства грунтов находятся в пределах нормы. При этом их наибольшая изменчивость отмечается в пределах первого геосейсмического слоя (см. таблицу).

В результате параметрического анализа и компьютерной интерпретации данных ВЭЗ проведена литологическая привязка выделенных границ и получена геоэлектрическая модель среды, отображающая изменения литологического состава и физического состояния грунтов в пяти геоэлектрических горизонтах, слагающих разрез в интервале от поверхности до глубины 10–13 м.

По результатам совместного анализа полученных геоэлектрических разрезов и карт (рис. 8) выделены две области пониженного электрического сопротивления, указывающие на возможное присутствие зон разуплотнения и повышенной влажности пород. Сопоставление этих данных с результатами применения метода ЕП указало на повышенную фильтрацию подземных вод, что говорит о вероятности развития суффозионных процессов.

В результате проведения георадарного зондирования (рис. 9) выделены ослабленные участки пород, связанные с повышенной глинистостью и миграцией подземных вод, а также околонулены участки, сопряженные с подземными коммуникациями.

Комплексный анализ геофизических данных (рис. 10), полученных разными методами, уверенно показал взаимную корреляцию данных. Аномальные зоны, прослеживаемые в интервале глубин 3–7 м, отмечаются пониженными значениями электрического сопротивления (по данным метода ВЭЗ), уменьшением величины модуля Юнга (по результатам сейсмометрии), повышенным затуханием высокочастотного электромагнитного поля (по материалам радиолокации) и увеличением абсолютных значений потенциала естественного поля (по



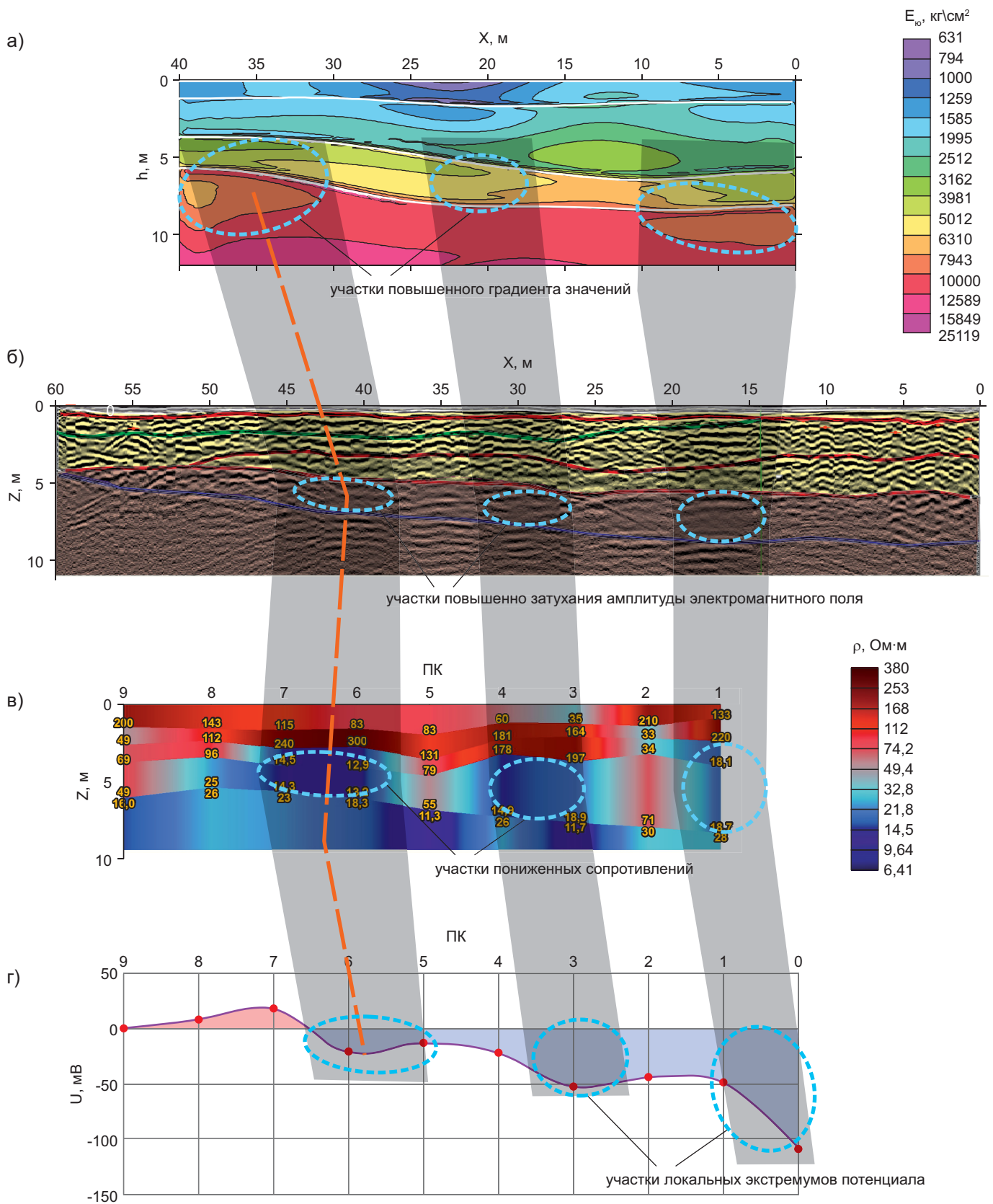
**Рис. 9.** Радиолокационные (георадарные) разрезы в объемном представлении: а — ГР8, ГР1 со стороны хоздвора; б — ГР4, ГР6 со стороны фасада. Серым цветом отображена толщина асфальта и его гравийного основания; золотистым — толщина рыхлых отложений, объединяющая ИГЭ № 1, 1а, 2; светло-коричневым — толщина мергелей и нижележащих грунтов; красные линии — границы между грунтами с различной диэлектрической проницаемостью в толще рыхлых отложений; черные линии — границы между грунтами с различной диэлектрической проницаемостью в толще мергелей; замкнутые голубые линии — области повышенного затухания электромагнитного поля; над разрезами серым цветом показано здание бассейна



данным метода ЕП). Это отвечает известным петрофизическим и физико-химическим представлениям о про-

явлении в физических полях зон повышенной влажности, глинистости и пористости пород.

Сводная схема расположения потенциально ослабленных зон совместно с картами пространственного



**Рис. 10. Пример комплексного анализа результатов геофизических исследований:**  
 а — разрез значений модулей Юнга,  $E_0$ ; б — георадарный разрез; в — разрез значений удельных электрических сопротивлений  $\rho$ ; г — график потенциала естественного электрического поля  $U$ . Голубыми пунктирными линиями обведены: на разрезе значений модуля Юнга — участки повышенного градиента значений, на георадарном разрезе — участки повышенно затухания амплитуды электромагнитного поля, на геоэлектрическом разрезе — участки пониженных сопротивлений, на разрезе потенциала естественного электрического поля — участки локальных экстремумов потенциала; серые полосы соединяют указанные участки

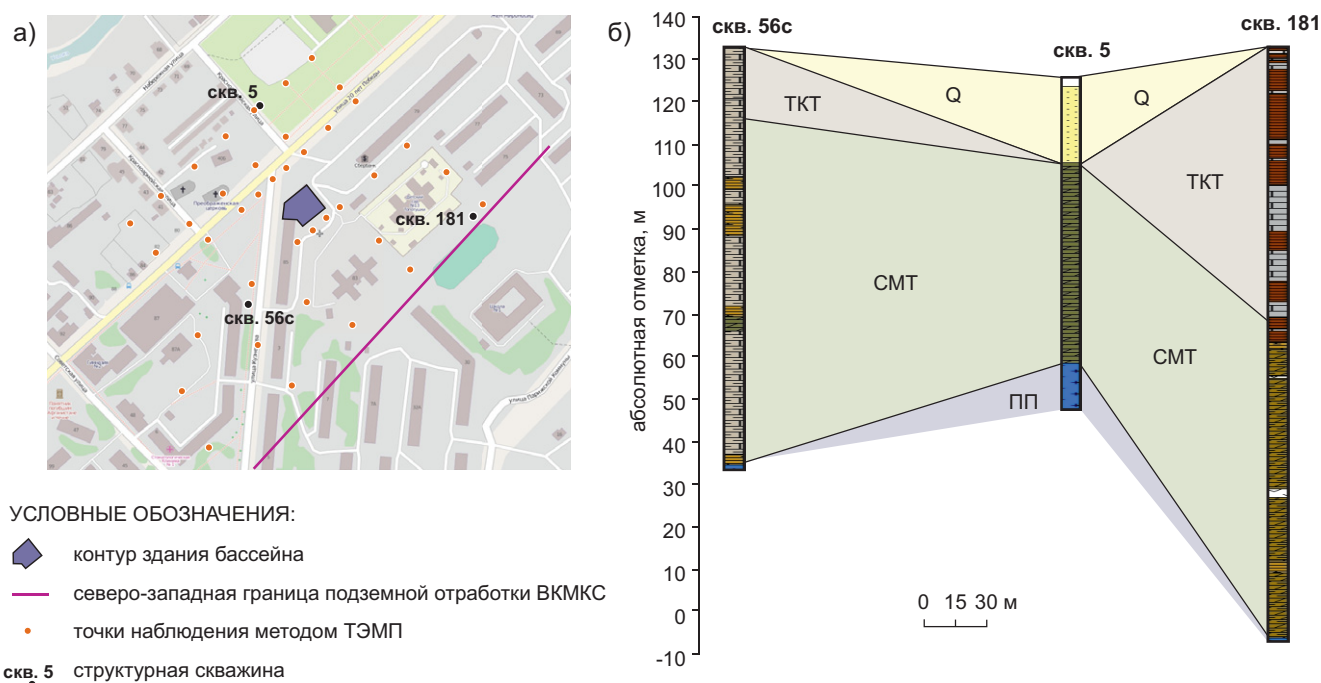


Рис. 11. Обзорная схема расположения бассейна «Дельфин» и прилегающей территории (а); геологические колонки по скважинам 56с, 5, 181 (б); Q — четвертичные отложения, ТКТ — терригенно-карбонатная толща, СМТ — соляно-мергельная толща, ПП — переходная пачка

изменения физических свойств пород указывает на наличие вертикальной и горизонтальной инфильтрации поверхностных вод в интервале глубин порядка 3–8 м. Коррелируемость от-

дельных аномальных зон в плане с местами расположения ряда коммуникаций (водоводов, канализационных коллекторов) говорит о том, что одной из возможных причин верти-

кальной фильтрации здесь могут служить утечки из них.

Метод глубинного зондирования (рис. 11, 12) с использованием техногенных электромагнитных полей выявил заметное понижение значений электрического сопротивления в глубинной части разреза (для эффективной глубины  $Z_{эф} = 58$  м), прилегающей к северо-восточной части здания. Одной из причин этого могут быть долговременные утечки в районе обследуемого здания, способствующие скоплению глубинных вод.

Внешнее и внутреннее тепловизионное обследование выявило ряд нарушений в теплоизоляции конструкций. Они в основном привязаны к углам здания, местам входа подземных коммуникаций, оконным и дверным проемам.

#### Заключение

Основные результаты проведенных изысканий в целях разработки оптимального комплекса геофизических исследований для обеспечения безопасной эксплуатации зданий и инженерных сооружений в условиях подработанных территорий сводятся к следующему.

1. Количественная оценка модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, выполненная на основе значений скоростей распростране-

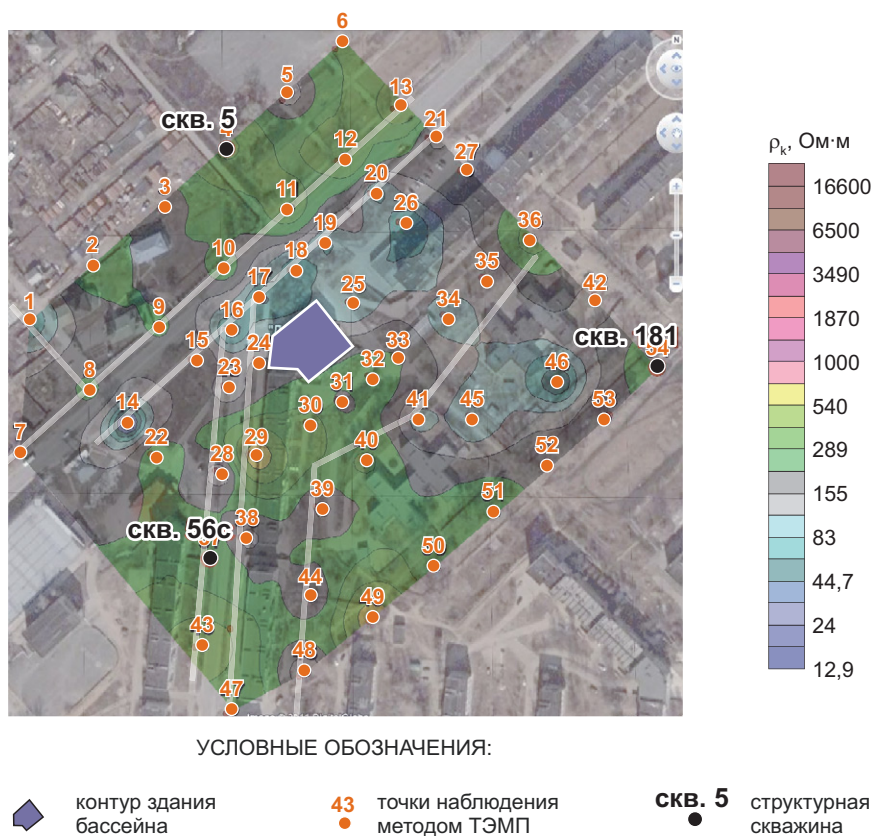
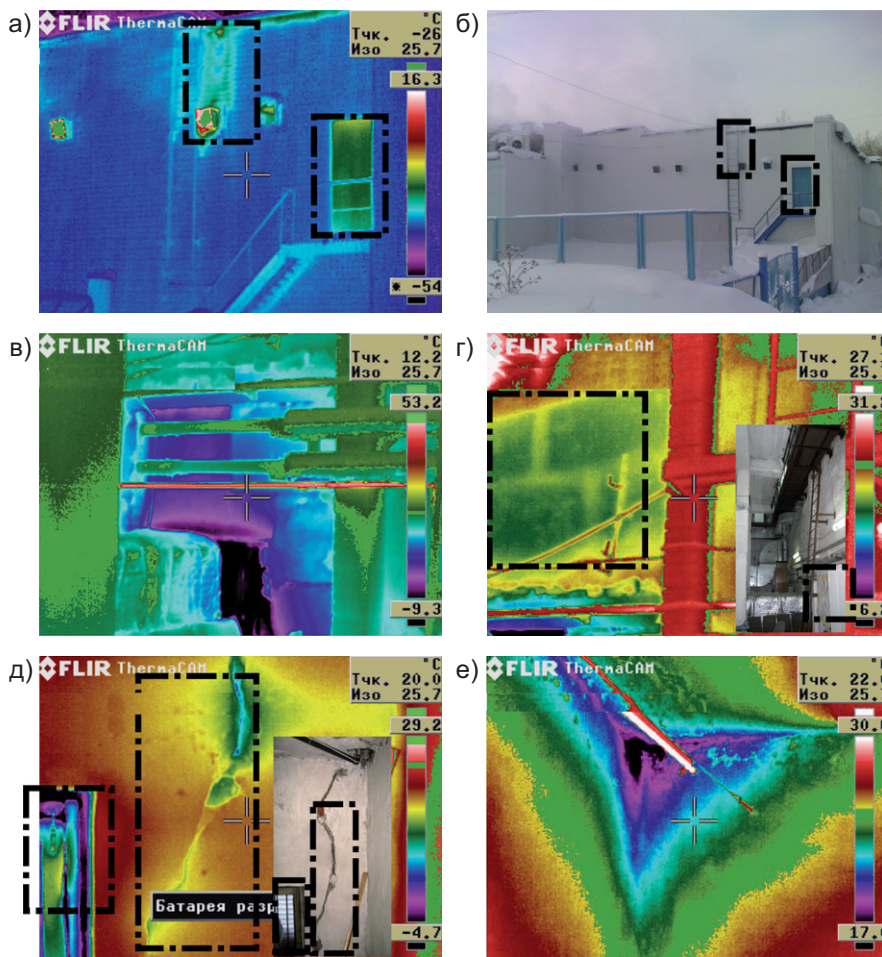


Рис. 12. Карта кажущихся сопротивлений по данным метода ТЭМП для эффективной глубины 58 м





**Рис. 13. Результаты тепловизионного обследования здания бассейна: тепловизионный снимок (ТС) дворового фасада (а); снимок того же участка в видимом диапазоне (б); ТС места входа внешних водопроводных коммуникаций в подвале (в); ТС стенки, контактирующей с промерзшим грунтом, в подвале (г); ТС области сквозной трещины на втором этаже (д); ТС места стыка бетонных плит, контактирующего с воздухом, в подвале (е). Черными штрих-пунктирными прямоугольниками обведены участки ТС, которым соответствуют те же участки на снимках в видимом диапазоне; цветовые шкалы — температура, °С; Тчк. — температура в центре ТС (отмеченном крестиком); Изо — системные настройки тепловизионной камеры**

ния продольных и поперечных волн в интервале глубин от 0 до 25 м, полученных по данным сейсморазведки, позволила выполнить картирование пространственных изменений указанных физико-механических свойств грунтов.

- Анализ результатов количественной интерпретации данных вертикального электрического зондирования с использованием результатов наблюдений методом естественного поля при изучении геоэлектрического разреза от земной поверхности до глубины 10–12 м выявил участки вероятного наличия зон разуплотнения с повышенной фильтрацией подземных вод, что указывает на вероятность развития суффозионных процессов.
- Результаты георадарного зондирования приповерхностной части

разреза до глубин 10–12 м зафиксировали наличие ослабленных, водообильных зон, сопряженных в плане с отдельными подземными коммуникациями.

- Комплексный анализ полученных разными методами материалов, показавший согласованность и взаимокоррелируемость использованных методов, послужил одним из критериев, подтверждающих достоверность полученных инженерно-геологических заключений.
- При исследовании глубинной части разреза в городских условиях весьма полезным оказался метод, основанный на использовании техногенных электромагнитных полей, который позволил получить оценочную информацию о физическом состоянии грунтов, залегающих выше нижней отметки

подработанного пространства в интервале глубин 58–225 м, и показал высокую оперативность и экономичность проведения таких наблюдений.

- Тепловизионная съемка, выполненная в зимних условиях при перепаде температур примерно от плюс 20 °С внутри здания до минус 25 °С снаружи, позволила выделить ряд нарушений теплоизоляции здания.

В заключение отметим, что полученные материалы изысканий были использованы проектной организацией для разработки плана мероприятий по обеспечению безопасности эксплуатации и надежности конструкций исследованного объекта.

### Список литературы

- Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований: материалы кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ. М.: Изд-во МГУ, 1997, 68 с.
- Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М: Научный мир, 2007. 248 с.
- Колесников В.П., Татаркин А.В., А.В. Пригара. О комплексировании методов электротометрии при решении гидрогеологических задач в условиях урбанизированных территорий на примере Верхнекамского месторождения солей // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «ИНЖГЕО-2010», г. Геленджик, 26–30 апреля 2010 г. Геленджик: Изд-во ГНЦ «Южморгеология», 2010. 248 с.
- Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. Тверь: ГЕРС, 2004. 294 с.
- Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.
- СНиП 22-01-95. Геофизика опасных природных воздействий. М.: Минстрой России, 1996.
- СНиП 11-02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Минстрой России, 1996.
- СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. М.: Госстрой России, 2004.