

УДК 550.837.76

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННО-ЗАКРЕПЛЕННЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ И СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Фоменко Николай Евгеньевич<sup>1</sup>,  
fnegeophyskohle@yandex.ru

Капустин Владимир Викторович<sup>2</sup>,  
1391854@mail.ru

Гапонов Дмитрий Александрович<sup>3</sup>,  
geophysics@land.ru

Фоменко Людмила Николаевна<sup>4</sup>,  
detush@yandex.ru

<sup>1</sup> Институт наук о Земле Южного федерального университета,  
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 40.

<sup>2</sup> ООО «НИИГеотех»,  
Россия, 110024, г. Москва, 2-я ул. Энтузиастов, д. 5, стр. 39.

<sup>3</sup> ОАО «Геострой-Ф»,  
Россия, 344064, г. Ростов-на-Дону, ул. Днепроградская, 54.

<sup>4</sup> Академия строительства и архитектуры Донского государственного технического университета,  
Россия, 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162.

**Актуальность** исследования обусловлена возрастающими требованиями к использованию объемных геофизических методов неразрушающего контроля для диагностики укрепленных посредством спецтампонажных работ грунтов основания фундаментов, где обязательным атрибутом является геофизический контроль качества упрочения в дополнение к дискретным измерениям на образцах, отобранных в специальных шурфах и скважинах.

**Цель работы:** 1) анализ физико-геологической и технической обстановки на объекте исследования с последующим составлением физико-геологических и физико-технических моделей для выбора комплекса современных геофизических технологий неразрушающего контроля и способов обработки результатов измерений с помощью специализированных обрабатывающих комплексов; 2) исследование состояния техногенно-закрепленных грунтов основания фундаментов георадиолокационным и сейсморазведочными методами в условиях длительно эксплуатируемого объекта культурного наследия регионального значения «Мемориальное здание Б. Дом Алафузова» 1880 г. в г. Таганроге.

**Методы исследования:** 1) радиолокационная съемка внутри и снаружи здания по параллельным профилям, проложенным вдоль стен на расстоянии 2,5 м друг от друга; 2) сейсморазведка методами: а) продольного профилирования с многоточечной системой наблюдений; б) сейсмопросвечивания по схеме поверхность–подвал с шагом между пунктами приема колебаний 1 м и записью сейсмограмм при времени регистрации 256 мс, частоте дискретизации 4000 Гц и развёртке 100 мс.

**Результаты.** Реализован конкретный пример постановки и решения задач контроля качества закрепления грунтов основания фундаментов геофизическими методами в условиях длительной эксплуатации строительных зданий и сооружений, а именно: 1) георадарной съемкой установлена зона закрепления грунтов по показателю  $Q$ -factor на глубину и по мере удаления от граней фундамента; 2) сейсморазведочными работами получены показатели: а) степени закрепления грунтов ( $K$ ), непосредственно возле фундамента и по мере удаления от него на расстоянии до 5 м; б) модуля деформации ( $E_{\text{деф}}$ ) грунтов возле боковых кромок фундамента и на удалении от них на расстоянии до 5 м; в) скоростей распространения упругих волн в закреплённом грунте в горизонтальном сечении под подошвой фундамента. Результаты выполненных исследований проанализированы на предмет совершенствования комплекса малоглубинных геофизических методов. С этой целью произведен краткий обзор отечественных и зарубежных публикаций по малоглубинной геофизике на строительных и археологических объектах.

### Ключевые слова:

Показатель закрепления грунтов основания фундаментов, георадиолокационный профиль, разрезы атрибута  $Q$ -factor, сейсмические профили, распространение упругих волн вблизи и на удалении от стен.

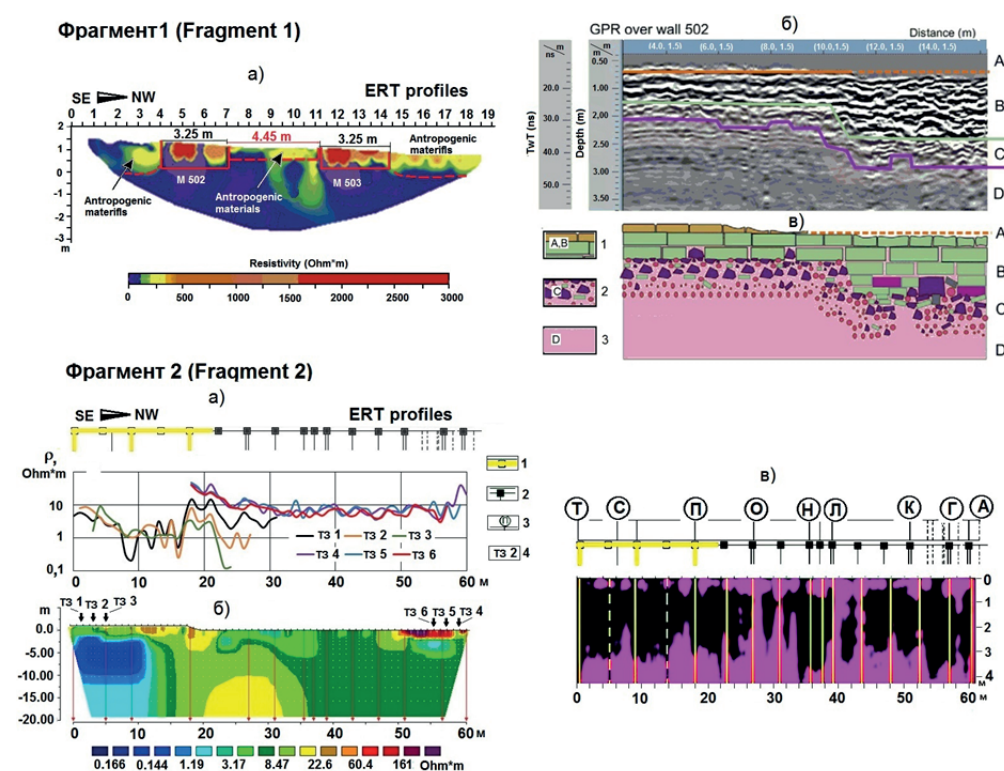
### Обзор состояния проблемы

Актуальность проведенных исследований обусловлена возрастающими требованиями к использованию объемных геофизических методов неразрушающего контроля для диагностики укрепленных посредством спецтампонажных работ грунтов основания фундаментов, где обязатель-

ным атрибутом является геофизический контроль качества упрочения в дополнение к дискретным измерениям на образцах, отобранных в специальных шурфах и скважинах. При этом следует подчеркнуть, что оценка качества закрепления грунтовых массивов является довольно сложной задачей и поэтому полученные результаты представля-

ют определенный научный и практический интерес. С их учетом ниже приведен локальный аналитический обзор по совершенствованию существующих и разработке новых прогрессивных технологий малоглубинной геофизики. На первый план, соответственно, выдвигается решаемая проблема по контролю геофизическими методами качества закрепления неустойчивых, преимущественно просадочных грунтов. В последние годы научные публикации на эту тему в отечественных журналах посвящены в основном использованию метода радиолокационного зондирования (РЛЗ), как одного из наиболее современных и легко реализуемых в полевых условиях с получением качественных визуальных результатов в режиме реального времени [1–6]. В зарубежных источниках приме-

нению георадарных съемок также придается большое значение. Многочисленными примерами, включая изучение памятников архитектурного наследия, показано, что результативность РЛЗ при благоприятных физико-геологических условиях – это прежде всего эффективная визуализация локальных природных и техногенных объектов, присутствующих в разрезах верхней части земной коры [7–9]. В более сложной физико-геологической обстановке, в основном в низкоомных средах, обусловленных повышением влажности, присутствием глинистых отложений и др., при анализе данных РЛЗ применяют специальные приемы обработки. Используются основные принципы комплексирования и комплексной интерпретации. Поясняющей иллюстрацией является рис. 1, на

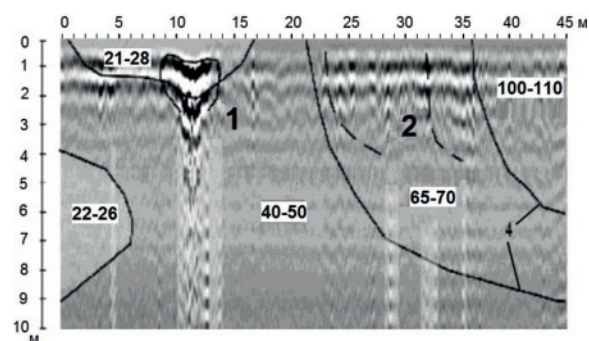


**Рис. 1.** Результаты комплексных электроразведочных работ методами электротомографии и георадиолокации при исследовании: культурного памятника Сайт Сегеда I на северо-востоке Испании (Фрагмент 1); на участке свайного поля легкоатлетического манежа на стадионе «Труд» в г. Ростове-на-Дону (Фрагмент 2). Фрагмент 1: а) геоэлектрический разрез 2D-ERT с использованием гибридной установки Веннера-Шлюмберже (40 электродов с интервалом 0,5 м); б, в) радарограмма внутренней структуры (б) и инженерно-геологический разрез (в) стены 502 в относительно высокоомном грунте (1 – кирпичный фундамент, 2 – валунно-галечный слой, 3 – песчано-суглинистый грунт); Фрагмент 2: а, б) кривые электропотенциального томографического зондирования в форме электропрофилирования (а) и геоэлектрический разрез 2D, полученный в программе Res2DInv (б) вдоль свай, перекрытых ростверками и фундаментной плитой; (1 – фундаментная плита, 2 – ростверк, 3 – обозначение свай в грунте, 4 – точки электропотенциального томографического зондирования); в) радарограмма свайных конструкций в низкоомном грунте, выраженная показателем атрибутов волнового поля

**Fig. 1.** Results of complex electrical prospecting works by electro-tomography and GPR-radar methods when researching: cultural memorial Sait Segeda I at North-East of Spain (fragment 1); at the site of pile field of the track-and-field arena at the stadium «Trud» in Rostov-on-Don (fragment 2); Fragment 1: а) 2D-ERT geoelectrical section using hybrid installation Wenner-Schlumberger (40 electrodes with 0,5 m gap); б, в) radarogram of inner structure (б) and engineering geological section (в) of the wall 502 at relatively high ground (1 is the brick foundation, 2 is the boulder-pebble layer, 3 is the sandy-loam ground); Fragment 2: а, б) electric-potential tomography sounding curves in shape of electrical profiling (а) and 2D geoelectrical section obtained in Res2DInv program (б) along piles overlapped by grillages and foundation plate; (1 is the foundation plate, 2 is the grillage, 3 is the designation of the piles in ground, 4 are the points of the electric-potential tomography sounding); в) radarogram of the pile constructions into the low-resistance ground expressed by attributes index of wave field

котором, по данным анализа литературных источников, приведены фрагменты детального картирования георадарной съемкой различных фундаментных конструкций. Фрагмент А заимствован из работы [10] и поясняет эффективность РЛЗ при исследовании культурного памятника Сайт Сегеда I на северо-востоке Испании (остатки древнего города, упоминаемого в римских источниках Пиренейского полуострова, особенно кельтской войны, с 153 по 133 г. до н.э. Фрагмент Б отображает результаты РЛЗ на территории строительства крытого манежа на стадионе «Труд» в г. Ростове-на-Дону [11]. Съемка РЛЗ в обоих случаях производилась совместно с электропрофилированием-электронзондированием, что является необходимым элементом комплексирования и позволяет по полученным результатам выявлять области повышенной электропроводности. В практике РЛЗ такие случаи встречаются повсеместно, что вызывает необходимость исследований по разработке и совершенствованию новых, нестандартных приемов интерпретации данных РЛЗ и электронзондирования. К таким приемам относится программный пакет «Георадар-Эксперт», использованный при интерпретации материалов РЛЗ на стадионе «Труд» [11]. Программа основана на фильтрации сигналов волнового поля методом вейвлет-декомпозиции с коэффициентами разложения сигнала высших уровней. Разработка подобных программ – пример применения внутриметодного комплексирования.

Показательным примером внутриметодного комплексирования РЛЗ является разработка С.М. Простова и Н.Ю. Никулина [3, 4]. Авторы обращают внимание на ограниченные режимы методики георадиолокации, которые не в полной мере обеспечивают требуемую информативность при интерпретации радарограмм, не адаптированы к решению задач локализации ослабленных зон в естественных и техногенных массивах с оценкой качества их укрепления.



**Рис. 2.** Радарограмма функции  $F$  с результатами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) для расстояния  $AB=22$  м: 1 – зона интенсивного разуплотнения; 2 – трещины отрыва (по С.М. Простову, Н.Ю. Никулину, 2015 г.)

**Fig. 2.** Radarogram of  $F$  function with the results of vertical electrical sounding (VES) for spacing  $AB=22$  m: 1 is the intensive decompaction zone; 2 are the cracks of breakaway (according to S.M. Prostov, N.Yu. Nikulin, 2015)

Проведенными исследованиями показано, что с помощью разработанного алгоритма разбиения поля на элементы заданных размеров и посредством суммирования измеренных сигналов в пределах этих элементов достигается построение интегрированных радарограмм, аналогичных геоэлектрическим разрезам с определением истинной глубины зондирования (рис. 2).

В результате выполненных разработок (С.М. Простов, Н.Ю. Никулин, 2015 г.) предлагается создание георадара в одном (едином) аппаратном блоке на принципах изопараметрии, что позволит на основе двух зондовых (разнесенных по расстоянию в зависимости от частоты) устройств получать количественные показатели электропроводности среды. Отметим, что разработки и применение новых программных продуктов в рамках внутриметодного комплексирования для расшифровки данных РЛЗ проводятся и в других публикациях [9, 12]. Однако в подавляющем большинстве случаев при решении инженерно-геологических задач, включая задачи контроля и мониторинга процессов закрепления грунтов основания, оптимальным решением является применение комплекса геофизических методов, в котором совместно с РЛЗ применяются акустические и сейсмоакустические методы. Именно они позволяют получать количественные характеристики прочностных показателей, необходимых в расчетах при проектировании и в процессе строительства и реконструкции тех или иных объектов [13–15]. Основой для формирования рационального (оптимального) комплекса геофизических методов с обязательным включением сейсмоакустических является многоуровневый анализ геолого-геофизической и геолого-технической обстановок на объекте исследований с соответствующим составлением геолого-геофизических и геолого-технических моделей. Публикации такого плана приводятся в работах [16–21].

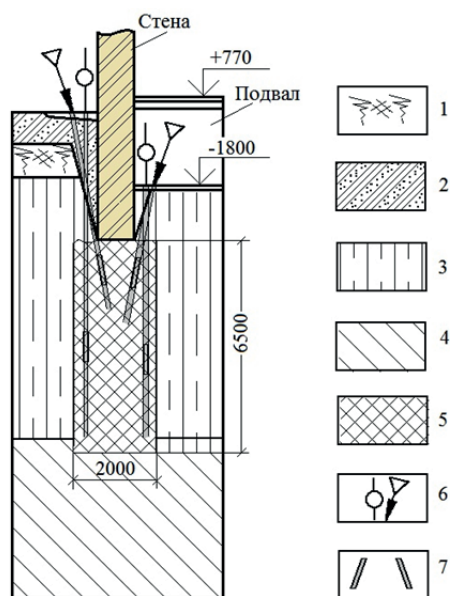
#### Характеристика объекта исследований и постановка задачи

Укрепление грунтов инъекционными способами широко применяется при строительстве объектов новых, реконструкции существующих и в условиях реставрации и поддержания старинных зданий-памятников культурного наследия. К последним относятся здания МУЗ «Городская поликлиника № 2», «мемориальное здание Б. Дом Алафузова» 1880 г. по адресу ул. Греческая, 104 в г. Таганроге Ростовской области. Первоначальная форма дома к настоящему времени изменялась два раза. В первой половине XX в. к юго-восточному фасаду особняка был пристроен двухэтажный кирпичный корпус с большим балконом по центру главного фасада. После Великой Отечественной войны этот корпус был еще раз перестроен, и уже к его новому юго-восточному фасаду добавилась еще одна кирпичная пристройка. В настоящее время здание представляет собой сблокированные между



собой разновременные постройки, имеющие историко-культурную ценность. Здание двухэтажное, кирпичное, с подвалом и многоскатной вальмовой крышей. Пространственная жесткость обеспечивается совместной работой несущих стен и горизонтальным диском междуэтажных перекрытий. Фундаменты ленточные, каменные. Стены здания толщиной 550–690 мм. Перекрытие над подвалом – кирпичные своды по металлическим прокатным балкам. Перекрытие над первым этажом по деревянным балкам в виде кирпичных сводов по металлическим прокатным балкам. Здание испытывает деформации осадочного характера, которые визуалью обнаруживаются в виде трещин в несущих и внутренних стенах здания. Известно, что перечисленные дефекты преимущественно вызываются длительной нагрузкой строений в инженерно-геологических условиях насыпных и просадочных грунтов с дополнительным воздействием локальных подтоплений [22].

Геологический разрез участка геофизических работ отображен на конструктивной схеме закрепления грунтов основания ленточного фундамента (рис. 3).



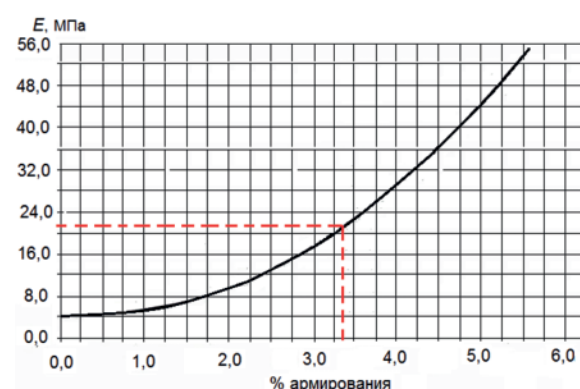
**Рис. 3.** Фрагмент конструктивной схемы закрепления грунтов основания ленточного фундамента здания МУЗ «Городская поликлиника № 2»: 1 – насыпной разнородный грунт-почва со строительным мусором; 2 – почвенно-растительный слой; 3 – суглинок легкий, пылеватый, просадочный, твердый; 4 – суглинок тяжелый пылеватый непросадочный, твердый; 5 – армированная смесь; 6 – вертикальная и наклонная сваи; 7 – инъекторы

**Fig. 3.** Fragment of constructive scheme of the banded foundation base of City hospital № 2: 1 is the bulk ground-soil with construction debris; 2 is the soil-vegetation layer; 3 is the loam light, dusty, subsidence, solid; 4 is the loam heavy, dusty, non-subsidence, solid; 5 is the reinforced mixture; 6 are the vertical and inclined walls; 7 are the injectors

Специфическими грунтами в разрезе являются техногенные (насыпные), почвенно-растительный комплекс и просадочные. Насыпные грунты пред-

ставлены неоднородным суглинистым грунтом со строительным мусором мощностью от 0,5 до 1,5 м. Почвенно-растительный комплекс имеет толщину от 0,5 до 2,1 м. Вниз по разрезу до глубины 9,9–12,70 м залегают суглинки, обладающие просадочными свойствами. Значение модуля деформации ( $E_{\text{деф}}$ ) по лабораторным определениям для них составляет 14,1 Мпа. Просадка грунтов под действием собственного веса при замачивании находится в диапазоне 7,69–14,82 см. Тип грунтовых условий по просадочности II. Наблюдается нарастающее увлажнение пород с глубиной за счет весенне-осенних дождевых осадков и снеготаяния. Подземные воды основного водоносного горизонта вскрыты на глубине 19,2–19,8 м. Амплитуда сезонного колебания уровня грунтовых вод 1,0–1,5 м.

В соответствии с приведенной на рис. 3 конструктивной схемой, армирование грунтов основания выполнено ниже подошвы фундамента до глубины от 6,0 до 7,5 м, то есть на всю просадочную толщу. Это достигается путем бурения скважин и нагнетания в них цементного раствора под давлением. После затвердения раствора происходит образование однородного по своим физико-механическим свойствам массива грунта непосредственно в основании фундаментов. Соответственно, в этом массиве прочностные показатели закрепленного основания регламентируются количеством нагнетаемого в скважины вяжущего (цементного или цементно-песчаного) раствора. При этом модули деформации армированного основания задаются проектом таким образом, чтобы снизить осадку основания и крен здания до допустимого уровня. В данном случае предельно допустимый модуль деформации задан (обозначен) в проекте показателем  $E_{\text{деф}} = 22,0$  Мпа. Этот показатель соответствует деформации массива грунта закрепленного основания при условии его полного водонасыщения. Необходимый процент армирования основания фундаментов определяется по графику зависимости модуля деформации от процента армирования и составляет 3,3 % (рис. 4).



**Рис. 4.** Зависимость модуля деформации армированного грунта от процентного содержания его армирования затвердевшим цементом

**Fig. 4.** Dependence of the reinforced soil deformation modulus on the percentage of content strong cement

Следует отметить, что график, приведенный на рис. 4, получен опытным путем на многочисленных объектах посредством штамповых испытаний закрепленного массива и лабораторных исследований на образцах армированного грунта [23].

Модель объекта армирования в количественных скоростных и деформационных характеристиках представляется следующим образом:

1) на территории незакрепленных грунтов (НГ) логично считать, что осадочная толща на удалении до 5 м от граней фундамента по электрическим и скоростным свойствам незначительно отличается от грунтовой толщи, прилегающей к этим граням, если разуплотненностью последней пренебречь, учитывая её долговременную «слеживаемость». Следовательно, скорость распространения упругих продольных волн грунтов у бортов фундамента ( $V_p^{нг}$ ) можно оценить по формуле В.И. Бондарева, В.В. Писецкого для толщи песчано-глинистых грунтов выше уровня грунтовых вод (УГВ) [24]:

$$V_p^{нг} = \frac{(A_{деф} + 12)\sqrt{2(1-\nu)}}{0,154\sqrt{1-2\nu}}. \quad (1)$$

Поскольку значение модуля деформации  $E_{деф}$  для изучаемых грунтов по данным инженерных изысканий составляет 14,1 Мпа, а коэффициент Пуассона ( $\nu$ ) для дисперсных грунтов равен  $\nu=0,30$ , в результате вычислений получаем:  $V_p^{нг}=317$  м/с;

2) в зонах (полосах) *закрепленных грунтов* (ЗГ) следует учитывать, что у боковых граней фундамента и под нижней его границей осадочная толща обладает неодинаковой «способностью» к насыщению цементно-песчаным раствором. Поэтому следует ожидать повышенную степень инъекционно-упрочнения грунтов возле боковых граней фундамента и на глубину за счёт наклона части скважин в сторону фундамента с постепенным затуханием деформационных характеристик на некотором удалении от места инъекций. Другими словами, грунты, прилегающие к бортовым граням фундамента, в результате их более высокой пористости, будут испытывать насыщение в большей мере, нежели уплотнённые грунты в основании фундамента. По этим соображениям, с учетом проектного требования полного водонасыщения закрепленных грунтов, скорость распространения упругих продольных волн в них ( $V_p^{зг}$ ) следует оценивать по формуле В.И. Бондарева, В.В. Писецкого для условий залегания толщи песчано-глинистых грунтов ниже УГВ. Уравнение регрессии имеет вид:

$$V_p^{зг} = \frac{(E_{деф} + 18,9)\sqrt{2(1-\nu)}}{0,1517\sqrt{1-2\nu}}. \quad (2)$$

При расчетах коэффициент Пуассона, как и в предыдущем случае, принимаем  $\nu=0,30$ . Вычислениями получаем:  $V_p^{зг}=504$  м/с. Соотношение расчетных скоростей  $V_p^{зг}$  и  $V_p^{нг}$  принимаем как *коэффициент закрепления* грунта ( $k$ ), который в данном случае равен  $k=1,6$  и который можно принять за

базовый количественный показатель на предмет сравнения модельной картины, закрепленной инъекциями грунтовой толщи, с фактической.

*Объектом исследований* являлся анализ физико-геологических и физико-технических моделей для выбора и применения оптимального комплекса объемных геофизических методов при решении поставленной задачи по контролю качества закрепления грунтов под длительно эксплуатируемым мемориальным зданием культурного наследия «Дом Алафузова», 1880 г. по адресу ул. Греческая, 104 в г. Таганроге Ростовской области с охватом трех участков площади инъектированных (армированных) грунтов основания ленточного фундамента.

*Цель работ* состояла в составлении базового трафарета-примера постановки и решения задач контроля качества закрепления грунтов основания фундаментов геофизическими методами в условиях длительной эксплуатации строительных зданий и сооружений посредством применения георадиолокационного и сейсморазведочного методов. Последние относятся к экспрессным, позволяющим, в отличие от дискретного точечного бурения, производить непрерывные площадные наблюдения при их относительно низкой стоимости и неразрушающем воздействии.

#### Методика работ

Первоначально исследовались геоэлектрические и сейсмогеологические условия участка геофизических работ посредством составления и многоуровневого анализа трех типов физико-геологических и физико-технических моделей. Первой моделью эмитировалась верхняя часть покровных отложений незатронутых техногенным воздействием, второй – та же толща осадков с локальными подземными включениями типа фундаментов. В третьей модели рассматривались инъекционно обновленные грунты с присутствием в них строительных подземных конструкций.

Исследование первой модели выполнялось на основе представлений об инженерно-геологических разрезах с нарастающим увлажнением осадочной толщи с глубиной, приводящим к сильному затуханию скоростей распространения как электромагнитных, так и сейсмоакустических волн. Исследование второй и третьей моделей осуществлялось с учётом известных сведений о резкой дифференцируемости физических свойств подземных строительных конструкций по отношению к вмещающему грунту [24].

Полевые работы, включающие РЛЗ, сейсморазведку методами преломлённых волн (МПВ) и сейсмопросвечивание, выполнялись в соответствии с нормативными требованиями [22, 24]. Съёмка РЛЗ произведена георадаром ОКО с антенным блоком 400 МГц. Использовался непрерывный способ перемещения последнего по заданным профилям с записью и одновременным представлением информации в форме радарограмм на дис-

плее ноутбука. Выбор интервала наблюдений определялся пространственной разрешающей способностью (минимальное расстояние по горизонтали, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали). Настройки, то есть установки параметров зондирования и записи профиля (количество точек по глубине и трасс в профиле, число накоплений, режим зондирования, шаг вдоль трассы, развертка по глубине, коэффи-

циент усиления и т. д.) задавались в соответствии с инструкцией по эксплуатации георадара и рекомендованными значениями в программе управления георадаром ОКО «GeoScan-32». Георадиолокационные наблюдения выполнялись как снаружи, так и внутри здания по трем параллельным профилям, проложенным вдоль стен на расстоянии 2,5 м друг от друга. Развертка по глубине составляла 200 нс, шаг зондирования – 50 мм, накопление

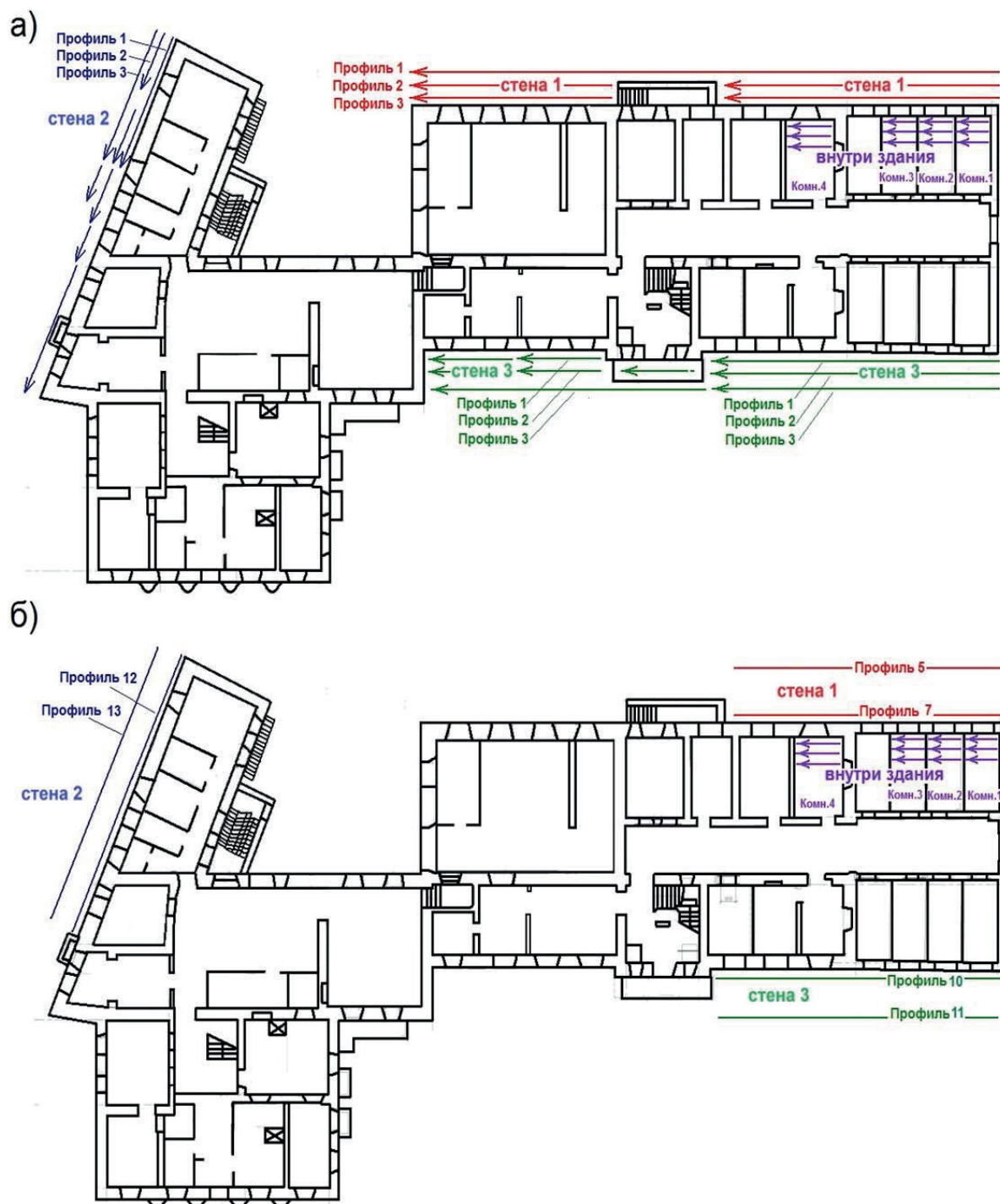


Рис. 5. Расположение георадиолокационных (а) и сейсмических (б) профилей снаружи и внутри здания

Fig. 5. Location of GPR (a) and seismic (b) profiles inside and outside the building



сигналов – 12 единиц. Схема (ситуационный план) расположения геофизических профилей, заснятых РЛЗ на исследуемом объекте, приведена на рис. 5, а. Сейсморазведочные профили размечались сопряженно с профилями РЛЗ (рис. 5, б). Первый сейсмический профиль прокладывался в непосредственной близости от стен, а второй – на расстоянии 5 м от них. Наблюдения выполнялись с использованием 24-канальной компьютеризированной сейсмостанции «Лакколит-24 М2». Профили отработаны по методикам продольного профилирования и сейсмопросвечивания [24–26]. Применена многоточечная система наблюдений (пункты удара (ПУ) возле каждого сейсмоприёмника кувалдой весом 5 кг по металлической плите). Шаг между пунктами приема колебаний (ПП) составлял 1 м.

Для производства сейсмического просвечивания под подошвой фундамента использовалась сейсмическая коса, размещенная на первом профиле у стены 1. В обязательном порядке определялись расстояния между линией сейсмоприёмников и линией удара. Регистрация колебаний при всех видах работ производилась на жесткий диск компьютера. Сейсмограммы записывались в формате SEG-Y. Время регистрации 256 мс, частота дискретизации 4000 Гц, развёртка 100 мс. Для улучшения соотношения сигнал/помеха на одно физическое наблюдение производилось по девять синфазных накоплений.

Технические условия выполнения геофизических наблюдений можно считать не весьма благоприятными вследствие влияния помех отстройки (вибрация, блуждающие токи, наличие строительного оборудования и строительных лесов, замусоренная дневная поверхность, наличие подземных коммуникаций и траншей). Рис. 6 иллюстрирует условия проведения РЛЗ (а) и МПВ (б).

Обработка данных РЛЗ осуществлялась с использованием программы автоматизированной обработки георадиолокационных данных ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ [27]. Сущность алгоритма программы в формировании набора точек, имеющих координаты и атрибуты в виде значений знаковых показателей (скорости, частоты и др.). Происходит отбраковка точек по скоростному критерию. То есть точки со значениями, превышающими скорости электромагнитной волны в вакууме, и точки с таковыми ниже минимальной скорости распространения электромагнитной волны в воде не принимаются к рассмотрению в качестве опорных и удаляются. В оставшемся поле точек для выявления различий между укрепленными грунтами и грунтами в их естественном состоянии производится анализ изменений атрибута волнового поля «Q-factor» (отношение ширины спектра сигнала к его центральной частоте). В результате строятся разрезы выбранного атрибута в 3D сборке. Относительно укрепленные и механически более крепкие зоны выделяются по признаку повышенных значе-



Рис. 6. Условия проведения РЛЗ (а) и МПВ (б) на территории размещения здания МУЗ «Городская поликлиника № 2»

Fig. 6. Conditions of conducting GRP (a) and MRV (b) at the area of Municipal polyclinic № 2 building location

ний атрибута (действительной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости).

Анализ первичных материалов сейсморазведки проводился в полевых условиях в режиме реального времени с использованием программы «Лакколит». Дальнейшая обработка проводилась с помощью специализированной лицензионной программы для обработки данных МПВ «RadExPro». Рассчитывались значения скоростей рефрагированных волн методом Герглота–Вихерта–Чибисова [28].

#### Результаты исследований

Результаты РЛЗ приведены на рис. 7, 8. Показаны сечения 3D сборки георадиолокационного обследования по профилям с наружной стороны стен 1–3 (рис. 7, а) и внутри помещения, в комнатах 1–3 (рис. 8, а). Разрезы атрибута Q-factor (отношение ширины спектра к центральной частоте

спектра отражённых сигналов по уровню 3 dB) построены на основе результатов анализа поля обратного рассеяния. Для наглядности разрезы сегментированы. Оптимальная величина сегмента для проведенного георадиолокационного исследования составила  $2,0 \times 0,25$  м (В×Ш). Радарограммы, зарегистрированные на отдельных отрезках одних и тех же профилей с разрывом менее 0,2–0,3 м, объединены. Разрыв профилей 1 и 2 возле лестницы входа в подвал (стена 1) отмечен на рис. 7, а.

Анализ приведенных на рис. 7, а; 8, а разрезов Q-factora позволяет сделать следующие выводы: 1) чем темнее сегмент, тем выше значение атрибута, достигающего величин 7–8, что соответствует наиболее укрепленным участкам (рис. 7, а; 8, а); 2) чем ближе к фундаменту располагается георадиолокационный профиль, тем больше в его разрезе сегментов, которые имеют повышенные значения атрибута, что демонстрируется на графиках

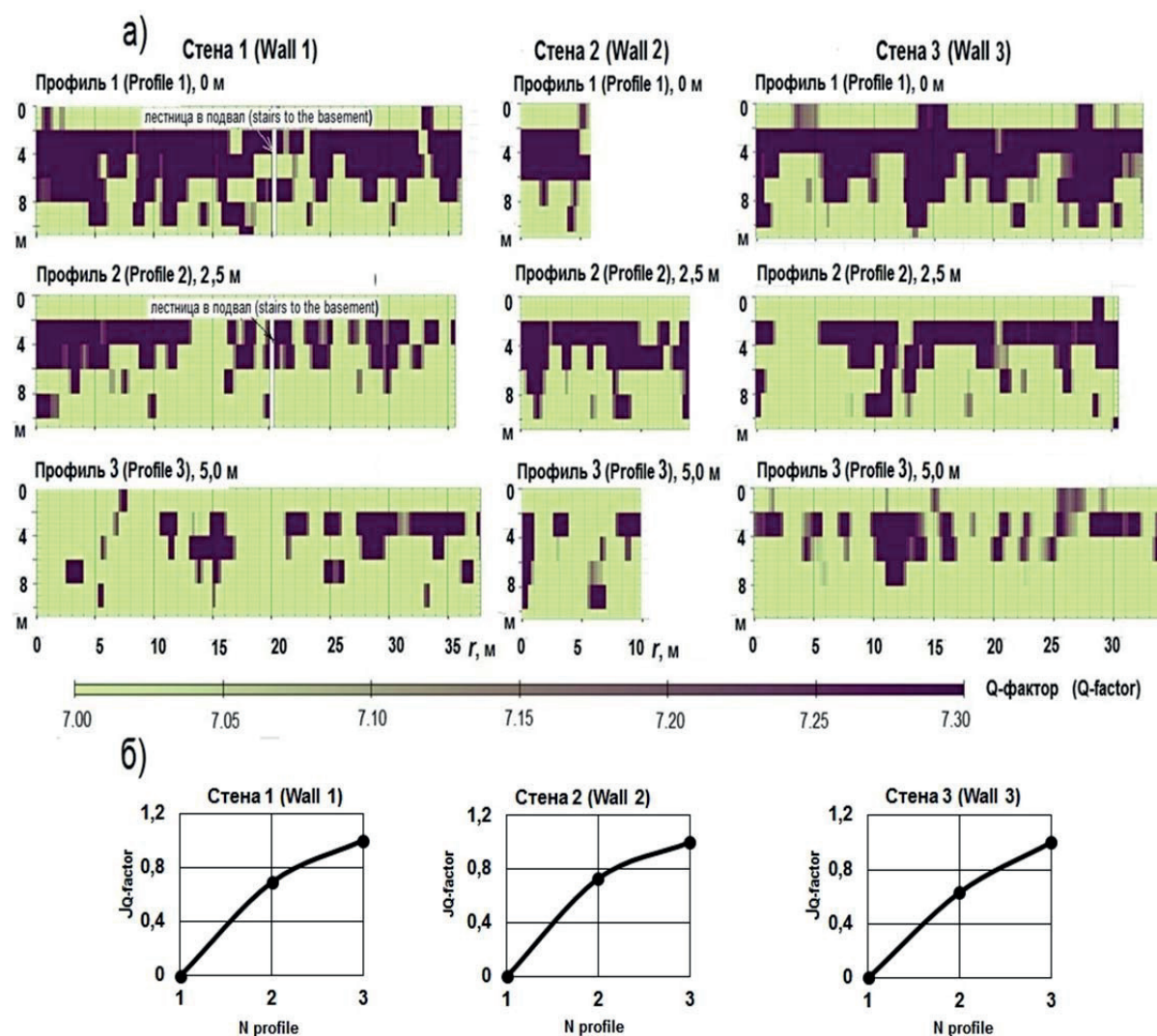
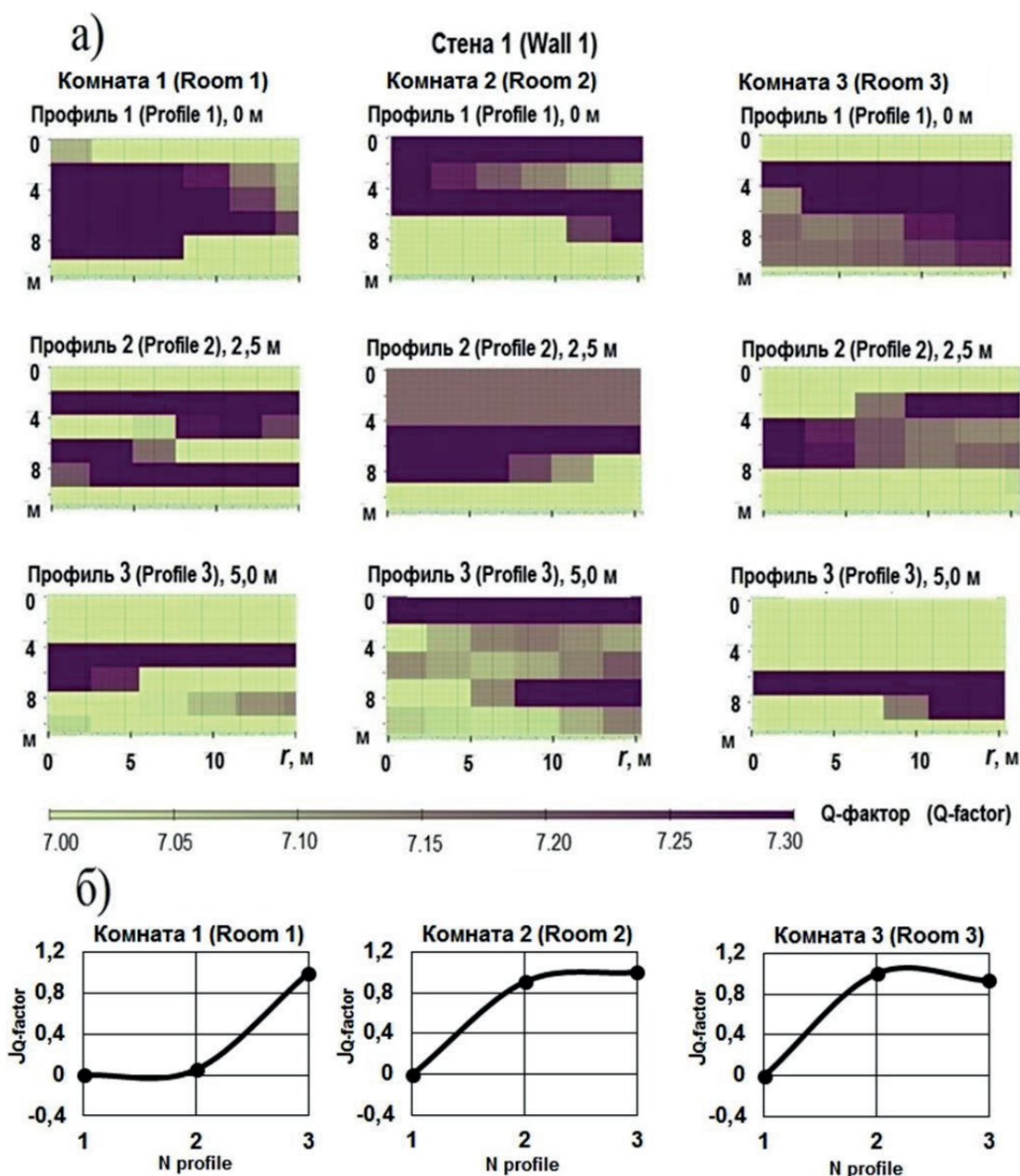


Рис. 7. Сечение 3D сборки Q-фактора с наружной стороны стен 1–3 (а) и интенсивность его затухания в относительных единицах по мере удаления от этих стен (б)

Fig. 7. Cross-section of 3D assembly of Q-factor at outer part of the walls 1–3 (a) and intensity of its attenuation in relative units as you remove from these walls





**Рис. 8.** Сечение 3D сборки Q-фактора с внутренней стороны стены 1 (а) и интенсивность его затухания в относительных единицах по мере удаления от этой стены (б)

**Fig. 8.** Cross-section of 3D assembly of Q-factor at inner side of the wall 1 (a) and intensity of its attenuation in relative units as you remove from these walls

интенсивности затухания Q-фактора (рис. 7, б; 8, б). Положение этих сегментов соответствует грунтам, находящимся ниже уровня фундамента.

Результаты сейсморазведки МПВ приведены рис. 9. Сопоставлены сейсмогеологические разрезы в изолиниях скоростей распространения упругих волн. На каждом рисунке сравниваются скоростные характеристики грунтов непосредственно возле стены и на удалении 5 м от неё. Отношение скоростей распространения упругих волн вблизи и на удалении от стен является количественным по-

казателем упрочения грунтов  $k$ . Средние значения этого коэффициента по проведенными расчетам равны 4, что характеризует надёжную степень закрепления. Поскольку скорости распространения упругих волн находятся в тесной корреляционной зависимости (при значениях корреляционного отношения  $\mu > 0,8$ ) от деформационных показателей грунтов, в частности модуля деформации ( $E_{\text{деф}}$ ), то для определения последнего использованы уравнения регрессии, приведенные в Приложении Е СП-11-105-97 [24].

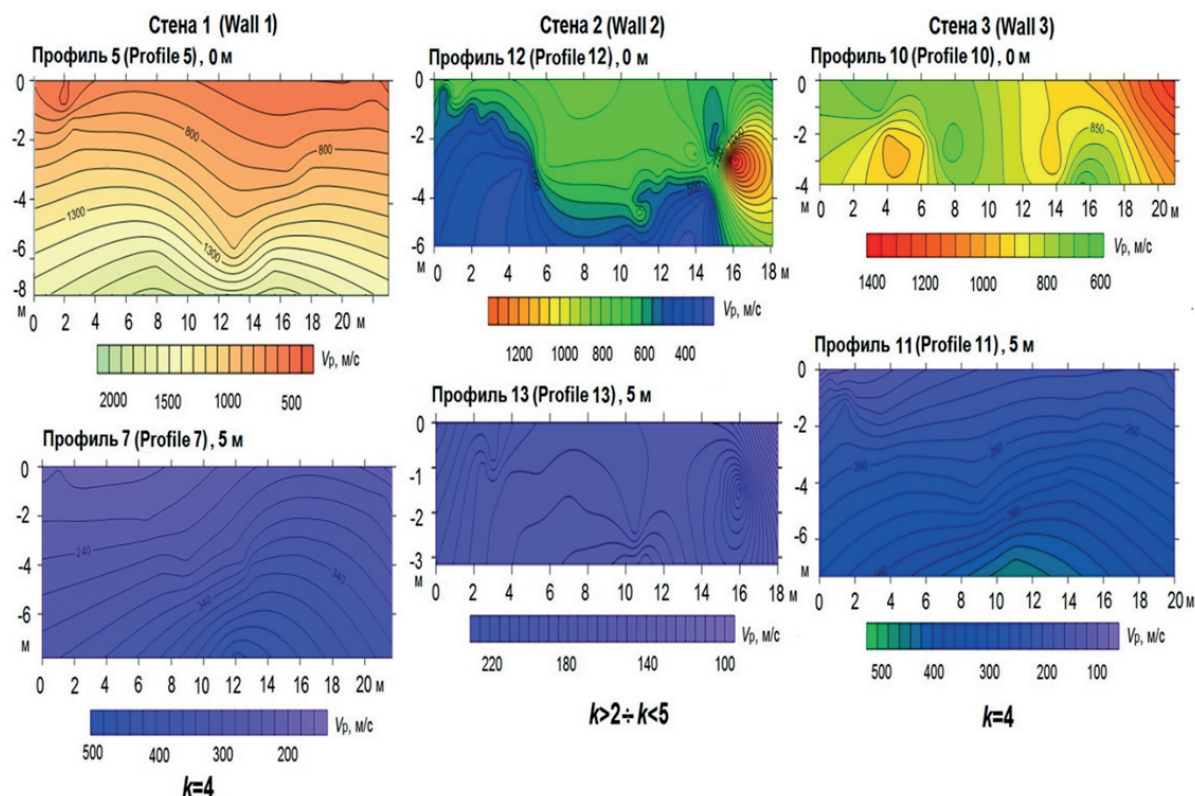


Рис. 9. Сопоставление сейсмогеологических разрезов по профилям, проложенных в непосредственной близости от стены 1 и на удалении от неё на расстоянии 5 м

Fig. 9. Matching the seismo-geological sections by profiles at close proximity from wall 1 and at five meters from it

Средние значения  $E_{\text{деф}}$  для грунтов, залегающих в местах размещения сейсмических профилей, проложенных непосредственно возле боковых кромок фундамента и на удалении от них на расстоянии 5 м, составили:

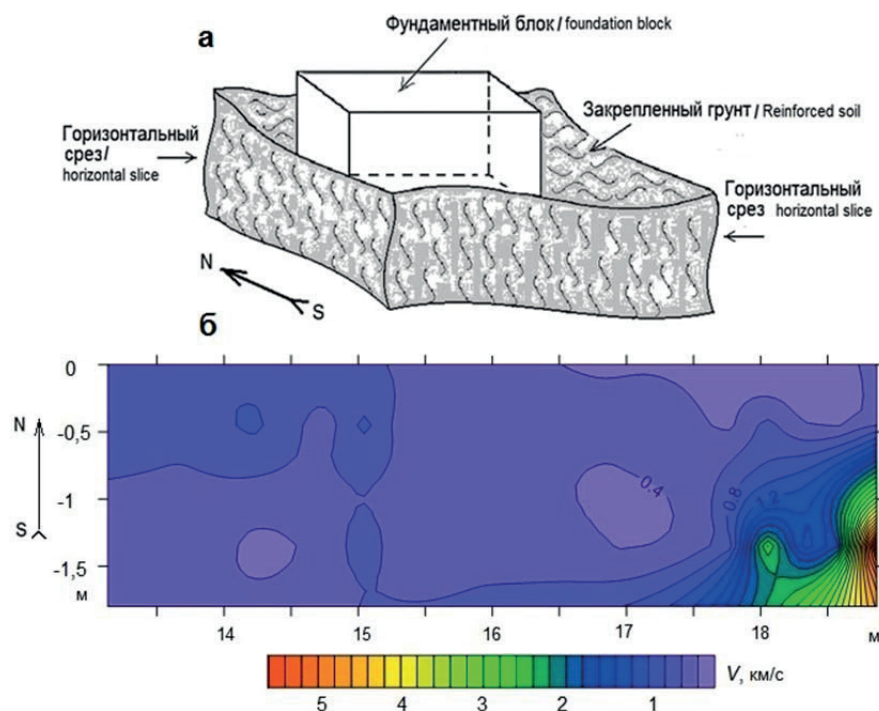
- Стена 1, профиль 5 (в непосредственной близости от стены):  $E_{\text{деф}}=95$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=1300$  м/с и  $\nu=0,30$ ;
- Стена 1, профиль 7 (на расстоянии 5 м от стены):  $E_{\text{деф}}=13$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=300$  м/с и  $\nu=0,30$ ;
- Стена 2, профиль 12 (в непосредственной близости от стены):  $E_{\text{деф}}=54$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=800$  м/с и  $\nu=0,30$ ;
- Стена 2, профиль 13 (на расстоянии 5 м от стены):  $E_{\text{деф}}=13$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=200$  м/с и  $\nu=0,30$ ;
- Стена 3, профиль 10 (в непосредственной близости от стены):  $E_{\text{деф}}=29$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=1300$  м/с и  $\nu=0,30$ ;
- Стена 3, профиль 11 (на расстоянии 5 м от стены):  $E_{\text{деф}}=4,5$  МПа при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=300$  м/с и  $\nu=0,30$ .

На рис. 10 показана томограмма горизонтального среза укрепленного основания фундамента стены 1. Картина сеймопросвечивания построена по профилю 5 в программе «LEF\_PC». Использован алгоритм лучевого приближения. Для получения входных данных были пропикированы годографы первых вступлений проходящих волн. Далее данные о временах пробега от источника к приёмнику использовались для решения обратной за-

дачи томографии. Бралась значения только по тем источникам и приёмникам, которые расположены друг напротив друга (первый источник расположен напротив 14-го приёмника, последний напротив 20-го). Значения скоростей на томограмме указаны в км/с, так как полученные времена первых вступлений зарегистрированы в миллисекундах. Шаг дискретизации модели составлял  $1 \text{ м}^2$ . Результаты сеймопросвечивания свидетельствует о квазиоднородном внедрении песчано-цементной смеси в подфундаментный грунт. Преобладающие значения скоростей распространения упругих волн в закреплённом грунте составляют 400–800 м/с, что характерно для относительно прочных грунтов [25, 26]. Среднее значения  $E_{\text{деф}}$ , вычисленное по формуле (1) при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}}=600$  м/с и  $\nu=0,30$  равно 37 МПа, что превышает предельное проектное значение в 22 МПа.

#### Заключение

Результатами комплексных инженерно-геофизических исследований (технологии РЛЗ, МПВ и сеймопросвечивания) на объекте изучения техногенно закрепленных грунтов под: зданием МУЗ «Городская поликлиника № 2» объекта культурного наследия регионального значения «мемориальное здание Б. Дом Алафузова», 1880 г. в г. Таганроге Ростовской области решены научно-технические задачи оценки информативности и оптими-



**Рис. 10.** Модель (а) и томограмма (б) горизонтального среза укреплённого основания фундамента стены 1, полученная по данным сейсмодосвечивания

**Fig. 10.** Model (a) and tomogram (b) of the horizontal section of fixed base foundation wall 1, getting by the seismic transillumination data

зации геофизических работ в конкретной геолого-геофизической обстановке. Разработана форма-трафарет составления научно-технического заключения, основой которого является создание физико-геологических и физико-технических моделей, как основы выбора рационального комплекса с последующей интерпретацией, включающей применение современных программ компьютерной обработки. Полученные результаты следующие:

1. Георадарной съёмкой подтверждён факт наличия под основанием фундаментов грунтов повышенной прочности, что прослеживается на разрезах Q-factora. Установлено, что чем ближе к фундаменту располагается георадиолокационный профиль, тем больше в этом разрезе сегментов, которые имеют повышенные значения атрибута и положение которых соответствует грунтам ниже уровня фундамента.
2. Сейсморазведкой МПВ получены количественные показатели скоростей распространения упругих волн в разрезах непосредственно возле фундамента и на удалении от него на расстоянии до 5 м. Отношения скоростей распространения упругих волн вблизи и на удалении от стен выражены показателем закрепления грун-

тов  $k$ , среднее значение которого в четыре единицы характеризует надёжную степень закрепления.

3. Сейсмодосвечиванием изучено распределение скоростей распространения упругих волн в закреплённом грунте в горизонтальном сечении под подошвой фундамента, что реализовано путём построения томограммы по алгоритму лучевого приближения. Значения скоростей распространения упругих волн в закреплённом грунте составили 400–800 м/сек, что характерно для относительно прочных грунтов. Вычисленное среднее значение  $E_{\text{деф}}$  при  $V_{\text{р}}^{\text{сред}} = 600$  м/с и  $\nu = 0,30$  составило 37 МПа, что превышает предельное проектное значение в 22 МПа.
4. Составленный комплекс геофизических методов соответствует современному состоянию отечественного и зарубежного развития технологий малоглубинной геофизики, где основой формирования рационального (оптимального) комплекса является многоуровневый анализ геолого-геофизической и геолого-технической обстановок на конкретных объектах исследований с соответствующим составлением геолого-геофизических и геолого-технических моделей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Контроль качества производства работ по закреплению грунтов основания с использованием метода георадиолокационного

подповерхностного зондирования / Л.В. Гирия, В.В. Белаш, С.В. Хоренков, К.С. Петров // Инженерный вестник Дона. – 2009. – № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056/) (дата обращения 02.02.2018).



2. Демахин А.Ю., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю. Георадиолокационное обследование состояния грунтов у фундаментов опор тепломагистрали // Проблемы недропользования – 2014. – № 1. – С. 20–23.
3. Никулин Н.Ю. Георадиолокационный мониторинг при изучении свойств закреплённого массива // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 3. – С. 7–11.
4. Простов С.М., Никулин Н.Ю. Георадиолокационный мониторинг при укреплении грунтовых оснований горнотехнических сооружений в Кузбассе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 5. – С. 11–18.
5. Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н., Шеремет Р.Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3724/ (дата обращения 02.02.2018).
6. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Вознесенский А.С. Георадиолокационная оценка качества контакта «грунт–обделка» в условиях тоннелей метрополитенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 9. – С. 157–163.
7. Rashed M., Harbi H. Background matrix subtraction (BMS): a novel background removal algorithm for GPR // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – V. 106. – P. 154–163.
8. Beben D., Anigacz W., Ukleja J. Diagnosis of bedrock course and retaining wall using GPR // NDT & E International. – 2013. – V. 59. – P. 77–85.
9. Improved high-resolution GPR imaging and characterization of prehistoric archaeological features by means of attribute analysis / W. Zhao, E. Forte, S. Tiziana, L. Michele, P.T. Gang // Journal of Archaeological Science. – 2015. – V. 54. – P. 77–85.
10. Using shallow geophysical methods to characterise the monumental building at the Segeda Isite (Spain) / G.T. Fernández, J.A. Teixidó, F. Peña, J.C. Burillo // Journal of Archaeological Science. – 2015. – V. 2. – P. 427–436.
11. Использование комплекса инженерно-геофизических методов при изучении свайного поля / Н.Е. Фоменко, В.В. Капустин, Д.А. Гапонов, Л.Н. Фоменко // Геотехника. – 2017. – № 2. – С. 56–64.
12. Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests / R. Martini, J. Carvalho, N. Barraca, A. Arède, H. Varum // Procedia Structural Integrity. – 2017. – V. 5. – P. 1108–1115.
13. Characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attribute / E. Forte, M. Pipan, D. Casabianca, R. Di Cuia, A. RivaImaging // Journal of Applied Geophysics. – 2012. – V. 81. – P. 76–87.
14. Forte E., Pipan M. Review of multi-office GPR applications: Data acquisition, Processing and analysis Research article // Signal Processing. – 2017. – V. 132. – P. 210–220.
15. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils / G. Santarato, G. Ranieri, M. Occhi, F. Fischanger, D. Gualerzi // Engineering Geology. – 2011. – V. 119. – P. 18–30.
16. Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T. Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography // Engineering Geology. – 2012. – V. 149–150. – P. 1–12.
17. Pavement testing by integrated geophysical methods: feasibility, resolution and diagnostic potential / L. Orlando, E. Cardarelli, M. Cercato, G. De Donn, L. Giambattista // Journal of Applied Geophysics. – 2017. – V. 136 (January). – P. 462–473.
18. Applications and challenges of near surface geophysics in geotechnical engineering / C.P. Lin, C.H. Lin, P.L. Wu, H.C. Liu, Y.C. Hung // Acta Geophysica Sinica. – 2015. – V. 58. – P. 2664–2680.
19. Methods of Underground Sensing. Ch. 2: Acoustic. Electromagnetic and Optical Sensing and Monitoring / W. Xiao, X. Yi, F. Pan, R. Li, T. Xia // Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure / Eds. Sibel Pamukcu, Liang Cheng. – Oxford: Publishing Academic Press, 2018. – P. 43–139.
20. Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George. Svätý Jur. Slovakia / J. Panisova, I. Murin, R. Pašteka, J. Halická, P. Milo // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – V. 127. – P. 102–111.
21. Erkan K., Jekeli C. A comparative analysis of geophysical fields for multi-sensor applications // Journal of Applied Geophysics. – 2011. – V. 74. – P. 142–150.
22. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*. Введен в действие с 20 мая 2011 г. – М.: Минрегион России, 2011. – 219 с.
23. Голованов А.М., Белаш В.В. Основные положения проектирования закрепленных цементацией массивов, служащих основанием различных зданий и сооружений // Сборник научных трудов ОАО-институт «Ростовский ПромстройНИИпроект». – Ростов-на-Дону: Изд-во ОАО-институт «Ростовский ПромстройНИИпроект», 2004. – С. 52–59.
24. СП 11–105–97. Свод правил «Инженерные изыскания для строительства». Ч. VI. Правила производства геофизических исследований. Дата введения 2004–07–01. – М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. – 52 с.
25. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – М.: Недра, 1979. – 147 с.
26. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. / под ред. Н.Н. Горяинова. – М.: Недра, 1992. – 264 с.
27. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. – 2010. – № 4. – С. 76–80.
28. Капустин В.В. Применение сейсмических и акустических технологий при исследовании состояния подземных строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. – 2008. – № 1. – С. 91–99.

Поступила 12.02.2018 г.

#### Информация об авторах

**Фоменко Н.Е.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле Южного федерального университета.

**Капустин В.В.**, кандидат физико-математических наук, технический директор ООО «НИИГеотех».

**Гапонов Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, инженер-геофизик ОАО «Геострой-Ф».

**Фоменко Л.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и вычислительной техники Академии строительства и архитектуры Донского государственного технического университета.

UDK 550.837.76

## RESEARCH OF THE TECHNOGENIC FIXED GROUNDS OF THE BOTTOM OF FOUNDATIONS BY RADAR AND SEISMIC METHODS IN CONDITIONS OF THE LONG-TERM USED OBJECT OF THE CULTURAL HERITAGE

**Nikolay E. Fomenko<sup>1</sup>**

fnegeophyskohle@yandex.ru

**Vladimir V. Kapustin<sup>2</sup>,**

1391854@mail.ru

**Dmitriy A. Gaponov<sup>3</sup>,**

geophysics@land.ru

**Ludmila N. Fomenko<sup>4</sup>,**

detush@yandex.ru

<sup>1</sup> Southern Federal Institute,  
40 Zorge street, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

<sup>2</sup> «NII Geotech» Ltd,  
5, Second street of Entuziastov, Moscow, 110024, Russia.

<sup>3</sup> Geostroy-F,  
54, Dneprogradskaya street, Rostov-on-Don, 344064, Russia.

<sup>4</sup> Don State Technical University,  
162, Sotsialisticheskaya street, Rostov-on-Don, 344022, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the growing demands to using volumetric geophysical methods of non-destroyed control for diagnostic of foundation bottom grounds fixed by special cementing works where the mandatory attribute is a geophysical control of the quality of strengthening in addition to the discrete measurements on samples taken in special pits and wells.

**The aim of the research:** 1) analysis of physic-geological and technical situation on the research object with subsequent composing of physic-geological and physic-technical models for choosing the complex of modern geophysical non-destructive control technologies and methods of measurement results processing by using specialized processing complexes; 2) research of condition of technogenic fixed grounds of foundation bottom by GPR-radar and seismic methods in conditions of the long-term used object of the cultural heritage of the regional importance «Memorial building B.Dom Alfuzova», 1880, Taganrog.

**Methods of research:** 1) GPR-radar survey inside and outside the building by parallel profiles laid along the walls on distance of 2,5 m from each other; 2) seismic survey by the methods: a) longitudinal profiling with many-point system of observations; b) seismo-translucency by the scheme of surface–basement with step between fluctuation receiving points 1 m and record of seismograms with the time of registration 256 ms, sampling frequency 4000 Gz and the evolvent 100 ms.

**Results.** The authors have implemented the specific example of setting and resolving the tasks of the quality control of the grouting of foundation bottom using geophysical methods in conditions of long-term exploitation of buildings and structures, and namely: 1) the zone of grouting by Q-factor index on depth and as you move away from the faces of the foundation was determine by the GPR-radar survey; 2) the data on the: a) degree of grouting (K), right next to the foundation and as you move away from it at distance to 5 m; b) deformation module ( $E_{det}$ ) of grounds near the side edges of foundation and away from them at distance to 5 m; v) distribution speed of the elastic waves into the grouting at horizontal section under foundation bottom, were obtained by seismic works. The results of research were analyzed on improvement of the complex of shallow depth geophysical methods. For this purpose the authors carried out the short review of domestic and foreign publications by shallow depth geophysics at building and archeological objects.

### Key words:

Index of grouting foundation bottom, GPR-radar profile, sections of Q-factor attribute, seismic profiles, propagation of elastic waves near and at distance from walls.

### REFERENCES

1. Giryа L.V., Belash V.V., Khorenkov S.V., Petrov K.S. Quality control of the conducting works by grouting of basis using georadar subsurface sounding method. *The engineer's messenger of the Don*, 2009, no. 4. In Rus. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056/) (accessed 02 February 2018).
2. Demakhin A.Yu., Zaporozhets D.V., Diakov A.Yu. GPR-radar survey of the soils conditions near the foundations of the heating main supports. *Subsoil use problems*, 2014, no. 1, pp. 20–23. In Rus.
3. Nikulin N.Yu. GPR-radar monitoring when studying the properties of a fixed array. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2013, no. 3, pp. 7–11. In Rus.
4. Prostov S.M., Nikulin N.Yu. GPR-radar monitoring during grouting of mining structures foundations in Kuzbass. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2015, no. 5, pp. 11–18. In Rus.
5. Gaponov D.A., Fomenko L.N., Sheremet R.D. The of GPR application for controlling the quality of soil fix. *The engineer's messenger of the Don*, 2016, no. 3. In Rus. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/2256/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/2256/)

- don.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3724/ (accessed 02 February 2018).
6. Nabatov V.V., Gaysin R.M., Voznesenskiy A.S. GPR-radar assessment of the quality of «soil-lining» contact in the conditions of subway tunnels. *Mountain information and analytical bulletin*, 2013, no. 9, pp. 157–163. In Rus.
  7. Rashed M., Harbi H. Background matrix subtraction (BMS): A novel background removal algorithm for GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 106, pp. 154–163.
  8. Beben D., Anigacz W., Ukleja J. Diagnosis of bedrock course and retaining wall using GPR. *NDT & E International*, 2013, vol. 59, pp. 77–85.
  9. Zhao W., Forte E., Tiziana S., Michele L., Gang P.T. Improved high-resolution GPR imaging and characterization of prehistoric archaeological features by means of attribute analysis. *Journal of Archaeological Science*, 2015, vol. 54, pp. 77–85.
  10. Fernández G.T., Teixidó J.A. Peña F., Burillo J.C. Using shallow geophysical methods to characterise the monumental building at the Segeda Isite (Spain). *Journal of Archaeological Science*, 2015, vol. 2, pp. 427–436.
  11. Fomenko N.E., Kapustin V.V., Gaponov D.A., Fomenko L.N. Using engineering geophysical method complex at pile field research. *Geotekhnika*, 2017, no. 2, pp. 56–64. In Rus.
  12. Martini R., Carvalho J., Barraca N., Arède A., Varum H. Advances on the use of non-destructive techniques for mechanical characterization of stone masonry: GPR and sonic tests. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 5, pp. 1108–1115.
  13. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuia R., RivaImaging A. Characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attribute. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, vol. 81, pp. 76–87.
  14. Forte E., Pipan M. Review of multi-office GPR applications: Data acquisition, processing and analysis. Research article. *Signal Processing*, 2017, vol. 132, pp. 210–220.
  15. Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Fischanger F., Gualerzi D. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils. *Engineering Geology*, 2011, vol. 119, pp. 18–30.
  16. Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T. Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology*, 2012, vol. 149–150, pp. 1–12.
  17. Orlando L., Cardarelli E., Cercato M., De Donn G., Giambattista L. Pavement testing by integrated geophysical methods: Feasibility. resolution and diagnostic potential. *Journal of Applied Geophysics*, 2017, vol. 136 (January), pp. 462–473.
  18. Lin C.P., Lin C.H., Wu P.L., Liu H.C., Hung Y.C. Applications and challenges of near surface geophysics in geotechnical engineering. *Acta Geophysica Sinica*, 2015, vol. 58, pp. 2664–2680.
  19. Xiao W., Yi X., Pan F., Li R., Xia T. Methods of Underground Sensing. Ch. 2: Acoustic. Electromagnetic and Optical Sensing and Monitoring. *Monitoring and Hazard Detection for Environment and Infrastructure*. Eds. Sibel Pamukcu, Liang Cheng. Oxford, Publishing Academic Press, 2018. pp. 43–139.
  20. Panisova J., Murin I., Pasteka R., Haličková J., Milo P. Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George. Svätý Jur. Slovakia. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, vol. 127, pp. 102–111.
  21. Erkan K., Jekeli C. A comparative analysis of geophysical fields for multi-sensor applications. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, vol. 74, pp. 142–150.
  22. SP 22.13330.2011. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01–83\** [Bases of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01–83 \*]. Date of entry 20 May 2011. Moscow, Minregion Rossii Publ., 2011. 219 p.
  23. Golovanov A.M., Belash V.V. Osnovnye polozeniya proektirovaniya zakreplennykh tsementatsiey massivov, sluzhashchikh osnovaniem razlichnykh zdaniy i sooruzheniy [The main provisions for design of cemented massifs, which serve as the basis for various buildings and structures]. *Sbornik nauchnykh trudov OAO-institut «Rostovskiy PromstroyNIIproekt»* [Collection of research papers]. Rostov-na-Donu, Rostovskiy PromstroyNIIproekt Publ., 2004. pp. 52–59.
  24. SP 11–105–97. *Svod pravil «Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitelstva»*. Chast VI. *Pravila proizvodstva geofizicheskikh issledovaniy* [Code of Regulations «Engineering Survey for Construction». P. VI. Rules for production of geophysical studies]. Date of entry 2004–07–01. Moscow, PNIIS Gosstroya Rossii Publ., 2004. 52 p.
  25. Goryainov N.N., Lyakhovitskiy F.M. *Seismicheskie metody v inzhenernoy geologii* [Seismic methods in engineering geology]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 147 p.
  26. *Primenenie seismoakusticheskikh metodov v gidrogeologii i inzhenernoy geologii* [Application of seismo-acoustic methods in hydrogeology and engineering geology]. Ed. by N.N. Goryainov. Moscow, Nedra Publ., 1992. 264 p.
  27. Denisov R.R., Kapustin V.V. Processing of the GPR data in automatic mode. *Geofizika*, 2010, no. 4, pp. 76–80. In Rus.
  28. Kapustin V.V. Application of seismic and acoustic technologies in the study of the condition of the underground building structures. *Tekhnologii seysmorazvedki*, 2008, no. 1, pp. 91–99. In Rus.

Received: 12 February 2018.

#### Information about the authors

**Nikolay E. Fomenko**, Dr. Sc., professor, Southern Federal Institute.

**Vladimir V. Kapustin**, Cand. Sc., technical director, NII Geotech Ltd.

**Dmitriy A. Gaponov**, Cand. Sc., engineer-geophysicist, Geostroy-F.

**Ludmila N. Fomenko**, Cand. Sc., associate professor, Don State Technical University.