

ТЕХНИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА. МЕТОДЫ И ЗАДАЧИ

КАПУСТИН В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва,
Россия, 1391854@mail.ru

Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

ВЛАДОВ М.Л.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва,
Россия, vladov@geol.msu.ru



Фото А.А. Чуркина

Обзорная статья

Поступила в редакцию 18.11.2020 / Принята к публикации 24.12.2020 / Дата публикации 30.12.2020

© ООО «Геомаркетинг», 2020

АННОТАЦИЯ

При возведении современных объектов и их дальнейшей эксплуатации приходится часто сталкиваться с решением довольно сложных инженерных задач, связанных с условиями взаимодействия сооружения и геологической среды. В статье рассматривается возможность использования геофизических методов, зарекомендовавших себя при проведении инженерно-геологических изысканий и геотехническом обследовании сооружений. Рассмотрены общие вопросы диагностики строительных конструкций и варианты решения конкретных задач при их обследовании. Среди объектов рассмотрения буронабивные сваи, ограждающие конструкции котлованов и массивы закрепленных грунтов, созданных по jet grouting — технологии. Для решения задач контроля качества этих сооружений используются варианты сейсмоакустических методов. Основными критериями при обследовании являются однородность конструкции и соответствие прочностных характеристик материала сооружения техническому заданию на ее изготовление. При обследовании фундаментных плит используется комплекс геофизических методов: ультразвуковые, акустические и георадарные. Основными задачами, решаемыми при обследовании фундаментных плит, являются определение толщины, распределения прочности бетона, оценка контактных условий, наличия дефектов, характера армирования. Важной задачей является контроль качества заобделочного пространства строящихся и эксплуатируемых тоннелей. Для оценки состояния контакта обделки с вмещающим грунтом выполняется анализ динамических параметров акустического отклика колебательной системы. В качестве определяемых параметров используются добротность, энергия нормированного сигнала, средневзвешенная частота, площадь нормированного спектра. Кроме диагностики вышеперечисленных сооружений, в статье рассмотрена задача оценки влияния полей динамических напряжений на грунты и сооружения. В заключительной части статьи рассмотрены некоторые особенности технической геофизики и отличие ее от традиционных геофизических методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Строительство; конструкция; закрепленные грунты; контроль качества; диагностика; геофизические методы; методика; модель объекта; свая; стена в грунте; фундамент

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Капустин В.В., Владов М.Л., 2020. Техническая геофизика. Методы и задачи. Геотехника, Том XII, № 4, с. 72–85, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85>.

TECHNICAL GEOPHYSICS. METHODS AND TASKS

VLADIMIR V. KAPUSTIN

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; 1391854@mail.ru

Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia

MIKHAIL L. VLADOV*

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; vladov@geol.msu.ru

Review paper

Received 18 November 2020 / Accepted 24 December 2020 / Published 30 December 2020

© Geomarketing LLC, 2020

ABSTRACT

Construction of modern facilities and their further operation are often faced with a fairly complex engineering problems associated with the conditions of interaction between the structure and the geological environment. The article considers the possibility of using geophysical methods that have proven themselves in conducting engineering-geological surveys and geotechnical survey of structures. General questions of diagnostics of building constructions and variants of solution of concrete tasks during their inspection are considered. Among the objects under consideration are bored piles, enclosing structures of pits and massifs of consolidated soils created by jet grouting technology. Variants of seismoacoustic methods are used for these structures quality control tasks. The main criteria during the inspection are the homogeneity of the structure and compliance of the strength characteristics of the structure material with the technical specifications for its manufacture. During the inspection of foundation mats a set of geophysical methods are used: ultrasonic, acoustic and georadar methods. The main tasks to be solved during the inspection of the foundation mats are to determine the thickness, the strength distribution of concrete, the assessment of contact conditions, the presence of defects, the nature of reinforcement. An important task is to control the quality of lining space in the tunnels under construction and in operation. In order to estimate the state of contact between the lining and the surrounding ground the dynamic parameters of acoustic response of the oscillating system are analyzed. Quality factor, normalized signal energy, weighted average frequency, normalized spectrum area are used as the determined parameters. In addition to diagnostics of the above-mentioned structures, the article considers the problem of assessing the influence of dynamic stress fields on soils and structures. In the final part of the article some peculiarities of technical geophysics and its difference from traditional geophysical methods are considered.

KEY WORDS

Construction; structure; improved soils; quality control; diagnostics; geophysical methods; methodology; object model; pile; diaphragm wall; foundation

FOR CITATION:

Kapustin V.V., Vladov M.L., 2020. Technical geophysics. Methods and tasks. *Geotechnics*, Vol. XII, No. 4, pp. 72–85, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85>.

Введение

Развитие современных строительных технологий и методов проектирования способствовало созданию крупных объектов промышленного, транспортного и жилищного строительства. Возведение современных объектов и их дальнейшая эксплуатация часто сталкиваются с решением довольно сложных инженерных задач, связанных с условиями взаимодействия сооружения и геологической среды.

Во многих случаях требуется получить информацию о внутреннем строении и свойствах строительных материалов, геотехнических объектов или техногенно-измененного грунтового массива. Для решения этих задач широко применяются неразрушающие инструментальные методы.

Появившиеся в результате бурного развития техники и IT-технологий в последние несколько десятилетий высокочастотные волновые методы (электромагнитные, акустические и ультразвуковые) способствуют решению целой группы специфических задач исследования грунтов и строительных материалов. Например, методы исследований на основе высокочастотных электромагнитных волн характеризуются небольшой глубиной (1–5 м), но высокой разрешающей способностью. На основании высокоразрешающих методов исследований в настоящее время развивается отдельное направление, получившее название «техническая геофизика». Этот термин стали применять в 80-х гг. XX в., когда масштабы техногенной нагрузки на грунтовые массивы резко возросли,



возникли требования к специальной подготовке грунтов в качестве основания для больших и «тяжелых» сооружений, а также появилась техника создания заглубленных конструкций. Соответственно, возникла необходимость в развитии методов диагностики строительных конструкций (методов неразрушающего контроля).

Объектом исследования технической геофизики являются строительные конструкции, геотехнические сооружения, природные и техногенно-преобразованные грунты, а также физические поля техногенного происхождения. Высокая интенсивность техногенных полей может приводить к изменению свойств грунтов и материалов, и ускорять течение ряда неблагоприятных процессов и явлений, таких как суффозия, склоновые процессы, просадки и др. Кроме того, появлению технической геофизики способствовали ряд положений СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», устанавливающие общие технические требования и правила, состав и объемы инженерно-геологических изысканий, выполняемых на соответствующих этапах (стадиях) освоения и использования территории: разработка проектной и проектной документации, строительство (реконструкция), эксплуатация и ликвидация (консервация) предприятий, зданий и сооружений. Включение инженерно-геофизических исследований в состав инженерно-геологических изысканий для архитектурно-строительного проектирования, строительства и реконструкции объектов капитального строительства также определило развитие технической геофизики.

Методы технической геофизики используются для решения широкого круга различных задач при обследовании наземных и подземных транспортных систем, гидротехнических сооружений, нефте- и газопроводов и других линейных сооружений, зданий различного назначения и др. Многообразие возникающих задач не представляет возможным перечисление их в объеме данной статьи.

Многообразие геотехнических задач соответствует и широта подходов к их решению в спектре геофизических методов.

Данная статья посвящена рассмотрению сейсмоакустических и родственных им, по волновому представлению, подходов к методике полевых работ и обработке результатов, метода высокочастотной электрометрии — георадиолокации к решению геотехнических задач.

Даже при кратком рассмотрении методов технической геофизики становится очевидным, что при многообразии задач, наблюдается почти полное отсутствие (за редким исключением) методов, доведенных до уровня производственных технологий.

Понятие технологии требует соблюдения следующих условий:

- наличия специализированной аппаратуры;
- наличия специализированных методов обработки;
- построенной и изученной интерпретационной модели;
- наличия нормативной технической и методической документации.

Данным условиям в полной мере не удовлетворяет большинство из используемых в технической геофизике методов, за ис-

ключением разве что ультразвукового метода исследования бетона, акустического метода исследования сплошности свай и электрометрического метода определения коррозионной активности грунтов.

Наиболее сложным вопросом в разработке технологий является утверждение нормативной технической и методической документации.

Каждый отдельный раздел геофизики требует от специалиста достаточно глубоких знаний предмета изучения, а также владения основами инженерной геологии, гидрогеологии, мерзлотоведения и т.д. От специалиста, работающего в области технической геофизики дополнительно требуются эрудиция и знания в области проектирования, видов и условий работы строительных конструкций и геотехнических сооружений, сопротивления материалов, грунтоведения, механики грунтов и т.п. Методы технической геофизики применяются для изучения различного рода сооружений: это и объекты транспортного наземного и подземного строительства, жилые и промышленные здания и сооружения, гидротехнические объекты, инженерные сооружения нефтегазовой и горнодобывающей области и т.д. В каждой из этих областей существует своя узкопрофессиональная терминология, применяющаяся при описании конструкций и сооружений. Данное обстоятельство создает значительные трудности при рассмотрении материалов и результатов проведенных исследований специалистами иных направлений, в т.ч. геофизики и строительства. К примеру, контакт между сооружением и вмещающим природным массивом может называться при строительстве тоннелей метрополитена «обделка — грунт», тогда как для штольни горнодобывающих объектов он носит название «крепь — порода» и т.д.

Представленные в статье примеры применения геофизических методов при решении задач геотехники составляют часть курса под названием «Техническая геофизика», который несколько лет назад начали преподавать в Московском государственном университете (далее МГУ) имени М.В. Ломоносова. Программа учебного курса включает в себя теоретические основы, описание аппаратурно-методического обеспечения, вопросы обработки и интерпретации результатов и служит для подготовки специалистов, способных успешно работать в данном направлении.

Цель данной статьи — обратить внимание изыскателей и геофизиков широкого профиля на существование, развитие и проблемы технической геофизики.

Задачи диагностики строительных конструкций

Наиболее часто встречающиеся в строительной практике задачи диагностики строительных конструкций, решаемые с помощью методов геофизики, могут быть отображены в виде следующей схемы (рис. 1).

При обследовании строительных конструкций обычно применяется комплекс методов: ультразвуковые, акустические и георадарные. Каждый из методов имеет свои недостатки и преимущества.



Рис. 1. Задачи, решаемые при диагностике строительных конструкций

Fig. 1. Tasks to be solved when diagnosing building structures

Применение технологий, позволяющих изготавливать конструкции непосредственно в грунтовом массиве, порождает проблему контроля качества так называемых «скрытых работ», то есть контроля объектов, доступ к которым затруднен или невозможен. При исследовании подобных объектов основной задачей геофизических методов является контроль качества искусственно созданных или закрепленных массивов, который включает определение *in situ* прочностных и геометрических характеристик отдельных элементов или определение прочностных и геометрических характеристик, и сплошности массивов, создаваемых на основе выбранной технологии. Для обследования данных объектов наибольшее распространение получили волновые методы - ультразвук, сейсмоакустика, георадиолокация. В настоящее время активно внедряется термометрический метод [9].

Ниже приводится ряд примеров задач, решаемых с помощью методов и подходов технической геофизики.

Буронабивные сваи и ограждающие конструкции котлованов и их диагностика

Классическим примером может являться широко развитая за рубежом и в России технология контроля качества бетонных свай поверхностным акустическим методом (low strain impact testing, sonic, SIT). Наиболее часто применяемые схемы исследования свай волновыми методами показаны на рис. 2 [12–16, 18, 21].

В соответствии с американским стандартом ASTM-D5882–07 «Standard test method for low strain impact integrity

testing of deep foundations» в бетонных сваях сейсмоакустическим методом определяются лишь два параметра — длина и сплошность. В РФ подобный стандарт отсутствует, однако, несмотря на данное обстоятельство, метод активно развивается и применяется [6]. В методах исследования бетонных свай, использующих скважинные наблюдения, применяется ультразвук, сейсмоакустика, георадарные и недавно появившиеся термометрические наблюдения [9]. Термометрический метод основан на измерении температуры тела конструкции в процессе твердения бетона (реакции гидратации цемента). Комплекс данных методов позволяет проводить контроль качества отдельностоящих свай, свайных фундаментов, «стен в грунте», ограждений котлованов и т.п. [11, 17, 19, 20].

Струйная цементация jet grouting method и контроль качества закрепления массива по jet grouting-технологии

Для изменения свойств грунтовых массивов сейчас достаточно широко используется струйная технология, известная в большинстве стран как jet grouting method. Основной идеей струйной технологии является подземный размыв грунта горизонтальными струями из заранее пробуренных скважин с образованием полостей в грунте заданных формы и размеров, с синхронным заполнением этих полостей материалом с требуемыми свойствами и перемешиванием разрыхленного грунта с твердеющим раствором [8]. Применение данной технологии позволяет создавать техногенно-преобразованные массивы с заданными свойствами, сооружать под землей фундаменты, сваи, искусственные основания,

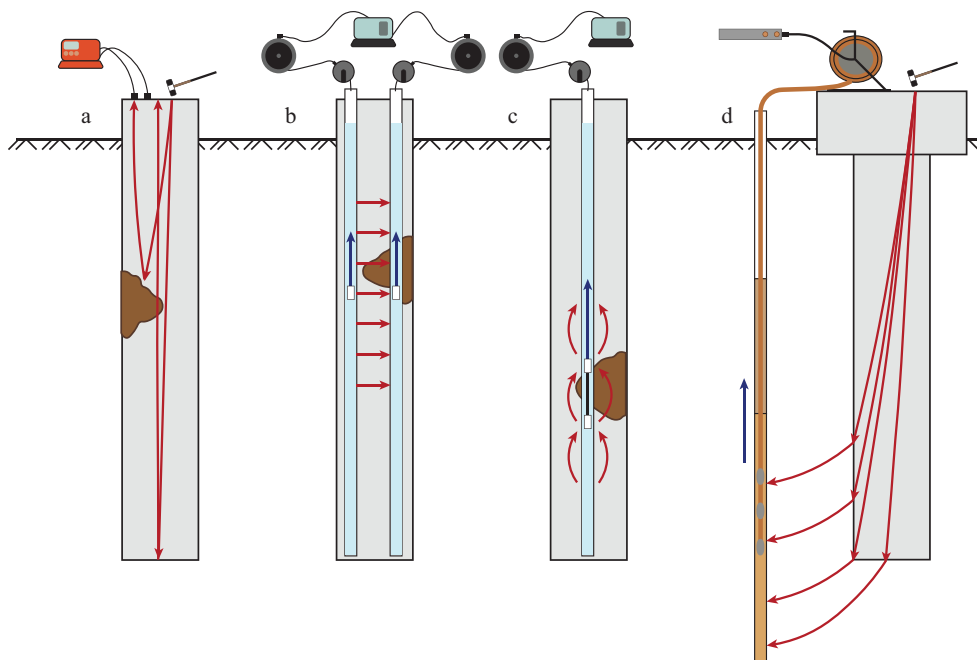


Рис. 2. Волновые методы контроля длины и сплошности свай по [7] с изменениями: а — сейсмоакустический, b — межскважинный ультразвуковой, с — однокважинный ультразвуковой, d — параллельный сейсмический. Обозначения: 1 — железобетонная свая, 2 — нарушение сплошности бетона свай, 3 — труба доступа, 4 — скважина, 5 — измерительное оборудование, 6 — ударный источник, 7 — ультразвуковые преобразователи, 8 — сейсмоприемник, 9 — траектории распространения упругих волн

Fig. 2. Wave methods of pile length and integrity control according to [7] with modifications: a — seismoacoustic, b — inter-well ultrasonic, c — single-well ultrasonic, d — parallel seismic. Designations: 1 — reinforced concrete pile, 2 — discontinuity of the concrete pile, 3 — access pipe, 4 — borehole, 5 — measuring equipment, 6 — impactor, 7 — ultrasonic generator, 8 — seismic receiver, 9 — trajectories of elastic wave propagation



Рис. 3. Устройство комбинированной ограждающей конструкции котлована на основе бетонных и грунтоцементных свай. Из фототеки авторов

Fig. 3. Construction of a combined enclosing structure of the excavation on the basis of concrete and soil-cement piles. From the authors' photo archive



Рис. 4. Провал в результате суффозионного выноса грунта в соседний котлован (г. Москва, Краснопресненская набережная). Из фототеки авторов

Fig. 4. Collapse as a result of soil suffusion into the adjacent excavation (Moscow, Krasnopresnenskaya Naberezhnaya). From the authors' photo archive

подпорные стены, горизонтальные и наклонные плиты и экраны, противофильтрационные завесы, дренажные конструкции, ограждения котлованов и пр. Возведение подземных объектов

может производиться с помощью комплексного использования буронабивных железобетонных и грунтоцементных свай, а также с помощью целого ряда других подобных технологий (рис. 3).

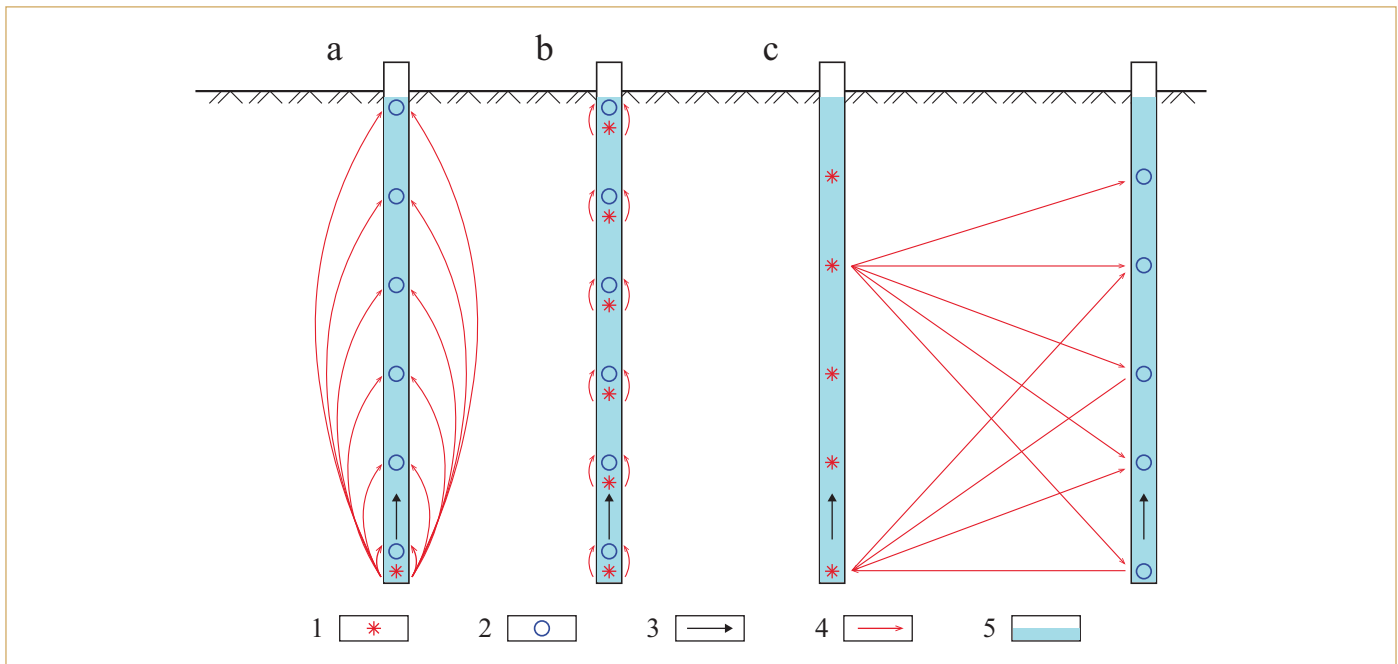


Рис. 5. Системы наблюдений и лучевые схемы при сейсмоакустическом контроле качества закрепления грунтов: а — потенциальный каротаж, б — дифференциальный каротаж, с — межскважинное просвечивание. Обозначения: 1 — источник колебаний, 2 — приемник колебаний, 3 — направление перемещения датчиков, 4 — траектории распространения упругих волн, 5 — скважина

Fig. 5. Observation systems and beam schemes for seismoacoustic quality control of stabilized soil body: а — potential logging, б — differential logging, с — crosswell acoustic measurements. Designations: 1 — wave source, 2 — wave receiver, 3 — direction of sensor movement, 4 — trajectories of elastic waves propagation, 5 — borehole

Дефекты в ограждающей конструкции котлована могут привести к серьезным авариям в результате выноса грунта в котлован, поэтому наличие дефектов должно быть установлено до начала экскавации котлована. Вынос грунта в котлован приводит также к оседанию грунта и образованию провалов за ограждающей конструкцией (рис. 4).

Необходимость наблюдения за изменением свойств грунтового массива возникает и при использовании других способов закрепления грунтов — инъецировании, цементации, химическом и термическом закреплении и т.п. Таким образом, использование технологии jet grouting также порождает проблему контроля качества «скрытых работ».

Методика контроля одиночных грунтоцементных свай и массивов была разработана в МГУ имени М.В. Ломоносова на основе скважинных сейсмоакустических наблюдений с электроискровым источником [10].

После закрепления массива и набора прочности пробуривается несколько контрольных скважин для отбора керна и его анализа в лаборатории. При производстве геофизических наблюдений скважины заполняются водой и используется электроискровой источник упругих волн и приемники давления. В зависимости от того, производятся ли каротажные наблюдения или межскважинные просвечивания (томография), излучатель и приемник размещают либо в одной скважине (рис. 5, а), либо в соседних скважинах (рис. 5, с).

В результате получают сведения о значениях скоростей распространения упругих волн в «колонне» диаметром около 3,0 м вдоль каждой скважины и в межскважинном пространстве. Затем производятся расчеты динамических упругих модулей и пересчет их в предел прочности на одноосное сжатие. При этом оценивается сплошность массива и лоцируются области слабого закрепления, если они обнаруживаются. При наличии нескольких контрольных скважин в массиве закрепленных грунтов производятся межскважинные (томографические) просвечивания.

На рис. 6 представлены примеры результата каротажных наблюдений и томографического просвечивания массива закрепленных грунтов.

Обычно для сейсмоакустического контроля закрепления массива грунтов скважины бурят «конвертом» с отбором керна через 1 м в каждой скважине для лабораторных испытаний.

Сплошность закрепленного массива означает однородное заполнение всего объема веществом, имеющим проектные свойства. Определение сплошности закрепленного массива буровыми методами довольно затруднительно, т.к. для этого необходимо проводить сплошной отбор керна по достаточно густой сетке скважин. Применение акустических методов значительно сокращает трудоемкость, а значит, и стоимость работ.

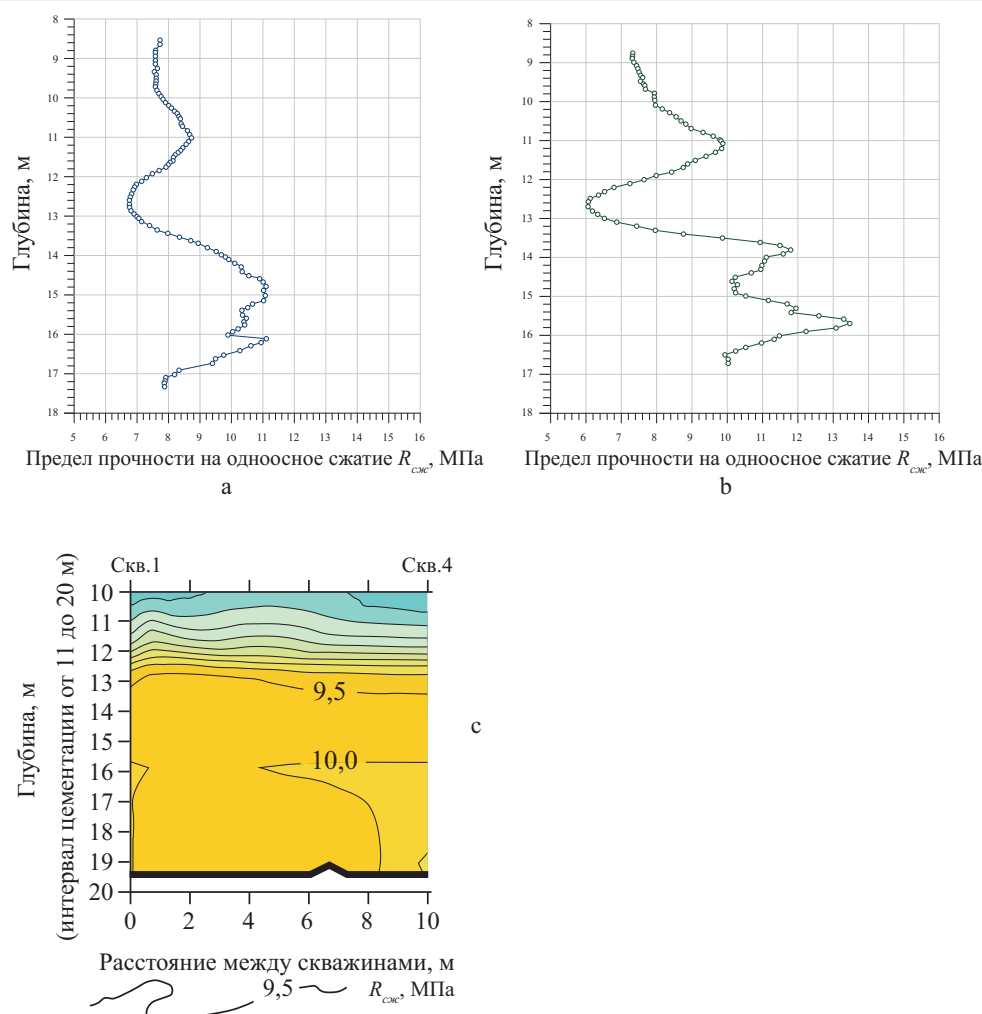


Рис. 6. Результаты расчета предела прочности на одноосное сжатие $R_{сж}$ в скв. 1 (а), то же в скв. 4 (б) и результат томографического просвечивания в створе скважин 1–4 (с)

Fig. 6. Results of calculation of tensile strength in uniaxial compression R_c in borehole 1 (a), the same in borehole 4 (b) and the result of tomographic method in the boreholes 1–4 (c)

Обследование фундаментных плит

При обследовании фундаментных плит применяется комплекс геофизических методов: ультразвуковые, акустические и георадарные. Основными задачами, решаемыми при обследовании фундаментных плит, являются определение толщины, распределения прочности бетона, оценка контактных условий, наличия дефектов, характера армирования и др. (рис. 7).

Используемые при оценке прочности бетона стандартные методы являются точечными: выбуривание и испытание кернов, отрыв со скалыванием, склерометрия, ультразвук и т.п. Получаемый при этом параметр прочности определяется свойствами небольшого объема среды и, по существу, относится к физической точке. Выполнение измерений прочностных характеристик монолитных конструкций большой площади целесообразно выполнять в два этапа: на первом оце-

нивать однородность бетона и разбивать площадь конструкции на зоны с однородным бетоном (рис. 8), а на втором этапе в пределах каждой выделенной зоны определять прочность бетона стандартными методами с минимальным количеством испытаний. В результате такого подхода может существенно снизиться трудоемкость обследования и повысится достоверность получаемых результатов [5].

Георадиолокационные исследования на фундаментных плитах проводятся для решения целого ряда связанных между собой задач. Сюда относятся: определение толщины плиты, степень ее однородности в плане и по толщине, поиск пустот под плитой, заполненных воздухом или водой, распределение мощности и однородности подготовительной отсыпки. Георадиолокационные наблюдения проводятся при перемещении антенн георадара по поверхности плиты при движении оператора пешком со скоростью около 0,5 м/с. Возможность та-

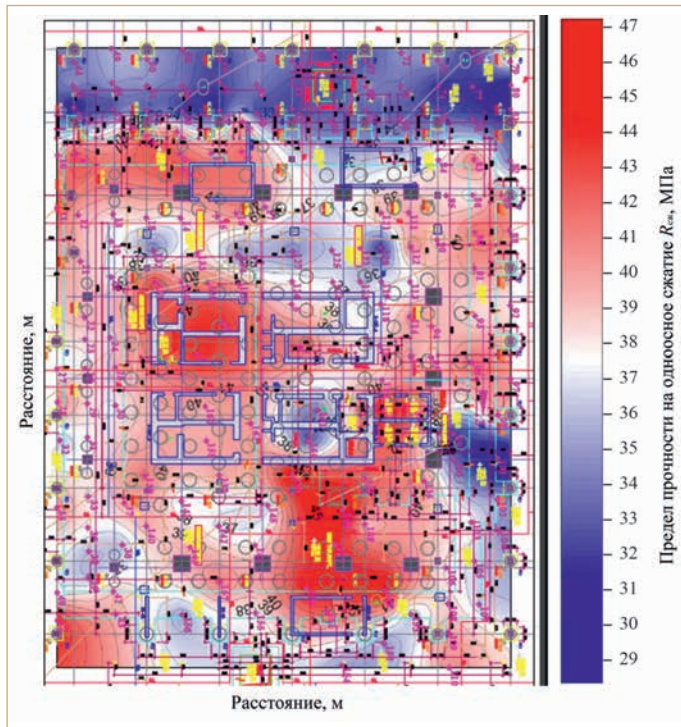


Рис. 7. Распределение прочности бетона в фундаментной плите по данным ультразвуковых и акустических наблюдений

Fig. 7. Distribution of concrete strength in the foundation mat according to ultrasonic and acoustic observations

кой скорости перемещения радара позволяет осуществлять детальную съемку фундаментных плит довольно больших размеров. Пример получаемых результатов при георадарной съемки фундаментной плиты приведен на рис. 9.

С другой стороны, связать прочностные характеристики бетона с диэлектрической проницаемостью — задача дальнейших исследований.

Контроль качества заобделочного пространства тоннелей

Среди скрытых дефектов конструкций тоннелей особую роль играют неоднородности, расположенные за обделкой тоннелей. Происхождение этих полостей, зон понижения плотности вмещающих грунтов может быть различным. Чаще всего это локальные нарушения сплошности массива связующих растворов, нагнетаемых при проходке за обделку тоннеля. На рис. 10 приведен пример георадиолокационной записи в верхней части тоннеля и фотография последующего обрушения этой части облицовки.

Этот пример важен с точки зрения ранней неразрушающей диагностики опасных процессов. В данном случае меры предотвращения обрушения приняты не были.

Нагнетание растворов за обделку тоннелей производится с целью заполнения остающихся за ней в процессе строительных работ пустот и зазоров твердеющими растворами, обес-

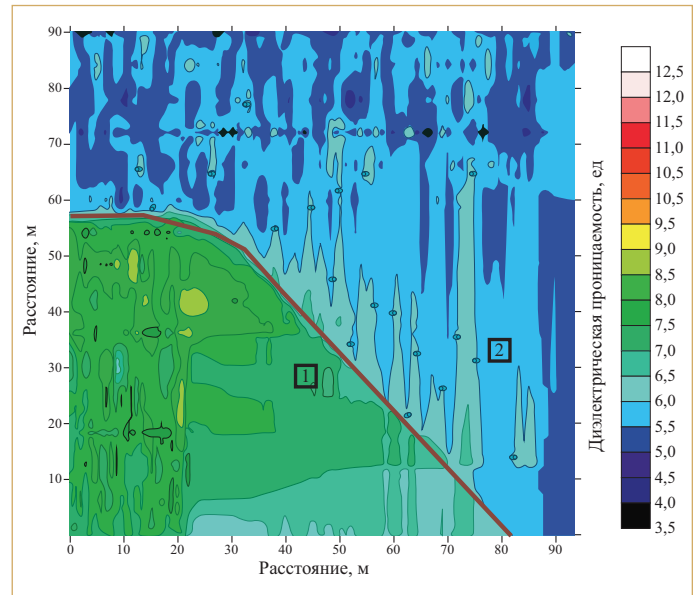


Рис. 8. Распределение диэлектрической проницаемости в относительных единицах по площади фундаментной плиты. Обозначения: 1 — зона с концентрациями неоднородностей, 2 — зона однородного бетона плиты, красная линия — раздел зон с различными концентрациями неоднородности плиты

Fig. 8. Distribution of dielectric permeability in relative units over the area of the foundation mat. Designations: 1 — zone with concentrations of inhomogeneities, 2 — zone of homogeneous mat concrete, red line — division of zones with different concentrations of mat inhomogeneities

печаивающими совместную работу обделки с окружающим грунтом.

Нагнетание растворов улучшает статическую работу, уменьшает деформации обделки, предупреждает осадки земной поверхности, обеспечивает повышение водонепроницаемости конструкций и, как следствие, уменьшает их коррозию и повышает долговечность сооружений.

Контроль качества нагнетания растворов за тоннельную обделку, относящихся к скрытым работам, должен производиться систематически на всех этапах проведения работ. Обследование конструкций тоннелей и метрополитенов включает в себя визуальное и инженерно-инструментальное обследование с проведением геофизического (сейсмоакустического) обследования заобделочного пространства тоннелей и грунтового массива и геодезическо-маркшейдерские работы согласно ГОСТ Р 57208-2016 «Тоннели и метрополитены. Правила обследования и устранения дефектов и повреждений при эксплуатации (переиздание)». В зависимости от задач, поставленных в техническом задании на обследование технического состояния транспортных тоннелей и метрополитенов, объектами исследования в соответствии с СП 120.13330.2012 «Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 (с изменениями № 1–4)», СП 122.13330.2012 «Тоннели железнодорожные и автомобильные. Актуализированная редакция СНиП 32-04-97 (с изменением № 1)» являются:

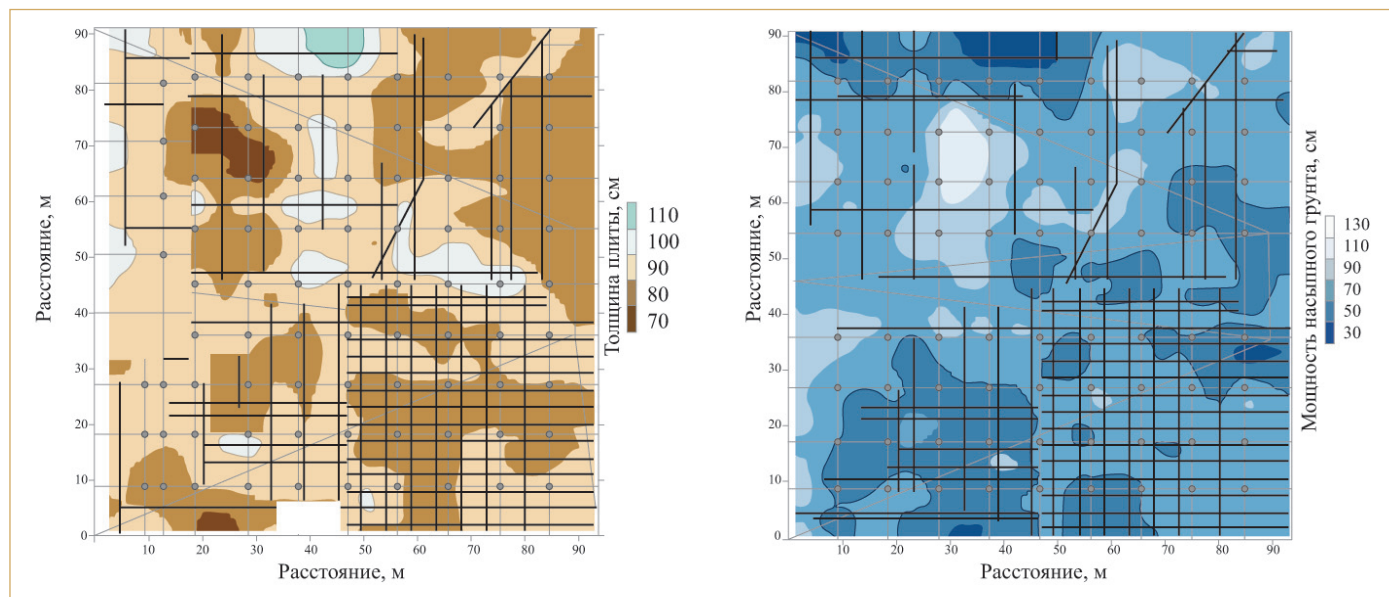


Рис. 9. Карты толщины фундаментной плиты (а) и распределения мощности насыпного грунта под ней (b)

Fig. 9. Maps of the thickness of the foundation mat (a) and the distribution of the thickness of the fill-up ground under it (b)

— обделки железнодорожных, автодорожных тоннелей, тоннелей метрополитена — перегонных и станционных притоннельных и пристанционных сооружений, пересадочных узлов, пешеходных переходов;

— конструкции вентиляционных комплексов (шахтные стволы, нижние и верхние вентиляционные коллекторы);

— внутренние несущие конструкции станционных комплексов, притоннельных и пристанционных сооружений (колонны, пилоны, прогоны, перекрытия, стены, подплатформенные коллекторы);

— конструкции подземных и надземных вестибюлей;

— заобделочное пространство сооружений (состояние контактного слоя «грунт—обделка»);

— грунт в основании сооружений и за обделками тоннелей.

Контроль качества заполнения заобделочного пространства широко применяется при строительстве тоннелей метро. При обследовании протяженных участков тоннелей рекомендуется использовать комплекс сейсмаакустических и георадарных методов. Основным методом, применяемым в настоящее время для оценки контактных условий, является акустический метод. Акустические методы позволяют оценить интегральные характеристики обделки и оценить состояние контакта между конструкциями тоннеля и заобделочным пространством. Акустический метод может применяться в двух модификациях: импакт-метод и виброакустический метод (метод регистрации изгибных колебаний). Поскольку данные методы работают в разных частотных диапазонах (виброакустический — в низкочастотном, импакт-метод — в высокочастотном) они имеют разную разрешающую способность в плане. Виброакустический метод применяется для обнаружения крупных нарушений контакта (от 1 м в плане и более) [1], импакт-метод позволяет об-

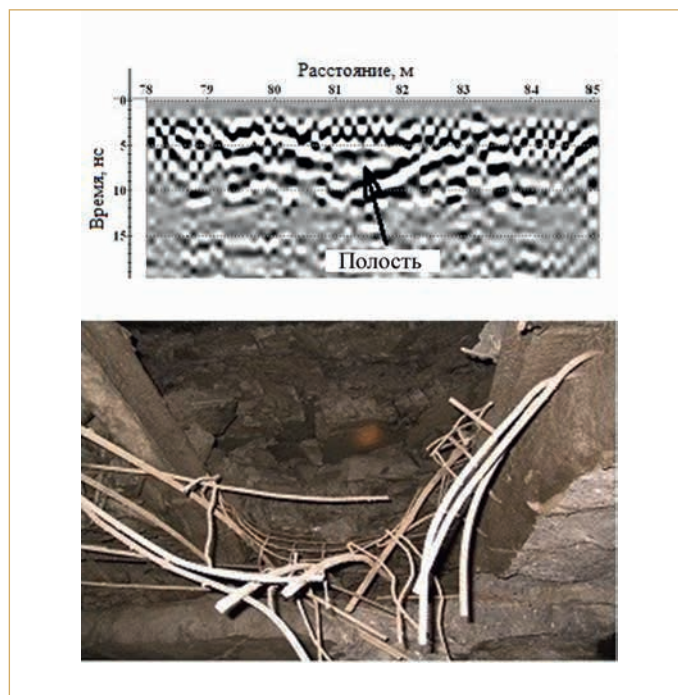


Рис. 10. Георадиолокационная запись (а) и последующее обрушение в верхней части тоннеля (шелыги) (b). Из фототеки авторов

Fig. 10. Georadiolocation recording (a) and the subsequent collapse at the top of the tunnel (b). From the authors' photo archive

наруживать дефекты, размер которых в плане составляет десятки сантиметров и поэтому используется для детальных работ.

Для оценки состояния контакта обделки с вмещающим грунтом выполняется анализ динамических параметров аку-

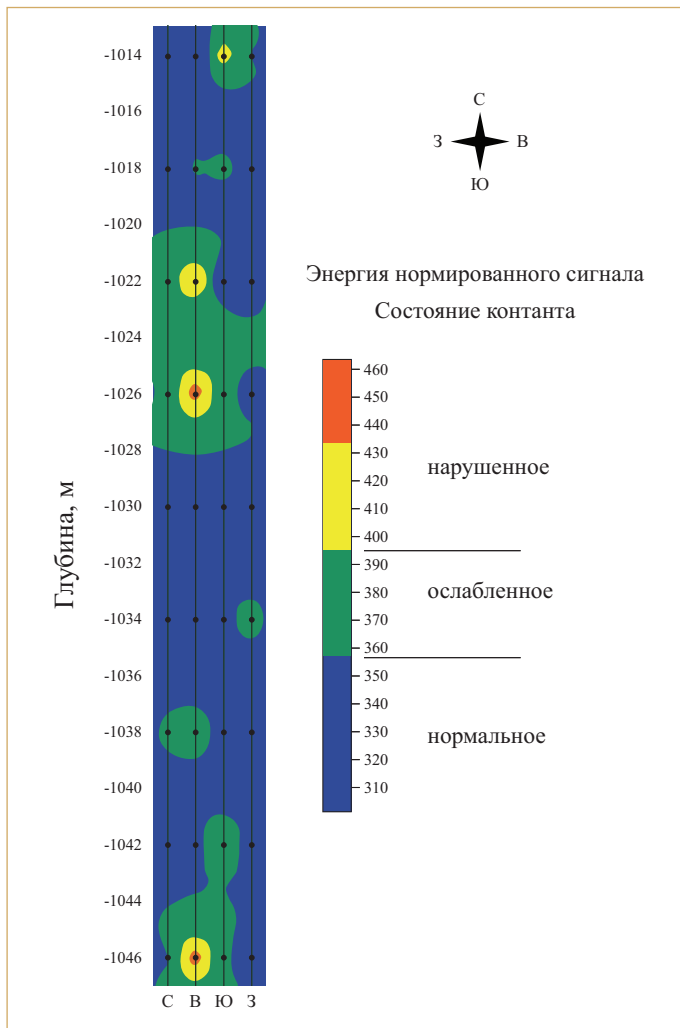


Рис. 11. Результаты обследования состояния контакта «грунт — обделка» участка вертикального шахтного ствола импакт-методом

Fig. 11. Survey results of soil-to-lining contact in a vertical shaft section using the impact method

стического отклика колебательной системы (рис. 11). В качестве определяемых параметров используются добротность, энергия нормированного сигнала, средневзвешенная частота, площадь нормированного спектра.

Оценка влияния полей динамических напряжений на грунты и сооружения

В настоящее время в рамках технической геофизики производится изучение свойств техногенных вибрационных и электромагнитных полей. Согласно п. 6.13.1 действующего в настоящее время СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», транспорт, промышленная и строительная техника рассматриваются как источник динамического воздействия, влияющий на безопасность эксплуатации грунтовых оснований сооружений.

Для определения воздействия полей динамических напряжений на грунты и сооружения и построения геотехнической мо-

дели используется комплекс наземных и скважинных сейсмоакустических методов совместно с трехкомпонентным измерением вибраций [2, 4]. Для линейных сред измерение скорости продольной V_p и поперечной V_s волн позволяет определить динамические упругие модули среды (модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона) при известной плотности.

Как известно из геотехнической практики, дисперсные грунты под действием динамических нагрузок могут проявлять следующие специфические свойства:

- увеличение сжимаемости по сравнению со статическим режимом нагружения (виброкомпрессия);
- сдвиговые деформации при длительных вибрационных нагрузках (виброползучесть);
- динамическое разжижение водонасыщенных грунтов.

Эти явления представляют серьезную опасность для возводимых зданий и сооружений из-за снижения несущей способности грунтового основания и возникновения сверхнормативных осадок. При длительном действии вибрационных нагрузок происходят не только объемные деформации — при наличии статических сдвигающих напряжений могут возникать сдвиговые деформации, имеющие характер виброползучести. Суммарные объемные и сдвиговые деформации приводят к возникновению кренов фундаментов, которые могут накапливаться на протяжении десятков лет. Следовательно, при проектировании оснований зданий и сооружений на площадках, находящихся в зонах влияния длительно действующих машин, механизмов и оборудования, которые создают вибрационное воздействие на грунтовое основание, следует учитывать дополнительную деформацию виброкомпрессии и виброползучести.

В СП 22.13330.2011 определены критерии, при превышении которых в случае наличия в грунтовом массиве динамически неустойчивых грунтов могут наблюдаться дополнительные деформации. Для длительных вибраций предельное значение виброскорости составляет 2 мм/сек, для импульсных — 15 мм/сек. Как показывает опыт проведенных наблюдений, значения амплитуд виброскорости, измеренной вблизи сооружений автомобильного и рельсового транспорта, могут достигать значений 25–50 мм/сек, что соответствует по интенсивности 4–5-балльному землетрясению [4]. Спектральный состав регистрируемых колебаний определяется, в основном, свойствами источника и грунтового массива (рис. 12, в области частот по оси ординат отложена нормированная амплитуда гармоник).

Некоторые особенности технической геофизики и отличие от традиционных геофизических методов

Для технической геофизики характерно наличие специфических геофизических задач, в частности — определение сплошности, однородности геометрических размеров, значения виброскорости (виброускорения), собственных частот колебаний и др. Особенностью физических основ задач технической геофизики является то обстоятельство, что приходится

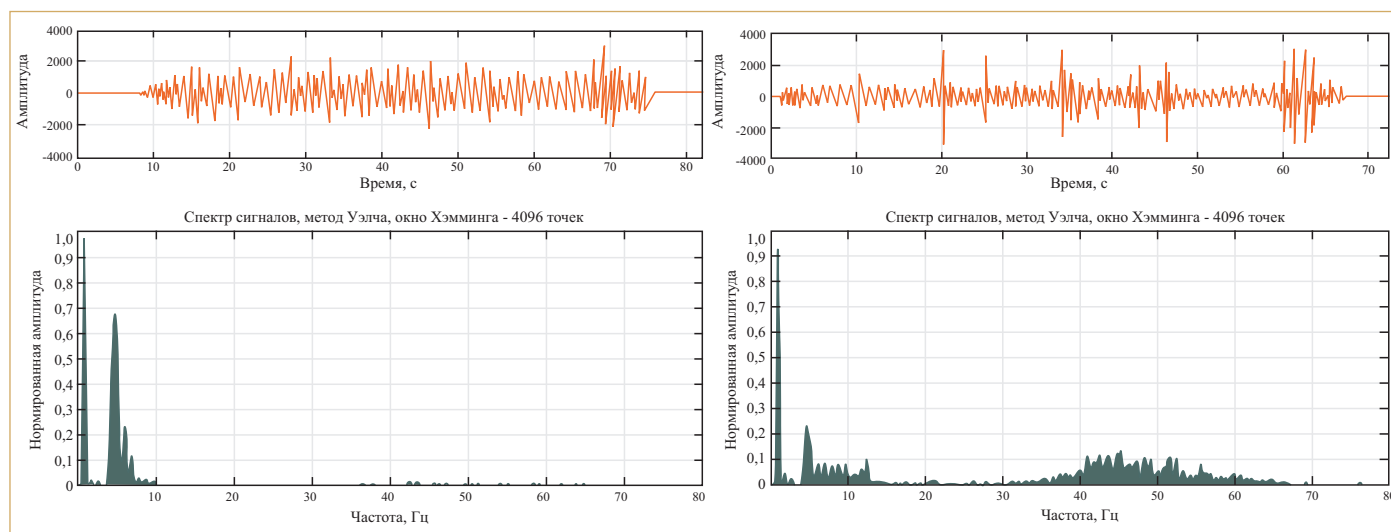


Рис. 12. Амплитуда сигнала (Z-компонента) и спектр мощности при прохождении поезда через участок неустойчивой (а) и устойчивой (б) ж/д насыпи

Fig. 12. Signal amplitude (Z-component) and power spectrum when a train passes through an unstable (a) and stable (b) sections of the railway embankment

рассматривать распространение **волн (упругих и электромагнитных) в условиях тел конечных размеров**. Данное обстоятельство приводит к заметному отличию в теории распространения волн, от классических моделей геофизики [3]. К примеру, фазовая скорость распространения плоской акустической волны в сваях и «стенах в грунте» отлична от скорости распространения в безграничном пространстве.

$$V_p = V_{Psv} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (1)$$

$$V_p = V_{Ppl} \sqrt{\frac{(1-\mu)^2}{1-2\mu}}, \quad (2)$$

где V_p — скорость акустической волны в бесконечном пространстве, V_{Psv} — скорость в свае, V_{Ppl} — скорость в «стене в грунте», μ — коэффициент Пуассона. Как видно из приведенных выражений, различие скоростей в телах и безграничном пространстве определяется функцией от коэффициента Пуассона. Распространение плоской продольной волны в свае или в «стене в грунте» в первом приближении может быть описано волновым уравнением с фазовыми скоростями соответственно V_{Psv} и V_{Ppl} . А вот волны, имеющие продольную и поперечную составляющую, уже обладают свойством дисперсии и описываются другими уравнениями, например, волны с поперечной составляющей в свае подчиняются уравнению Похгаммера-Кри.

В основе волновых методов технической геофизики лежат феноменологические теории, которые описывают наблюдаемые явления лишь частично, но во многих случаях этого достаточно для практического использования. Теория распро-

странения упругих волн строится на основе уравнений механики сплошных сред, где среда может быть описана скоростью продольных, поперечных волн (либо модулями Юнга, сдвига и коэффициентом Пуассона) и плотностью. Распространение электромагнитных волн рассматривается на основе системы материальных уравнений Максвелла, где среда задается значениями диэлектрической и магнитной проницаемости и проводимости. Для описания поведения реальных сред часто требуется использовать большее число параметров. Поэтому во многих случаях при описании волновых полей существующих в телах конечных размеров приходится делать выбор между точными решениями приближенных уравнений либо приближенными решениями точных уравнений. В связи с чем для многих задач технической геофизики приобретает большое значение использование физического и математического моделирования.

Для решения отдельных инженерных задач применяются методики, не характерные для классической геофизики. Например, основными акустическими методами обследования фундаментных плит и обделок тоннелей являются: импакт-метод, основанный на явлении «толщинного» резонанса, и виброакустический метод, основанный на наблюдении изгибных колебаний. Данные методы не применяются в сейсмической разведке.

Одной из особенностей методов технической геофизики является необходимость учета **объемного фактора при определении изучаемого параметра**.

Этот эффект известен в сейсмической разведке и даже иногда используется при разночастотных исследованиях. Однако при обследовании тел конечных размеров он приобретает первостепенное значение. Суть его сводится к тому, что любой геофизический параметр, будь то время (скорость) распро-

странения волны или иной атрибут сейсмической записи и его производные, является функцией расстояния между источником и приемником колебаний и преобладающей длины волны, которые определяют объем среды, вовлеченной в волновой процесс.

Зависимость изучаемого свойства среды от объема определяет одну из причин, по которой не удастся напрямую сопоставить данные полевых и лабораторных измерений при инженерно-геологических изысканиях.

Другой особенностью подходов технической геофизики к решению обратных задач является следующее. В большинстве случаев грунтовые массивы, с которыми приходится иметь дело, неоднородны. В то время как строительные конструкции *a priori* считаются, и должны быть таковыми — сплошными и однородными. Отсюда следует вывод, что наличие зависимости свойств от объема свидетельствует о неоднородности материала конструкции, а **мера неоднородности** позволяет сделать заключение о пригодности или непригодности данной конструкции. Например, фундаментные плиты с коэффициентом вариации более 13–16% прочностных свойств бетона могут быть непригодны для основания сооружения.

Вообще же вопрос о мере неоднородности конструкции является весьма дискуссионным. Например, коэффициент вариации говорит лишь о большем или меньшем наличии неоднородностей в интервале имеющихся величин параметра, как и другие статистические характеристики. В то же время размеры неоднородностей (а это другая статистика) и их распределение по объему никак не описываются численно. Например, на рис. 8 неоднородности сконцентрированы в левом нижнем углу, что важно в данном конкретном случае, но коэффициент вариации это не описывает. Не менее важным и нерешенным вопросом является количественное обоснование понятия «плохая — хорошая» конструкция по результатам геофизических исследований. В соответствии с данным обстоятельством од-

ним из направлений развития методов технической геофизики является определение численных критериев, позволяющих делать заключение о качестве и состоянии конструкции.

Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что весь набор геофизических методов, который можно и нужно использовать при решении задач технической геофизики, нуждается в серьезных дополнениях и адаптации к условиям строительных конструкций в их взаимодействии с природными грунтами по всем направлениям — теория, методика, аппаратура и обработка. Особое место должны занять математическое и физическое моделирование.

Есть еще один аспект, необходимый для развития любого направления и технической геофизики в том числе — развитие нормативной базы. Применение геофизических технологий на стадии строительства и эксплуатации сооружений требует создания технических стандартов, которые бы определяли порядок проведения работ и форму представления материалов. Отсутствие нормативных критериев исключает возможность убедиться в квалификации исполнителей работ и провести, при необходимости, независимую экспертизу. Данное обстоятельство во многом определяет востребованность геофизических методов.

Очевидно, что в объеме одной статьи невозможно вдаваться в подробности приспособления каждого геофизического метода к нуждам технической геофизики, невозможно перечислить все задачи проектирования, сопровождения строительства и мониторинга сооружений, где востребованы или представляются перспективными геофизические методы, а также изложить собственные подходы к решению конкретных задач. Тем не менее, если по прочтении статьи возникнут возражения, вопросы и предложения по развитию технической геофизики — цель статьи будет достигнута. 🌐

Список литературы

1. Бауков Ю.Н., 1977. Исследования возможности использования вибрационного метода для контроля качества контакта между железобетонными плитами и горной породой. Изд-во МГИ, Москва.
2. Вознесенский Е.А., Владов М.Л., Кушнарера Е.С., Коваленко В.Г., 2005. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической устойчивости грунтов в массиве. Разведка и охрана недр, № 12, с. 41–45.
3. Гринченко В.Т., Мелешко В.В., 1981. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Наукова думка, Киев.
4. Капустин В.В., 2013. Вибродиагностика состояния железнодорожных насыпей на слабых основаниях. Инженерные изыскания, № 10–11, с. 100–108.
5. Капустин В.В., Сеницын А.В., 2018. Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования. Геофизика, № 2, с. 17–23.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., 2020. Применение динамических атрибутов акустического сигнала для оценки контакта свай с вмещающими грунтами. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, № 3, с. 126–137.
7. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В., 2018. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов. Геотехника, Том X, № 5–6, с. 62–71.
8. Малинин А.Г., 2000. Применение струйной цементации в подземном строительстве. Подземное пространство мира, № 2.



9. Мухин А.А., Лозовский И.Н., Чуркин А.А., 2018. Неразрушающий контроль сплошности бетона буронабивных свай термометрическим методом. Транспортное строительство, № 10, с. 6–9.
10. Черняков А.В., Богомолова О.В., Капустин В.В., Владов М.Л., Калинин В.В., 2008. Контроль качества геотехнических конструкций, созданных методом струйной цементации. Технологии сейсморазведки, № 3, с. 97–103.
11. Чуркин А.А., Лозовский И.Н., 2020. Контроль качества «стен в грунте» геофизическими методами. Construction and Geotechnics, Том 11, № 2, с. 49–61, <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.05>.
12. Amir J.M., Amir E.I., Felice C.W., 2004. Acceptance criteria for bored piles by ultrasonic testing. Proceedings of the 7th International Conference on application of stress wave theory to piling, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
13. Amir J.M., Amir E.I., 2009. Capabilities and limitations of cross hole ultrasonic testing of piles. Proceedings of the International foundations Conference and equipment expo (IFCEE), Orlando, FL, USA, 2009, [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)67](https://doi.org/10.1061/41021(335)67).
14. Amir J.M., 2017. Pile integrity testing: history, present situation and future agenda. Proceedings of the 3rd Bolivian International Conference deep foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2017, pp. 17–32.
15. Bustamante M., Gianceselli L., Salvador H., 2002. Double rotary CFA piles: performance in cohesive soils. Proceedings of 9th International Conference on piling and deep foundations, Nice, France, 2002, pp. 375–381.
16. Camp III W.M., Holley D.W., Canivan G.J., 2007. Crosshole sonic logging of South Carolina drilled shafts: a five-year summary. Proceedings of the Geo-Denver, Denver, CO, USA, 2007, [https://doi.org/10.1061/40902\(221\)2](https://doi.org/10.1061/40902(221)2).
17. Niederleithinger E., Hubner M., Amir J.M., 2010. Crosshole sonic logging of secant pile walls — a feasibility study. Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to environmental and engineering problems (SAGEEP), Keystone, FL, USA, 2010, pp. 685–693.
18. Spruit R., van Tol F., Broere W., Slob E., Niederleithinger E., 2013. Detection of anomalies in diaphragm walls with crosshole sonic logging. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 51, No. 4, pp. 369–380, <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0204>.
19. Tian Z., Huo L., Gao W., Li H., Song G., 2017. Modeling of the attenuation of stress waves in concrete based on the Rayleigh damping model using time-reversal and PZT transducers. Smart Materials and Structures, Vol. 26, No. 10, pp. 1–10.
20. Wharmby N., Perry B., Waikato H., 2010. Development of secant pile retaining wall construction in urban New Zealand. Proceedings of the New Zealand concrete industry Conference, Wellington, New Zealand, 2010, pp. 1–8.
21. Zhi Tang Lu, Zhi Liang Wang, Dong Jia Liu, 2013. A study on the application of the parallel seismic method in pile testing. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 55, pp. 255–262.

References

1. Baukov Yu.N., 1977. Studies of the possibility of using the vibration method to control the quality of contact between reinforced concrete slabs and rocks. Publishing house of the Moscow Mining Institute, Moscow. (in Russian)
2. Voznesensky E.A., Vladov M.L., Kushnareva E.S., Kovalenko V.G., 2005. Use of seismic acoustic research data to assess the dynamic stability of soils in the massif. Razvedka i okhrana neдр, No. 12, pp. 41–45. (in Russian)
3. Grinchenko V.T., Meleshko V.V., 1981. Harmonic vibrations and waves in elastic bodies. Naukova Dumka, Kiev. (in Russian)
4. Kapustin V.V., 2013. Vibration-based diagnostics of the state of railway embankments on soft ground bases. Engineering Survey, No. 10–11, pp. 100–108. (in Russian)
5. Kapustin V.V., Sinitsin A.V., 2018. The application of attribute analysis for the solution of applied problems of GPR profiling. Russian Geophysics, No. 2, pp. 17–23. (in Russian)
6. Kapustin V.V., Churkin A.A., 2020. Applying of dynamic acoustic signal attributes for evaluation of the contact between pile and soils. Moscow University Bulletin. Series 4. Geology, No. 3, pp. 126–137. (in Russian)
7. Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Kuvaldin A.V., 2018. Capabilities of seismoacoustic and ultrasonic methods for quality control of pile foundations. Geotechnics, Vol. X, No. 5–6, pp. 62–71. (in Russian)
8. Malinin A.G., 2000. Application of jet cementation in underground construction. Podzemnoye Prostranstvo Mira, No. 2. (in Russian)
9. Mukhin A.A., Lozovsky I.N., Churkin A.A., 2018. Non-destructive pile integrity testing using thermal integrity profiling. Transport Construction, No. 10, pp. 6–9. (in Russian)
10. Chernyakov A.V., Bogomolova O.V., Kapustin V.V., Vladov M.L., Kalinin V.V., 2008. Quality control of geotechnical structures created by jet cementation. Tekhnologii sejsmorazvedki, No. 3, pp. 97–103. (in Russian)
11. Churkin A.A., Lozovsky I.N., 2020. Quality assurance of diaphragm and pile walls by geophysics. Construction and Geotechnics, Vol. 11, No. 2, pp. 49–61, <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2020.2.05>. (in Russian)

12. Amir J.M., Amir E.I., Felice C.W., 2004. Acceptance criteria for bored piles by ultrasonic testing. Proceedings of the 7th International Conference on application of stress wave theory to piling, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
13. Amir J.M., Amir E.I., 2009. Capabilities and limitations of cross hole ultrasonic testing of piles. Proceedings of the International foundations Conference and equipment expo (IFCEE), Orlando, FL, USA, 2009, [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)67](https://doi.org/10.1061/41021(335)67).
14. Amir J.M., 2017. Pile integrity testing: history, present situation and future agenda. Proceedings of the 3rd Bolivian International Conference deep foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2017, pp. 17–32.
15. Bustamante M., Ghaneselli L., Salvador H., 2002. Double rotary CFA piles: performance in cohesive soils. Proceedings of 9th International Conference on piling and deep foundations, Nice, France, 2002, pp. 375–381.
16. Camp III W.M., Holley D.W., Canivan G.J., 2007. Crosshole sonic logging of South Carolina drilled shafts: a five-year summary. Proceedings of the Geo-Denver, Denver, CO, USA, 2007, [https://doi.org/10.1061/40902\(221\)2](https://doi.org/10.1061/40902(221)2).
17. Niederleithinger E., Hubner M., Amir J.M., 2010. Crosshole sonic logging of secant pile walls — a feasibility study. Proceedings of the Symposium on the application of geophysics to environmental and engineering problems (SAGEEP), Keystone, FL, USA, 2010, pp. 685–693.
18. Spruit R., van Tol F., Broere W., Slob E., Niederleithinger E., 2013. Detection of anomalies in diaphragm walls with crosshole sonic logging. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 51, No. 4, pp. 369–380, <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0204>.
19. Tian Z., Huo L., Gao W., Li H., Song G., 2017. Modeling of the attenuation of stress waves in concrete based on the Rayleigh damping model using time-reversal and PZT transducers. Smart Materials and Structures, Vol. 26, No. 10, pp. 1–10.
20. Wharmby N., Perry B., Waikato H., 2010. Development of secant pile retaining wall construction in urban New Zealand. Proceedings of the New Zealand concrete industry Conference, Wellington, New Zealand, 2010, pp. 1–8.
21. Zhi Tang Lu, Zhi Liang Wang, Dong Jia Liu, 2013. A study on the application of the parallel seismic method in pile testing. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, No. 55, pp. 255–262.

Информация об авторах

КАПУСТИН ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

Младший научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н., г. Москва, Россия

ВЛАДОВ МИХАИЛ ЛЬВОВИЧ

Заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., профессор, г. Москва, Россия

Information about the authors

VLADIMIR V. KAPUSTIN

PhD (Physics and Mathematics); Junior Research Scientist of the Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

MIKHAIL L. VLADOV

DSc (Physics and Mathematics); Head of the Department of Seismometry and Geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University; Professor; Moscow, Russia



Фото А.А. Чуркина