

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»

Чуркин А. А., к. т. н., старший научный сотрудник

Смирнов И. Д., инженер

ООО «НПЦ Геотех»

Широбоков М. П., ведущий инженер-геофизик

Широкое использование плитных фундаментов приводит к необходимости разработки комплексного подхода к диагностике их состояния. Помимо традиционных методик дефектоскопии, для неразрушающего контроля качества конструкций и оценки их взаимодействия с грунтом основания применяются геофизические методы. Комплекс акустических и георадиолокационных методов способен оперативно предоставить разностороннюю информацию о состоянии сооружения. Возможности площадной акустической съемки методом анализа отклика и атрибутного анализа георадиолокационного профилирования показаны на примерах результатов комплексного обследования конструкций. Исследование выполнялось с использованием высокопроизводительного оборудования российского производства — сейсмостанций «ИДС-2» и бетоноскопов «СК-1700/2500».

ВВЕДЕНИЕ

Неразрушающий контроль является важной и актуальной частью инженерных работ в строительстве. Комплекс методов и технологий позволяет оценить состояние материалов и конструкций без их повреждения или разрушения, что особенно важно при эксплуатации фундаментов. Дефекты плит и плитоподобных конструкций могут привести к серьезным последствиям, включая необратимые деформации и осадки, ведущие к снижению эксплуатационных характеристик зданий. Распространенной проблемой являются дефекты, возникающие в процессе строительства или эксплуатации под воздействием внешних факторов (опасные инженерно-геологические процессы, техногенное воздействие) и связанные с недостаточной прочностью бетона, несоблюдением проектных геометрических параметров, наличием трещин.

Техническая геофизика — направление геофизики, использующее высокоразрешающие электромагнитные, акустические и другие методы для решения геотехнических задач [1]. Она решает широкий спектр задач, включая определение геологических границ и оценку свойств техногенных грунтов, обнаружение скрытых дефектов в конструкциях, оценку качества материалов, определение фактических конструктивных параметров и т. д.

Для экспресс-диагностики фундаментных плит и плитоподобных конструкций эффективен комплекс методов, включающий георадиолокационное профилирование [2–6] и площадное сейсмоакустическое обследование [2, 3, 7, 8]. Комплекс обладает рядом преимуществ: оперативностью проведения полевых работ, высокой степенью автоматизации обработки данных, возможностью быстрой интерпретации результатов.

В представляемом материале применение сейсмоакустической и георадарной съемки при обследовании фундаментных плит иллюстрируется на примерах работ, выполненных с использованием российского оборудования — сейсмостанции «ИДС-2» и георадаров семейства «ОКО».

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ

Для обследования фундаментных плит чаще всего используются наземное георадиолокационное профилирование, сейсмоакустические методы (метод анализа отклика, импакт-эхо метод, модификации методик наземной сейсморазведки) [7], а также методы дефектоскопии (термография, поверхностная ультразвуковая томография) [9–14].

Георадарные исследования позволяют получить информацию о глубине зало-

жения и форме дефектов (субгоризонтальные трещины, области обводнения), определить параметры арматурной сетки. Акустический импакт-эхо метод, использующий явление толщинного резонанса, позволяет получить информацию о толщине плит, обнаружить полости, трещины и другие неоднородности материала конструкций. Метод анализа отклика (виброакустический метод) основан на регистрации низкочастотных поверхностных и изгибных колебаний и дает сравнительную оценку однородности бетона плиты / качества контакта «плита — грунт». Ультразвуковые методы применяются для определения сплошности бетона и выявления дефектов. Распространение ультразвуковых импульсов чувствительно к наличию зон с пористостью, трещинами, деформациями. Термографическая съемка основана на измерении инфракрасного излучения и используется для обнаружения тепловых аномалий, которые могут свидетельствовать о наличии скрытых дефектов, влаги или деформаций, а также для оценки теплоизоляционных свойств конструкции.

Существенная часть волновых методов геофизики, используемых для обследования конструкций, основана на анализе данных во временной области и работе с кинематическими параметрами. Получаемая благодаря этому анализу информация прямо связана со свойствами объектов исследования. В то же время активно

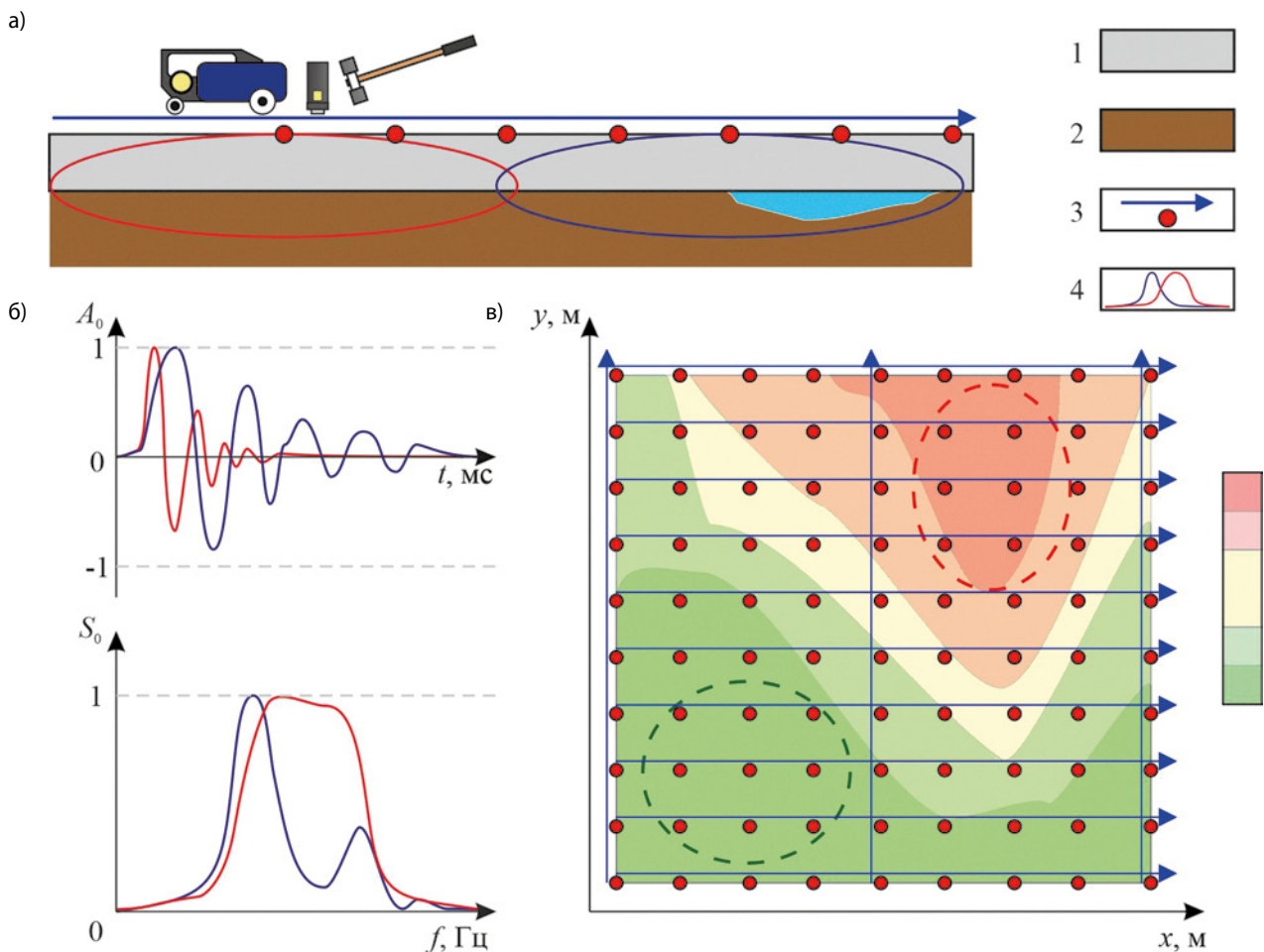


Рис. 1. Геофизический экспресс-комплекс обследования плит:

- а) схема выполнения работ;
 б) анализ сигналов во временной и частотной области;
 в) выделение аномальных участков по результатам атрибутивного анализа.
- Обозначения:
 1 — плита; 2 — грунт; 3 — точки акустики и профили георадиолокации;
 4 — идеализированный отклик среды

используется анализ данных в частотной области — сведения о частотном диапазоне и интенсивности колебаний. Эта информация позволяет локализовать дефекты и исследовать процессы преобразования внутренней структуры объектов исследования [8].

Теория волновых методов имеет много сходного при рассмотрении процессов распространения волн различной физической природы. При корректных параметрах возбуждения сигнала с поверхности плиты возможно зарегистрировать резонансные явления различной природы (акустические и электромагнитные, низкочастотные и высокочастотные) [6–8].

Предлагаемый комплекс экспресс-диагностики включает в себя площадную съемку двумя дополняющими друг друга геофизическими методами (рис. 1) и выполняется в несколько этапов. На первом этапе необходимо оперативно получить информацию о степени однородности плиты с помощью наземной георадиолокации. Наиболее быстрый результат может быть получен в случае расчета и построения карт атрибутов. Результаты георадарного обследования позволяют выбрать участки

для акустического обследования (например, импакт-эхо методом) [6]. Для выполнения данного вида работ, как георадарных, так и акустических, применяются источники сигнала, содержащие в своем спектре частоты, превышающие частоту «толщинного резонанса». На втором этапе для оценки контактных условий применяются источники, содержащие в спектре зондирующего импульса частоты ниже «толщинного резонанса». Уточнение сети наблюдений на втором этапе осуществляется с учетом результатов первого этапа. Выбор акустических источников и георадарных антенн можно производить на основании предварительных расчетов, учитывающих информацию о геометрических параметрах плиты [15].

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Первый набор данных получен при обследовании демонстрационного участка на территории Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета. Объект представлял собой монолитную плиту в основании демон-

тированного рекреационного сооружения. В ходе визуального обследования были выделены две зоны, различающиеся по состоянию материала плиты (рис. 2, а). Причины деформации бетона были установлены с применением комплекса методов (рис. 2, б). На поверхности конструкции были размечены 49 точек акустических наблюдений и 9 профилей георадиолокации.

Для проведения испытаний методом анализа отклика использовался ИДС-2 (ООО «Логические системы») с молотком из твердого пластика весом 250 г в качестве ударного источника. Обработка данных выполнялась в программном обеспечении GeoTechControl (ООО «Геодавайс»). Граф обработки включал сборку и сортировку данных, присвоение геометрии. Затем производился расчет атрибутов энергии нормированного отклика, площади нормированного спектра (рис. 3, а). По рассчитанным значениям была построена карта (рис. 3, б). Для выполнения георадарного обследования применялся георадар с центральной частотой 1700 МГц, целиком



Рис. 2. Фотографии обследования:

- а) плита с выделенным контуром визуально наблюдаемых зон различного состояния конструкции;
- б) выполнение измерений методом анализа отклика и георадарного сканирования

размещенный в одном корпусе. Обработка и визуализация данных выполнялись в поставляющемся вместе с прибором специализированном программном обеспечении ArmScan 3D, предназначенном для обследования строительных конструкций (рис. 4).

Рассчитанные значения атрибута энергии нормированного акустического сигнала и их визуализация в виде карты позволяют показать его чувствительность к изменениям внутренней структуры материала плиты, наличию в нем систем трещин. Коэффициент вариации параметра для

зоны конструкции с ненарушенной сплошностью материала составил 5%, для нарушенной — 12%. По карте видно (рис. 3, б), что заметные участки аномального роста атрибута приурочены к участкам плиты с наибольшей концентрацией трещин.

Результаты георадарного обследования позволили установить причину разделения плиты на визуально выделяемые зоны. Профили для первой зоны показали наличие регулярного поперечного армирования, для второй — его отсутствие. Трехмерная визуализация данных с использованием алгоритма автоматической

пикировки гипербол дифракции от арматурных стержней дает хорошее представление о структуре исследованной конструкции (рис. 4, б). Таким образом, в случае первого объекта исследования георадиолокация позволила установить его строение, а сейсмоакустическое обследование показало чувствительность анализируемых параметров к изменению физико-механических характеристик бетона.

Второй набор данных получен при обследовании монолитной плиты фонтана на объекте в Московской области. Причиной для проведения обследования

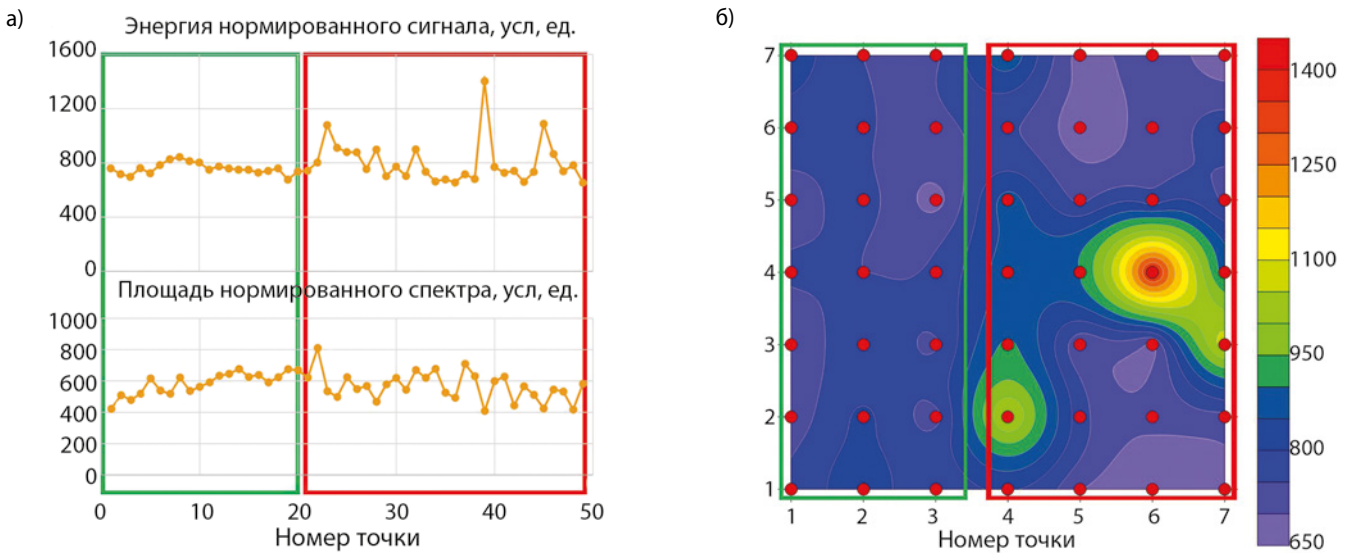


Рис. 3. Результаты акустического обследования:

- а) изменение атрибутов отклика для точек наблюдения;
- б) карта изменения атрибута энергии нормированного сигнала

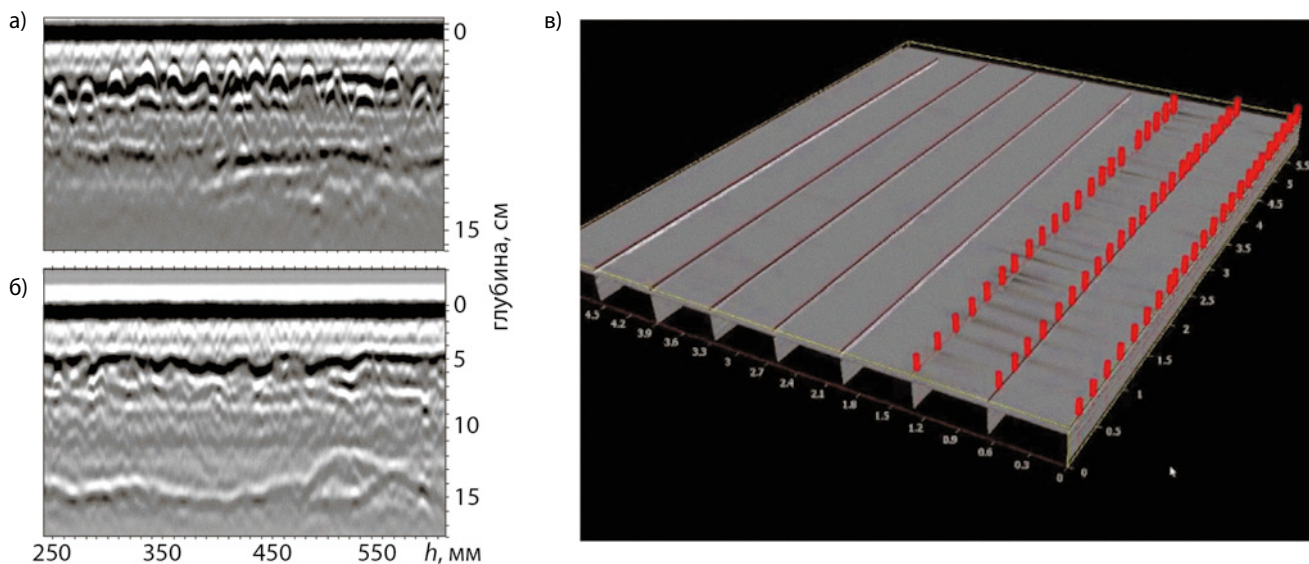


Рис. 4. Результаты георадарного обследования:

- а) фрагмент георадарного профиля по первой зоне плиты;
- б) фрагмент георадарного профиля по второй зоне плиты;
- в) визуализация результатов обследования в виде псевдотрехмерной карты с выделенными арматурными стержнями

стало частичное вымывание грунта из-под конструкции в ходе выполнения земляных работ вблизи от плиты. На доступной для исследования поверхности плиты были выполнены 84 точки акустического обследования методом анализа отклика и 14 профилей георадиолокации. При работах методом анализа отклика для возбуждения сигнала использовалась резиновая киянка весом 1000 г. Георадиолокационное обследование выполнялось с использованием бетоноскопа СК-2500 3D, имеющего центральную частоту 2500 МГц. Полученные данные после предобработки использовались для атрибутного ана-

лиза в программе CartScan (ООО «Логические системы»). Массивный ударник для акустического обследования был выбран для исследования контакта конструкции с грунтом основания, высокочастотный бетоноскоп — для изучения материала плиты. При анализе результатов акустики был использован критерий однократного («ослабленный контакт») и двукратного («нарушенный контакт») превышения стандартного отклонения σ для атрибута энергии нормированного сигнала (рис. 5) [7, 16]. Акустический отклик плиты в целом ведет себя стабильно, в качестве аномальных возможно указать ряд точек обследова-

ния, примыкающих к границам конструкции (вероятно, связанных с частичным размывом грунта с краев конструкции во время земляных работ). В целом для обследованной конструкции нарушения контакта с грунтом не установлено.

Данные георадиолокации позволили показать проектное положение армирования конструкции (рис. 6, а) и отсутствие заметных неоднородностей материала по данным атрибутного анализа (рис. 6, б). Области аномального изменения георадарных атрибутов непосредственно связаны с выходом на поверхность плиты, заделанной в конструкцию водопроводной

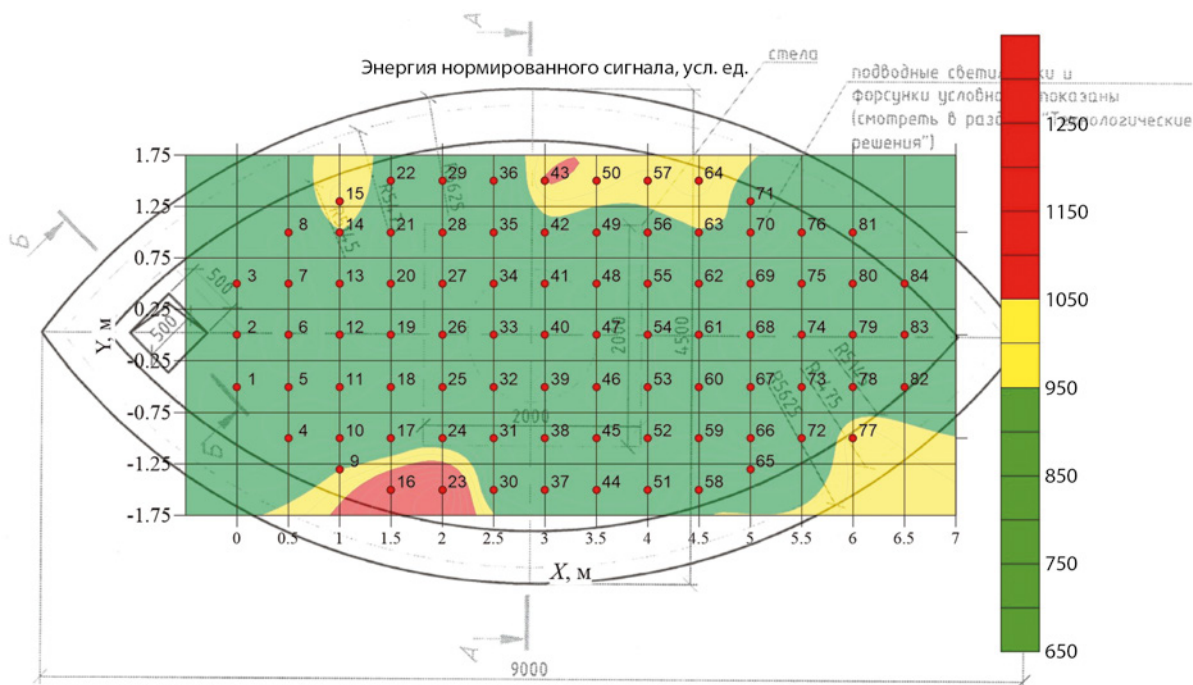


Рис. 5. Результат акустического обследования — карта атрибута энергии нормированного сигнала в расцветке критерия «трех сигма»

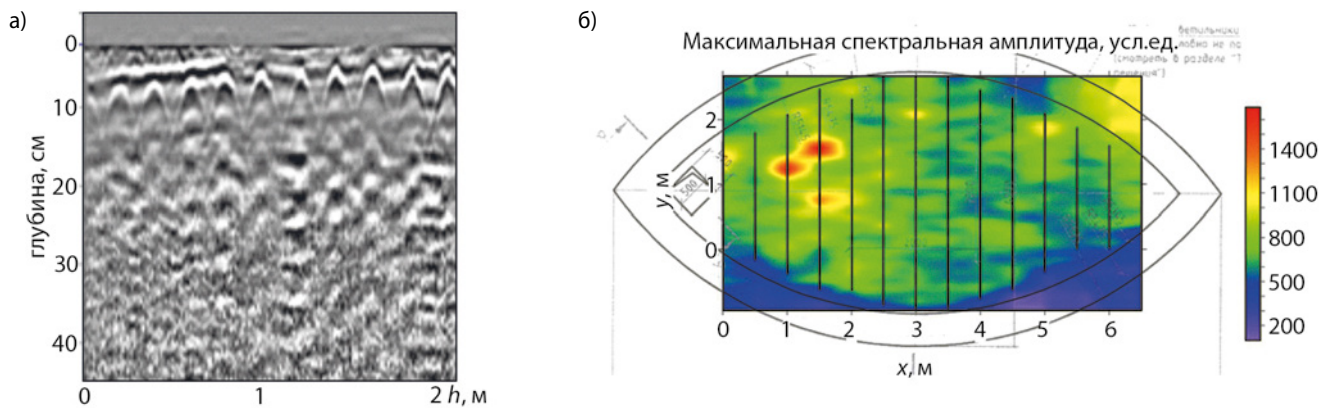


Рис. 6. Результат георадарного обследования:

- а) фрагмент георадарного профиля по плите;
 б) карта атрибута максимальной спектральной амплитуды георадарного сигнала

системы. Таким образом, комплекс методов позволил установить отсутствие нарушения контакта плиты с грунтом и дать косвенную оценку однородности материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика экспресс-обследования фундаментных плит с применением комплекса геофизических методов представляет современный технологичный взгляд на дефектоскопию системы «плита — грунт». Комплекс из сейсмоакустики и георадарного профилирования можно использовать для контроля качества различных видов плитоподобных конструкций (подпорных стен, гидротехнических сооружений, тоннельной отделки и шахтной крепи).

Перспектива полной автоматизации процесса обработки и подготовки к интерпретации результатов является существенным плюсом комплекса. Комплект карт динамических атрибутов сигналов подбирается исходя из решаемой задачи. Способ расчета атрибутов также определяется исходя из поставленной задачи (исследование контакта конструкции с грунтом или локализация внутренних неоднородностей материала).

При этом необходимо отметить, что в разработке нуждаются следующие вопросы применения методики:

- выработка оптимальных решений по автоматизации обработки сигналов;
- уточнение подходов к геотехнической интерпретации результатов.

Корректный анализ выделяемых по данным обследования аномалий требует использования априорной информации о проектных характеристиках объекта, инженерно-геологических условиях, процессе сооружения конструкции и подразумевает совместную работу специалистов-геофизиков, обследователей, строительных инженеров. ■

Список источников

1. Капустин В. В., Владов М. Л. *Техническая геофизика. Методы и задачи // Геотехника*. 2020. Т. 12, № 4. С. 72–85.
2. Блохин Д. И., Вознесенский А. С., Кудин И. И., Набатов В. В., Шейнин В. И. *Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит // Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 2. С. 283–289.
3. Капустин В. В., Кувалдин А. В. *Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // Технологии сейсморазведки*. 2015. № 1. С. 99–105.
4. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. А., Капустин В. В. и др. *Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328, № 3. С. 37–46.
5. Зеркаль Е. О., Калашников А. Ю., Лапшинов А. Е., Тютюнков А. И. *Выявление внутренних дефектов бетонирования в теле монолитной фундаментной плиты по данным георадиолокационного обследования // Вестник МГСУ*. 2020. № 7. С. 980–987.
6. Капустин В. В., Чуркин А. А., Ширококов М. П. *Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // Геотехника*. 2021. Т. 13, № 1. С. 68–79.
7. Чуркин А. А., Хмельницкий А. Ю., Капустин В. В. *Оценка условий контакта конструкций с грунтовым массивом по атрибутам нормированного акустического отклика // Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2022. № 5. С. 17–21.
8. Ширококов М. П., Капустин В. В., Чуркин А. А. *Обследование фундаментных плит с применением комплекса акустических и георадиолокационных методик // Инженерная и рудная геофизика 2022: сб. тезисов конф. Геленджик, 5–8 сентября 2022. С. 1–6.*
9. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T. *Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE // NDT & E International*. 2009. Vol. 42, № 8. Pp. 678–689.
10. Sadowski L. *Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors // Applied Sciences*. 2017. Vol. 9, № 7. Article № 893.
11. Qin H., Tang Y., Wang Z., Xie X., Zhang D. *Shield tunnel grouting layer estimation using sliding window probabilistic inversion of GPR data // Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 112. Article № 103913.
12. Pospisil K., Manychova M., Stryk J., Korenska M., Matula R., Svoboda V. *Diagnostics of reinforcement conditions in concrete structures by GPR, impact-echo method and metal magnetic memory method // Remote Sensing*. 2021. № 13. Pp. 1–15.
13. Nicholas J. Carino. *The Impact-Echo Method: An Overview. Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey*.
14. Варпанов А. З., Набатов В. В. *Термографический контроль для строительства (обзорная статья) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 9. С. 193–200.
15. Володин Г. В., Капустин В. В. *Анализ колебаний фундаментных плит для оценки контакта с грунтами // Геотехника*. 2021. Т. 13, № 4. С. 64–79.
16. *Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы. М.: Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 2021. 114 с.*