ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Метод анализа нормированного акустического отклика при мониторинге подземных конструкций

А.А.Чуркин[1], **В.В.Капустин**[2], **М.С.Плешко**[3]✉
[1] *Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений им. Н.М.Герсеванова, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия, Москва*
[3] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Чуркин А.А., Капустин В.В., Плешко М.С. Метод анализа нормированного акустического отклика при мониторинге подземных конструкций // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 963-976. EDN BPIOTO

Аннотация
Метод анализа акустического отклика – широко распространенный геофизический метод обследования монолитных плитоподобных конструкций (фундаментных плит, обделки тоннелей и крепи вертикальных, наклонных и горизонтальных горных выработок, подпорных стен), применяемый для контроля контактных условий и оценки качества тампонажа. Представлен новый подход к обработке данных, основанный на анализе атрибутов нормированного акустического отклика. В качестве информативных параметров сигнала предложено использовать рассчитываемую во временной области энергию нормированного сигнала и рассчитываемые в частотной области площадь нормированного спектра и средневзвешенную частоту. Предлагаемая методика позволяет оперативно оценить качество тампонажа или состояние контакта подземной конструкции с грунтом. Достоинством подхода является возможность применения для сбора данных геофизического оборудования, предназначенного для сейсмоакустического контроля длины и сплошности свайных фундаментов. Выполнены экспериментальные работы по применению методики при обследовании физической модели тоннельной обделки с известным положением области нарушения контакта «обделка – грунт». В качестве примеров применения методики представлены результаты обследования нескольких монолитных конструкций, включенных в эксплуатируемые объекты коммунальной и транспортной инфраструктуры. Подтверждена применимость методики для исследования обделки тоннелей, шахтной крепи и контроля нагнетания раствора под фундаментные плиты. Для интерпретации данных успешно применены модифицированный критерий 3σ и совместный анализ поведения комплекта атрибутов. Подробно рассмотрены особенности выполнения полевых работ, сбора и анализа данных. Предложены подходы развития методики и ее применения в рамках мониторинга подземных сооружений. Обозначены вопросы, возникающие при акустическом обследовании монолитных плитоподобных конструкций.

Ключевые слова
неразрушающий контроль; техническая геофизика; метод анализа отклика; подземные сооружения; контакт грунт – сооружение; качество тампонажа; поиск пустот; атрибутный анализ

Поступила: 27.07.2023 ***Принята: 03.06.2024*** ***Онлайн: 01.08.2024*** ***Опубликована: 25.12.2024***

Введение.

Монолитные конструкции, такие как обделка тоннелей, крепь шахт, фундаментные плиты и т.д. (плитоподобные конструкции) широко распространены в подземном строительстве. Многие из них эксплуатируются в сложных условиях, характеризующихся большими глубинами, высокими значениями напряжений, динамическими проявлениями горного давления, интенсивными водопротоками, нарушением ограждающих грунтов и т.д. [1], оказывающих негативное влияние на техническое состояние сооружений, и приводят к значительному росту затрат на их текущее содержание и капитальный ремонт [2]. Исключение негативного воздействия городского подземного строительства на окружающую среду в тоннелестроении достигается применением современных щитовых систем с активной пригрузкой забоя и возведением обделки сразу после перемещения щита [3, 4]. Нагнетание цементации улучшает распределение статических нагрузок, уменьшает деформации материала, предотвращает оседания, повышает водонепроницаемость и, как следствие, увеличивает долговечность сооружения [5-7].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Контроль качества состояния контакта «грунт – конструкция» и выполненной цементации должен проводиться систематически. Для обследования массивных монолитных сооружений значительных линейных размеров часто используются геофизические методы из-за возможности косвенно оценить состояние сооружения и его взаимодействие с грунтами [8-11]. Для решения задачи оценки состояния подземных сооружений в основном используется несколько неразрушающих методов:

• Профилирование с помощью георадара позволяет определить состояние арматуры и наличие дефектов в конструкции [12, 13], изучить состояние контакта обделки с грунтом [14, 15] и даже оценить толщину слоя цементного раствора [16].

• Ультразвуковая томография [17, 18] в основном используется для оценки прочности бетонной облицовки, глубины раскрытия трещин, наличия внутренних дефектов и определения шага армирования.

• Акустическое обследование, проводимое импакт-эхо методом (IE) или методом анализа отклика (IR) [19-21], позволяет оценить интегральные характеристики конструкции в различных масштабах [22-24] и локализовать зоны аномального контакта или состояния цементации [25, 26].

• Некоторые методы, такие как профилирование с помощью инфракрасной термометрии [27], электроразведка методом сопротивления [28] или анализ поверхностных волн [29-31], также используются для исследования плитоподобных конструкций, но значительно реже.

В данной работе представлена методика обработки и анализа нормированного акустического отклика (описана в статье [26]), которая позволяет оперативно получить оценку состояния контакта или качества цементации для различных типов подземных сооружений. Преимущество методики в сравнении с широко применяемым в зарубежной практике методом анализа кривой мобильности (mobility response testing) состоит в отсутствии необходимости применения калиброванного источника сигнала (ударника с датчиком силы). Акустический отклик описывается параметрами, поведение которых определяется устойчивыми к малым изменениям силы удара особенностями сигналов (длительность цуга колебаний и их распределение по характерному диапазону частот). Кроме того, поведение акустического отклика чувствительно к наличию заполненных воздухом пустот на контакте «грунт – сооружение», что позволяет использовать метод в комплексе с георадиолокационным профилированием (которое дает возможность успешно локализовывать зоны обводнения, но не позволяет уверенно выделять воздушные пустоты) для повышения достоверности выводов по результатам геофизического обследования.

Для проверки работоспособности предлагаемого подхода использована физическая модель сегмента обделки тоннеля с тампонажем за ним. На основе модельных результатов описаны некоторые особенности обработки сигналов. Представлены примеры применения методики при обследовании эксплуатируемых подземных сооружений. Перечислены некоторые недостатки и пробелы исследования и предложены направления для будущих исследований.

Методы.

С точки зрения акустических методов, исследуемая среда может быть описана как многослойная колебательная система (конструкция – тампонаж – грунт), т.е. задачи контроля качества цементации и оценки условий контакта «грунт – конструкция» (двухслойная система) могут рассматриваться совместно. В такой среде может быть возбуждено сложное волновое поле.

Метод анализа отклика и импакт-эхо метод основаны на явлении возникновения низкочастотных и высокочастотных резонансных колебаний соответственно (рис.1, *а*). Возбуждение свободных колебаний в системе «конструкция – грунт» и анализ отклика в различных частотных диапазонах имеют различную разрешающую способность. Выбор частотных диапазонов включает масштабный фактор – чем более высокие частоты выбраны, тем меньшие неоднородности влияют на регистрируемые данные [22].

Метод IE основан на явлении толщинного резонанса, вызванного образованием стоячих волн из-за многократных отражений от верхней и нижней поверхностей конструкции. Обработка данных может проводиться как в частотной, так и во временной области (для случаев, когда прямой и отраженный импульсы разрешены во времени). Для интерпретации данных активно используется анализ спектральных атрибутов [20, 32-34]. IE-исследование позволяет обнаружить дефекты размером в десятки сантиметров и поэтому может быть использовано на этапе детального обследования выбранного участка конструкции.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 963-976
© А.А.Чуркин, В.В.Капустин, М.С.Плешко, 2024

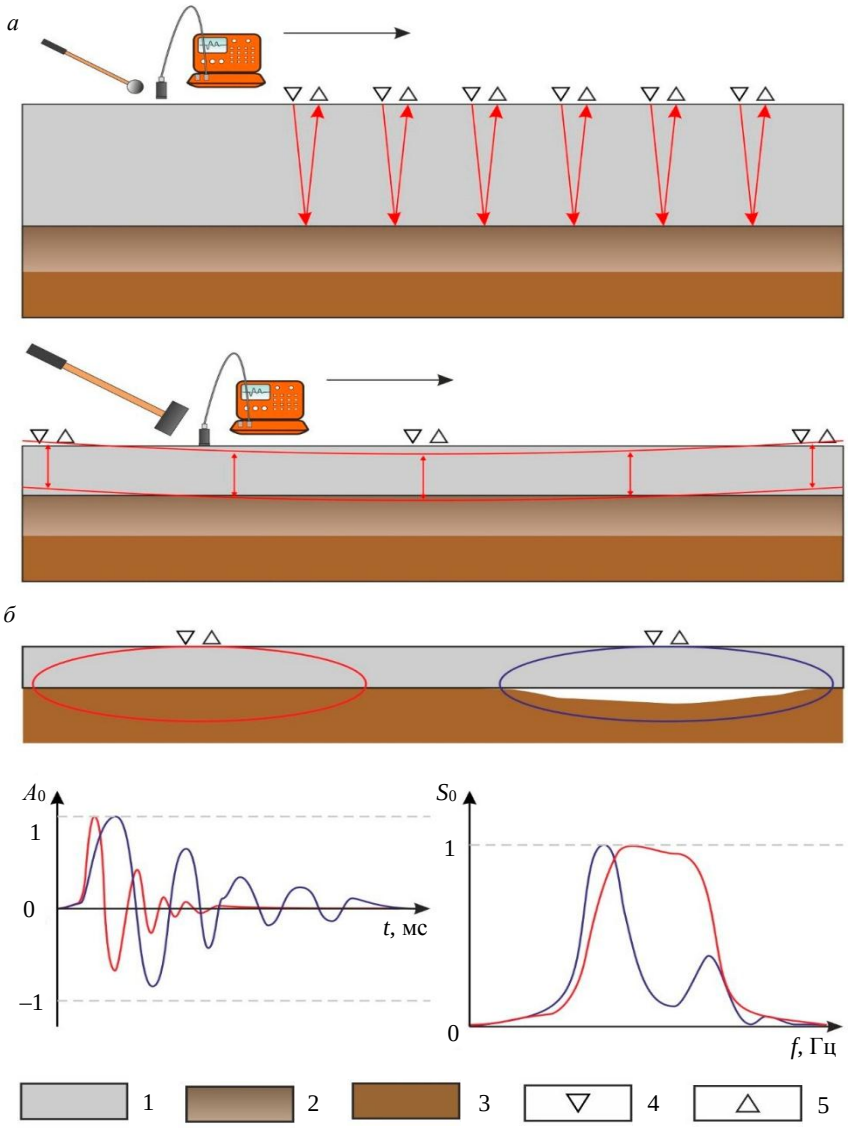


Рис.1. Акустические испытания плитоподобных конструкций методом анализа акустического отклика (*а*) и принцип формирования нормализованного импульсного отклика (объем среды, участвующий в колебании и идеализированный отклик во временной и частотной областях) (*б*)

1 – железобетон; 2 – цементный раствор; 3 – грунт; 4 – источник; 5 – приемник

Метод IR основан на явлении возникновения изгибных колебаний объема среды между дефектом (неплотный контакт или нарушение цементации) и свободной поверхностью (граница «плита – воздух»). Сама идея метода очень похожа на концепцию локального резонанса дефекта в нелинейном ультразвуковом контроле [35]: изгибные колебания в многослойных структурах вызывают гармонический резонанс в зонах расслоения. Для линейно-упругой модели тела взаимодействие волны и дефекта проявляется в амплитудных и фазовых изменениях сигнала. Методика имеет достаточно модификаций, различающихся как по типу возбуждения колебаний (вибрационные или импульсные), так и по обработке данных [9, 26, 36, 37]. Низкочастотное исследование применяется для выявления крупных нарушений состояния контакта или цементации (от первых метров в плане и более).

Изгибные колебания массивной плитообразной конструкции лежат в низкочастотной области спектра Фурье. Для предварительной оценки их частотного диапазона может быть использована модель шарнирной плиты. Частота основной моды колебаний шарнирных пластин может быть определена по известным аналитическим решениям для пластин различной формы:

$$\omega_1 \cong \pi^2 \left\{ \frac{a^2 + b^2}{a^2 b^2} \right\} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho\left(1-\mu^2\right)}};$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

$$\omega_1 \cong \frac{3,2h}{2r^2}\sqrt{\frac{E}{12\rho\left(1-\mu^2\right)}},$$

где a и b – длина и ширина прямоугольной пластины соответственно; r – радиус круглой пластины; h – толщина пластины; E и μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона пластины соответственно; ρ – плотность пластины.

Существует теоретически нерешенная проблема строгого описания возникновения аномального отклика в зонах нарушенных контактных условий [26, 36, 37]. Для значительных нарушений контакта (большие площади выноса материала под плитой или зоны разрушения породы за обделкой) подход изгибных колебаний представляется корректным: длина волны возбуждаемого импульса меньше линейных размеров участка конструкции, вовлеченного в колебание. Для небольших нарушений контакта (локальные пустоты в массиве пород или участки ослабленных грунтов) формирование аномального отклика происходит сложным образом в ближней зоне источника (и включает различные нелинейные эффекты, дисперсию поверхностных волн и т.д.). Причины возникновения аномального акустического отклика могут быть уточнены на этапе геотехнической интерпретации результатов исследования.

Применение метода позволяет получить качественную оценку условий контакта системы «плита – грунт». При возбуждении свободных колебаний в слоистой среде эффективность цементирующего раствора или вмещающих грунтов как демпфера проявляется в сравнительном изменении отклика во временной и частотной областях. В случае нарушения контакта (наличия расслоения, пустоты, полости за плитой) следует заметное увеличение длительности и амплитуды основного цуга колебаний (рис.1, *б*). Стандартные подходы к интерпретации данных заключаются в анализе энергии отклика и пиковых частот спектра, вычислении атрибутов сигнала, таких как Q-фактор, и использовании численного моделирования и априорной информации в качестве вспомогательных инструментов [38].

Основные вопросы, которые обычно ставятся перед специалистом – интерпретация данных и принятие окончательного решения о состоянии контакта. Это прежде всего выбор критерия для выделения пустот, т.е. набора параметров для количественной классификации областей аномального отклика.

Предложенный подход к экспресс-анализу данных был кратко описан в статье [26] и представляет собой альтернативный взгляд на обработку данных. Методика позволяет избежать использования калиброванного источника с датчиком силы (что требуется при анализе кривой мобильности [36]) путем анализа параметров нормированного отклика, которые более устойчивы к условиям возбуждения сигнала. Ранее атрибуты были адаптированы к обработке сигналов при вибродиагностике геотехнических конструкций, испытаниях свай на сплошность и параллельном сейсмическом методе обследования фундаментов [11, 39, 40].

При рассмотрении конструкции в качестве идеального линейного упругого тела при низкоамплитудном динамическом воздействии поведение отклика во временном и частотном диапазонах определяется свойствами самого тела и условиями работы регистратора, но не зависит от приложенной силы. Для реальных железобетонных конструкций данное свойство выполняется приблизительно, но этого достаточно для решения практических задач. Условия приема сигнала влияют на нормированный отклик больше, чем изменение силы удара в обычном диапазоне полевых испытаний.

При этом подходе зарегистрированная акустическая трасса $V(t)$ и ее спектр Фурье $S(j\omega)$ представляются в виде:

$$V(t) = A_{\max}V_0(t); \quad S(j\omega) = A_{\max}S_0(j\omega),$$

где $A_{\max}$ – максимальная амплитуда сигнала; $V_0(t)$ – значение сигнала, нормированное к максимальной амплитуде; $S_0(j\omega)$ – спектр трассы, нормированный по величине максимальной спектральной амплитуды.

Атрибуты энергии нормированного сигнала E_n, площади нормированного спектра S_n и средневзвешенной частоты f_s позволяют характеризовать характер поглощения энергии колебаний, возбужденных в исследуемом линейно-упругом теле, и определяются по следующим формулам:

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 963-976
© А.А.Чуркин, В.В.Капустин, М.С.Плешко, 2024

$$E_n = \sum_0^T V_0(t)V_0(t);$$

$$S_n = \sum_i |S_0(i)|df;$$

$$f_s = \frac{\sum_i (S(i)f(i))}{\sum_i S(i)},$$

где $V_0(t)$ – значение нормированного сигнала, $t = 0, \ldots T$, $df = \frac{\Delta f}{2(n-1)}$, Δf – частота дискретизации; n – количество отсчетов в спектре; $i = 1, 2 \ldots n$; $S_0(i)$ – значение нормированного спектра в i-й точке; $f(i)$ – значение частоты в i-й точке.

Согласно равенству Парсеваля энергию отклика можно определить следующим образом:

$$E = \int_0^T V(t)^2 dt = \int_0^\omega |S(j\omega)|^2 d\omega. \quad (1)$$

Энергия сигнала, как видно из равенства (1), определяется во временной области амплитудой сигнала $V(t)$ и временным интервалом (0; T), т.е. длительностью сигнала. В частотной области энергия определяется спектральной амплитудой $|S(j\omega)|$ и частотным интервалом (0; ω). При использовании атрибута E_n его значение для линейно-упругой среды определяется в основном длительностью сигнала T. При нарушении контакта длительность акустического отклика увеличивается, и, следовательно, значение атрибута возрастает. В соответствии с свойством преобразования Фурье спектр отклика при этом становится уже, а центральная частота спектра ниже. Поэтому атрибуты S_n и f_s снижаются с ростом E_n (см. рис.1, *б*), а для хорошего (*g*) и плохого (*p*) состояния контакта можно записать следующие соотношения:

$$E_{ng} < E_{np};\ S_{ng} > S_{np};\ f_{sg} > f_{sp}. \quad (2)$$

Общие соображения относительно связи поведения атрибутов нормированного и ненормированного сигналов с характеристиками возбужденных колебаний приведены в табл.1. Атрибут S_n/f_s позволяет оценить характер затухания энергии колебания и имеет сходный физический смысл с параметром добротности (Q-фактором). Снижение данного параметра является показателем снижения добротности колебательной системы «конструкция – грунт» (энергия перераспределяется в выраженные низкочастотные колебания). Однако, в отличие от других методов оценки Q-фактора, подобный атрибут более устойчив к малым изменениям в спектре отклика (поскольку его расчет не привязан к форме основного цуга колебаний) и подходит для характеристики колебательной системы с более чем одной выраженной частотой колебаний (многослойной системе, к которой в том числе относится система «конструкция – тампонаж – грунт»).

Таблица 1

Связь динамических признаков нормированного и ненормированного отклика со свойствами колебательной системы

Атрибут	Сигнал	Нормированный сигнал
Энергия E	Энергия колебаний	Продолжительность колебаний
Площадь спектра S	Энергия колебаний	Ширина основного частотного диапазона колебаний
Средневзвешенная частота f_s	Преобладающие частоты спектра отклика	
S/f_s	Q-фактор	

При выборе параметров источника удара важно знать преобладающие частоты, индуцируемые ударом. Их диапазон связан с длительностью ударного импульса τ, которая, в свою очередь, связана в основном с параметрами источника сигнала – массой, материалом, радиусом контактной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

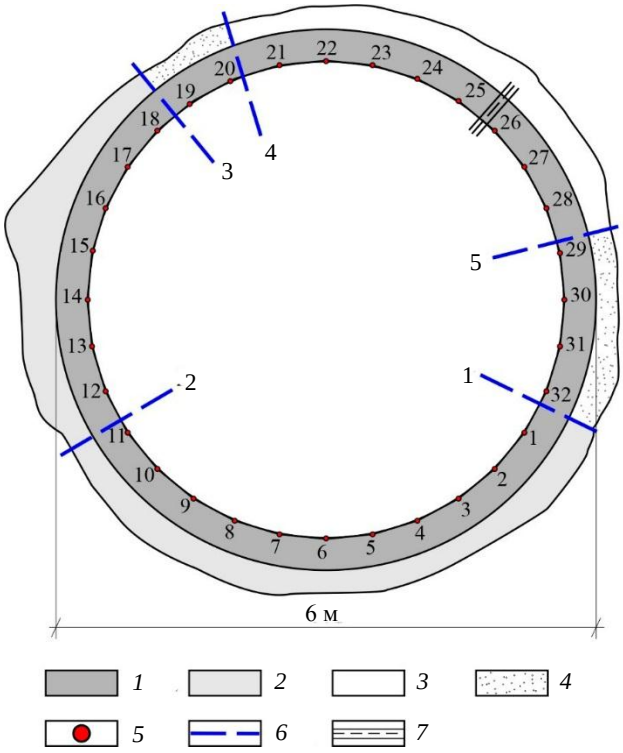


Рис.2. Схема физической модели тоннельной обделки
1 – железобетонная обделка; *2* – тампонаж; *3* – полость; *4* – рыхлые грунты; *5* – точка ИК-испытаний; *6* – маркеры различных зон контактного состояния; *7* – разрыв тоннельной обделки

поверхности и скоростью удара. Первые три параметра модулируются выбором конкретных ударных устройств, в то время как четвертый является наиболее трудно стандартизируемым, хотя варьируется в относительно небольших пределах. Для проведения эксперимента по физическому моделированию было предложено использовать два ударных элемента с противоположными характеристиками – компактный металлический молоток и массивную резиновую киянку.

Экспериментальные исследования проводились на модели, имитирующей обделку тоннеля. Для проверки предложенного подхода было проведено физическое моделирование на специально построенном лабораторном стенде. Схема стенда и расположение точек наблюдения показаны на рис.2. Краткое описание эксперимента для атрибута энергии нормированного сигнала приведено в статье [26].

Полное кольцо тоннеля было собрано из стандартных бетонных блоков толщиной 250 мм и заглублено в грунт на величину ширины кольца. С внешней стороны кольца был оборудован зазор между обделкой и грунтом шириной не менее 200 мм. На большей половине окружности кольца (отметки 1-2-3) зазор заполнялся цементирующим раствором: ширина цементирующего раствора составляла 20-30 см для участка между отметками 1-2, 30-50 см для участка между отметками 2-3. Участки 3-4 и 5-1 были заполнены рыхлым грунтом, участок 4-5 был оставлен без засыпки для имитации полости/провала цементного раствора за облицовкой и был засыпан грунтом после первого цикла измерений.

Модель лабораторного стенда была выбрана для представления на практике основного положения методики – связи поведения атрибутов нормированного отклика и наличия кондиционного тампонажа между конструкцией и грунтовым массивом, выступающего в качестве демпфера для возбуждаемых колебаний.

Для полевых измерений использовалась двухканальная сейсмическая станция ИДС-1 (ООО «Логические системы») с всенаправленным велосиметром GTSensor (ООО «ГЕОДЕВАЙС») для регистрации отклика. Сигнал индуцировался с помощью резиновой киянки (вес бойка 400 г) и металлического молотка (вес бойка – 70 г). Обработка сигналов для всех результатов, представленных в статье, проводилась в программном комплексе GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС»).

На внутренней поверхности кольца обделки были равномерно распределены 32 точки IR-тестирования. Между точками наблюдения 25 и 26 (ближе к точке 26) имелся зазор в обделке. Для каждой точки была выполнена серия из четырех ударов каждым из источников. Удары наносились на расстоянии около 10 см от датчика с четырех противоположных сторон, для подавления помех, вызванных геометрическим фактором при расчете среднего арифметического и мультипликативного спектров для каждой точки наблюдения. После завершения полного цикла наблюдений полость засыпали рыхлым грунтом и проводили повторные наблюдения за точками 18-32.

Обсуждение результатов.

Результаты расчета атрибутов для двух точек испытаний, представляющих противоположные случаи – хороший контакт с вмещающим грунтом через слой цементации (точка 6) и плохой контакт с вмещающим грунтом без цементации (полость, точка 24), приведены в табл.2. Зарегистрированные сигналы, средние арифметические и мультипликативные спектры для обоих типов ударного источника представлены на рис.3.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 963-976
© А.А.Чуркин, В.В.Капустин, М.С.Плешко, 2024

Визуальный анализ подтверждает, что для обоих источников разница между хорошим и плохим состоянием контакта выражается в появлении интенсивных колебаний во временной области («звон») и возросшей нерегулярности («изрезанности») спектра в частотной области. Рассчитанные характеристики показывают значительное увеличение нормированной энергии сигнала и заметное уменьшение нормированной площади спектра. Поведение средневзвешенной частоты f_s отличается от ожидаемого – вместо заметного снижения увеличивается.

Таблица 2

Динамические характеристики нормализованного отклика, полученного для точек измерения 6 (хороший контакт) и 24 (плохой контакт)

Атрибут	Точка 6		Точка 24	
	Металл	Резина	Металл	Резина
E_n, усл.ед.	243	564	890	1589
S_n, усл.ед.	2037	602	462	331
f_s, Гц	1462	632	1472	895
S_n/f_s, усл.ед.	1,393	0,953	0,314	0,370

Наблюдаемое явление связано с ограничениями используемой модели размерами одиночного кольца обделки. При обследовании реальных сооружений их габариты (протяженность тоннеля или размеры плиты в плане) значительно превышают длины возбуждаемых волн. В случае применяемого стенда отражения акустических волн от краев конструкции создают помеху. Поэтому при возбуждении колебаний регистрируются не только моды изгибных колебаний, но и различные пространственные резонансные явления, пики которых можно наблюдать на средних и мультипликативных спектрах. Кроме того, расположенный рядом с точкой наблюдения 26 разрыв в тюбинге является источником дополнительных акустических помех.

Результаты расчета динамических атрибутов для всех точек наблюдения на профиле представлены на рис.4. Значение энергии нормированного сигнала E_n для резинового молотка показало чувствительность к переходу цементного раствора в полость (2,5-3-кратная разница в значениях, точки аномальных наблюдений соответствуют переходу цементного раствора в окружающий рыхлый грунт). Для металлического молотка E_n показал меньшую чувствительность к наличию полости за облицовкой, после ее заполнения рыхлым грунтом интенсивность аномалий уменьшается. Значение площади нормированного спектра S_n для металлического молотка демонстрирует большую чувствительность по сравнению с резиновой киянкой – уменьшение в два раза совпадает с

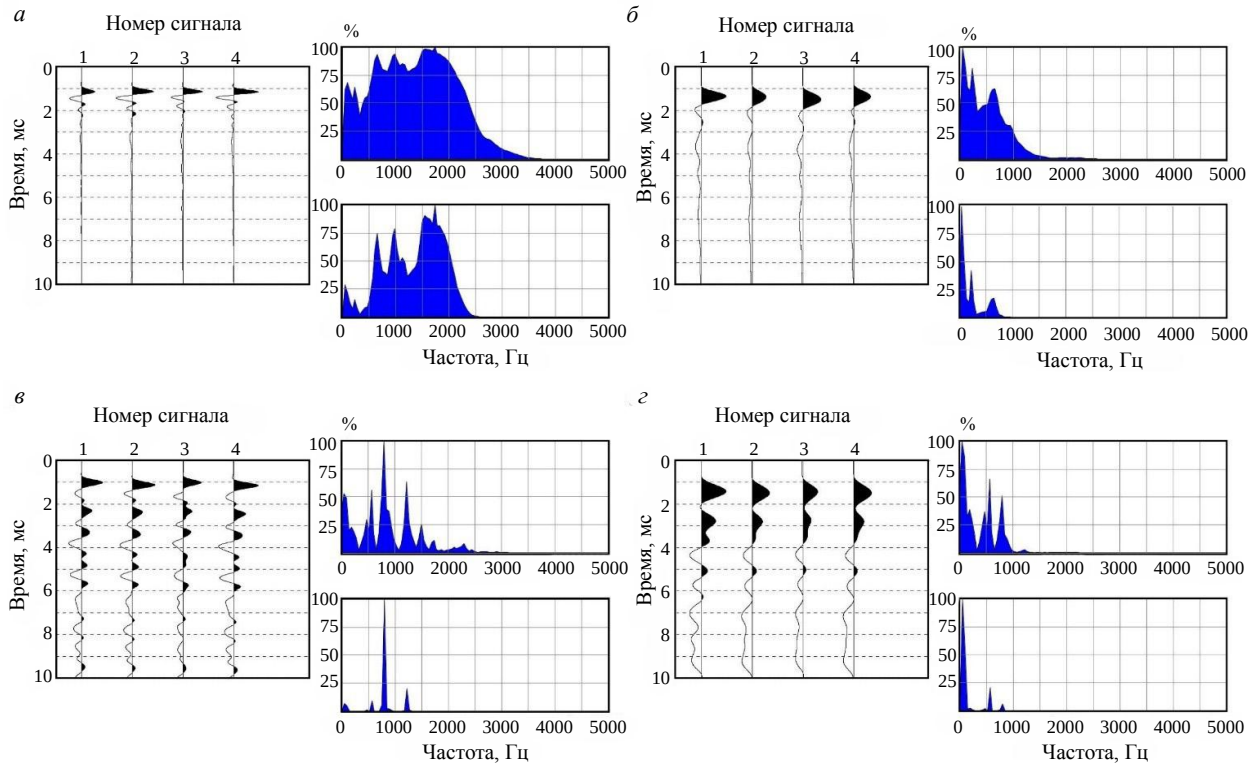


Рис.3. Отклик во временной и частотной областях (средние арифметические и мультипликативные спектры) для точек с цементацией за обделкой (*а*, *б*) и без нее (*в*, *г*):
а – точка 6, металлический молоток; *б* – точка 6, резиновая киянка;
в – точка 24, металлический молоток; *г* – точка 24, резиновая киянка

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

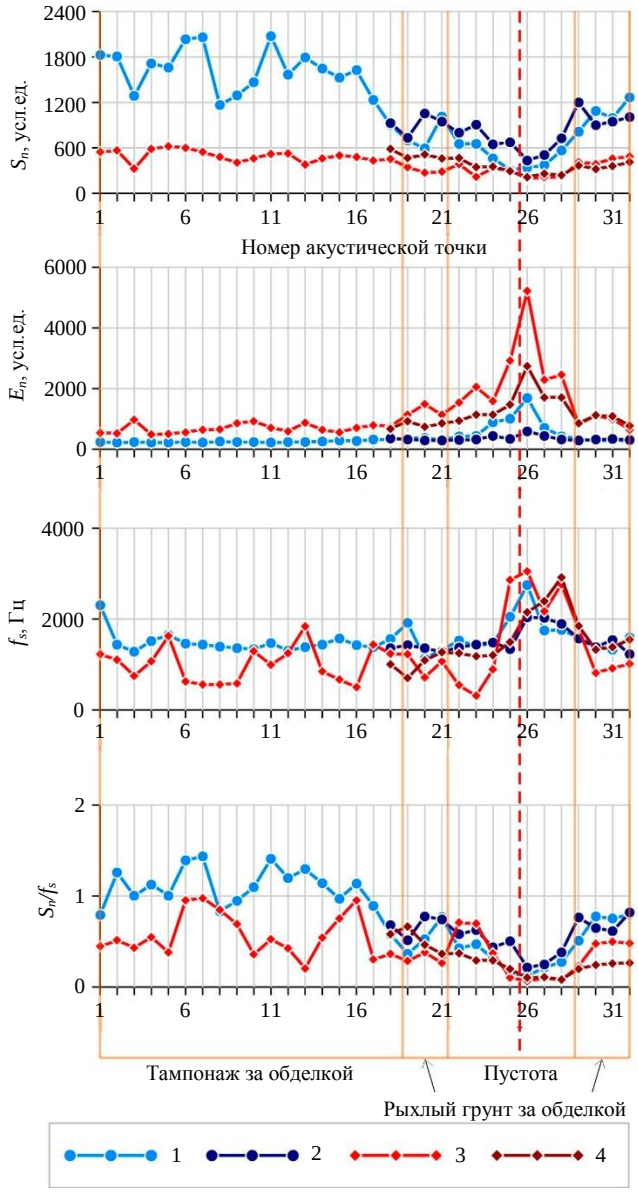


Рис.4. Значения атрибутов, полученные в результате физического моделирования

1 – металлический молоток до заполнения полости; 2 – после заполнения полости; 3 – резиновая киянка до заполнения полости; 4 – после заполнения полости

границами зоны цементации. Кольцевой разрыв вблизи точки 26 проявляется в интенсивных аномальных значениях атрибутов E_n и f_s.

Таким образом, связь между состоянием контакта системы «бетон – тампонаж – грунт» и поведением нормализованных атрибутов отклика подтверждена на практике. Следующим шагом является уточнение методики выполнения полевых работ, которое можно обосновать результатами лабораторного эксперимента.

Повышенная чувствительность атрибутов, полученных с низкочастотным ударником (резиновой киянкой), к изменению состояния контакта позволяет выбрать их для детального анализа. На рис.5 представлены результаты расчета атрибутов отклика для киянки, полученные до засыпки полости, в расчет которых внесено несколько существенных изменений.

Для снижения влияния помех различного происхождения на значения атрибутов они рассчитывались отдельно для каждой записанной трассы, после чего за значение атрибута для точки исследования принималось медианное значение. Это позволило частично автоматизировать процедуру отбраковки вылетевших сигналов. Ручная отбраковка затруднительна при накоплении большого массива данных на реальном объекте.

Для повышения достоверности выделения точек с аномальным откликом был использован опыт специалистов, работающих с методикой анализа кривой мобильности. Параметры кривой мобильности рассчитываются для частотного диапазона (0, 1000) Гц, поскольку было установлено, что для данного «окна» поведение спектра мобильности наиболее чувствительно к состоянию системы «плитоподобная конструкция – грунт» [9, 21, 36]. В случае анализа нормированного отклика задача состоит в локализации области низкочастотного «звона» для участков нарушения контакта или некачественного тампонажа.

Значения атрибутов S_n и f_s были пересчитаны для «окна» (0, 1000) Гц. Результаты пересчета, представленные на рис.5, позволяют показать соответствие поведения атрибутов отклика теоретическому критерию (2) для участка с отсутствующим тампонажем после внесения данного изменения. Заметному снижению S_n (приблизительно в два раза) и f_s (приблизительно на 25 %) соответствует рост значения E_n более чем в два раза. Результаты экспериментов по численному моделированию применения методики для локализации пустот (представлены в статье [40]) также подтвердили корректность данных изменений в методике расчета.

Дополнение комплекта выбранных атрибутов рекомендациями по их расчету позволяет перейти к интерпретации акустического обследования конструкции. Применение метода анализа отклика позволило обследовать несколько действующих подземных сооружений. Примеры результатов полевых работ позволяют показать специфику анализа результатов с помощью данной методики.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 963-976
© А.А.Чуркин, В.В.Капустин, М.С.Плешко, 2024

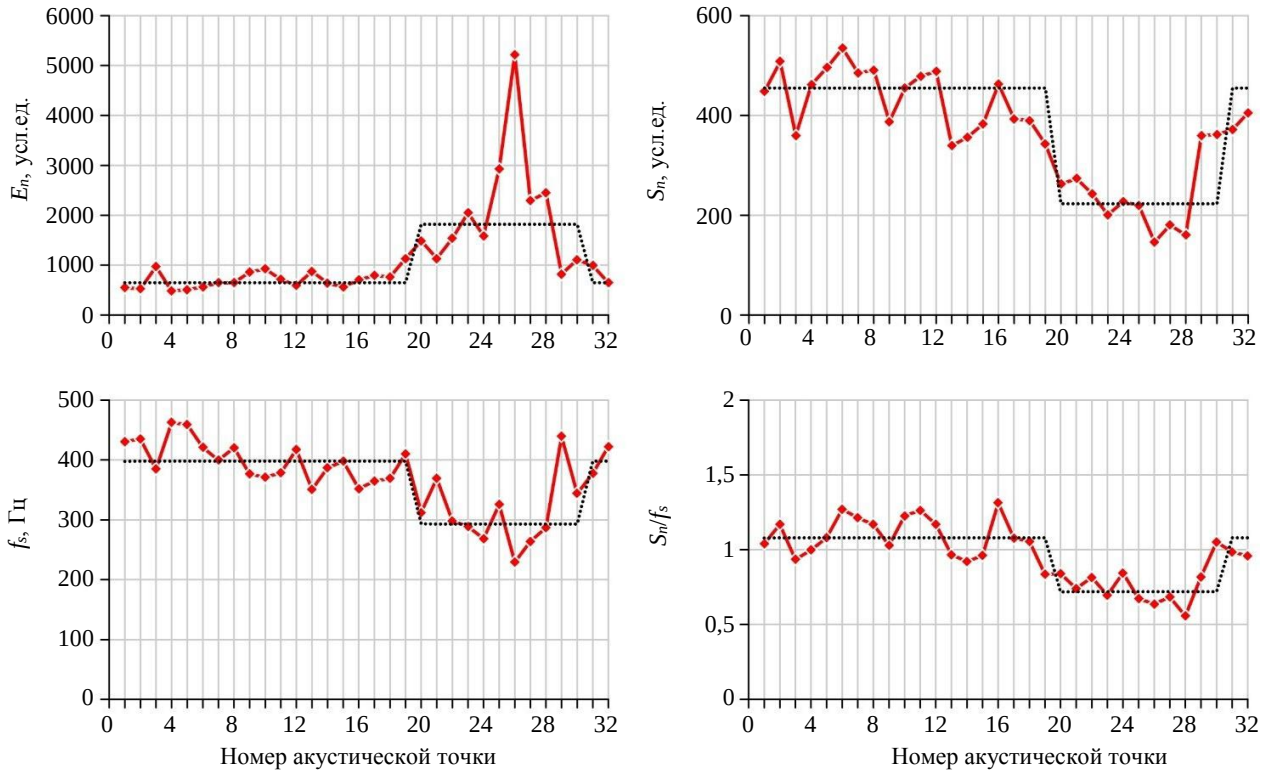


Рис.5. Атрибуты нормированного отклика, полученные при обследовании резиновой киянкой, после отбраковки сигналов, расчета медианных значений и пересчета для окна (0, 1000 Гц). Прерывистыми черными линиями обозначены медианные значения атрибутов для участков нормального и аномального состояния контакта «обделка – грунт»

Первый пример – обследование фундаментной плиты толщиной 0,6 м объекта незавершенного строительства. Данное значение толщины приблизительно соответствует верхнему пределу адекватных результатов обследования [36], возбуждение изгибного колебания для более массивной конструкции с ручным ударником может оказаться проблематичным. Для регистрации отклика использовался аппаратно-программный комплекс ИДС-1, в качестве источника была выбрана резиновая киянка с весом бойка 350 г. Для каждой точки измерения выполнялось пять накоплений сигнала. Задача заключалась в уточнении областей нарушения контакта плит с грунтами основания по отношению к периметру сооружений. Визуальные исследования показали некоторые последствия разуплотнения грунта основания.

Сеть наблюдений планировалась, исходя из задачи, следующим образом – плотная сеть (шаг между соседними точками ~1 м) равномерно покрывала внешний периметр. Центральные части сооружений были обследованы с помощью менее детальных продольных профилей (шаг между соседними точками ~5 м). Дополнительным ограничением для сети наблюдений была необходимость работы на открытом воздухе в зимний период. Подготовка точек измерения для установки датчиков и ограниченное время проведения исследований не позволили провести более детальные наблюдения для центральных частей конструкций.

Полученные результаты позволяют показать варианты визуализации данных. Карты атрибутов (значения были проинтерполированы между точками измерений, метод интерполяции – кригинг) показаны на рис.6. Традиционным способом представления результатов геофизических исследований является визуализация в цветовой шкале (min; max). Более информативным представляется использование метода визуализации данных, позволяющего с помощью статистических критериев выделить на плане области аномальных значений. Предлагаемый подход визуализации данных заключается в выборе цветовой шкалы, где цветовые переходы определяются границами стандартного отклонения σ-значений атрибутов. Модифицированный таким образом критерий 3σ (правило трех сигм, эмпирическое правило) дает грубую статистическую оценку собранному набору данных. Его применение позволяет выявить значительные отклонения от нормального поведения исследуемых параметров [26]. На рис.6, *а* показано хорошее соответствие совместного поведения атрибутов отклика критерию (2).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

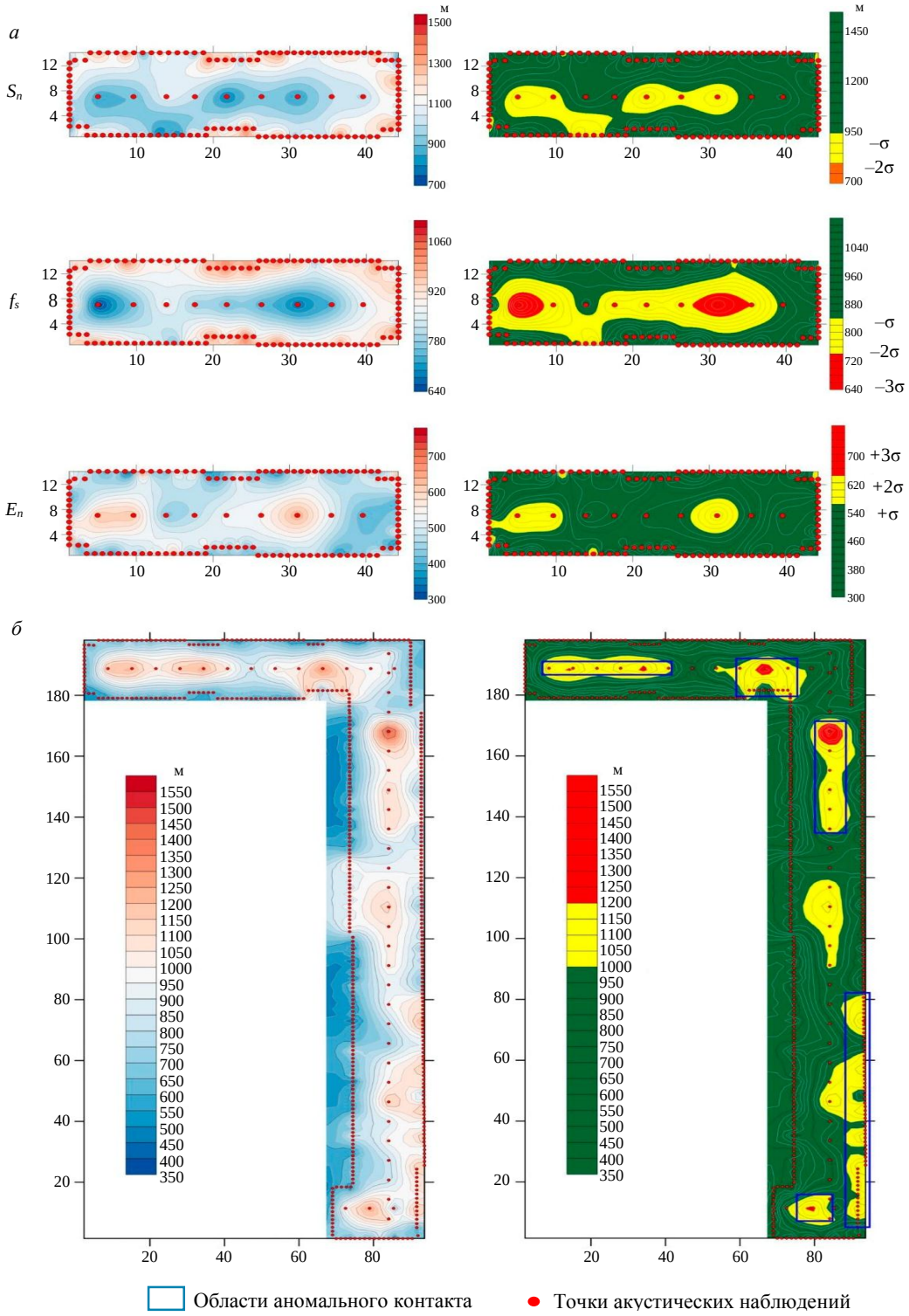


Рис.6. Карты атрибутов для первой плиты (*а*) и карта атрибута E_n для второй обследованной плиты (*б*). Цветовая шкала слева равномерно изменяется от минимальных до максимальных значений; цветовая шкала справа привязана к границам стандартного отклонения

Вторым аспектом анализа данных является неправильное использование статистических критериев для выделения аномальных зон без учета их размера и распределения в пределах исследуемой области [11]. Относительное пространственное расположение аномальных точек позволяет отделить случайные отклонения (возникающие из-за инструментальных ошибок или ошибок сбора данных) от зон предполагаемого нарушения контакта, прослеживаемых для нескольких точек наблюдения. На рис.6, *б* показан пример отбраковки аномальных зон на этапе интерпретации

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

результатов. В качестве «подозрительных» были выделены участки плиты с прослеживаемым для нескольких соседних точек наблюдения аномальным откликом.

Это позволило сделать вывод об относительном ослаблении контакта центральной части плит с грунтом, что объясняется неравномерной осадкой грунта из-за его неправильного уплотнения при подготовке к бетонированию сооружений. Результаты исследования были использованы при проектировании сети инъектирования цементного раствора.

Второй пример представляет результаты обследования фундаментной плиты толщиной 32-35 мм в основании существующего подземного сооружения. При укреплении грунтового основания сооружения были изготовлены вспомогательные грунтоцементные колонны, что привело к неравномерным осадкам плиты. Комплекс исследования методом анализа отклика и инъекций цемента для гидравлического опробования был использован для локализации участков нарушения контакта плиты с грунтовым основанием и развития дефектов в материале плиты.

Для акустических испытаний использовался прибор ИДС-2 (ООО «Логические системы»), в качестве ударника применялся резиновый молоток весом 450 г. Для каждой точки выполнялось 10 накоплений. Сбор данных осуществлялся с поверхности исследуемой конструкции. Удары киянкой наносились в разных направлениях от точки регистрации для увеличения соотношения сигнал/шум.

Обработка акустических данных проводилась в программе GeoTechControl. График обработки включал сортировку и сбор данных, присвоение геометрии, пространственную фильтрацию (для получения среднего отклика для каждой точки наблюдения). Затем рассчитывались атрибуты нормированного отклика и после интерполяции значений (с помощью кригинга) строились карты (рис.7). Для изучения контакта плиты с грунтом использовались критерии 3σ и совместного поведения атрибутов. По результатам исследования были выделены две аномальные зоны.

Аномальная зона, выявленная вблизи точки наблюдения 67, была подтверждена гидравлическими испытаниями. Цементный раствор, закачанный в грунт основания с глубины 1,5 м, начал вытекать на поверхность плиты через трещины и пустоты в строительном материале в районе точки 67. Декомпрессия грунта основания в районе точек 17, 40, 55 также была исключена при закачке раствора.

Подводя промежуточные итоги, можно вынести на обсуждение ряд вопросов. Для успешного применения предложенной методики при мониторинге подземных сооружений требуется решение следующих задач:

• изучение влияния на регистрируемые данные акустических интерференционных волн и шумов, обусловленных пространственными и материальными характеристиками сооружения;

• уточнение типов состояний контакта по акустическому отклику и разработка количественных критериев их разделения;

• разработка приборно-аппаратного комплекса, обеспечивающего быстрый сбор и обработку данных при обследовании сооружения с нетривиальной геометрией и затрудненным доступом к поверхности обследования – старые шахтные стволы, коммуникации метрополитена, элементы гидротехнических сооружений.

Вопрос влияния акустических интерференционных волн и шумов на регистрируемые данные регулярно возникает при классическом анализе кривой мобильности [8, 9, 21, 22, 36]. Влияние краевых эффектов может быть учтено на этапе планирования работ (точки сетки располагаются на расстоянии от нестандартных участков конструкции) или уже в процессе анализа данных (зоны изменения отклика для нестандартных участков отмечаются на картах вручную).

В российской практике традиционно выделяют три эмпирических типа состояний по акустическому отклику – прочный контакт, ослабленный и нарушенный [11, 26, 38]. Правило 3σ может быть адаптировано для этой классификации, однако из-за относительности критерия оно не может служить единственным способом отбраковки данных и требует дополнительной геофизической и геотехнической интерпретации результатов. Некоторые ученые склоняются к возможности повышения надежности применения относительных критериев путем установления достаточного количества наблюдений по сети (не менее 200 точек в случае, когда требуется контроль качества материала плиты) [36]. Аналогичные рекомендации могут быть разработаны для испытаний с использованием анализа нормированного отклика. В качестве дополнительных инструментов анализа можно указать расчет коэффициента вариации выборки каждого атрибута и построение диаграмм рассеяния для упрощения совместного анализа параметров.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

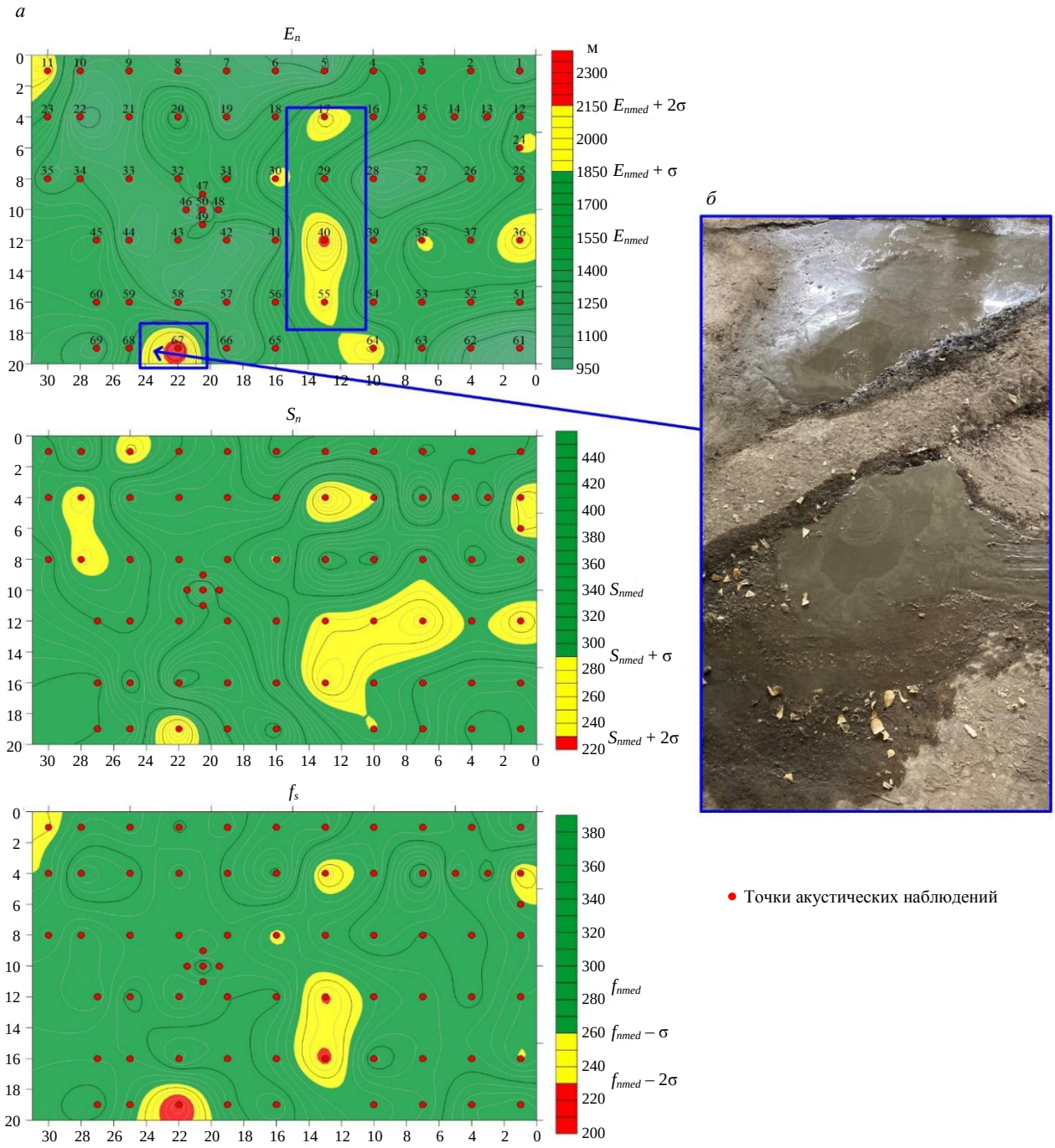


Рис.7. Результаты обследования фундаментной плиты в основании подземного сооружения (*а*) и подтверждение дефекта в теле фундаментной плиты вблизи точки 67 во время нагнетания цементного раствора (*б*). Индексом *nmed* отмечено медианное значение атрибута

Разработка новых синтетических параметров, характеризующих многослойную систему «бетон – тампонаж – грунт», может предоставить некоторые перспективы. Интересным способом обработки данных является сочетание атрибутов нормированного отклика с атрибутами мобильности, такими как индекс пустот или наклон кривой мобильности [21, 32, 37]. Так, в статье [40] показана возможность адаптации индекса пустот (void index) из ASTM C1740 для анализа данных нормированного отклика. Применение спектральных характеристик удара для нормализации отклика может уменьшить ошибки, связанные с условиями возбуждения сигнала (несмотря на первоначальное предположение, что влияние силы удара на отклик незначительно). Информативный параметр можно извлечь из сравнительного анализа нелинейных изменений отклика. Интересный подход, описанный в статье [41], пока представляется проблематичным для обследования реальных конструкций, однако также нуждается в развитии.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Несомненно, по мере накопления эмпирического материала возможно изменение количества критериев. Огромный интерес представляет появление количественных оценок для типа заполнения полостей за сооружением [33, 38]. Необходимым этапом для методики будет адаптация алгоритмов машинного обучения (в первую очередь кластерного анализа) для выделения аномальных точек по аналогии с предложенным в работе [42] подходе.

Для метода анализа мобильности некоторые производители разработали программно-аппаратные комплексы, которые полностью решают вопрос проведения полевых испытаний в соответствии с требованиями ASTM C1740-16 [8-10, 36, 37]. Поскольку испытания методом анализа нормированного отклика можно выполнять с помощью оборудования для сейсмоакустического контроля свай, основным вопросом является разработка программного комплекса (например, на основе применяемого в работе GeoTechControl) и рекомендаций для производителей оборудования по параметрам записи для датчиков (частота дискретизации, длина записи, динамический диапазон) для сбора кондиционных данных.

Заключение.

Предложенная методика применения атрибутов нормированного отклика позволяет реализовать быструю и экономичную неразрушающую технологию оценки различных плитоподобных структур. Расчет атрибутов прост и не занимает много времени, что позволяет проводить полуавтоматическую обработку данных при небольшом участии специалиста-обработчика. Методика может быть использована для оценки состояния различных подземных сооружений в процессе их строительства, эксплуатации, а также для оценки эффективности ремонтных работ с использованием инъекции раствора. Ряд вопросов методики требует развития и дополнения, что позволяет рассчитывать на ее разработку параллельно с более широко применяемыми методиками исследования плитоподобных структур, такими как метод анализа кривой мобильности или импакт-эхо метод.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Плешко М.С., Плешко М.В., Войнов И.В.* Оценка технического состояния железнодорожных тоннелей с большим сроком эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 34-40. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-34-40

2. *Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Y.* The experience of strengthening subsidence of the soil under the existing building in the city of Rostov-on-Don // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. № 02001. DOI: 10.1051/matecconf/201710602001

3. *Wuzhou Zhai, David Chapman, Dongming Zhang, Hongwei Huang.* Experimental study on the effectiveness of strengthening over-deformed segmental tunnel lining by steel plates // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 104. № 103530. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103530

4. *Zhi-Feng Wang, Wen-Chieh Cheng, Ya-Qiong Wang.* Quantitative Evaluation of Ground Movements Caused by Grouting during Shield Tunnelling in Clay // Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019. № 7498367. DOI: 10.1155/2019/7498367

5. *James C. Ni, Wen-Chieh Cheng.* Trial Grouting under Rigid Pavement: A Case History in Magong Airport, Penghu // Journal of Testing and Evaluation. 2012. Vol. 40. Iss. 1. P. 107-118. DOI: 10.1520/JTE103776

6. *Qing Yu, Kexin Yin, Jinrong Ma, Hideki Shimada.* Vertical Shaft Support Improvement Studies by Strata Grouting at Aquifer Zone // Advances in Civil Engineering. 2018. Vol. 2018. № 5365987. DOI: 10.1155/2018/5365987

7. *João Ricardo Marques Conde Da Silva.* Use of cement based grouts in the rehabilitation of concrete dams: a review / 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 27-29 August 2019, Potsdam, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing. 2020. Vol. 25 (1). 8 p.

8. *Cardarelli E., Marrone C., Orlando L.* Evaluation of tunnel stability using integrated geophysical methods // Journal of Applied Geophysics. 2003. Vol. 52. Iss. 2-3. P. 93-102. DOI: 10.1016/S0926-9851(02)00242-2

9. *Davis A.G., Lim M.K., Petersen C.G.* Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods // NDT & E International. 2005. Vol. 38, Iss. 3. P. 181-186. DOI: 10.1016/j.ndteint.2004.03.011

10. *Hertlein B., Davis A.* Nondestructive Testing of Deep Foundations. John Wiley & Sons, 2006. 296 p. DOI: 10.1002/0470034831

11. *Капустин В.В., Владов М.Л.* Техническая геофизика. Методы и задачи // Геотехника. 2020. Т. XII. № 4. С. 72-85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85

12. *Sheng Zhang, Wenchao He, Yongsuo Li, Yuchi Zou.* Thickness Identification of Tunnel Lining Structure by Time–Energy Density Analysis Based on Wavelet Transform // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2019. Vol. 12. Iss. 4. P. 28-37. DOI: 10.25103/jestr.124.04

13. *Kravitz B., Mooney M., Karlovsek J. et al.* Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 83. P. 381-392. DOI: 10.1016/j.tust.2018.09.032

14. *Ming Peng, Dengyi Wang, Liu Liu et al.* Recent Advances in the GPR Detection of Grouting Defects behind Shield Tunnel Segments // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 22. № 4596. DOI: 10.3390/rs13224596

15. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 1. С. 19-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-19-25

16. *Hui Qin, Yu Tang, Zhengzheng Wang et al.* Shield tunnel grouting layer estimation using sliding window probabilistic inversion of GPR data // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 112. № 103913. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103913

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

17. *White J.B., Wieghaus K.T., Karthik M.M. et al.* Nondestructive Testing Methods for Underwater Tunnel Linings: Practical Application at Chesapeake Channel Tunnel // Journal of Infrastructure Systems. 2017. Vol. 23. Iss. 3. 4 p. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000350

18. *Zatar W.A., Nguyen H.D., Nghiem H.M.* Ultrasonic pitch and catch technique for non-destructive testing of reinforced concrete slabs // Journal of Infrastructure Preservation and Resilience. 2020. Vol. 1. № 12. DOI: 10.1186/s43065-020-00012-z

19. *Chia-Chi Cheng, Chih-peng Yu, Jiunn-Hong Wu et al.* Evaluating the integrity of the reinforced concrete structure repaired by epoxy injection using simulated transfer function of impact-echo response / 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 10th International Conference on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, 21-26 July 2013, Baltimore, MD, USA. AIP Conference Proceedings, 2014. Vol. 1581. Iss. 1. P. 836-843. DOI: 10.1063/1.4864908

20. *Bahati P.A., Le V.D., Lim Y.* An impact echo method to detect cavities between railway track slabs and soil foundation // Journal of Engineering and Applied Science. 2021. Vol. 68. № 7. DOI: 10.1186/s44147-021-00008-w

21. *Shokouhi P., Wöstmann J., Schneider G. et al.* Nondestructive Detection of Delamination in Concrete Slabs: Multiple-Method Investigation // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2011. Vol. 2251. Iss. 1. P. 103-113. DOI: 10.3141/2251-11

22. *Sadowski Ł.* Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. Iss. 9. № 893. DOI: 10.3390/app7090893

23. *Terzioglu T., Karthik M.M., Hurlebaus S. et al.* Nondestructive evaluation of grout defects in internal tendons of post-tensioned girders // NDT & E International. 2018. Vol. 99. P. 23-35. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.05.013

24. *Hai-xiang Tang, Shi-guo Long, Ting Li.* Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 228. № 116762. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116762

25. *Hendricks L.J., Baxter J.S., Chou Y. et al.* High-Speed Acoustic Impact-Echo Sounding of Concrete Bridge Decks // Journal of Nondestructive Evaluation. 2020. Vol. 39. Iss. 3. № 58. DOI: 10.1007/s10921-020-00695-0

26. *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.

27. *Konishi S., Kawakami K., Taguchi M.* Inspection Method with Infrared Thermometry for Detect Void in Subway Tunnel Lining // Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. P. 474-483. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.723

28. *Jong-Ho Shin, Yong-Seok Shin, Jong-Ryeo Yoon, Ho-Jong Kim.* A Study on leakage monitoring of tunnel linings using the electric resistivity survey // Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association. 2008. Vol. 10. № 3. P. 257-267.

29. *Kumar J., Gohil R.R.* Non-destructive testing of slab-like structures including pavements using Lamb and Rayleigh waves-based dispersion analysis // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24. Iss. 1. № 2180147. DOI: 10.1080/10298436.2023.2180147

30. *Tremblay S.-P., Mhenni A., Karray M. et al.* Non-intrusive Characterization of Shallow Soils and Utility Structures Below Pavements Using Rayleigh Waves // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177. Iss. 2. P. 737-762. DOI: 10.1007/s00024-019-02333-x

31. *Goel A.* Applicability of SASW method for subsurface structural evaluation of layered asphalt pavements / NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (ISNT), 14-16 December 2017, Chennai, T.N., India. e-Journal of Nondestructive Testing, 2018. 8 p.

32. *Azari H., Yuan D., Nazarian S., Gucunski N.* Sonic Methods to Detect Delamination in Concrete Bridge Decks: Impact of Testing Configuration and Data Analysis Approach // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2012. Vol. 2292. Iss. 1. P. 113-124. DOI: 10.3141/2292-14

33. *Cao R., Ma M., Liang R., Niu C.* Detecting the Void behind the Tunnel Lining by Impact-Echo Methods with Different Signal Analysis Approaches // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. Iss. 9. № 3280. DOI: 10.3390/app9163280

34. *Chaudhary M.T.A.* Effectiveness of Impact Echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 753-759. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.021

35. *Solodov I., Bai J., Bekgulyan S., Busse G.* A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99. Iss. 21. № 211911. DOI: 10.1063/1.3663872

36. *Sajid S., Chouinard L.* Impulse response test for condition assessment of concrete: A review // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 211. P. 317-328. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174

37. *Ottosen N.S., Ristinmaa M., Davis A.G.* Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures // Journal of Engineering Mechanics. 2004. Vol. 130. Iss. 9. P. 1062-1071. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1062)

38. *Voznesenskii A.S., Nabatov V.V.* Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // Tunnelling and Underground Space Technology. 2017. Vol. 70. P. 254-261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010

39. *Шмурак Д.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Жостков Р.А.* Спектральный анализ данных параллельного сейсмического метода обследования подземных конструкций // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 1. С. 116-121. DOI: 10.31857/S0367676522010252

40. *Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Володин Г.В., Жостков Р.А.* Оценка качества контакта «плита-грунт» сейсмоакустическим методом: результаты численного моделирования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 1. С. 27-31.

41. *Hafiz A., Schumacher T., Raad A.* A self-referencing non-destructive test method to detect damage in reinforced concrete bridge decks using nonlinear vibration response characteristics // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 318. № 125924. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125924

42. *Sajid S., Chouinard L., Carino N.* Condition assessment of concrete plates using impulse-response test with affinity propagation and homoscedasticity // Mechanical Systems and Signal Processing. 2022. Vol. 178. № 109289. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.109289

Авторы: **А.А.Чуркин,** *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-4043-9590* (*Научно-исследовательский институт оснований и подземных сооружений им. Н.М.Герсеванова, Москва, Россия*), **В.В.Капустин,** *канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0001-9404-4407* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), **М.С.Плешко,** *д-р техн. наук, профессор, mixail-stepan@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2412-3075* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0