

УДК: 624.073.2:624.151.5:550.34.052:550.344.33

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-32-47)

### **Теоретические и экспериментальные исследования**

#### **Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция–грунт»**

**Чуркин Алексей Андреевич<sup>1</sup>, Смирнов Игорь Дмитриевич<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, Российская Федерация

**Аннотация:** *Введение.* Метод анализа отклика в настоящий момент является одним из наиболее распространенных способов акустической экспресс-диагностики состояния фундаментных плит и других плитоподобных конструкций за рубежом, однако сравнительно мало распространен в Российской Федерации. Модификация данной методики, основанная на анализе параметров нормированного отклика, активно разрабатывается отечественными специалистами для оценки качества контакта конструкций с грунтовым основанием. Актуальным является вопрос выработки новых информативных параметров и критериев для выделения аномалий, связанных с нарушениями контакта.

*Целью работы* является информирование специалистов о возможностях метода анализа нормированного акустического отклика для локализации зон нарушения контакта конструкция-грунт. Для достижения поставленной цели предложено применить атрибут «индекс пустот» и вспомогательный критерий анализа данных, основанный на характере распределения значений атрибутов.

*Материалы и методы.* Описаны особенности методики анализа нормированного акустического отклика, применяемой для поиска участков нарушенного контакта «конструкция-грунт». Показан способ расчета атрибута «индекс пустот» для данной методики. Предложен критерий выделения аномальных областей, отталкивающийся от анализа характера распределения значений атрибутов.

*Результаты.* Верификация применения атрибута «индекс пустот» для поиска зоны нарушения контакта конструкции с грунтом показана на результатах обследования физической модели тоннельной обделки с известным положением пустоты. На примере результатов обследования плиты в основании подземной автостоянки показано использование «индекса пустот» совместно с атрибутом энергии нормированного сигнала. Предложен вспомогательный критерий анализа данных, дополняющий критерий «трех сигма», и основанный на характере распределения значений атрибутов.

*Выводы.* Показан способ применения атрибута «индекс пустот» для локализации зон нарушения контакта конструкция-грунт для метода анализа нормированного акустического отклика. Предложен вспомогательный критерий анализа данных, учитывающий характер распределения атрибутов отклика.

**Ключевые слова:** фундаментные плиты, неразрушающий контроль, техническая геофизика, метод анализа отклика, атрибутный анализ, индекс пустот

@ A.A. Churkin, I.D. Smirnov, 2023

**Для цитирования:** Чуркин А.А., Смирнов И.Д. Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция–грунт» // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 32–47.  
DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-32-47)

#### **Вклад автора**

Авторы берут на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ***Theoretical and experimental studies***

#### **Development of normalized acoustic response analysis for soil-structure contact state evaluation**

Alexey A. Churkin<sup>1</sup>, Igor D. Smirnov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation

**Abstract: Introduction.** Impulse response testing is currently one of the most common methods of acoustic express diagnostics of the foundation slabs and other plate-like structures state, but is relatively uncommon in the Russian Federation. A modification of this technique, based on the analysis of normalized response parameters, is being actively developed by Russian specialists to assess the quality of soil-structure contact. The issue of developing of the new informative parameters and criteria for identifying of anomalies associated with contact violations is topical.

**Aim.** The purpose of the work is to inform specialists about the capabilities of the normalized acoustic response analysis method for localizing zones of soil-structure contact violation. It is proposed to apply the attribute "void index" and an auxiliary criterion for data analysis based on the nature of the distribution of attribute values.

**Materials and methods.** The features of the normalized acoustic response testing methodology for soil-structure contact violations searching are described. The method for calculating the attribute "void index" for the data of the technique is shown. A criterion for the selection of anomalous areas is proposed, based on the data analysis of the nature of the distribution of attribute values.

**Results.** Verification of the "void index" attribute application for searching for zones of soil-structural contact violation is shown on the results of a survey of a tunnel liner physical model with a known position of the void. An example of the results of a survey of a slab at the base of an underground car park shows the use of a "void index" in conjunction with the normalized signal energy attribute. A method for statistical processing of the results is proposed, which supplements the traditionally used "three sigma" criterion.

**Conclusions.** A method of the "void index" attribute application to localize zones of soil-structure contact violation for the normalized acoustic response analysis method is shown. A method for statistical data processing is proposed, considering the nature of the distribution of response attributes.

**Keywords:** foundation slabs, nondestructive testing, technical geophysics, impulse response testing, attribute analysis, void index

**For citation:** Churkin A.A., Smirnov I.D. Development of normalized acoustic response analysis for soil-structure contact state evaluation. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 32–47. [In Russian]

**DOI** [10.37153/2618-9283-2023-2-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-32-47)

#### **Author contribution statement**

The authors take responsibility of all aspects of the article preparation.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

#### **Введение**

Применение геофизических методов для исследования геотехнических конструкций обозначают термином «техническая геофизика» [1, 2]. При диагностике состояния фундаментных плит и других плитоподобных конструкций (обделка тоннелей и шахтная крепь, подпорные стены и др.) геофизика применяется для решения двух взаимосвязанных задач: оценки состояния материала (толщина, армирование, сплошность и т.д.) и оценки качества контакта с грунтовым основанием/вмещающими грунтами [3, 4]. Оба этих вопроса касаются сферы безопасности эксплуатируемых сооружений и могут вносить коррективы в прогноз их реакции на сейсмические воздействия. Своевременное выделение дефектов плитоподобных конструкций или областей нарушения их контакта с грунтом способно помочь в планировании ремонтно-восстановительных работ.

Среди множества методов геофизики для решения данных задач наиболее широкое распространение получили георадиолокационное профилирование (ground penetrating radar) [5–7] и сейсмоакустические методы: импакт-эхо метод (impact-echo testing) [4, 7, 8] и метод анализа отклика (impulse response testing).

Метод анализа отклика (вибраакустический метод) получил распространение за рубежом, однако сравнительно мало применяется в Российской Федерации [10–14], в основном для контроля качества тампонажа заобделочного пространства тоннелей [15–16]. Модификация методики, основанная на анализе параметров нормированного отклика, активно разрабатывается отечественными специалистами [12].

В рамках развития метода актуальны два направления – выработка новых информативных параметров и определение критериев для выделения акустических аномалий, связанных с нарушениями контактных условий. Применение параметра «индекс пустот» / "void index" при обработке данных и выделение аномального отклика при бимодальном характере распределения атрибутов в качестве возможного критерия предлагается обсудить в материале.

#### **Методы исследования**

Метод анализа отклика (вибраакустический метод) применяется для обнаружения нарушений контакта конструкции с грунтом. В основе метода лежит явление возникновения аномальных колебательных процессов в системе конструкция–грунт при ударно-акустическом воздействии.

При возбуждении низкочастотных колебаний в плите основными параметрами, характеризующими эффективность работы грунта основания в качестве демпфера,

являются продолжительность и амплитудно-частотный состав основного цуга колебаний [12] (рис. 1). Их аномальное изменение связывается с нарушением контакта (наличием зоны разуплотнения, пустоты или каверны) или неоднородностью материала (наличием неравномерно набравшего прочность бетона, бетона повышенной пористости и трещиноватости, расслоения) [15].

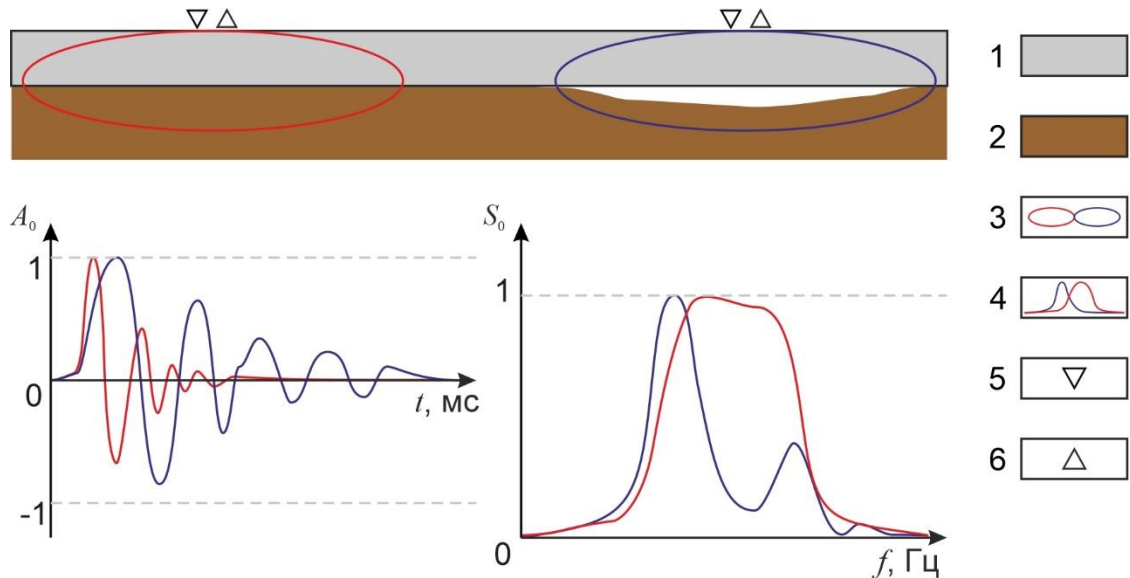


Рисунок 1 – Принципиальная схема метода анализа нормированного акустического отклика. Обозначения: 1 – конструкция, 2 – грунт, 3 – объем среды, вовлеченный в колебание, 4 – идеализированный отклик во временной и частотной области, 5 – источник, 6 – приемник

Figure 1– Schematic diagram of the normalized acoustic impulse response testing. Legend: 1 – structure, 2 – soil, 3 – medium volume involved in the oscillation, 4 – idealized response in the time and frequency domain, 5 – source, 6 – receiver

Метод анализа нормированного отклика состоит в сравнении взаимного поведения ряда атрибутов – энергии нормированного сигнала  $E_n$  (определяется во временной области), площади нормированного спектра  $S_n$  и средневзвешенной частоты  $f_s$  (рассчитываются в частотной области). Критерий выделения аномального отклика предполагает, что росту  $E_n$  для аномальной точки соответствует снижение  $S_n$  и  $f_s$  [12]. Практический опыт применения методики показал, что средневзвешенная частота обладает малой устойчивостью к акустическим помехам различного происхождения. Поэтому необходимо дополнение энергии и площади спектра атрибутом, реагирующим на рост вклада низкочастотных (изгибных) колебаний в отклик.

Комплект атрибутов можно дополнить за счет параметров, применяемых в других модификациях метода, в первую очередь методике анализа мобильности (mobility response testing). При использовании в качестве источника молотка с датчиком силы взаимодействие конструкции с основанием описывается т.н. кривой мобильности  $Mobility(f) = Signal(f)/Force(f)$  (mobility curve, «спектр механического адмиттанса»), где  $Signal(f)$  – спектр зарегистрированного сигнала,  $Force(f)$  – спектр силовой характеристики ударного импульса, записанный датчиком. Основными атрибутами для кривой мобильности являются [9, 10, 14]:

- среднее значение мобильности в частотном диапазоне 100–800 Гц  $M_{av}$ ;
- угол наклона кривой мобильности в полосе частот 0–40 Гц, т.н. «динамическая

жесткость»  $K_d$ ;

- угол наклона линии тренда (линейной регрессии) для кривой мобильности в частотном диапазоне 100–800 Гц  $M_p/N$ ;
- отношение пикового значения кривой мобильности в полосе частот 0–100 Гц к  $M_{av}$ , т.н. «индекс пустот».

Последний из параметров представляет интерес для оценки вклада низкочастотных колебаний в отклик и рекомендован стандартом ASTM C1740 для выделения областей расслоения бетона и нарушений контакта конструкция-грунт. Возможности адаптации параметра для методики анализа нормированного отклика способствует то, что его значение не связано напрямую с абсолютным значением мобильности, в отличие от других атрибутов.

Важным вопросом при применении метода анализа отклика является планирование сети наблюдений и определение минимального количества точек исследования. Сводная информация по оценкам оптимальных параметров для методики анализа мобильности собрана в [9]. Регистрация в полевых условиях массива сигналов с корректной сетью наблюдений не решает вопроса выбора критериев выделения аномального отклика.

Предложенный в [12] критерий «трех сигма» является достаточно жестким и требует ручной проверки корректности его применения при разделении данных [13]. Представляется необходимым учитывать при анализе характер распределения значений атрибутов для коррекции пороговых значений выделения аномалий.

Геофизические атрибуты не всегда имеют нормальный характер распределения (например, сопротивление в электроразведке имеет логнормальный характер) [17]. Для удобства визуального анализа полезно применять различные преобразования к данным. Распределение параметра может носить мультимодальный характер, каждая мода характеризует свою особенность предмета изучения [18]. На практике моды не всегда хорошо разделены даже для достаточно больших выборок [19]. Поэтому в каждом конкретном случае окончательные выводы по характеру и оценке параметров распределения должны приниматься интерпретатором [20].

Показанные в статье результаты получены с использованием измерителей длины свай первого и второго поколений, ИДС-1 и ИДС-2 («Логические системы», Россия). Рабочие комплекты приборов включали блоки управления и регистрации данных, датчик колебаний – стандартный велосиметр либо датчик GTSensor (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия), набор ударных источников (параметры ударников указаны в тексте).

Обработка результатов осуществлялась в программном обеспечении GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия). Использованный граф обработки включал сборку и сортировку сигналов в один массив данных с присвоением пространственной геометрии и удалением некондиционных сигналов; расчет атрибутов энергии нормированного отклика, площади нормированного спектра, средневзвешенной частоты для каждой трассы с последующим расчетом среднеарифметических атрибутов для каждой точки наблюдений. Расчет атрибута «индекс пустот» для массива данных осуществлялся с применением скрипта, написанного на языке Python.

## Результаты

Проиллюстрируем применение атрибута «индекс пустот» для набора данных, полученного при исследовании модельного кольца бетонной обделки толщиной 250 мм. С внешней стороны кольца оборудовалась щель между бетоном и грунтом. Более подробное описание модели дано в [12]. На внутренней поверхности кольца были равномерно распределены 32 точки наблюдений. Пустота в заобделочном пространстве располагалась между точками 19 и 29. Вблизи от точки 26 располагался разрыв в сегменте обделки. Для

возбуждения сигнала помимо резиновой киянки весом 400 г использовался металлический молоток с весом бойка 70 г.

Результаты обработки показывают, что для обоих ударных источников по «индексу пустот» выделяется зона нарушения сплошности обделки. Наличие пустоты в заобделочном пространстве хорошо коррелирует с ростом медианного значения атрибута в 2 и более раз. Результаты, полученные для низкочастотного воздействия киянки, лучше подчеркивают действительные границы зоны нарушения контакта (рис. 2).

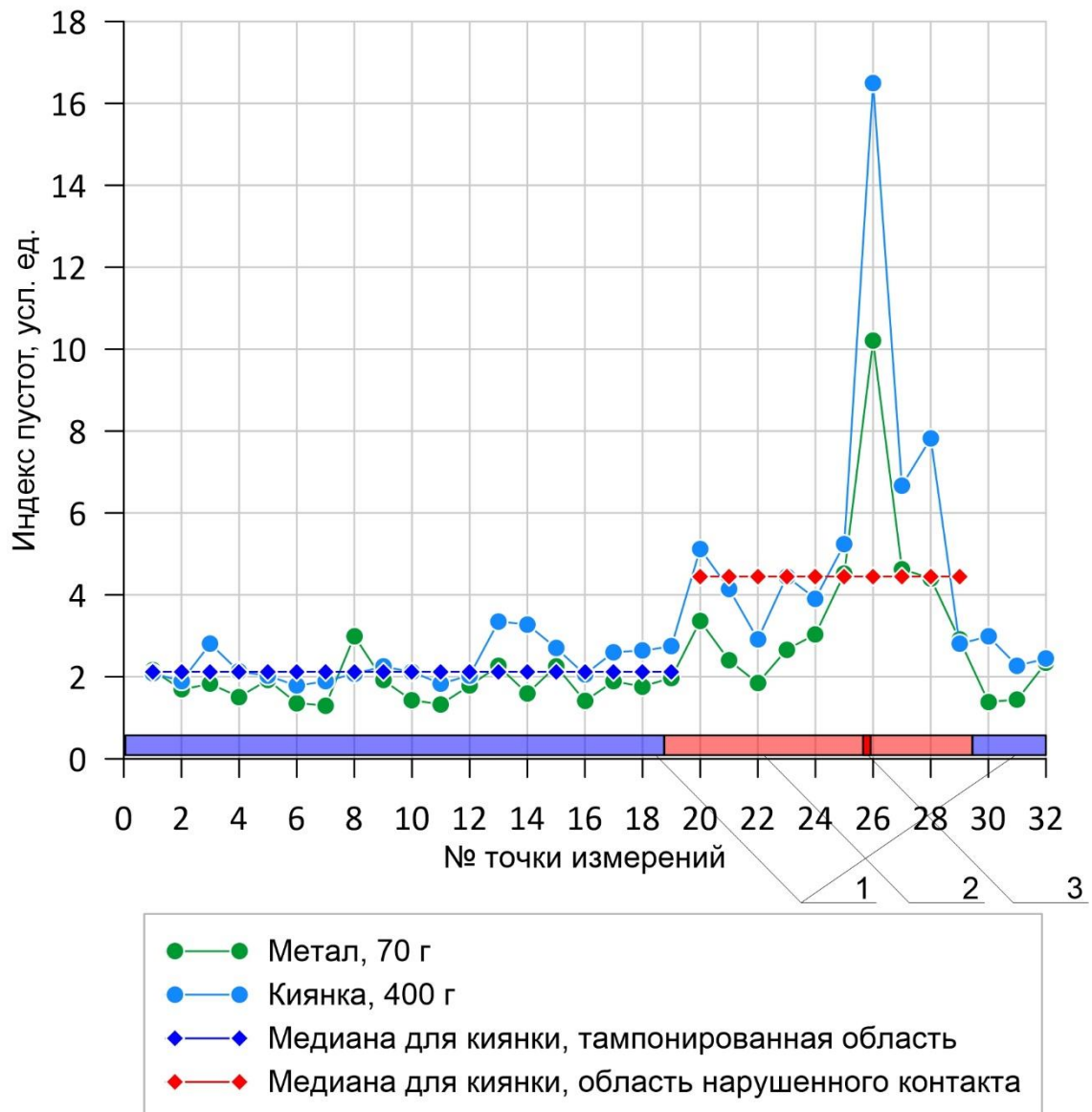


Рисунок 2 – Применение «индекса пустот» для данных, полученных на физической модели с известным положением пустоты в заобделочном пространстве: 1 – тампонируемая область, 2 – область нарушенного контакта, 3 – нарушение сплошности бетона обделки

Figure 2 – Application of the "void index" for data obtained on a physical model with a known position of the void behind liner: 1 – grouted area, 2 – area of loose contact, 3 – lining integrity defect

Показав чувствительность «индекса пустот», рассчитываемого для нормированного отклика, к наличию пустот и дефектов, рассмотрим результаты обследования монолитного покрытия мощностью 150 мм в основании подземного паркинга. Исследование выполнялось с целью локализации зон нарушения контакта «покрытие-грунт засыпки». В ходе работ по обустройству дренажной системы на объекте было выявлено несколько участков нарушенного контакта.

Для возбуждения сигнала использовалась резиновая киянка весом 1000 г (рис. 3а). Привязка сети наблюдений осуществлялась с применением лазерного дальномера (рис. 3б). Точки обследования располагались на удалении 0,5–1,0 м от стен, границ подколонных ростверков, дренажных приемков и других участков с потенциально аномальным откликом. В ходе проведения исследований выполнено 1140 точек акустического обследования (рис. 3с).

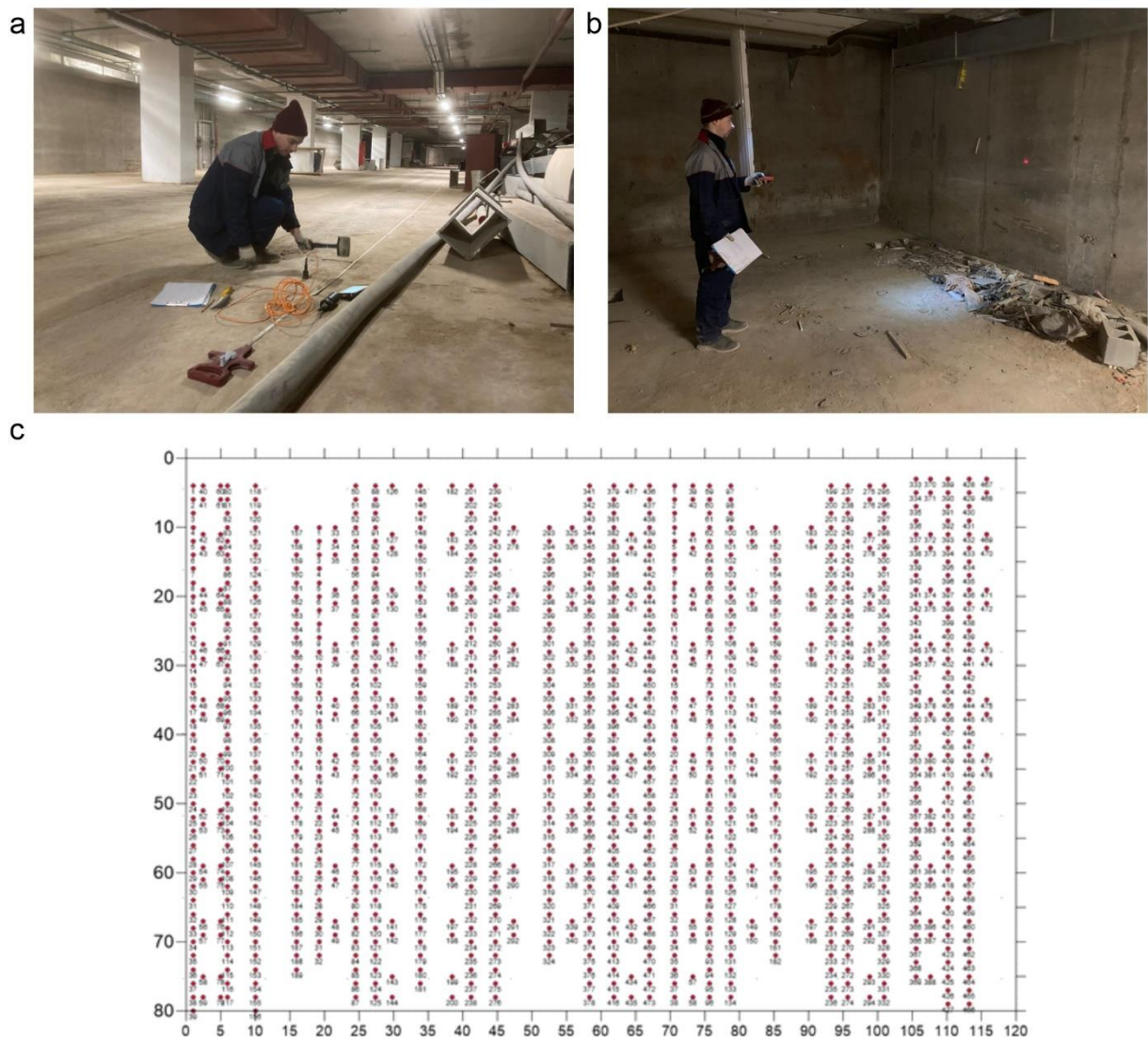


Рисунок 3 – Процесс обследования: *a* – измерения методом анализа отклика, *b* – привязка точек измерения, *c* – план-схема сети наблюдений

Figure 3 – Survey process: *a* – binding of measurement points, *b* – impulse response testing, *c* – plan-scheme of the observation network

Результаты обработки данных представлены на рис. 4 в виде карт распределения атрибутов энергии нормированного сигнала и индекса пустот. Для локализации нарушений контакта был использован критерий однократного (аномалия, «ослабленный контакт») и двукратного (сильная аномалия, «нарушенный контакт») превышения стандартного отклонения  $\sigma$  для атрибутов.

Способ расчета «индекса пустот» был изменен по результатам выборочного визуального анализа сигналов. Для точек со стабильным акустическим откликом сигнал быстро затухает во временной области (до 15 мс), его центральная частота совпадает с центральной частотой источника (400 Гц) (рис. 5, а). Для точек с нестабильным откликом время затухания основного цуга колебаний заметно растет (до 40 миллисекунд), центральная частота сигнала составляет около 200 Гц, частоты источника в спектре не выделяются (рис. 5, б). Наибольший интерес для анализа представляют точки с «промежуточным» характером отклика (рис. 5, с). Сигнал затухает на временах около 20–30 мс, центральная частота в спектре смещена в низкочастотную область, однако все еще прослеживается частота источника. Такой отклик может соответствовать области ослабления контакта.

Для всего массива зарегистрированных сигналов низкочастотные пики в спектре в основном располагались в интервале 50–200 Гц, а не в интервале 0–100 Гц. Поэтому окна расчета «индекса пустот» были изменены следующим образом: максимальная амплитуда нормированного спектра – 0–200 Гц, медианное значение нормированного спектра – 200–800 Гц.

Акустический отклик плиты в целом ведет себя неоднородно (коэффициент вариации для атрибута  $E_n$  составил 30%), однако анализ согласно критерию трех сигма дает возможность локализовать несколько областей аномального поведения отклика. Стоит отметить, что аномалии, расположенные вдоль 40 м по оси Y, связаны с особенностями конструктива (это ось организации дренажных приемков и отходящих от них каналов) и не выделялись в качестве аномальных.

Заметно, что границы аномальных областей, выделенные согласно критерию, различаются для энергии и «индекса пустот». На рост  $E_n$  влияют не только низкочастотные, но и высокочастотные помехи, в то время как «индекс» связан с относительным ростом низкочастотной области спектра. Это позволяет перейти к вопросу выбора критерия для разделения зон аномального и нормального отклика.

Для рассматриваемых выборок атрибутов, рассчитанных по 1140 точкам наблюдений, значения атрибута для случаев стабильного отклика (нормального контакта) и нестабильного отклика (ослабленного или нарушенного контакта) распределены различным образом. На суммарной гистограмме распределения мы имеем два различных события, объединенных вместе. Сложность определения порогового значения атрибута между нарушенным и ненарушенным контактом заключается в том, что распределения пересекаются в области точек с «промежуточным» характером отклика.

Для рассчитанных атрибутов построены гистограммы распределения (рис. 6, а, с). Распределение обоих параметров имеет ассиметричный характер и не является нормальным. После применения операции натурального логарифма к данным форма гистограмм стала более симметричной (рис. 6, б, d).

На гистограмме «индекса пустот» появилась возможность выделить пик второй моды. По итогам визуального анализа был выбран следующий критерий: значения, превышающие второй пик распределения, приняты в качестве аномальных; интервал от предполагаемой зоны пересечения мод (минимум гистограммы между пиками) до второго пика может соответствовать ослаблению контакта (промежуточный отклик). Определенные при визуальном анализе граничные значения затем были пересчитаны обратным преобразованием в исходное пространство значений (возведение экспоненты в степень граничного значения).



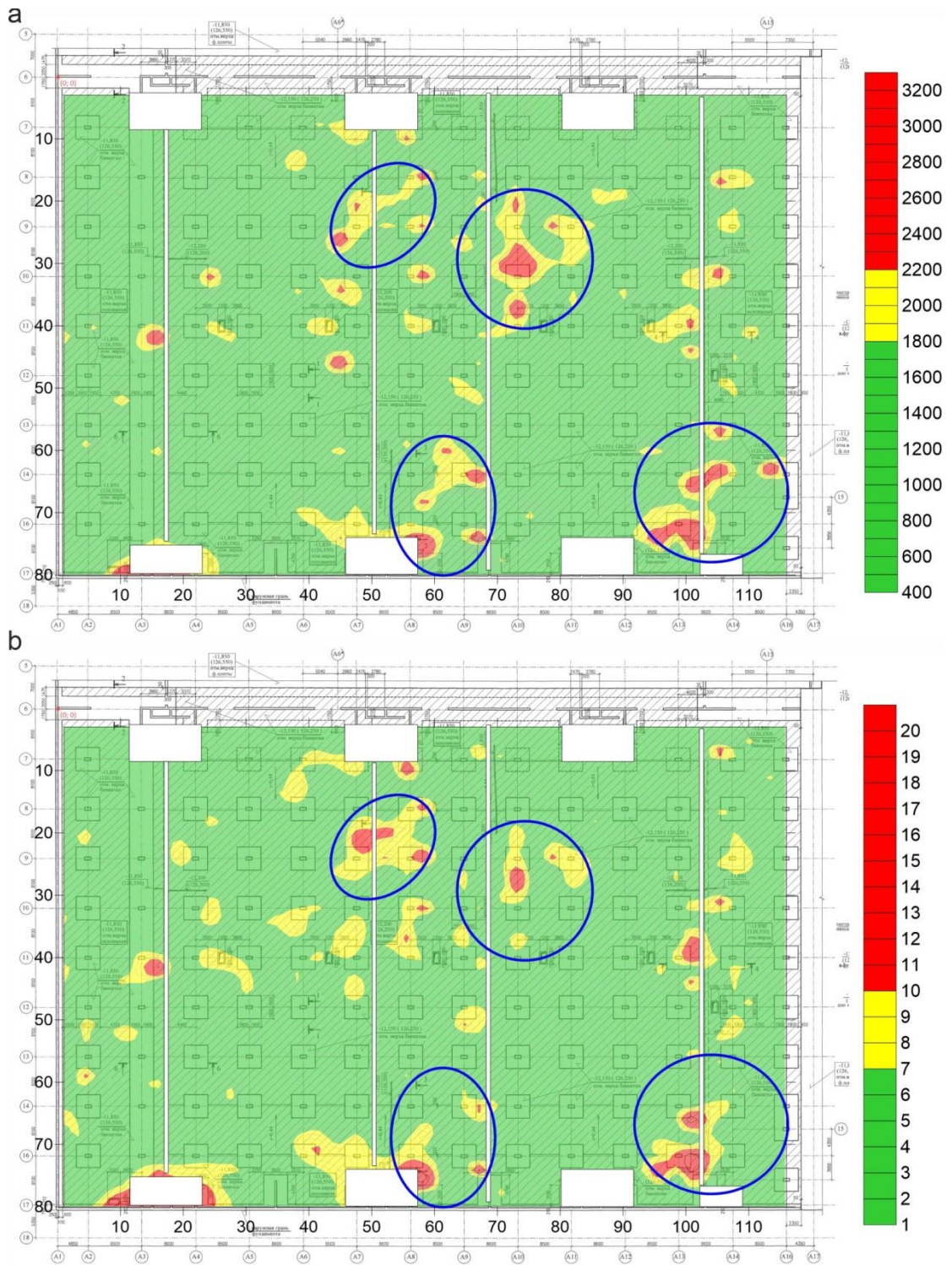


Рисунок 4 – Карты атрибутов  $E_n$  (a) и «индекса пустот» (b) с выделенными зонами аномального отклика согласно критерию «трех сигма»

Figure 4 – Attribute maps of  $E_n$  (a) and “void index” (b) with highlighted areas of anomalous response according to the “three sigmas” criterion

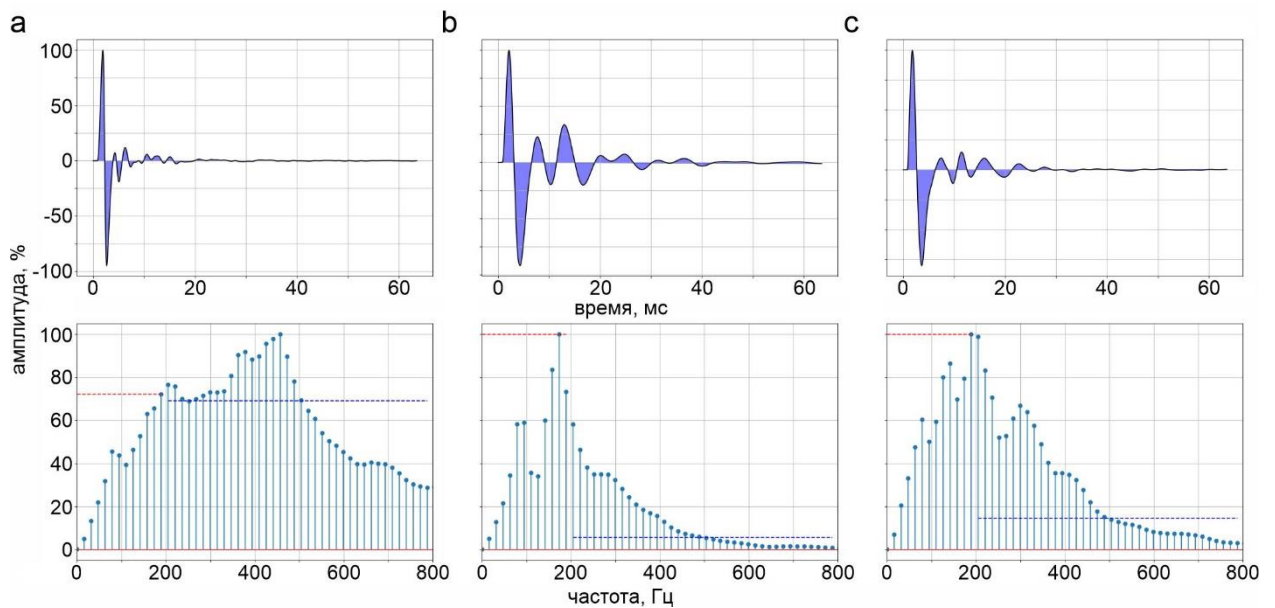


Рисунок 5 – Характерные примеры поведения отклика конструкции: *a* – стабильный отклик; *b* – нестабильный отклик; *c* – промежуточный по поведению отклик. Обозначения: красная пунктирная линия – максимальная амплитуда нормированного спектра в окне (0, 200) Гц, синяя пунктирная линия – медианное значение нормированного спектра в окне (200, 800) Гц

Figure 5 – Typical examples of structure response behavior: *a* – stable response; *b* – unstable response; *c* – intermediate behavioral response. Legend: the red dotted line – maximum amplitude of the normalized spectrum in the (0, 200) Hz, the blue dotted line – median value of the normalized spectrum in the (200, 800) Hz

Гистограмма энергии нормированного сигнала после преобразования стала чуть более симметричной, разделения мод нормального и аномального отклика в явном виде не произошло. В качестве граничной отсечки было выбрано значение, для которого предположительно проявляется вторая мода (асимметрия правой части гистограммы относительно основного пика). Пороговое значение, которое бы соответствовало промежуточному отклику (ослабление контакта), в отличие от гистограммы логарифма «индекса пустот», выделить не удалось.

На рис. 7 представлены карты распределения атрибутов с цветовой шкалой, соответствующей пороговым значениям, определенным при визуальном анализе гистограмм. Ранее выделенные области аномального отклика теперь имеют более четкий контур. Помимо этого, выделено несколько дополнительных аномальных областей. Карты энергий и индекса пустот согласуются между собой. Визуальный анализ сигналов для выделенных дополнительных областей показал, что карта «индекса пустот» с переопределенными значениями более точно описывает границы зон аномального отклика.

Необходимо отметить, что карты атрибутов отклика и выделенные на них аномальные области – это все еще результат обследования конструкции косвенным геофизическим методом. Только после применения прямых способов верификации (бурение, эндоскопия, зондирование и др.) и оценки согласованности акустических аномалий с действительными дефектами полученные карты атрибутов становятся инструментом планирования мероприятий по устранению зон с ослабленным или нарушенным контактом «плита–грунт».

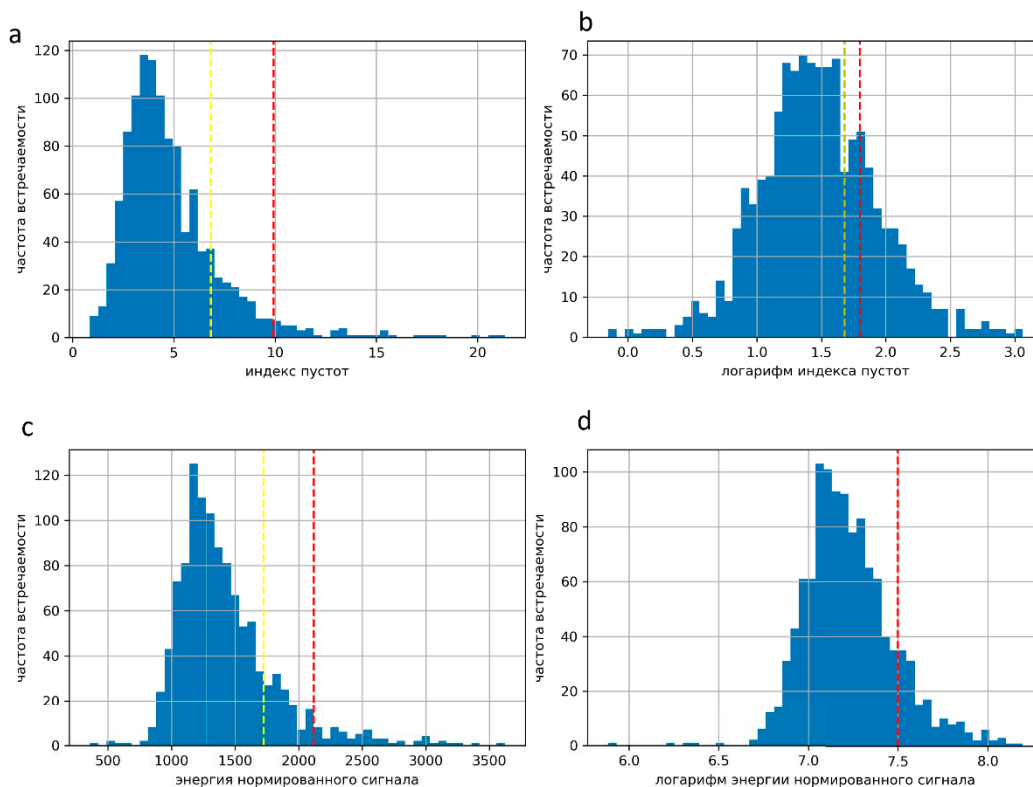


Рисунок 6 – Гистограмма распределения индекса пустот (а), гистограмма распределения логарифма индекса пустот (b), гистограмма распределения энергии нормированного сигнала (с), гистограмма распределения логарифма энергии нормированного сигнала (d). На исходных гистограммах желтая и красная пунктирные линии соответствуют критерию трех сигма. На преобразованных гистограммах желтая линия – точка пересечения распределений, красная линия – пик второй моды

Figure 6 – Histogram of “void index” distribution (a), logarithm distribution histogram of “void index” (b), normalized signal energy distribution histogram (c), normalized signal energy logarithm distribution histogram (d). On the original histograms the yellow and red dotted lines correspond to the three-sigma criterion. On the transformed histograms, the yellow line is the intersection point of the distributions, the red line is the peak of the second mode

## Заключение

На примере данных физического моделирования и обследования плиты подземного паркинга показана применимость атрибута «индекс пустот» для обработки данных метода анализа нормированного акустического отклика. Параметр чувствителен к аномалиям, интерпретируемым в качестве проявлений нарушения контактных условий.

Предложен критерий выбора пороговых значений, отталкивающийся от характера распределения значений атрибута. Критерий не является универсальным, однако для случая двухмодального распределения выборки показал свою эффективность и может применяться совместно с критерием «трех сигма».

Требует дополнительного исследования ряд вопросов. Индекс пустот является вспомогательным атрибутом, расчет которого возможно необходимо подстраивать под конкретную задачу, оптимальным образом выбирая методику расчета. Выбор способа статистической обработки данных также требует вмешательства интерпретатора и предварительного определения характера распределения атрибутов.

Предложенные дополнения к стандартной методике анализа нормированного акустического отклика требуют дальнейшей оптимизации и проверки на эмпирических данных для возможности включения их в стандартный граф работы с данными.

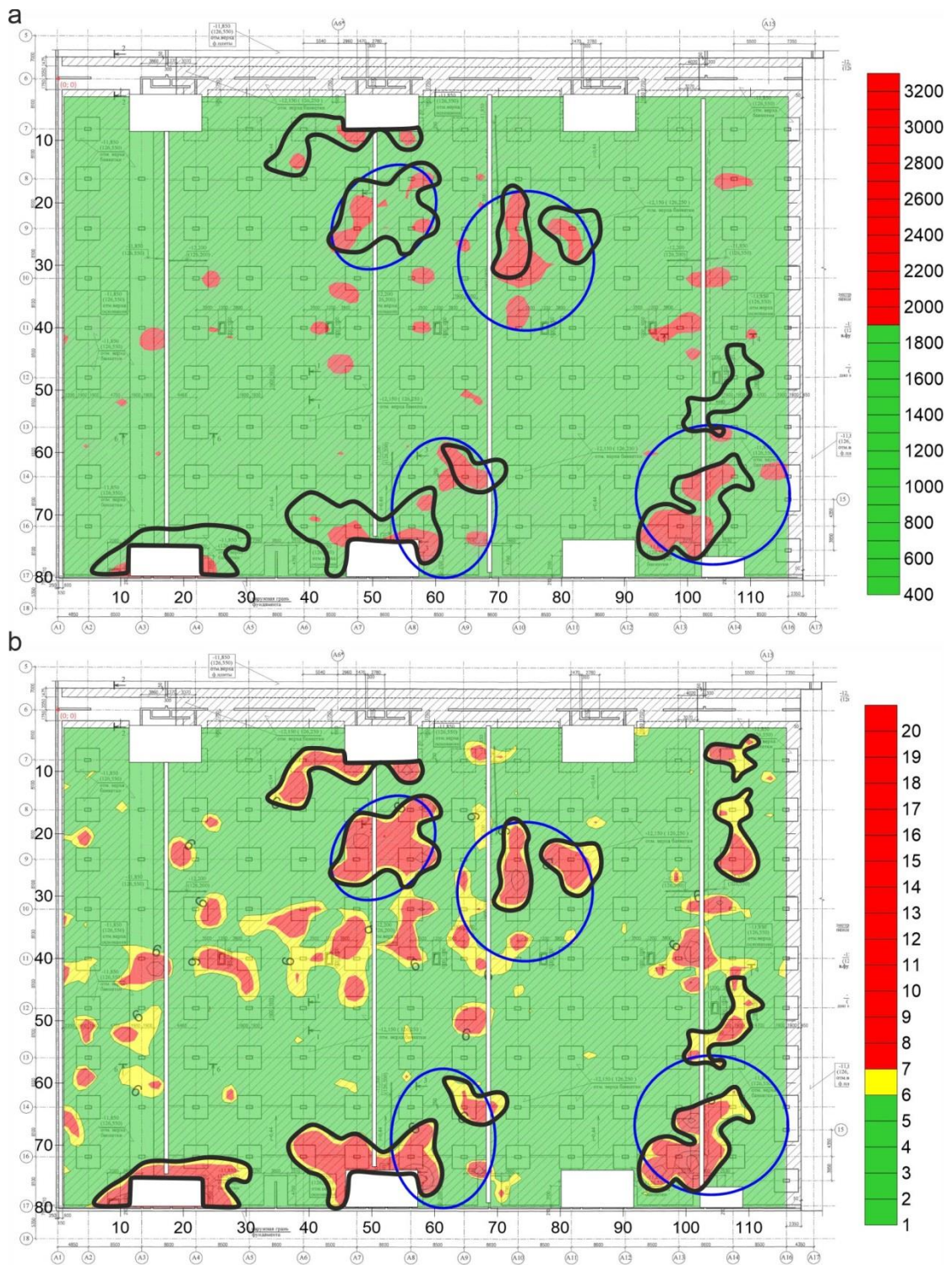


Рисунок 7– Карты атрибутов  $E_n$  (a) и «индекса пустот» (b) с выделенными зонами аномального отклика согласно критерию анализа гистограмм распределения

Figure 7– Attribute maps of  $E_n$  (a) and “void index” (b) with highlighted areas of anomalous response according to the distribution histogram analysis criterion

## Список литературы

1. Капустин В.В., Владов М.Л. Техническая геофизика. Методы и задачи // *Геотехника*. 2020. Т. 12. № 4. С. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85.
2. Чуркин А.А., Капустин В.В., Конюхов Д.С., Владов М.Л. Последние изменения в российской практике нормативного регулирования «технической» геофизики // *Геотехника*. 2021. № 2. С. 56–70. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70.
3. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит / Д.И. Блохин, А.С. Вознесенский, И.И. Кудинов и др. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 2. С. 283–289.
4. Sadowski L. Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors. *Applied Sciences*, 2017, vol. 9, no. 7, article no. 893. DOI: 10.3390/app7090893.
5. Xie X., Liu Y., Huang H., Du J., Zhang F., Liu L., 2007. Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China. *Journal of Geophysics and Engineering*. Vol. 4, no. 3, pp. 253–261. DOI: 10.1088/1742-2132/4/3/S03.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., Ширококов М.П. Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // *Геотехника*. 2021. № 1. С. 68–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79.
7. Капустин В.В., Ширококов М.П. Применение георадарных технологий при обследовании подводных конструкций гидротехнических сооружений // *Геотехника*. 2021. Т. 13. № 3. С. 54–65. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-3-54-65.
8. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T., 2009. Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE. *NDT & E International*, vol. 42, no. 8, pp. 678–689. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.06.001.
9. Sajid S., Chouinard L. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review. *Construction and building materials*. 2019, vol. 211, pp. 129–140, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174.
10. Tang H., Long S., Li T., 2019. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*, vol. 228, article no. 116762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. Dodge E.C., Chapa S.V., 2015. Impulse response testing – analysis of relative test data. *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, September, 2015.
12. 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.
13. Володин Г.В., Капустин В.В. Анализ колебаний фундаментных плит для оценки контакта с грунтами // *Геотехника*. 2021. Т. 13. № 4. С. 64–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-4-64-79.
14. Ottosen N.S., Ristinmaa M., Davis A.G. Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures. *J. Eng. Mech.* 2004, no. 9, pp. 1062–1071, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1062).
15. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Комплексные обследования бетонных и железобетонных обделок транспортных тоннелей ультразвуковым и ударно-акустическим методами // *Транспортное строительство*. 2014. № 5. С.12–14.

16. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel survey using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, no. 70, pp. 254–261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010.
17. Модин И.Н., Шевнин В.А. Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения // *Прикладная геофизика*. Выпуск 109. Москва: Издательство «Недра». 1984. С. 75–82.
18. Ллойд Э., Эдерман У. Справочник по прикладной статистике. Том 1. Москва: «Финансы и статистика». 1989. 511 с.
19. Нерадовский Л.Г. Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада» // *Вестник евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 6. DOI: 10.15862/25ECVN621
20. Шейнин В.И., Дзагов А.М. Использование логнормального распределения при обработке результатов испытаний грунтов сваями // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021. № 3. С. 2–5.

## References

1. Kapustin V.V., Vladov M.L. Tekhnicheskaya geofizika. Metody i zadachi. *Geotekhnika*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85. [In Russian]
2. Churkin A.A., Kapustin V.V., Konyuhov D.S., Vladov M.L. Poslednie izmeneniya v rossijskoj praktike normativnogo regulirovaniya «tekhnicheskoj» geofiziki. *Geotekhnika*. 2021, no. 2, pp. 56–70, DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70. [In Russian]
3. Opyt ispol'zovaniya geofizicheskikh metodov dlya ocenki fakticheskikh konstruktivnykh parametrov zhelezobetonnykh fundamentnykh plit / D.I. Blohin, A.S. Voznesenskij, I.I. Kudinov i dr. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2011, no. 2, pp. 283–289. [In Russian]
4. Sadowski L. Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors. *Applied Sciences*, 2017, vol. 9, no. 7, article no. 893. DOI: 10.3390/app7090893.
5. Xie X., Liu Y., Huang H., Du J., Zhang F., Liu L., 2007. Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China. *Journal of Geophysics and Engineering*. Vol. 4, no. 3, pp. 253–261. DOI: 10.1088/1742-2132/4/3/S03.
6. Kapustin V.V., Churkin A.A., Shirobokov M.P. Opyt primeneniya georadiolokacii dlya kontrolya kachestva fundamentnykh plit. *Geotekhnika*. 2021, no. 1, pp. 68–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79. [In Russian]
7. Kapustin V.V., Shirobokov M.P. Primenenie georadarnykh tekhnologij pri obsledovanii podvodnykh konstrukcij gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. *Geotekhnika*. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 54–65. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-3-54-65. [In Russian]
8. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T., 2009. Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE. *NDT & E International*, vol. 42, no. 8, pp. 678–689. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.06.001.
9. Sajid S., Chouinard L. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review. *Construction and building materials*. 2019, vol. 211, pp. 129–140, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174.

10. Tang H., Long S., Li T., 2019. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*, vol. 228, article no. 116762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. Dodge E.C., Chapa S.V., 2015. Impulse response testing – analysis of relative test data. *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, September, 2015.
12. Churkin A.A., Khmel'nitsky A.Yu., Kapustin V.V. Evaluation of soil-structure contact state by normalized acoustic response analysis. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022, no. 5, pp. 453–458. DOI: 10.1007/s11204-022-09836-1
13. Volodin G.V., Kapustin V.V. Analiz kolebanij fundamentnyh plit dlya ocenki kontakta s gruntami. *Geotekhnika*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 64–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-4-64-79. [In Russian]
14. Ottosen N.S., Ristinmaa M., Davis A.G. Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures. *J. Eng. Mech.* 2004, no. 9, pp. 1062–1071, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1062).
15. Shilin A.A., Kirilenko A.M., Znajchenko P.A. Kompleksnye obsledovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh obdelok transportnyh tonnelej ul'trazvukovym i udarno-akusticheskim metodami. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2014, no. 5, pp. 12–14. [In Russian]
16. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel survey using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, no. 70, pp. 254–261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010.
17. Modin I.N., Shevnin V.A. Sootvetstvie dannyh elektrorazvedki lognormal'nol'nomu zakonu raspredeleniya. *Prikladnaya geofizika*. Vypusk 109. Moskva: Izdatel'stvo «Nedra». 1984, pp. 75–82. [In Russian]
18. Llojd E., Ederman U. Spravochnik po prikladnoj statistike. Tom 1. Moskva: «Finansy i statistika». 1989. 511 p. [In Russian]
19. Neradovskij L.G. Opyt izucheniya metodom VEZ geoelektricheskogo stroeniya doliny reki Leny «Tujmaada». *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2021, vol. 13, no. 6. DOI: 10.15862/25ECVN621 [In Russian]
20. Shejnin V.I., Dzagov A.M. Ispol'zovanie lognormal'nogo raspredeleniya pri obrabotke rezul'tatov ispytaniy gruntov svayami. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2021, no. 3, pp. 2–5. [In Russian]

## Информация об авторах / Information about the authors

**Чуркин Алексей Андреевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории новых видов свайных фундаментов ЦИСФ НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация  
e-mail: [chaa92@mail.ru](mailto:chaa92@mail.ru)

**Aleksei A. Churkin**, Cand. Sci. (Engineering), senior researcher of the laboratory of new types of pile foundations of the Pile Foundation Research Center of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

**Смирнов Игорь Дмитриевич**, инженер лаборатории новых видов свайных фундаментов ЦИСФ НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство»; магистр кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Российская Федерация

e-mail: smirnov.ya-igor1999@yandex.ru

**Igor D. Smirnov**, engineer of the laboratory of new types of pile foundations of the Pile Foundation Research Center of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow; master of the department of seismometry and geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation