



ГЕОТЕХНИКА

GEOTECHNICS

Том XII, Vol. XII

3

2020

ГЕОТЕХНИКА

Международный научно-практический журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Издается с декабря 2009 г.

Выходит 4 раза в год.

ISSN: 2221–5514 (Print), ISSN: 2587–8239 (Online)
Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в области механики грунтов, геотехники, проектирования оснований и фундаментов. Основные темы — теоретические и прикладные аспекты механики грунтов, описание механических свойств грунтов, проектирование и устройство оснований и фундаментов, подземных и заглубленных сооружений, методы численного моделирования в строительстве, контроль качества работ и обследование конструкций нулевого цикла, а также многие другие вопросы.

УЧРЕДИТЕЛЬ

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО

ООО «Геомаркетинг», 115088, РФ,
Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

РЕДАКЦИЯ

Кондратьева Екатерина Андреевна
Генеральный директор

Барькина Ольга Сергеевна
Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна
Отдел рекламы и отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

ООО «Геомаркетинг»
107076, РФ, Москва, ул. Электrozаводская, д. 60
Тел. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А.
Допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

ООО «ТЕКС-ПРИНТ», 107023, РФ, Москва,
ул. Большая Семеновская, д. 49

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Васенин В.А.

Критерии ограничения сжимаемой толщи при расчете осадок оснований зданий и сооружений. Часть 2. Реализация комплексных расчетов применительно к инженерно-геологическим условиям г. Санкт-Петербурга 6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ

Готман А.Л., Крутяев С.А.

Исследования работы горизонтально нагруженных пирамидальных свай и их расчет 26

ПРОИЗВОДСТВО ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г., Лукин В.М.

Результаты геотехнического мониторинга при строительстве высотного здания в г. Санкт-Петербурге 36

ГЕОФИЗИКА В ГЕОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Чуркин А.А., Капустин В.В.

Анализ динамических свойств акустического сигнала для сравнительной оценки контактных условий свай 56

Басов А.Д., Романевич К.В., Андрианов С.В., Шляев С.А.

Натурные исследования естественного электромагнитного излучения при вибрационных нагрузках 70

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

- 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 05.23.07 – Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.08 – Технология и организация строительства (технические науки);
- 05.23.17 – Строительная механика (технические науки);
- 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);
- 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);
- 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физико-математические науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки);
- 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки).

NUMERICAL MODELING

Vasenin V.A.

Compressed thickness limitation criteria in settlement analysis of building and structure footings. Part 2. Realisation of complex calculations applicable to Saint Petersburg's engineering-geological conditions6

BEDS AND FOUNDATIONS DESIGN

Gotman A.L., Krutyaev S.A.

Experimental studies of a horizontally loaded pyramidal piles and its calculation26

GEOTECHNICAL WORKS PRODUCTION

Shashkin A.G., Shashkin K.G., Bogov S.G., Lukin V.M.

The results of geotechnical monitoring during the construction of high-rise building in Saint Petersburg36

GEOPHYSICS IN GEOTECHNICAL CONSTRUCTION

Churkin A.A., Kapustin V.V.

The analysis of the dynamic properties of the acoustic signal for comparative assessment of the contact conditions of piles56

Basov A.D., Romanevich K.V., Andrianov S.V., Shlyayev S.A.

Field studies of natural electromagnetic radiation under vibration loads70



GEOTECHNICS

International scientific and practical journal

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

Published since December 2009.

Issued 4 times a year.

ISSN: 2221-5514 (Print), ISSN: 2587-8239 (Online)
Prefix DOI: 10.25296

The journal publishes articles by leading experts in the field of soil mechanics, geotechnics, foundation engineering. The main topics are theoretical and applied aspects of soil mechanics, description of soil mechanical properties, design and construction of foundations, underground and buried structures, methods of numerical modeling in construction, quality control and inspection of zero-cycle structures, as well as many other issues.

FOUNDER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

PUBLISHER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

JOURNAL EDITORING

Ekaterina A. Kondratieva
General Director

Olga S. Barykina
Literary Editor

Marina S. Kashkina
Advertising Department and Subscription Department

CONTACTS

Geomarketing LLC
107076, Russian Federation, Moscow,
Electrozavodskaya St., Bld. 60
Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06
E-mail: info@geomark.ru
<http://geomark.ru>

Individual entrepreneur Gilmanov M.A.
Prepress, Design and Layout

PRINTING HOUSE

TEKS-PRINT LLC, 107023, Russian Federation,
Moscow, Bolshaya Semenovskaya St., Bld. 49

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОНТАКТНЫХ УСЛОВИЙ СВАЙ

ЧУРКИН А.А.*

ООО «ЭГЕОС», г. Москва, Россия, chaa92@mail.ru

Адрес: ул. Миклухо-Маклая, вл. 8, стр. 3, г. Москва, 117198, Россия

КАПУСТИН В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

г. Москва, Россия, 1391854@mail.ru

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

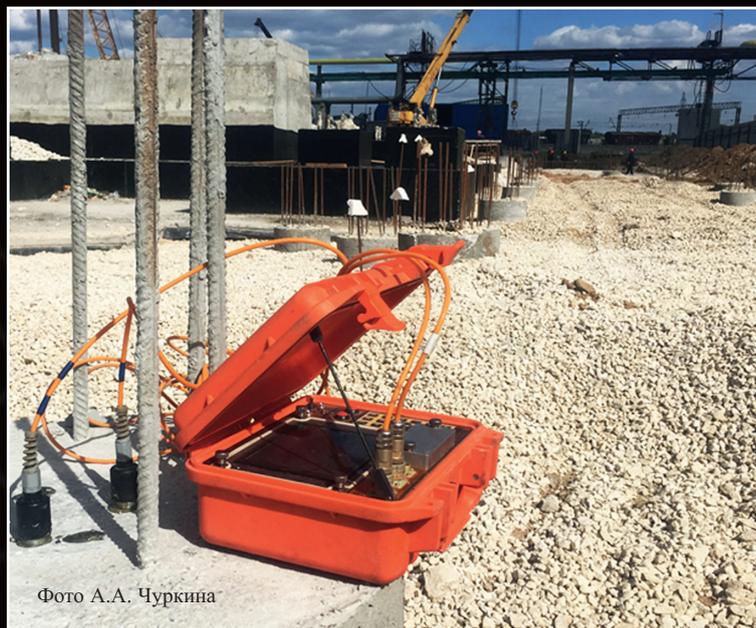


Фото А.А. Чуркина

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 22.08.2020 / Принята к публикации 25.09.2020 / Дата публикации 30.09.2020

© ООО «Геомаркетинг», 2020

АННОТАЦИЯ

Сейсмоакустический метод — наиболее широко применяемый неразрушающий геофизический метод контроля длины и сплошности свай. Физическая основа метода заключается в регистрации отклика сваи на возбуждение в ее теле упругих волн с помощью механического удара. Анализ получаемых данных производится во временной и частотной областях с целью получения информации о состоянии изучаемой конструкции. Теоретические основы методики подразумевают влияние контакта сваи с вмещающим грунтом на характер распространения возбуждаемых колебаний. Непосредственный практический интерес представляет возможность получения сравнительной характеристики контактных условий для свай в пределах изучаемого фундамента. Косвенная информация о работе свай в грунте, полученная сейсмоакустическим методом, дополняет результаты прямых испытаний несущей способности свай (статических, динамических, использующих принципы волновой теории удара). Предлагаемая авторами методика опирается на связь контактных условий с поглощением энергии возбуждаемых в свае упругих волн. Атрибуты площади нормированного спектра и средневзвешенной частоты предлагаются для сравнительной оценки поглощения в колебательной системе свая — грунт. Корректность данного предложения была подтверждена результатами полевых экспериментов и исследований с использованием численного моделирования. В статье предложены способы интерпретации атрибутов отклика отдельных свай изучаемого фундамента, позволяющие разделить их на ряд групп: свай с потенциальным нарушением контакта, свай с возможными дефектами сплошности или неоднородностью оголовка и др. Для анализа данных предлагается использовать корреляционные диаграммы атрибутов, количественную характеристику поведения которых возможно дать с использованием статистических параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сейсмоакустический метод; испытания свай; контакт сваи с грунтом; атрибутный анализ; корреляционные диаграммы; статистический анализ

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чуркин А.А., Капустин В.В., 2020. Анализ динамических свойств акустического сигнала для сравнительной оценки контактных условий свай. Геотехника, Том XII, № 3, с. 56–68, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-3-56-68>.

Чуркин А.А., Капустин В.В., 2020

THE ANALYSIS OF THE DYNAMIC PROPERTIES OF THE ACOUSTIC SIGNAL FOR COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE CONTACT CONDITIONS OF PILES

ALEKSEI A. CHURKIN*

AIGEOS LLC; Moscow, Russia; chaa92@mail.ru

Address: Bld. 8, Pde 3, Mikluho-Maklaya St., 117198, Moscow, Russia

VLADIMIR V. KAPUSTIN

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

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

Original paper

Received 22 August 2020 / Accepted 25 September 2020 / Published 30 September 2020

© Geomarketing LLC, 2020

ABSTRACT

The low strain impact is the most widely used of the non-destructive geophysical methods for the pile length and integrity evaluation. The physical basis of the method consists in recording the response of a pile to the propagation of elastic waves excited by a mechanical impact. The analysis of the data is carried out in the time and frequency domains to obtain information about the state of the structure. The theoretical basis of the technique implies the effect of the contact of the pile with the surrounding soil on the propagation of excited vibrations. The possibility of obtaining a comparative characteristic of the contact conditions for piles within the studied foundation is of immediate practical interest. Indirect information about the pile-soil interaction, established by the low strain testing, supplies the results of direct tests of the bearing capacity of piles (static load, dynamic, high strain dynamic testing). The method proposed by the authors is based on the connection of contact conditions with the energy absorption of elastic waves excited in the pile. The attributes of the normalized spectrum area and the average-weighted frequency are proposed for a comparative assessment of absorption in the pile-soil vibrational system. The correctness of this proposal was confirmed by the results of field experiments and numerical simulations. The paper proposes ways of interpreting the response attributes of individual piles of the studied foundation, allowing them to be divided into several groups: piles with a potential contact failure, piles with possible defects or pile head inhomogeneity, etc. For data analysis, it is proposed to use correlation diagrams of attributes, which quantitative characterization can be given using statistical parameters.

KEY WORDS

Low strain impact method; pile testing; pile-soil contact; attribute analysis; correlation diagrams; statistical analysis

FOR CITATION:

Churkin A.A., Kapustin V.V., 2020. The analysis of the dynamic properties of the acoustic signal for comparative assessment of the contact conditions of piles. *Geotechnics*, Vol. XII, No. 3, pp. 56–68, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-3-56-68>.

Введение

Сейсмоакустический метод (Low Strain Impact Testing, Sonic, SIT) активно применяется для контроля длины и сплошности бетона свайных фундаментов. Массовый характер применения метода обусловлен требованиями СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты» — для оценки качества устройства изготовленных свай рекомендуется выполнение сплошного (полного) контроля качества сейсмоакустическим, ультразвуковым или радиоизотопным методами.

Среди предложенных в своде правил геофизических методов сейсмоакустический отличается минимальным объе-

мом подготовительных работ и наибольшей производительностью. При возведении сооружений промышленного и гражданского строительства наибольшее количество свай проходит экспресс-оценку качества по данной методике. Собираются массивы данных, в которых акустическим сигналам могут быть сопоставлены определенные параметры изучаемых свай, сведения о технологии их устройства, характеристики вмещающих грунтов. Для оценки достоверности результатов применения сейсмоакустического метода к анализу данных часто привлекается аппарат математической статистики [12, 13].

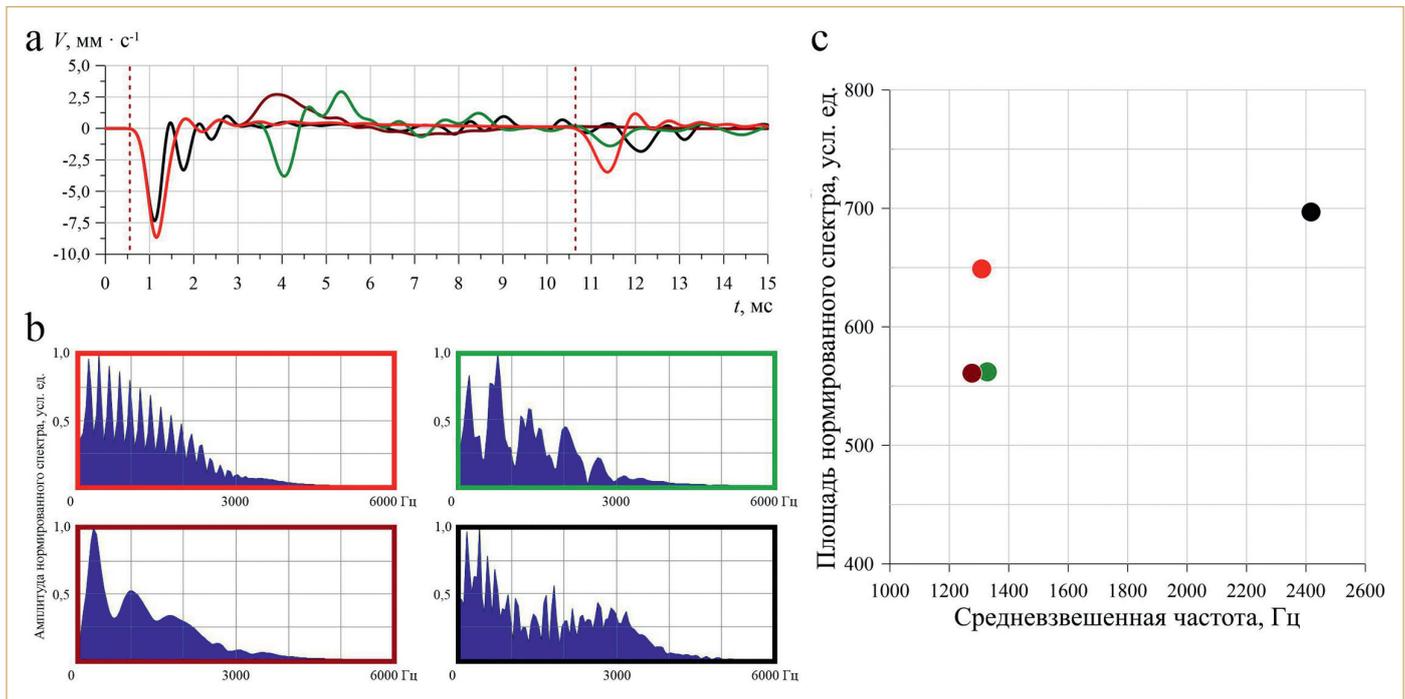


Рис. 1. Виды представления информации, получаемой из сигналов сейсмоакустического метода: а — во временной области, б — в частотной области, с — в виде динамических атрибутов. Красный сигнал — модель 1, зеленый сигнал — модель 2, коричневый сигнал — модель 3, черный сигнал — модель 4

Fig. 1. Types of representation of information obtained from low strain impact testing: а — in the time domain, б — in the frequency domain, с — in the form of dynamic attributes. Red signal — model 1, green signal — model 2, brown signal — model 3, black signal — model 4

Перспективы развития метода, согласно мнению авторов, состоят в активном использовании динамических свойств регистрируемых сигналов для получения дополнительной информации об объектах изучения (как отдельных свай, так и свайных полей в целом). Данная статья посвящена развитию предложенного ранее подхода [4] к анализу динамических атрибутов для оценки контакта свай с вмещающим грунтом.

Анализ данных сейсмоакустического метода во временной и частотной области

При работе с данными сейсмоакустического метода могут использоваться два способа обработки данных — во временной и в частотной области. Применение атрибутного анализа, активно используемого в «большой» сейсморазведке, пока не получило должного распространения в области контроля качества монолитных сооружений.

Различие в характере информации, получаемой при анализе параметров сигналов сейсмоакустического метода, можно проиллюстрировать на примере результатов двумерного численного моделирования, параметры которого описаны в [10] (рис. 1). Синтетические сигналы получены для четырех моделей: свай, погруженной в песчаный грунт (модель 1); свай с значительным сужением сечения, погруженной в песчаный грунт (модель 2); свай, погруженной в глинистый грунт (модель 3); свай, перекрытой массивным ростверком, погруженной в песчаный грунт (модель 4).

Кинематические параметры сигнала (времена регистрации отраженных импульсов t , ms ; скорости упругих волн v , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) используются для контроля длины и сплошности свай (рис. 1, а). Сигналы, анализируемые во временной области, могут также содержать информацию о глубине залегания контрастных геологических границ [2, 3, 8, 5].

Динамические параметры сигнала (амплитуда, частотный диапазон, форма импульса, представляемые амплитудным и фазовым спектрами) определяются множеством факторов — в том числе упругими и поглощающими характеристиками свойств среды, через которую распространяются колебания (рис. 1, б) [1]. На их поведение оказывают заметное влияние не только характеристики материала свай, но и вмещающих грунтов.

Динамические атрибуты — показатели, рассчитываемые из параметров сигнала во временной и частотной областях, численно характеризующие интенсивность и спектральный состав импульса (рис. 1, с). Атрибуты могут быть использованы для получения сравнительной характеристики поглощающих свойств среды, позволяют дать количественную оценку качественным изменениям физико-механических свойств [7]. Используемый при работе с данными различных по физической природе (как акустических, так и электромагнитных) методов параметр добротности Q является хорошим примером динамического атрибута, нашедшего массовое применение в области неразрушающего контроля.

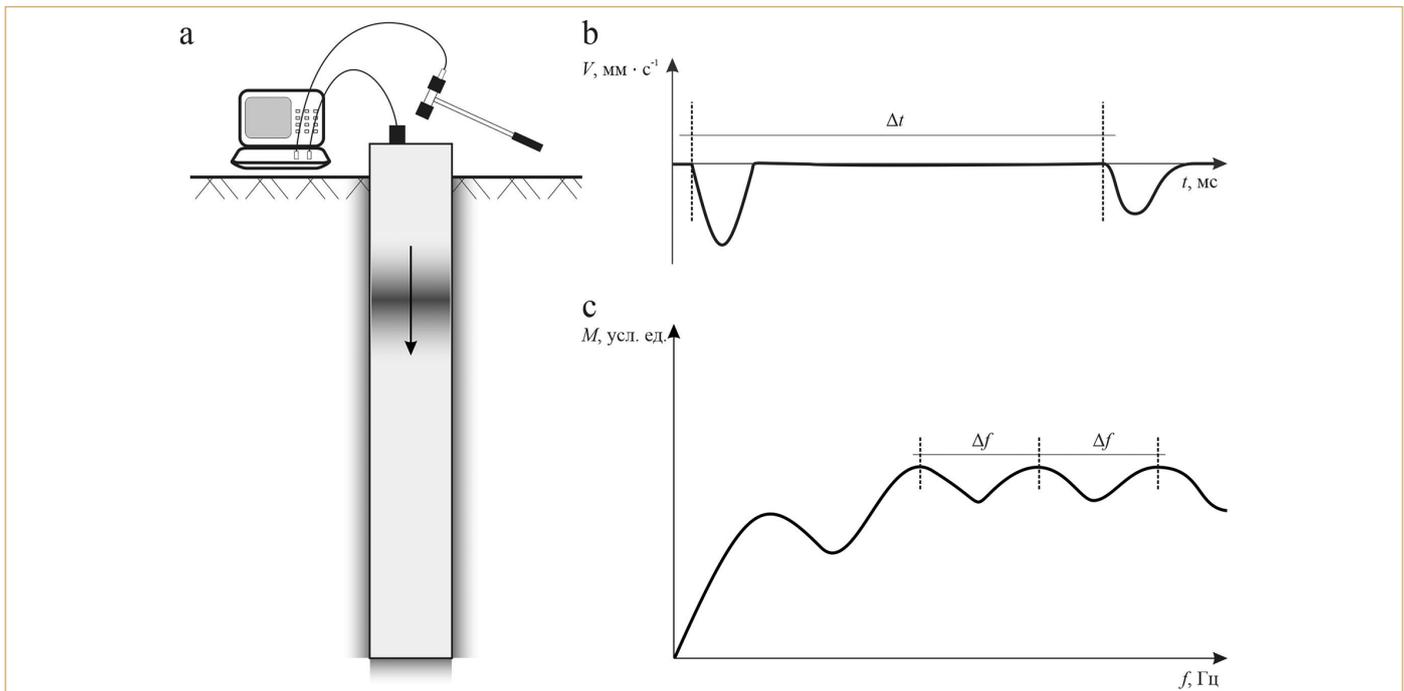


Рис. 2. Методики анализа данных сейсмоакустического метода: а — проведение полевых испытаний, б — представление данных во временной области, с — представление данных в частотной области

Fig. 2. Techniques for analyzing low strain impact testing data: a — conducting field tests, b — presenting data in the time domain, c — presenting data in the frequency domain

Общим для подходов к анализу данных является используемое теоретическое приближение — модель распространения плоской продольной волны в тонком стержне, погруженном в однородное полупространство [2, 3]. Совпадает методика возбуждения и регистрации сигнала — механический удар по оголовку сваи и запись отраженного сигнала установленным на поверхности оголовка датчиком (рис. 2, а). Причиной возникновения регистрируемых импульсов, помимо отражения от нижнего конца сваи, считаются контрастные изменения акустического импеданса сваи $Z = \rho \cdot v \cdot S$, где ρ — плотность материала сваи, v — стержневая скорость упругой волны в теле сваи, S — площадь поперечного сечения сваи [5].

В первом случае регистрируемый сигнал $V(t)$ анализируется на предмет наличия отражений от нижнего конца сваи и возможных нарушений сплошности (рис. 2, б), при этом длина сваи или расстояние до значительного изменения ее импеданса определяется по формуле:

$$L = (v \cdot \Delta t) / 2, \quad (1)$$

где L — глубина / расстояние до отражающей границы, $v = \sqrt{E / \rho}$ — скорость стержневой волны в теле сваи (E — модуль Юнга, ρ — плотность материала сваи), Δt — интервальное время пробега отраженной волны.

Во втором случае используется подход к описанию сваи как колебательной системы, в которой под действием внешней силы возникают резонансные колебания. Идея метода устойчи-

вой частотной характеристики (Steady-State Frequency Response, Transient Response, Mobility Response) заключается в попытке получения нормированного отклика системы свая — грунт, в которой распространяется ударный импульс, силовые параметры которого измеряются установленным на молотке датчиком [4].

Благодаря принятым теоретическим допущениям (свая считается однородным тонким стержнем, наносимый по ней удар имеет малую интенсивность и материал стержня является линейно-упругим для распространяющихся колебаний) становится возможным использование подхода, схожего с одномерной сверточной моделью сейсмического сигнала [6]:

$$V(t) = m(t) * i(t), \quad (2)$$

где $m(t)$ — функция изменения акустического импеданса (связанных с ним коэффициентов отражения / преломления) материала изучаемой сваи, $i(t)$ — зондирующий импульс, $*$ — оператор свертки.

Использование теоремы о свертке позволяет представить спектр зарегистрированного сигнала $S(f)$ в виде:

$$S(f) = M(f) \cdot I(f), \quad (3)$$

где $M(f)$ — спектральная характеристика функции изменений акустического импеданса сваи, $I(f)$ — спектр зондирующего импульса.

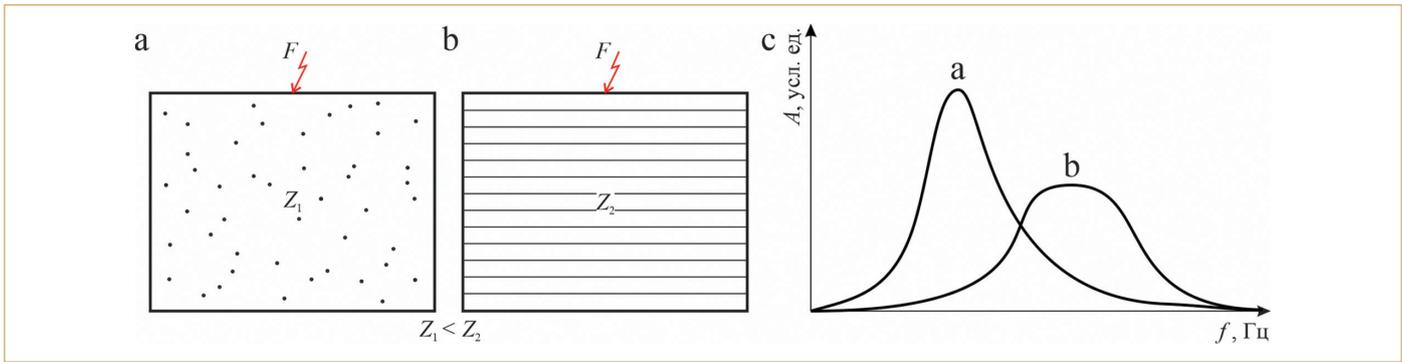


Рис. 3. Влияние физико-механических характеристик грунта на спектр колебания: а — песчаный грунт, б — глинистый грунт, с — спектральный отклик

Fig. 3. Influence of physical and mechanical characteristics of soil on the vibration spectrum: a — sandy soil, b — clay soil, c — spectral response

Отличие используемого на практике подхода заключается в том, что установленный на бойке источника датчик измеряет параметры удара, приложенного для возбуждения волн, а не возбужденного в теле сваи импульса. Поэтому получаемая таким образом частотная характеристика системы свая — грунт $M(f)$ не избавлена полностью от влияния ударного импульса, а нормирована на его силовую характеристику.

Спектральную характеристику $M(f)$ также называют спектром мобильности (Mobility Spectrum) и анализируют на наличие пиков, связываемых с резонансными частотами собственных колебаний сваи (рис. 2, с). Связь между расстоянием между резонансными пиками Δf и параметрами сваи описывается с помощью дисперсионного уравнения для тонкого стержня [2]:

$$\Delta f = v \cdot n / 2L, \tag{4}$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$. Помимо определения длины сваи / расстояния до контрастной акустической аномалии по спектру мобильности рассчитываются атрибуты динамической жесткости (Dynamic Stiffness) и механического адмиттанса (Mechanical Admittance), используемые для характеристики контакта основания сваи с грунтом и однородности материала сваи, соответственно [4].

Применение обоих подходов к анализу данных на практике сталкивается с ограничениями. Чем больше система свая — грунт начинает отклоняться от модели «тонкого стержня в однородном полупространстве», тем выше неоднозначность интерпретации. Это можно проиллюстрировать на примере изменения сигнала во временной и частотной области для результатов моделирования, представленных на рис. 1.

Сигнал и его спектр для модели 1 позволяют однозначно определить необходимые для расчета длины сваи Δt и Δf . Дефект конструкции (модель 2) усложняет сигнал отражением от верхней и нижней границы значительного сужения сечения во временной области и появлением резонансных пиков, соответствующих распространяющимся между оголовком сваи

и дефектом стоячим волнам, в частотной области. При погружении сваи в глинистый грунт (модель 3) существенно возрастают потери энергии на излучение колебаний во вмещающие грунты (растущее при снижении контраста акустических жесткостей материала сваи и грунта) — по регистрируемому сигналу и его спектру проблематично определить длину конструкции. При включении сваи в ростверк (модель 4) помехи, связанные с распространением колебаний в ростверке, осложняют анализ данных и во временной и в частотной областях.

Динамические атрибуты нормированного спектра акустического сигнала

Предложенный в работах [4, 9] способ изучения контактных условий сваи предлагает сосредоточиться на анализе динамических атрибутов сигнала, т.к. их поведение позволяет получить интегральную характеристику взаимодействия изучаемых свай с грунтовым массивом, определяемую их способностью излучать акустический сигнал во вмещающие грунты.

Анализ спектральных характеристик регистрируемого отклика с позиции поглощающих свойств среды следует начать со случая распространения упругой волны через грунт. Акустический закон Ома для рассматриваемой системы можно записать в виде:

$$V = F / Z, \tag{5}$$

где V — скорость смещения частиц среды, F — приложенная для возбуждения колебаний сила, Z — акустический импеданс грунта. Используя данное соотношение, мы можем сравнить распространение импульса, вызванного силой F , через песчаный (рис. 3, а) и через глинистый грунты (рис. 3, б), т.е. $Z_1 < Z_2$. Отклик глинистого грунта имеет тенденцию к «растеканию» в область высоких частот, тогда как при колебаниях песчаного грунта высокие частоты поглощаются. При этом колебания глинистого грунта имеют меньшую пиковую амплитуду (в соответствии с соотношением $V_1 Z_1 = V_2 Z_2$).

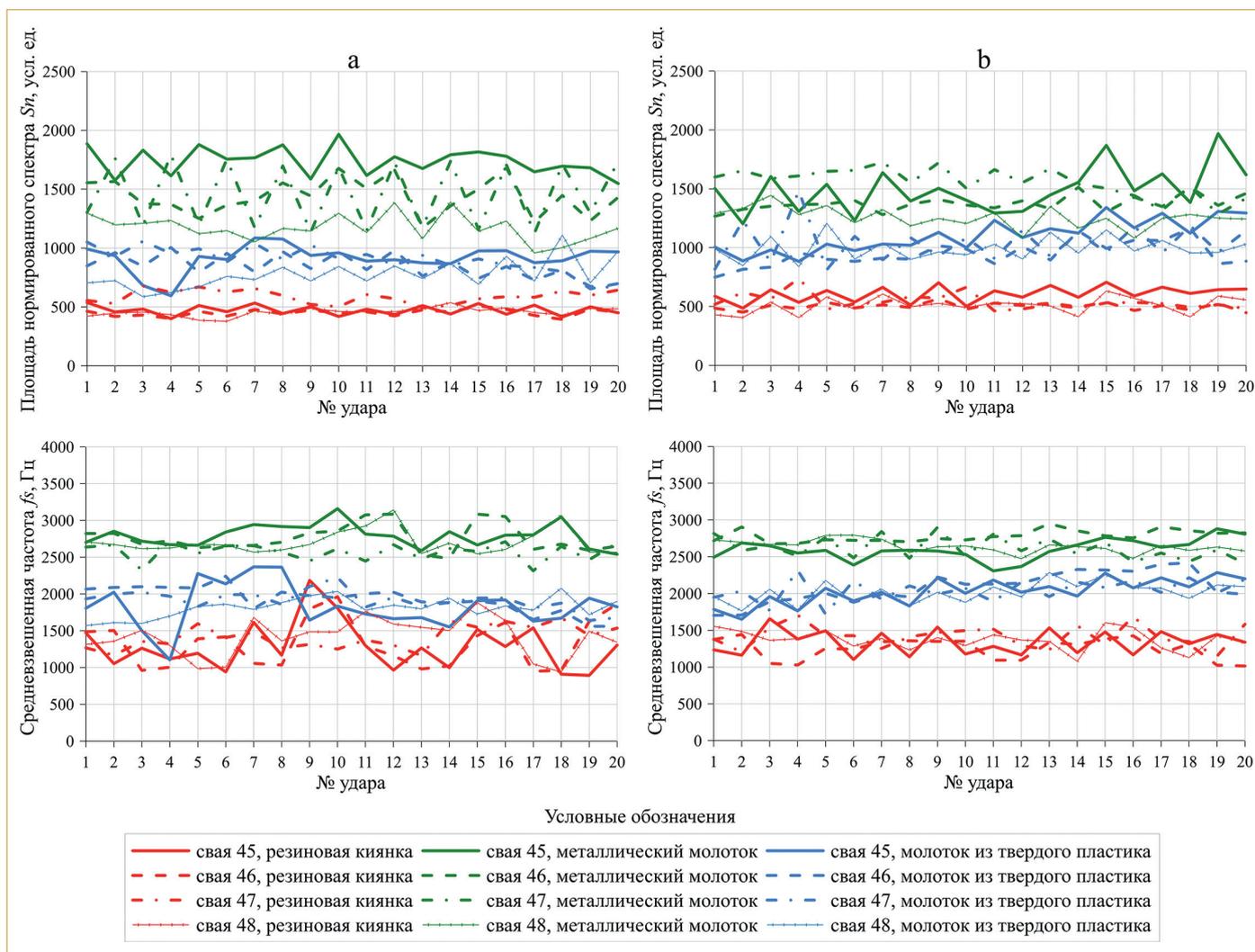


Рис. 4. Динамические атрибуты сигнала при постоянной (а) и растущей (б) силе удара. Исследованы буронабивные сваи диаметром 600 мм, длиной 10,0 м, изготовленные в глинистых грунтах

Fig. 4. Dynamic signal attributes at constant (a) and increasing (b) impact force. Bored piles with a diameter of 600 mm, a length of 10.0 m, cast in clay soils were investigated

Железобетон по своим физико-механическим свойствам приближен к скальному грунту. Система свая — грунт состоит из «скального грунта» монолитной конструкции, с поверхности которой производится возбуждение и регистрация сигнала. Свая окружена дисперсным по своим свойствам грунтом, который после перехода в напряженное состояние при погружении/бетонировании сваи проходит процесс постепенной релаксации, с неравномерно распределяющимися по торцу и боковой поверхности конструкции прижимными силами в окружающем грунте, влияющими на контактные условия [11].

В случае хорошего контакта между свайей и вмещающим грунтом возбужденные в ее оголовке колебания передаются (излучаются) в окружающие сваю уплотненные грунты, и регистрируемый отклик снижается и сдвигается в низкие частоты (соответствующие собственным частотам колебаний грунтового массива). В случае нарушения контакта граница сваи

с грунтом сохраняет способность к относительно интенсивным колебаниям, выступая в качестве источника отраженных волн, — регистрируемый отклик растет и сдвигается в высокие частоты (соответствующие собственной частоте колебаний материала сваи).

Для количественной характеристики регистрируемого отклика предложен ряд динамических атрибутов, из которых по результатам полевых исследований и экспериментов по численному моделированию в качестве основных были выбраны площадь нормированного спектра $S\eta$ и средневзвешенная частота f_s .

Значение средневзвешенной частоты / периода — характеристика, определяемая поглощающей способностью сваи и грунтов. Средневзвешенная частота f_s снижается в песчаных грунтах и возрастает в глинистых, и не всегда совпадает с центральной частотой зондирующего импульса. Атрибут

Значения коэффициента вариации C_v для приведенных на рис. 4 динамических атрибутов. Материал бойка: 1 — пластик, 2 — резина, 3 — металл

The values of the variation coefficient C_v for the dynamic attributes shown in fig. 4. Hammer material: 1 — plastic, 2 — rubber, 3 — metal

№ сваи	Постоянная сила удара						Растущая сила удара					
	Sn			fs			Sn			fs		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
45	12%	9%	7%	17%	25%	6%	12%	11%	13%	9%	12%	5%
46	12%	7%	11%	10%	25%	7%	11%	6%	5%	10%	12%	3%
47	12%	10%	19%	7%	11%	5%	16%	13%	8%	7%	11%	6%
48	16%	8%	10%	8%	18%	6%	10%	14%	7%	7%	10%	3%

чувствителен к изменениям свойств среды в области формирования зондирующего импульса. Площадь нормированного спектра Sn является показателем распределенности энергии по частотам (широты полосы частот наблюдаемых колебаний) и, следовательно, также связана с поглощением энергии.

Для иллюстрации независимости поведения атрибутов спектра отклика $S(f)$ от силы удара был проведен ряд полевых экспериментов [4]. В качестве регистрирующей аппаратуры для измерений использовалась двухканальная сейсмостанция ИДС-1 (ООО «ЛОГИС-Геотех», Россия).

Результаты дополнительного эксперимента, выполненного для четырех буронабивных свай, приведены на рис. 4. Измерения для первого канала записи соответствуют нечетным номерам ударов, для второго канала — четным номерам ударов. Атрибуты сигналов, полученных с приблизительно равной силой удара (рис. 4, *a*) и с постепенно возрастающей силой удара (рис. 4, *b*), не демонстрируют повторяющихся трендов или наглядных различий в поведении.

Наблюдаемые перепады значений в пределах записанных серий можно разделить по двум предполагаемым причинам их появления:

— связанные с установкой датчиков в пределах оголовка свай колебания значений атрибутов до 5–10% между соседними точками приема;

— значительные, но не систематические отклонения значений атрибутов, связанные с влиянием ударного воздействия на стабильность положения датчиков и другими случайными факторами.

Расчет коэффициентов вариации показывает, что максимальный перепад значений атрибутов в пределах серии ударов достигает 25% (табл. 1). Погрешность в определении параметров отклика для отдельной сваи может быть снижена в результате использования методов робастной отбраковки аномальных значений атрибутов.

Результаты полевых экспериментов и исследование чувствительности атрибутов к изменениям свойств вмещающего грунта, выполненное с использованием численного модели-

рования, позволили сформулировать следующее положение: неоднородности в верхней части сваи и изменения ее поперечного сечения приводят к снижению параметров отклика, которое может ошибочно интерпретироваться в качестве улучшения контактных условий [4, 9].

Использование корреляционных диаграмм для анализа атрибутов

Применение описанной методики к полевым данным требует подходов к объяснению поведения атрибутов. Для анализа предлагается использовать диаграммы корреляционных связей между парами атрибутов Sn и fs . Для характеристики взаимного поведения атрибутов отдельных свай в составе свайного поля можно предложить статистические параметры — коэффициент вариации и коэффициент линейной корреляции Пирсона.

Коэффициент вариации C_v отвечает за «кучность» значений атрибута: чем меньше значение коэффициентов вариации и ближе к единице их отношение, тем более получаемый результат приближен к идеальному случаю — свайному полю, отклик отдельных элементов которого стабилен и не содержит аномальных показателей.

Расчет коэффициента линейной корреляции Пирсона r позволяет оценить поведение атрибутов с точки зрения «тесноты» их линейной взаимосвязи. Для зависимостей с высоким значением коэффициента $|r| \geq 0,7$ (сильная и очень сильная корреляция) можно говорить о том, что поведение отклика отдельных свай соответствует ярко выраженной линейной зависимости.

Выделены несколько вариантов взаимного расположения свай одного фундамента на корреляционной диаграмме (рис. 5), которые можно количественно классифицировать по значениям C_v и r .

Случай а: Пары атрибутов группируются в пределах области, оба атрибута мало вариабельны: $C_v(Sn) \leq 10\%$, $C_v(fs) \leq 10\%$, значение r не принципиально.

Это случай свайного поля, отклик отдельных элементов которого ведет себя стабильно. Возможные особенности отдельных свай (состояние оголовков, особенности установки датчиков, не-

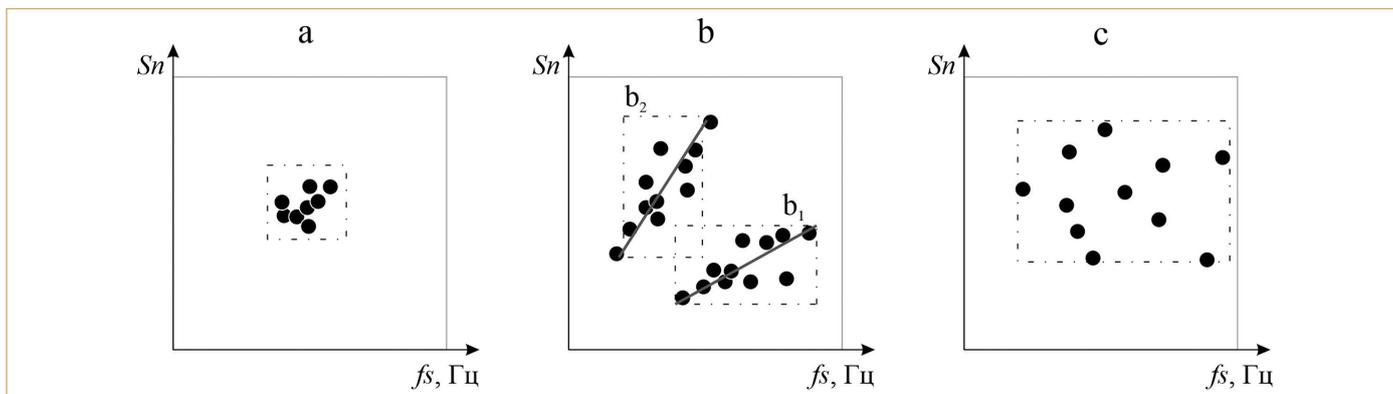


Рис. 5. Взаимное поведение атрибутов нормированной площади спектра и средневзвешенной частоты, характерные случаи (описание дано в тексте)

Fig. 5. Mutual behavior of the attributes of the normalized spectrum area and the average-weighted frequency, typical cases (description is given in the text)

однородности формы и свойств материала, изменения свойств вмещающих грунтов) оказывают малое влияние на поглощение сигнала. В этом случае по поведению атрибутов отклика нельзя выделить сваи с нарушениями контактных условий.

Случай b: Пары атрибутов группируются вдоль линейного тренда — один из коэффициентов вариации заметно превышает другой, выборки по атрибутам средне или сильно вариабельны ($10\% \leq Cv(Sn) \leq 30\%$), коэффициент линейной корреляции $r \geq 0,7$. Здесь возможно два варианта поведения атрибутов:

Случай b₁: $Cv(Sn) < Cv(fs)$, т.е. при близких значениях нормированной площади спектра отклик отдельных свай фундамента сдвигается в низкие или в высокие частоты.

Подобный сдвиг по частотам (при сохранении «формы» сигнала) объясняется в первую очередь изменением характера поглощения сигнала, т.е. относительным улучшением или ухудшением контактных условий. В этом случае сваи с повышенными значениями ($Sn; fs$) отмечаются как «аномальные».

Случай b₂: $Cv(Sn) > Cv(fs)$, т.е. при близких значениях средневзвешенной частоты растет или снижается площадь нормированного спектра.

В этом случае поведение отклика может быть связано не с нарушением контактных условий с грунтом, а с различным поглощением сигнала при распространении колебаний по материалу конструкции. На значение Sn влияет изменение формы нормированного спектра, вызванное появлением дополнительных резонансных пиков. Значительное снижение отклика у «дефектных» свай вызвано его растущей «изрезанностью».

Наличие подобной линейной зависимости дает повод к дополнительному анализу сигналов и их нормированных спектров на наличие акустических аномалий, вызванных изменением свойств материала свай или состоянием их оголовков. В случае, если анализ данных во временной или частотной области не подтверждает подозрений на наличие дефектов, сваи с повышенными значениями ($Sn; fs$) отмечаются как «аномальные».

Случай c: Атрибуты отклика отдельных свай не укладываются в линейную зависимость и имеют сильный разброс

значений ($r \leq 0,5$; $Cv(Sn) \geq 30\%$; $Cv(fs) \geq 30\%$). Интерпретация подобных диаграмм «в лоб» с точки зрения анализа контактных условий не представляется возможной.

Несохожесть отклика отдельных свай в пределах одной конструкции может говорить о недочетах в методике сбора данных, несоответствии инженерно-геологического разреза модели горизонтально-однородной среды, разбросу параметров изготовленных свай и др.

В этом случае среди испытанных свай путем последовательного исключения из рассмотрения отдельных элементов можно выделять множества, характеризующиеся более стабильными значениями Cv и r . В случае, если сваи группируются в одну или несколько линейных зависимостей, снова появляется возможность выделения аномальных по значениям атрибутов свай согласно логике случаев *a* и *b*.

На рис. 6 приведены атрибутные диаграммы, рассчитанные для шести располагавшихся в пределах одного объекта свайных полей (114 буронабивных свай). Инженерно-геологический разрез представлен суглинками полутвердой и твердой консистенции, подстилаемыми плотными песками. Геометрические параметры свай испытанных фундаментов: фундамент 1 и фундамент 6 — диаметр 600 мм, длина 16,0 м; фундамент 2 и фундамент 5 — диаметр 800 мм, длина 18,0 м; фундамент 3 — диаметр 800 мм, длина 16,0 м; фундамент 4 — диаметр 800 мм, длина 14,0 м.

Атрибуты отклика свай отдельных фундаментов группируются в линейные зависимости, имеющие разный наклон и положение друг относительно друга — линии тренда характеризуют как поглощение энергии для фундаментов схожих параметров, так и особенности возбуждения и регистрации сигнала для данных конструктивов. Рассчитанные значения Cv и r приведены в табл. 2 и 3.

На примере фундамента 4 (отличающегося малой вариабельностью значений отклика, см. табл. 2) можно рассмотреть интерпретацию атрибутной диаграммы ($Sn; fs$) (рис. 7). Среди свай, отклик которых можно отнести к «аномально вы-

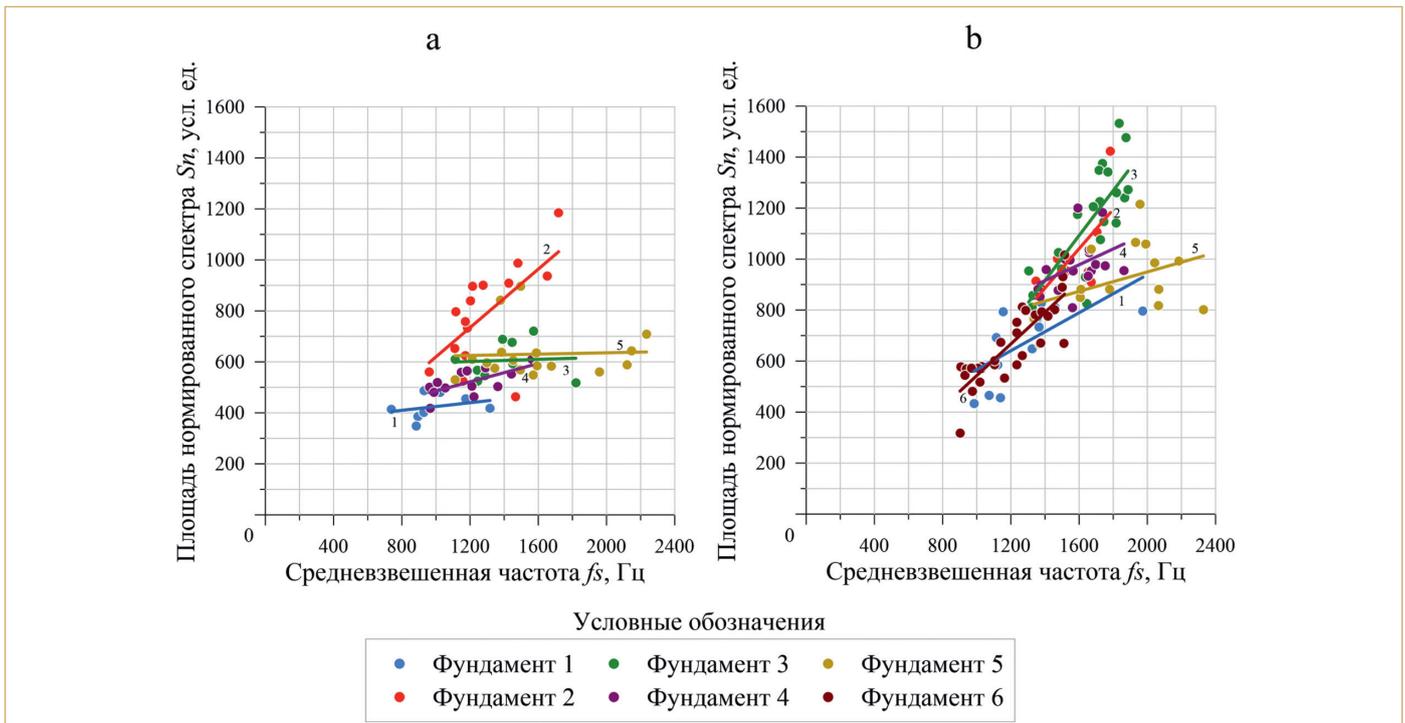


Рис. 6. Атрибутные диаграммы для свайных фундаментов, испытанных в пределах одного объекта, для двух ударных источников, с линиями тренда. Виды ударного источника: а — резиновая киянка, б — молоток из твердого пластика

Fig. 6. Attribute diagrams for pile foundations tested within one site, for two impact sources, with trend lines. Impact source types: a — rubber mallet, b — hard plastic hammer

Таблица 2
Table 2

Значения коэффициента вариации Cv для свай рис. 6. Материал бойка: 1 — пластик, 2 — резина
Values of the variation coefficient Cv for piles of fig. 6. Hammer material: 1 — plastic, 2 — rubber

Фундамент №	Sn		fs	
	1	2	1	2
1	0,23	0,11	0,18	0,19
2	0,18	0,25	0,10	0,17
3	0,18	0,12	0,11	0,15
4	0,10	0,10	0,09	0,16
5	0,16	0,16	0,16	0,21
6	0,23	-	0,17	-

соким», по обоим ударным источникам выделяется свая № 44. Следовательно, именно эта свая потенциально обладает худшим контактом с вмещающими грунтами, и ее нельзя рекомендовать при выборе свай для проведения статических испытаний.

Краткая характеристика предложенной методики

Важная особенность описанной методики атрибутного анализа состоит в том, что процесс получения сравнительной ха-

рактеристики контактных условий для исследуемого свайного поля может быть практически полностью автоматизирован. Ниже перечислены основные этапы исследования.

Полевые измерения (рис. 8, а)

Цель испытателя на этапе полевых работ — получить пригодные для обработки материалы. Сбор данных осуществляется согласно стандартной процедуре сейсмоакустического метода.

Таблица 3
 Table 3

Значения коэффициента линейной корреляции r для свай рис. 6. Материал бойка: 1 — пластик, 2 — резина
 The values of the linear correlation coefficient r for piles shown on fig. 6. Hammer material: 1 — plastic, 2 — rubber

Фундамент №	Количество испытанных свай		(S_n, f_s)	
	1	2	1	2
1	14	8	0,7	0,3
2	7	16	0,6	0,6
3	20	10	0,8	0,1
4	18	13	0,5	0,7
5	13	17	0,4	0,0
6	28	-	0,8	-

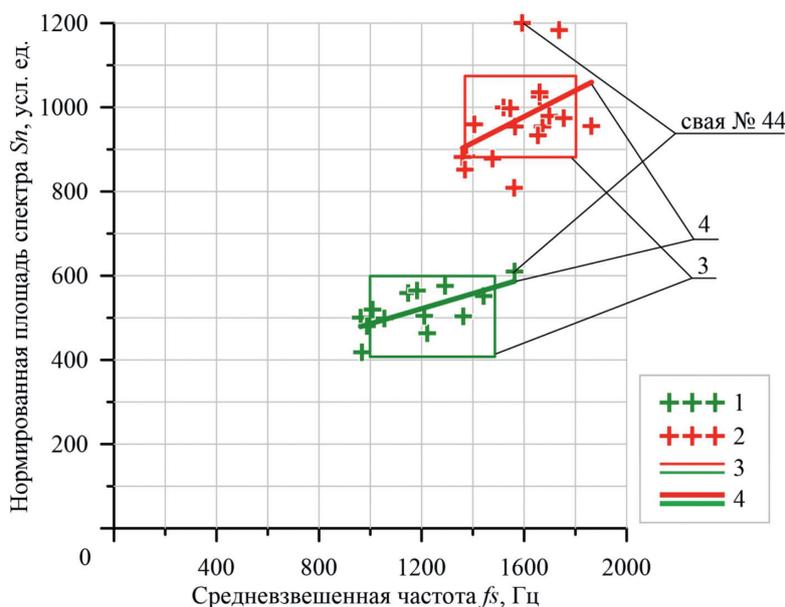


Рис. 7. Пример интерпретации поведения атрибутов отклика свайного фундамента. Материал бойка: 1 — резина; 2 — пластик; 3 — границы среднеквадратического отклонения; 4 — линии трендов

Fig. 7. Example of interpreting the behavior of the response attributes of a pile foundation. Hammer material: 1 — rubber; 2 — plastic; 3 — standard deviation limits; 4 — trend lines

1. Для каждой из исследуемых свай каждым из используемых ударных источников (рекомендуется включать как минимум два молотка с различным весом и материалом бойка) собирается набор сигналов, достаточный для расчета динамических атрибутов.

2. Особое внимание должно быть уделено состоянию оголовка сваи. В случае, если визуальный осмотр показал наличие заметных трещин, шламового слоя, мягкого бетона, отличающихся по конфигурации от других свай арматурных выпусков — свая должна быть отмечена отдельно. Возможно,

при дальнейшей оценке контактных условий ее придется исключить из рассмотрения.

3. Качество собираемых данных можно проанализировать визуально — стабильность сигнала от удара к удару и при смене точек регистрации говорит о малом влиянии на отклик внешних причин (условий установки датчиков или нанесения удара).

Обработка данных (рис. 8, b)

Задача испытателя на этапе обработки данных — получить в готовом к интерпретации виде информацию о поведении

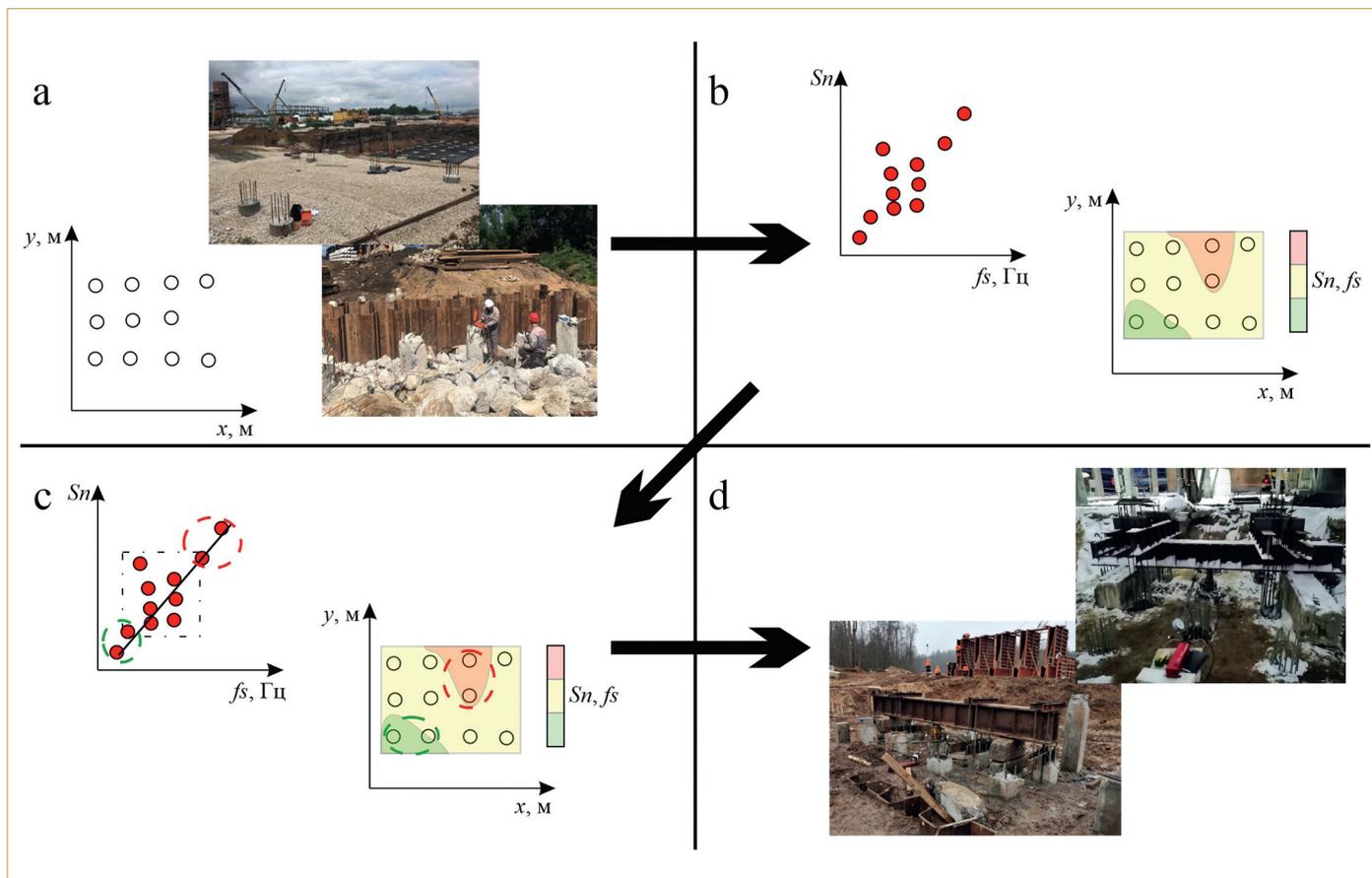


Рис. 8. Применение предложенной методики: а — сплошной контроль свай фундамента сейсмоакустическим методом, б — построение диаграмм и карт атрибутов, с — выделение свай с аномальным откликом, д — планирование и проведение статических испытаний для выбранных свай со сравнительно худшими контактными условиями. Фото из архива ООО «ЭГЕОС»

Fig. 8. Application of the proposed technique: a — low strain impact testing for entire foundation, b — plotting of diagrams and attribute maps, c — identifying piles with anomalous response, d — planning and conducting static load tests for selected piles with comparatively worse contact conditions. Photos from the archive of AIGEOS LLC

динамических атрибутов отклика для всех свай исследуемого фундамента.

1. Зарегистрированные в поле сигналы используются для получения средних значений атрибутов отклика сваи для каждого из ударных источников. Для минимизации погрешности определения параметров отклика сваи производится отбраковка отдельных аномальных трасс (например, с помощью расчета среднеарифметического отклонения значений атрибута).

2. Представление рассчитанных для каждого элемента фундамента атрибутов отклика в виде корреляционных диаграмм ($Sn; fs$) может быть дополнено построением карт распределения значений атрибутов (при наличии взаимной геометрической привязки свай по их расположению в пределах строительной площадки) для упрощения визуального анализа.

3. Для каждой из диаграмм определяются статистические параметры (коэффициенты вариации и коэффициент линейной корреляции Пирсона, среднеарифметические значения и сред-

неквадратическое отклонение атрибутов), которые выводятся на диаграмму вместе с построенными линиями тренда.

Интерпретация данных (рис. 8, с)

Интерпретация состоит в выделении на диаграмме свай с аномальным акустическим откликом, который можно проинтерпретировать в качестве ухудшения контакта с вмещающими грунтами.

1. В зависимости от значений статистических параметров возможно выделение для отдельного рассмотрения свай согласно с предложенными подходами к интерпретации поведения их отклика (см. рис. 5, случаи а, б, с). Сваи, которые при визуализации границ среднеквадратичных отклонений попали за пределы областей, помечаются в качестве свай с аномальным поведением отклика.

2. Аномально низкие значения атрибутов отклика могут быть объяснены выделением на этапе сбора данных свай с нестандартным состоянием оголовка сваи. Кроме того, собран-

ные сигналы можно проанализировать во временной или частотной области на предмет наличия отражений от нарушений сплошности конструкции.

3. Аномально высокие значения атрибутов отклика (в особенности, подтвержденные по атрибутным диаграммам для различных ударных источников) позволяют выделить сваи, потенциально обладающие худшими контактными условиями с вмещающими грунтами.

Использование результатов (рис. 8, д)

Выделенные аномальные сваи могут быть рекомендованы для определения их несущей способности прямым методом контроля (статическими, динамическими или испытаниями с применением волновой теории удара).

Положение п. 4.4 ГОСТ 5686–2012 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» рекомендует выбирать для проведения статических испытаний сваи, располагающиеся в наиболее характерных для рабочей площадки грунтовых условиях и как минимум одну, расположенную в потенциально худших грунтовых условиях, для получения достаточно достоверной информации о работоспособности фундамента.

Предложенная методика предоставляет косвенную информацию о сравнительном поведении свай в грунте, которая не-

зависимо дополняет данные инженерно-геологических изысканий и позволяет спланировать проведение дорогостоящих и трудозатратных испытаний с выполнением требований нормативной технической документации.

Выводы

1. Использование динамических атрибутов акустических сигналов позволяет получить информацию о состоянии контакта исследуемых свай с вмещающим грунтом, дополняющую результаты стандартного использования метода новыми данными о работоспособности фундамента.

2. Сравнительный анализ контактных условий опирается на изучение поведения динамических атрибутов сигнала — среднедневзвешенной частоты и площади нормированного спектра.

3. Обработка сигналов и расчет значений атрибутов для получения информации о контактных условиях может быть полностью автоматизирована.

4. На основании интерпретации атрибутивных диаграмм свайное поле может быть разделено на участки, различающиеся по контактным условиям. По результатам данного разделения могут быть выбраны сваи, рекомендованные для проведения статических испытаний, что позволяет в полной мере выполнить рекомендации ГОСТ 5686–2012. 

Список литературы

1. Боганик Г.Н., Гурвич И.И., 2006. Сейсморазведка. АИС, Москва.
2. Капустин В.В., 2011. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай. Инженерные изыскания, № 11, с. 10–15.
3. Капустин В.В., 2012. Использование технологий направляемых акустических волн для исследования грунтов и строительных конструкций. Технологии сейсморазведки, № 1, с. 72–78.
4. Капустин В.В., Чуркин А.А., 2020. Применение динамических атрибутов акустического сигнала для оценки контакта сваи с вмещающими грунтами. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология, № 3, с. 126–137.
5. Мухин А.А., Лозовский И.Н., Чуркин А.А., 2019. Технические стандарты ООО ЭГЕОС по применению неразрушающего контроля сплошности свай. Сейсмоакустический метод. Геотехника, № 4, с. 68–78.
6. Хаттон Л., Уэрдингтон М., Мейкин Дж., 1989. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. Мир, Москва.
7. Хилтерман Ф.Дж., 2010. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. ООО «Издательство Герс», Тверь.
8. Хмельницкий А.Ю., Владов М.Л., Капустин В.В., 2012. Экспериментальные исследования влияния вмещающего грунта на распространение сейсмических волн в свайных конструкциях. Инженерные изыскания, № 6, с. 16–22.
9. Чуркин А.А., Капустин В.В., Лозовский И.Н., Жостков Р.А., 2020. Исследование динамических атрибутов акустического отклика системы свая-грунт с использованием численного моделирования. Волновые явления в неоднородных средах (Волны — 2020), Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара им. А.П. Сухорукова, Москва, 2020, с. 30–32.
10. Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Жостков Р.А., 2020. Численное моделирование сейсмоакустических методов контроля качества свай. Известия Российской академии наук. Серия физическая, Том 84, № 1, с. 124–127, <https://doi.org/10.31857/S0367676520010093>.
11. Шадунц К.Ш., 2006. О взаимодействии боковой поверхности свай с окружающим их грунтом основания. Научный журнал КубГАУ, № 3(19), с. 27–36. URL: <http://ej.kubagro.ru/2006/03/03/p03.asp> (дата обращения: 09.08.2020).
12. Amir E.I., Amir J.M., 2008. Statistical analysis of a large number of PEM tests on piles. Proceedings of 8th International Conference on application of stress wave theory to piling, Lisbon, Portugal, 2008, pp. 671–675.
13. Rybak J., 2019. Non-destructive determining of foundation pile length variability for reliability analysis. Modelling and Methods of Structural Analysis, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1425, Papers 012205.

References

1. Boganik G.N., Gurvich I.I., 2006. Seismic survey. AIS, Moscow. (in Russian)
2. Kapustin V.V., 2011. On the acoustic method basic physics of pile testing. Engineering Survey, No. 11, pp. 10–15. (in Russian)
3. Kapustin V.V., 2012. The use of guided acoustic wave technologies for the study of soils and building structures. Tekhnologii seysmorazvedki, No. 1, pp. 72–78. (in Russian)
4. Kapustin V.V., Churkin A.A., 2020. Application of dynamic attributes of an acoustic signal to assess the contact of a pile with host soils. Bulletin of Moscow University. Series 4. Geology, No. 3, pp. 126–137. (in Russian)
5. Mukhin A.A., Lozovsky I.N., Churkin A.A., 2019. AIGEOS LLC Technical Standards for the nondestructive pile integrity testing. Low strain impact method. Geotechnics, No. 4, pp. 68–78. (in Russian)
6. Hatton L., Werdington M., Meikin J., 1989. Processing of seismic data. Theory and practice. Mir, Moscow. (in Russian)
7. Hilterman F.J., 2010. Interpretation of amplitudes in seismic prospecting. Izdatelstvo Gers LLC, Tver. (in Russian)
8. Khmelntsky A.Yu., Vladov M.L., Kapustin V.V., 2012. Experimental research of host rock influence on acoustic wave propagation in pile structures. Engineering Survey, No. 6, pp. 16–22. (in Russian)
9. Churkin A.A., Kapustin V.V., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A., 2020. Investigation of the dynamic attributes of the acoustic response of the pile-soil system using numerical modeling. Wave phenomena in inhomogeneous media (Waves — 2020), Proceedings of the XVII Sukhorukov All-Russian School-Seminar, Moscow, 2020, pp. 30–32. (in Russian)
10. Churkin A.A., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A., 2020. Numerical modeling of seismoacoustic methods of pile quality control. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Vol. 84, No. 1, pp. 124–127, <https://doi.org/10.31857/S0367676520010093>. (in Russian)
11. Shadunts K.Sh., 2006. On the interaction of the lateral surface of the piles with the surrounding soil of the base. Scientific Journal of KubSAU, No. 3(19), pp. 27–36. URL: <http://ej.kubagro.ru/2006/03/03/p03.asp> (accessed: 09 August 2020). (in Russian)
12. Amir E.I., Amir J.M., 2008. Statistical analysis of a large number of PEM tests on piles. Proceedings of 8th International Conference on application of stress wave theory to piling, Lisbon, Portugal, 2008, pp. 671–675.
13. Rybak J., 2019. Non-destructive determining of foundation pile length variability for reliability analysis. Modelling and Methods of Structural Analysis, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1425, Papers 012205.

Информация об авторах

ЧУРКИН АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ

Руководитель отдела геофизики ООО «ЭГЕОС», г. Москва, Россия

КАПУСТИН ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

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

Information about the authors

ALEKSEI A. CHURKIN

Head of the Geophysical Department, AIGEOS LLC; Moscow, Russia

VLADIMIR V. KAPUSTIN

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



Фото А.А. Чуркина