

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ДЛИНЫ СВАЙ ИДС-2 ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

ЧУРКИН АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ

НИИОСП им. Н.М. Герсманова
АО НИЦ «Строительство», г. Москва,
Россия
chaa92@mail.ru

ШИРОБОКОВ МАКСИМ ПЕТРОВИЧ

ООО «НПЦ Геотех», г. Москва, Россия
msh@geotech.ru

АННОТАЦИЯ

В статье описана специфика аппаратуры, применяемой при проведении исследований методами технической геофизики. Условия применения методов и диапазон решаемых задач требуют от приборов компактности, многоканальности, совместимости с различными типами регистрирующих датчиков и программным обеспечением для обработки сигналов. На примере многоканального измерителя длины свай ИДС-2, производимого ООО «Логические системы», показан возможный подход к разработке оборудования, удовлетворяющего данным требованиям. Представлены примеры использования ИДС-2 для решения ряда распространенных геотехнических задач – сейсмоакустического контроля длины и сплошности свай, акустического обследования фундаментной плиты методом анализа отклика, оценки скорости поперечных волн в грунтовом основании с помощью метода многоканального анализа поверхностных волн (MASW). Результаты исследований показывают возможности оборудования по оперативному сбору полевых данных для методов, имеющих различную физическую специфику. Предложены направления для дальнейшего развития функционала прибора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

неразрушающий контроль; техническая геофизика; контроль сплошности; оценка контактных условий; оценка свойств грунтов; направленные волны.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Чуркин А.А., Ширококов М.П. Опыт применения многоканального измерителя длины свай ИДС-2 при решении геотехнических задач // Геоинфо. 2023. Т. 5. № 7. С. 14–21 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-7-14-21

EXPERIENCE IN APPLICATION OF THE MULTICHANNEL PILE LENGTH TESTER **IDS-2** IN SOLVING GEOTECHNICAL TASKS

CHURKIN ALEKSEI A.

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC, Moscow, Russia
chaa92@mail.ru.

SHIROBOKOV MAKSIM P.

GEOTECH LLC, Moscow, Russia
msh@geotech.ru.

ABSTRACT

The specific features of the equipment for Technical Geophysics are described. The application conditions of the methods and the range of tasks to be solved require apparatus to be compact, multichannel, compatible with various types of recording sensors and signal processing software. A possible approach to the production of the equipment that meets these requirements is shown using the example of the IDS-2 multichannel pile length tester manufactured by «Logicheskiye sistemy» LLC. Some examples of the IDS-2 application for solving a number of common geotechnical problems (low strain impact testing of the length and integrity of piles, acoustic survey of a foundation slab by the impulse response testing, estimation of the shear wave velocity in soils using the MASW technique) are presented. The research results show the capabilities of the equipment in rapid data collection for techniques with various physical specifics. Directions for further development of the device functional are proposed.

KEYWORDS:

non-destructive testing; Technical Geophysics; integrity testing; contact state evaluation; soil properties estimation; guided waves.

FOR CITATION:

Churkin A.A., Shirobokov M.P. Opyt primeneniya mnogokanal'nogo izmeritelya dliny svay IDS-2 pri reshenii geotekhnicheskikh zadach [Experience in application of the multichannel Pile Length Tester IDS-2 in solving geotechnical tasks] // Geoinfo. 2023. T. 5. № 7. S. 14–21 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-7-14-21 (in Rus.).

Введение ►

Вопросы, возникающие в практике инженерно-геологических и геотехнических изысканий, решаются с применением комплекса мероприятий, включающего геофизические исследования. Ряд специфических задач требует использования методов так называемой технической геофизики – дисциплины на стыке инженерной геофизики и дефектоскопии [1, 2].

При неразрушающем контроле качества геотехнических конструкций и оценке их взаимодействия с грунтами основания традиционно применяются волновые методы [3]. В научной литературе подробно описаны особенности исследования свайных фундаментов с применением сейсмоакустического метода и его модификаций [4–8], использования геофизических методов при контроле качества и оценке контактных условий фундаментных плит и обделки тоннелей [9–11]. Ведется разработка нормативно-технической регламентации для подробно описанных методик [2], учитывающая наработки стан-

дартов ASTM [12–15]. Помимо внесения информации о применении геофизических методов в тексты сводов правил (СП) разрабатываются подробные руководства [16].

Если сравнивать с методами инженерной геофизики, методы технической геофизики отличает сравнительная простота проведения полевых работ (один оператор за рабочую смену способен получить сотни точек акустических наблюдений или записать несколько километров радарных данных), несложный граф обработки (не требующий полноценного функционала геофизического программного обеспечения и применяемый для упрощения визуальной интерпретации), прямая зависимость достоверности результатов исследований от объема априорной информации [2].

Указанные особенности формируют запрос на специализированную аппаратуру, обладающую ограниченным функционалом и применимую для решения частных задач.

Измеритель длины свай ИДС-1 (ООО «Логические системы», Россия)

в начале нулевых годов нашего века стал одним из первых серийных геофизических приборов, спроектированных в качестве малоканальной сеймостанции, предназначенной для обследования геотехнических конструкций. Второе поколение этого измерителя ИДС-2 – современный геофизический прибор, предназначенный в первую очередь для сейсмоакустического обследования свайных фундаментов [17].

На примере решения нескольких распространенных задач с применением ИДС-2 можно обозначить ряд общих вопросов, связанных с оборудованием для методов технической геофизики.

Методы и оборудование ►

Контроль качества свайных фундаментов сейсмоакустическим методом (эхо-методом, методом sonic) – распространенная задача, различные аспекты которой подробно исследованы специалистами. Метод основан на возбуждении в теле конструкции продольных стержневых волн и использует теоретическое приближение «тонкого стержня

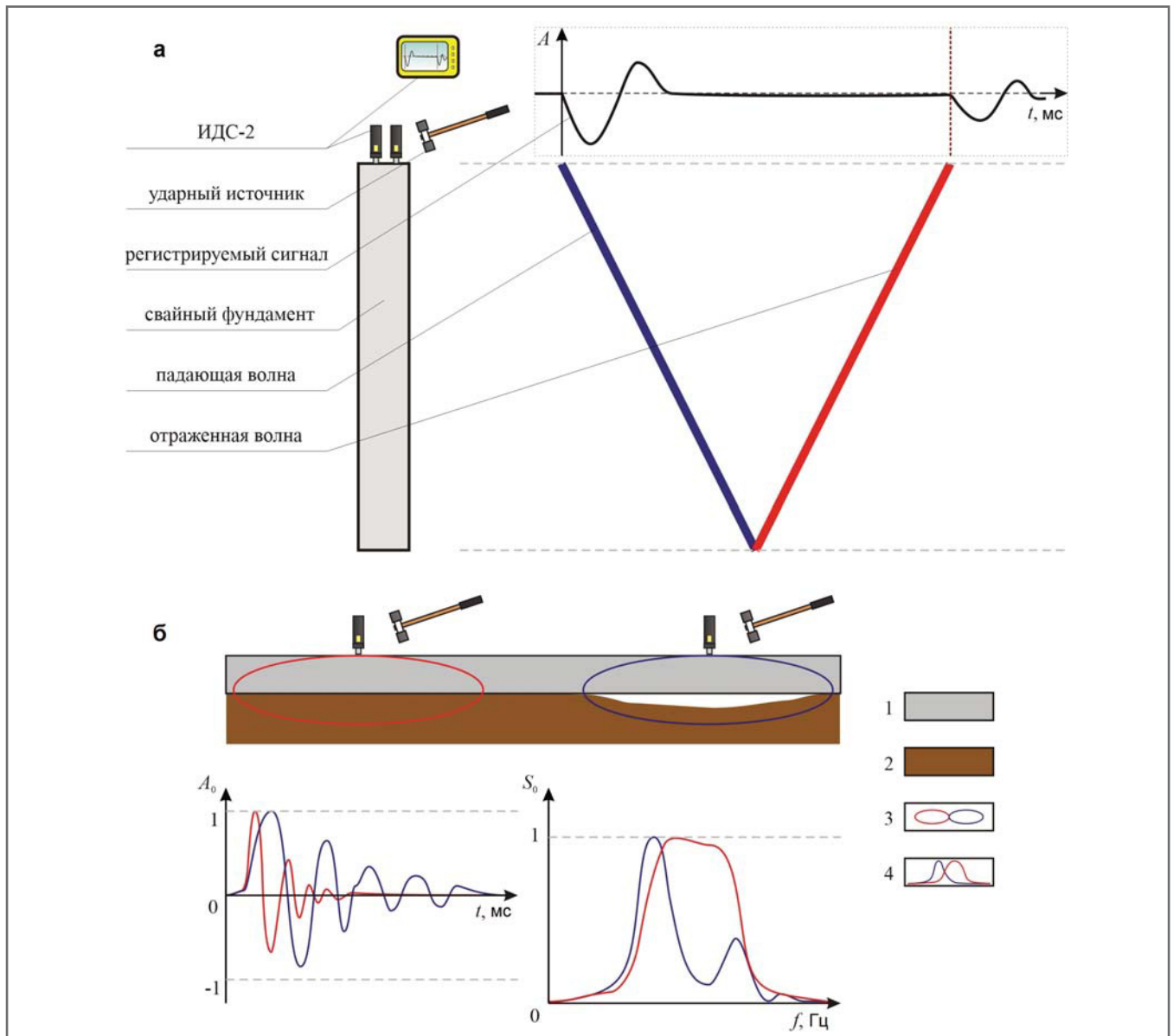


Рис. 1. Акустическое обследование монолитных конструкций (по [16] с изменениями): а – сейсмоакустический контроль свай; б – оценка контакта «плита – грунт» методом анализа нормированного отклика. Условные обозначения: 1 – конструкция; 2 – грунт; 3 – вовлеченный в колебание объем среды; 4 – отклик во временной и частотной области

в однородном полупространстве» при анализе сигналов (рис. 1, а) [4]. Выделение аномальных свай (длина или сплошность материала которых не соответствуют требованиям проекта), локализация участков возможного сужения и уширения сечения – достаточно успешно решаемые сейсмоакустическим исследованием задачи [4, 5, 7]. Распространенные модификации, использующие нестандартное расположение датчиков: параллельный сейсмический метод [6], профилирование с общим пунктом возбуждения / ультразвуковой метод [16], обследование свай в составе существующих сооружений и ростверков [7].

Метод анализа отклика (impulse response testing) является одним из наиболее распространенных способов акусти-

ческого контроля качества фундаментных плит и плитоподобных конструкций (мостовых покрытий, подпорных стен, тоннельной обделки и др.) [11]. Он заключается в возбуждении низкочастотных колебаний в обследуемой плите по регулярной сети наблюдений (рис. 1, б) и предназначен для обнаружения крупных нарушений контакта с грунтом и локализации значительных неоднородностей материала (размерами в плане в первые метры и более). Метод позволяет оперативно обследовать значительные по площади конструкции [10], имеет несколько распространенных методик анализа данных [14, 16].

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) заключается в использовании информации об амплитудно-частотном составе поверх-

ностных волн. Цуг волн Рэлея распространяется вдоль границы «земля – воздух» и содержит информацию не только о продольных, но и о сдвиговых смещениях грунта [16]. Это позволяет выполнять экспресс-оценку геотехнических параметров грунтового массива (модулей упругости, коррелируемых с изменением скоростей поперечных волн с глубиной) и средневзвешенной скорости поперечных волн V_{S30} , требуемой при выполнении сейсмического микрозонирования [18–20].

Область технической геофизики не ограничена перечисленными выше методами и задачами [1]. Близко к обследованию свай и плит расположен импакт-эхо метод (impact-echo testing), использующий явление геометрического (толщинного) резонанса при обследова-

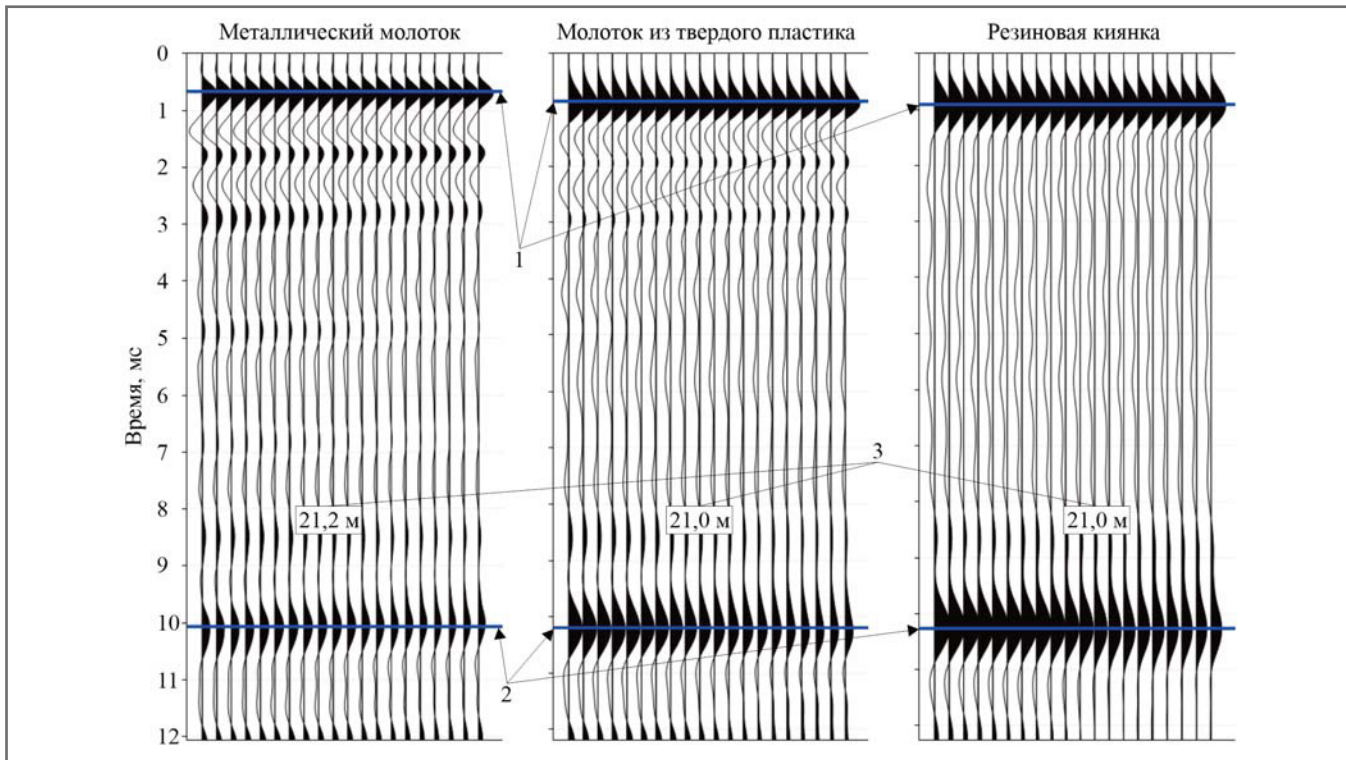


Рис. 2. Пример определения длины сваи с применением разночастотного возбуждения сигнала. Условные обозначения: 1 – момент нанесения удара по оголовку конструкции; 2 – момент регистрации отражения от нижнего торца сваи; 3 – оценка длины сваи для ударных источников

нии строительных конструкций [11, 15]. Анализ поверхностных волн по методикам MASW и SASW применяется для обследования геотехнических покрытий (дорожной одежды, грунтовых насыпей и др.).

Специфика задач и методов их решения требует от аппаратуры соответствия ряду требований, таких как:

- компактность: работа ведется в стесненных условиях функционирующих строительных площадок и действующих объектов инфраструктуры;

- многоканальность: стандартные методики акустического контроля свай и плит требуют одного регистрирующего канала, однако вспомогательные методики и адаптация приемов из области инженерной геофизики или дефектоскопии требуют наличия как минимум двух каналов записи;

- совместимость с различными видами регистрирующих датчиков: элементная база современных регистраторов позволяет в зависимости от выбранного метода работать с акустическими колебаниями в диапазонах от сотен герц до десятков килогерц;

- возможность для обработки данных как в специализированном приборном, так и в распространенном программном обеспечении.

Главная особенность ИДС-2, представляющая интерес для специалиста с

учетом вышесказанного, заключается в возможности его использования в качестве телеметрической сейсмостанции [17]. Наличие формальной специализации на измерении длины свай не лишает прибор функционала. Записанные сигналы экспортируются на персональный компьютер в формате SEG-Y, что позволяет использовать для их обработки геофизическое программное обеспечение.

Использование нескольких регистраторов (до четырех) позволяет выполнять обследование ленточных фундаментов, плит, массивных монолитных конструкций и других конструкций сложной геометрии. Возможно проведение работ по методикам наземной сейсморазведки.

Использование ИДС-2 в качестве регистратора с заменой встроенного датчика GS-20DX (опция, предусмотренная конструкцией прибора) на датчик с иной частотной характеристикой или чувствительностью (например, GTSensor [21]) дает возможность обследования обделки тоннелей, шахтной крепи, гидротехнических сооружений и других плитоподобных конструкций, в том числе с применением импакт-эхо метода.

Результаты ►

Рассмотрим несколько примеров использования ИДС-2 при решении опи-

санных выше задач. Данные сейсмоакустического обследования свайного и плитного фундаментов были обработаны с помощью программного комплекса GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия). Данные метода MASW обрабатывались с помощью программы SeisPro (ООО «Деко-геофизика СК», Россия).

На рисунке 2 представлены результаты определения длины и оценки сплошности буронабивной сваи (класс бетона – В40, диаметр – 1000 мм, проектная длина – 21,1 м) с применением сейсмоакустического метода. При обследовании использовалась методика разночастотного возбуждения сигнала с помощью нескольких ударных источников с различным весом и материалом бойка (металлического молотка массой 200 г, молотка из твердого пластика массой 350 г, резиновой киянки массой 450 г) [4, 7].

Датчик прибора устанавливался в трех точках – на площадки, предварительно подготовленные с применением угловой шлифовальной машинки на поверхности оголовка сваи. При обработке к собранному для каждого молотка массиву сигналов применялась двумерная сглаживающая фильтрация, что позволило получить усредненный вид волновой картины. Для всех источников хорошо прослеживается отражение от нижнего торца сваи, что позволяет

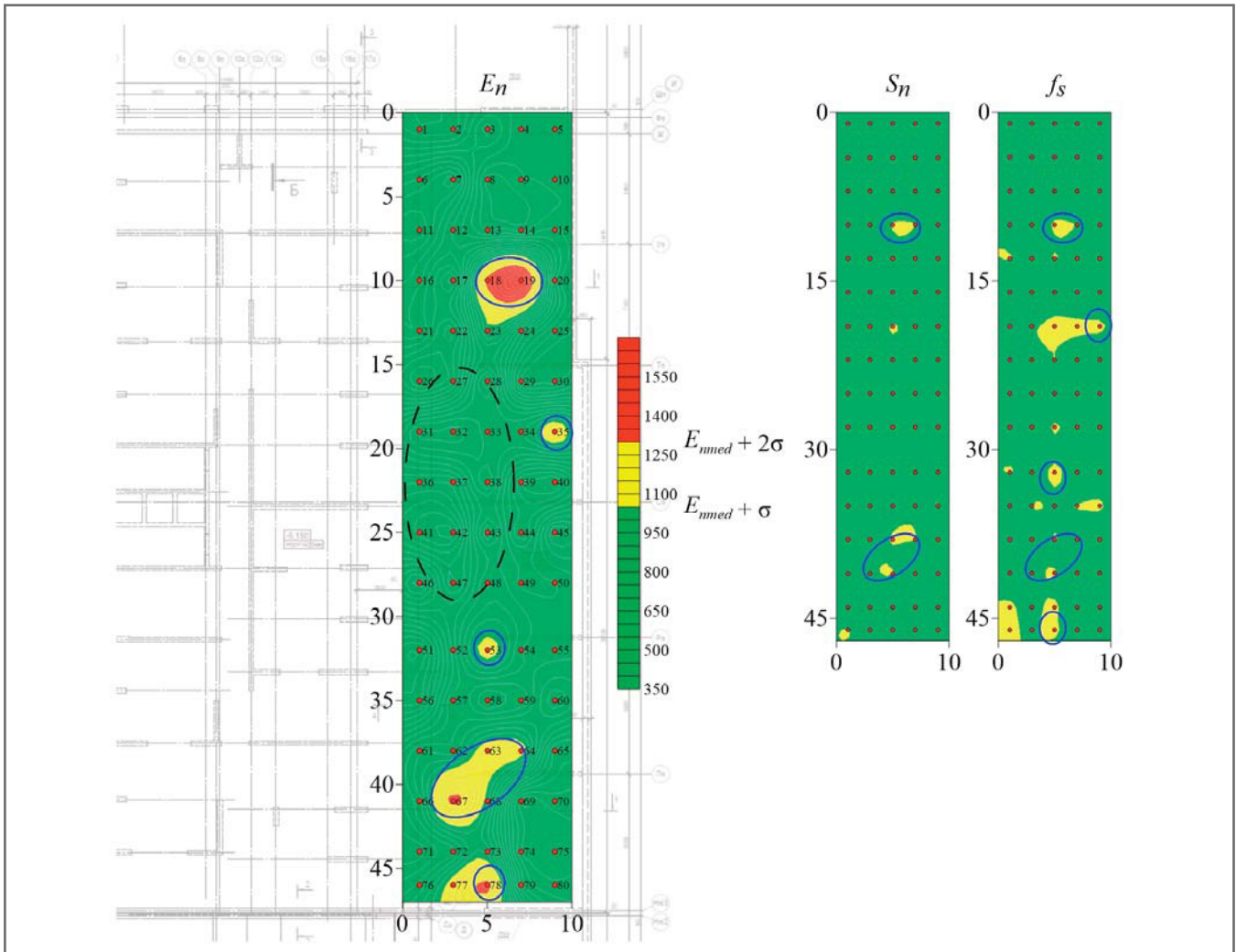


Рис. 3. Карты атрибутов нормированного отклика (даны в расцветках, соответствующих применению к выборке значений критерия «трех σ »). Условные обозначения: черная штриховая овальная линия – область зафиксированных неравномерных осадок плиты; синие сплошные овальные линии – области аномального отклика согласно анализу поведения атрибутов

говорить о сплошности ее ствола. При скорости распространения стержневой волны, принятой равной 4500 м/с (выбранной с учетом класса прочности бетона сваи и возраста бетона конструкции), средняя определенная длина сваи составляет 21,07 м, то есть с высокой точностью соответствует проектному значению параметра.

На примере наборов данных для различных молотков можно показать приближение к случаю «тонкого стержня» при увеличении массы и снижении жесткости бойка источника (соответствует снижению центральной частоты зондирующего импульса). Сигналы, полученные для резиновой киянки, избавлены от высокочастотных акустических помех (связанных с незначительными изменениями поперечного сечения сваи или акустической жесткости насыпных грунтов в верхней части конструкции).

На рисунке 3 представлены результаты акустического обследования монолитной плиты толщиной 600 мм в ос-

новании строящегося высотного здания. Целью геофизических работ являлась локализация участков возможного нарушения/ослабления контакта фундаментной плиты с грунтом основания. Поводом для обследования послужили неравномерные осадки участка плиты, выявленные при геодезическом мониторинге. Причиной их возникновения мог стать частичный размыв грунтовой подушки из-за недобросовестной организации работ по подготовке основания конструкции.

Для возбуждения сигнала использовалась резиновая киянка с массой бойка 450 г. Для каждой из 80 точек, равномерно распределенных по поверхности обследуемой плиты, производилась запись не менее 10 накоплений. Удары киянкой наносились с разных сторон от точки регистрации (на расстояниях от нее в пределах 10–20 см) для снижения влияния случайных помех на данные.

Результаты обработки данных, полученных методом анализа отклика, пред-

ставлены на рисунке 3 в виде карт распределения атрибутов нормированного сигнала. Значения атрибутов по сети наблюдений проинтерполированы до плановых размеров конструктива. Согласно рекомендациям [16] для выделения точек наблюдений с аномальным откликом был использован критерий однократного (ослабленный контакт / незначительная неоднородность материала) и двукратного (нарушенный контакт / значительная неоднородность материала) превышения стандартного отклонения σ для атрибута энергии относительно медианного значения по выборке, а также критерий совместного аномального поведения нескольких атрибутов отклика из работы [11].

Акустический отклик плиты в целом вел себя сравнительно однородно, что позволило локализовать области аномального отклика. Участок развития аномальных осадок плиты паркинга не выделялся в качестве аномального по картам атрибутов. Это позволило сде-

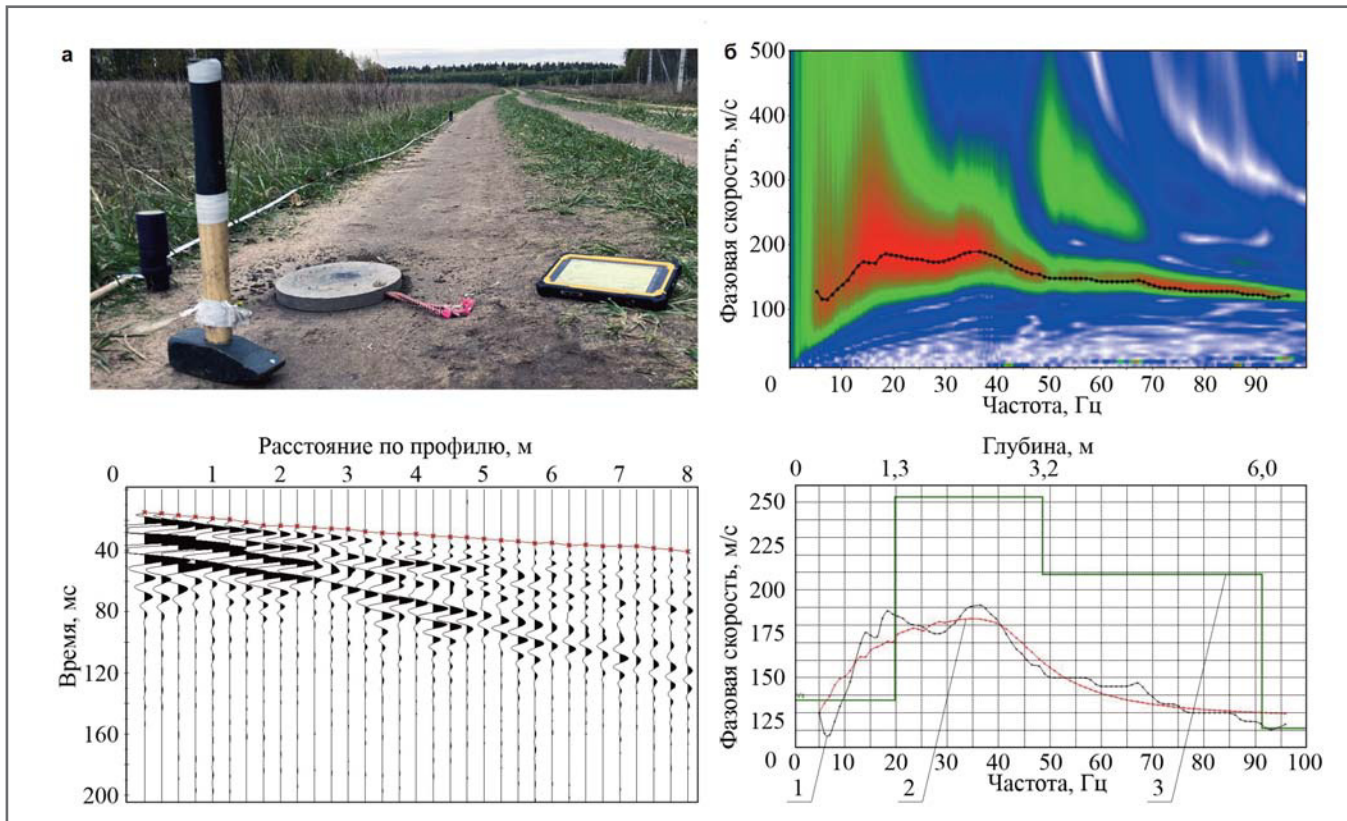


Рис. 4. Применение двухканального ИДС-2 для работ методом MASW: а – сбор полевых данных (сверху) и пример сейсмограммы «пропикированными» первыми вступлениями (снизу); б – полученное дисперсионное изображение (сверху) и оценка изменения скорости поперечных волн (снизу) по результатам инверсии данных. Условные обозначения: 1 – «пропикированная» дисперсионная кривая; 2 – теоретическая дисперсионная кривая; 3 – восстановленный разрез изменения скорости поперечных волн с глубиной

лать вывод об отсутствии значительных по размерам пустот ниже обследуемой плиты в области развития осадок (подтвержденный позднее данными геодезического мониторинга, поскольку на момент проведения испытаний произошло стабилизация, а позднее – полное затухание осадок).

Для нескольких участков конструкции были выделены зоны аномального отклика. Их присутствие может быть связано с наличием локальных зон ослабления контакта «плита – грунт» или внутренними неоднородностями в бетоне конструкции (возникшими после ее неравномерных осадок). Установленные области были рекомендованы для обследования прямыми методами в случае, если в процессе мониторинга фундамента возникнет необходимость продолжения обследования.

По итогам обследования было показано отсутствие значительного в плане нарушения контакта плиты с грунтом.

На рисунке 4 представлены результаты применения ИДС-2 с двумя модулями

регистрации данных для обследования грунтового массива методом MASW. Для возбуждения сигнала применялась металлическая кувалда с массой бойка 2 кг и с плашкой-распределителем. Первый канал регистратора использовался в качестве датчика момента нанесения удара, второй перемещался вдоль профиля наблюдений с шагом 0,25 м. Профиль с максимальным расстоянием между источником и приемником, равным 8 м, позволил получить данные хорошего качества (фундаментальная мода поверхностных волн прослеживается на дисперсионном изображении в диапазоне 6–100 Гц) и дать оценку скорости поперечных волн до глубины 6 м.

Заключение ►

На примере решения нескольких геотехнических задач с использованием многоканального измерителя длины свай ИДС-2 показана специфика приборов, применяемых для работ методами «технической геофизики». По своему функционалу эти устройства распо-

лагаются между геофизической аппаратурой, позволяющей выполнять работы несколькими методами, и приспособлениями для неразрушающего контроля, предназначенными для реализации жестко стандартизированных методик.

Актуальным является вопрос о метрологическом контроле подобного оборудования, так как оно применяется для решения задач (например, для оценки конструктивных параметров сооружений), достоверность которых зависит в том числе от точности измерений.

Важной чертой данных приборов является возможность адаптации оборудования для выполнения работ нестандартными методами за счет дополнения его комплекта модульными устройствами. Разработка и совершенствование регистрирующих датчиков, совместимых с сейсмостанцией, позволяет использовать многоканальный прибор не только для обследования свай и плит стандартными методами, но и для работ параллельным сейсмическим методом или импакт-эхо методом. ■

Список литературы ►

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

2. Чуркин А.А., Капустин В.В., Колюхов Д.С., Владов М.Л. Последние изменения в российской практике нормативного регулирования технической геофизики // *Геотехника*. 2021. Т. 13. № 2. С. 56–70. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70>.
3. Hertlein B., Davis A. *Nondestructive Testing of Deep Foundations*. John Wiley & Sons, 2006. 290 p. <https://doi.org/10.1002/0470034831>.
4. Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай // *Инженерные изыскания*. 2011. Т. 5. № 11. С. 10–15.
5. Качанов В.К., Соколов И.В., Федоренко С.А., Лебедев С.В. Использование импакт-эхо метода для анализа целостности забивных железобетонных свай // *Измерительная техника*. 2017. № 4. С. 56–60. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-4-56-60>.
6. Чуркин А.А., Капустин В.В., Лозовский И.Н., Жостков Р.А. Исследование влияния параметров системы «свая – грунт» на динамические атрибуты акустического сигнала с использованием численного моделирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 1. С. 129–140. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3006>.
7. Чуркин А.А., Лосева Е.С., Лозовский И.Н., Сясько В.А. Приемы повышения достоверности оценки длины свай в составе существующих сооружений при обследовании сейсмоакустическим методом // *Контроль. Диагностика*. 2022. № 10. С. 24–32. <https://doi.org/10.14489/td.2022.10.pp.024-032>.
8. 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. <https://doi.org/10.31857/S0367676522010252>.
9. Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение комплекса геофизических методов при исследовании фундаментных плит // *Технологии сейсморазведки*. 2015. № 1. С. 99–105. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-1-99-105>.
10. Tang H., Long S., Li T. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. Article № 116762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. 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.
12. ASTM D5882-16. Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations. ASTM International, 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1520/D5882-16>.
13. ASTM D8381-21. Standard Test Methods for Measuring the Depth of Deep Foundations by Parallel Seismic Logging. ASTM International, 2021. 8 p. https://doi.org/10.1520/D8381_D8381M-21.
14. ASTM C1740-16. Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response Method. ASTM International, 2016. 10 p. <https://doi.org/10.1520/C1740-16>.
15. ASTM C1383-22. Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. ASTM International, 2022. 11 p. <https://doi.org/10.1520/C1383-15R22>.
16. Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы. М.: Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 2021. 114 с.
17. ИДС-2. Измеритель длины свай // Официальный сайт ООО «НПЦ Геотех». Дата последнего обращения: 16.09.2023. URL: https://www.geotech.ru/izmeritel_dliny_svaj_ids-2/.
18. Jamiolkowski M. Role of geophysical testing in geotechnical site characterization // *Soils and Rocks*. 2012. Vol. 35. № 2. P. 117–137. <https://doi.org/10.28927/SR.352117>.
19. Salas-Romero S., Malehmir A., Snowball I., Brodic B. Geotechnical site characterization using multichannel analysis of surface waves: a case study of an area prone to quick-clay landslides in southwest Sweden // *Near Surface Geophysics*. 2021. Vol. 19. № 6. P. 699–715. <https://doi.org/10.1002/nsg.12173>.
20. Da Col F., Accaino F., Bohm G., Meneghini F. Analysis of the seismic properties for engineering purposes of the shallow subsurface: two case studies from Italy and Croatia // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 9. Article 4535. <https://doi.org/10.3390/app12094535>.
21. GTSensor – сейсмоприемник для решения геотехнических задач // Официальный сайт ООО «Геодавайс». Дата последнего обращения: 16.09.2023. URL: <https://geodevice.ru/main/seismic/seis-cables/gtsensor/>.

References ►

1. Kapustin V.V., Vladov M.L. Tehnicheskaya geofizika. Metody i zadachi [Technical Geophysics. Methods and tasks] // *Geotekhnika*. 2020. Т. 12. № 4. С. 72–85. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85> (in Rus.).
2. Churkin A.A., Kapustin V.V., Konyuhov D.S., Vladov M.L. Posledniye izmeneniya v rossiyskoy praktike normativnogo regulirovaniya tehnicheckoy geofiziki [Recent changes in the Russian practice of normative regulation of Technical Geophysics] // *Geotekhnika*. 2021. Т. 13. № 2. С. 56–70. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70> (in Rus.).

3. Hertlein B., Davis A., *Nondestructive Testing of Deep Foundations*. John Wiley & Sons, 2006. 290 p. <https://doi.org/10.1002/0470034831>.
4. Kapustin V.V. K voprosu o fizicheskikh osnovakh akusticheskogo metoda ispytaniya svay [On the issue of the physical foundations of the acoustic method of testing piles] // *Inzhenernyye izyskaniya*. 2011. T. 5. № 11. S. 10–15 (in Rus.).
5. Kachanov V.K., Sokolov I.V., Fedorenko S.A., Lebedev S.V. Ispol'zovaniye impakt-eho metoda dlya analiza tselostnosti zabivnykh zhelezobetonnykh svay [Using the impact echo method to analyze the integrity of driven reinforced concrete piles] // *Izmeritel'naya tekhnika*. 2017. № 4. S. 56–60. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-4-56-60> (in Rus.).
6. Churkin A.A., Kapustin V.V., Lozovskiy I.N., Zhostkov R.A. Issledovaniye vliyaniya parametrov sistemy «svaya – grunt» na dinamicheskiye atributy akusticheskogo signala s ispol'zovaniyem chislennogo modelirovaniya [Study of the influence of the parameters of the “pile-soil” system on the dynamic attributes of the acoustic signal with the use of numerical modeling] // *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring geosursov*. 2021. T. 332. № 1. S. 129–140. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3006> (in Rus.).
7. Churkin A.A., Loseva E.S., Lozovskiy I.N., Syas'ko V.A. Priyemy povysheniya dostovernosti otsenki dliny svay v sostave sushchestvuyushchikh sooruzheniy pri obsledovanii seysmoakusticheskim metodom [Techniques for increasing the reliability of estimating the length of piles as part of existing structures when surveyed using the seismic-acoustic method] // *Kontrol'. Diagnostika*. 2022. № 10. S. 24–32. <https://doi.org/10.14489/td.2022.10.pp.024-032> (in Rus.).
8. Shmurak D.V., Churkin A.A., Lozovskiy I.N., Zhostkov R.A. Spektral'nyi analiz dannykh paralelnogo seysmicheskogo metoda obsledovaniya podzemnykh konstruksiy [Spectral analysis of data from the parallel seismic method of underground structures survey] // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2022. T. 86. № 1. S. 116–121. <https://doi.org/10.31857/S0367676522010252> (in Rus.).
9. Kapustin V.V., Kuvaldin A.V. Primeneniye kompleksa geofizicheskikh metodov pri issledovanii fundamentnykh plit [Application of a complex of geophysical methods in the study of foundation slabs] // *Tehnologii seysmorazvedki*. 2015. № 1. S. 99–105. <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-1-99-105> (in Rus.).
10. Tang H., Long S., Li T. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. Article № 116762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. Churkin A.A., Hmel'nikskiy A.Y., Kapustin V.V. Otsenka usloviy kontakta konstruksii s gruntovym massivom po atributam normirovannogo akusticheskogo otklika [Assessment of the contact conditions “structure – soil mass” by the attributes of the normalized acoustic response] // *Osnovaniya, fundamente i mehanika gruntov*. 2022. № 5. S. 17–21 (in Rus.).
12. ASTM D5882-16. Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations. ASTM International, 2016. 6 p. <https://doi.org/10.1520/D5882-16>.
13. ASTM D8381-21. Standard Test Methods for Measuring the Depth of Deep Foundations by Parallel Seismic Logging. ASTM International, 2021. 8 p. https://doi.org/10.1520/D8381_D8381M-21.
14. ASTM C1740-16. Standard Practice for Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the Impulse-Response Method. ASTM International, 2016. 10 p. <https://doi.org/10.1520/C1740-16>.
15. ASTM C1383-22. Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method. ASTM International, 2022. 11 p. <https://doi.org/10.1520/C1383-15R22>.
16. *Rukovodstvo po kontrolyu kachestva skrytykh rabot geofizicheskimi metodami pri stroitel'stve podzemnykh ob"ektov, vklyuchaya ob"ekty metropolitena, na territorii Moskvy* [Guidelines for Hidden Works Quality Control by Geophysical Methods in the Construction of Underground Facilities, Including Metro Facilities, in the territory of Moscow]. M.: Kompleks gradostroitel'noy politiki i stroitel'stva goroda Moskvy, 2021. 114 s. (in Rus.).
17. IDS-2. Izmeritel' dliny svay [IDS-2. Pile length tester] // *Ofitsial'nyi sait OOO “NPTs Geotekh”*. Data poslednego obrashcheniya: 16.12.2022. URL: https://www.geotech.ru/izmeritel_dlina_svaj_ids-2/ (in Rus.).
18. Jamiolkowski M. Role of geophysical testing in geotechnical site characterization // *Soils and Rocks*. 2012. Vol. 35. № 2. P. 117–137. <https://doi.org/10.28927/SR.352117>.
19. Salas-Romero S., Malehmir A., Snowball I., Brodic B. Geotechnical site characterization using multichannel analysis of surface waves: a case study of an area prone to quick-clay landslides in southwest Sweden // *Near Surface Geophysics*. 2021. Vol. 19. № 6. P. 699–715. <https://doi.org/10.1002/nsg.12173>.
20. Da Col F., Accaino F., Bohm G., Meneghini F. Analysis of the seismic properties for engineering purposes of the shallow subsurface: two case studies from Italy and Croatia // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 9. Article 4535. <https://doi.org/10.3390/app12094535>.
21. GTSensor – seysmopriyemnik dlya resheniya geotekhnicheskikh zadach [GTSensor – a seismic receiver for solving geotechnical problems] // *Ofitsial'nyi sait OOO “Geodevais”*. Data poslednego obrashcheniya: 16.09.2023. URL: <https://geodevice.ru/main/seismic/seis-cables/gtsensor/>.