

УДК 620.179.17; 624.154.1; 550.8.056

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-59-71](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-59-71)

EDN: TIRKDT

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

А.А. ЧУРКИН, канд. техн. наук

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, стр. 12, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рост сложности задач, возникающих при контроле качества геотехнических конструкций, ведет к росту вклада косвенных методов в составе комплекса изысканий. Сейсмоакустический контроль длины и сплошности свай в настоящий момент является одним из наиболее распространенных неразрушающих геофизических методов, применяемых при диагностике состояния фундаментов. Возможности и ограничения метода связаны с особенностями лежащей в его основе теоретической модели распространения упругих волн в тонком стержне. Специалистам часто приходится прибегать к вспомогательным методикам полевых исследований.

Целью работы является информирование инженеров-испытателей, проектировщиков и сотрудников надзорных организаций о возможностях вспомогательных методик сейсмоакустического контроля качества свайных фундаментов.

Материалы и методы. Описаны особенности теоретической модели сейсмоакустического контроля качества свай и связанные с ними возможности и ограничения метода. Вспомогательные методики сбора и анализа данных применены для обследования свайных фундаментов, в том числе включенных в состав существующих сооружений.

Результаты. Результатом работы является получение дополнительной информации об обследуемых фундаментах с использованием вспомогательных методик сбора и анализа данных. Альтернативное расположение датчиков относительно обследуемой конструкции применено для определения глубины заложения свай в составе ростверков и существующих сооружений. Профилирование с общим пунктом возбуждения сигнала (ультрасейсмический метод) использовано для оценки скорости распространения стержневой волны в теле конструкции. На примере способов представления данных параллельного сейсмического метода показана возможность его использования для контроля качества бетона фундаментов.

Выводы. Вспомогательные методики сбора и анализа данных, применяемые при сейсмоакустическом обследовании свайных фундаментов, позволяют существенно повысить достоверность выводов о глубине заложения и сплошности материала конструкции.

Ключевые слова: испытания свай, неразрушающий контроль, техническая геофизика, сейсмоакустический метод, вспомогательные методики испытаний, обследование свай под ростверком, ультрасейсмический метод

Для цитирования: Чуркин А.А. О возможностях вспомогательных методик сейсмоакустического обследования свайных фундаментов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;36(1):59–71. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-59-71](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-59-71)

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.02.2023

Поступила после рецензирования 21.02.2023

Принята к публикации 28.02.2023

CAPABILITIES OF AUXILIARY TECHNIQUES FOR LOW STRAIN IMPACT TESTING OF PILES FOUNDATIONS

A.A. CHURKIN, Cand. Sci. (Engineering)

*Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov,
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 12, Moscow, 109428, Russian Federation*

Abstract

Introduction. An increase in the complexity of tasks arising from the quality control of geotechnical structures ultimately increases the role of indirect methods as part of the survey set. Low strain impact testing of piles length and integrity is currently one of the most common non-destructive geophysical methods used in the state diagnostics of foundations. The capabilities and limitations of the method are associated with the peculiarities of its basic theoretical model describing the propagation of elastic waves in a thin rod. In this regard, specialists often have recourse to the auxiliary techniques of field research.

Aim. To inform test engineers, designers and employees of supervisory organizations about the potential of auxiliary methods for the low strain impact quality control of pile foundations.

Methods and materials. The features of the theoretical model of the low strain impact pile quality control, as well as the associated capabilities and limitations of the method are described. The auxiliary methods of data collection and analysis were used for the survey of pile foundations, including those in the composition of existing structures.

Results. The results of the work are represented by additional information obtained about the foundations surveyed using the auxiliary methods of data collection and analysis. An alternative arrangement of sensors relative to the surveyed structure was used for determining the depth of piles in the composition of grade beam footings and existing structures. The common shot point profiling (ultra-seismic method) was used to assess the velocity of rod wave propagation in the body of the structure. The options of data presentation in the parallel seismic method were used to demonstrate its potential for the quality control of foundation concrete.

Conclusion. The auxiliary methods of data collection and analysis used in the low strain impact survey of pile foundations can significantly increase the reliability of conclusions about the depth and integrity of a structural material.

Keywords: pile testing, non-destructive testing, technical geophysics, low strain impact testing, auxiliary test methods, pile cap inspection, ultra-seismic method

For citation: Churkin A.A. Capabilities of auxiliary techniques for low strain impact testing of piles foundations. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;36(1):59–71. (In Russ.). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-59-71](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-59-71)

Author contribution statement

The author takes responsibility of all aspects of the article preparation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 02.02.2023

Revised 21.02.2023

Accepted 28.02.2023

Введение

Актуальность неразрушающих косвенных методов исследования фундаментов вызвана связанными причинами: затратностью прямых методов и ростом объемов подземного строительства в современных городских агломерациях. Распространенность и широта применения геофизических подходов к исследованию конструкций [1–8] позволяют использовать термин «техническая геофизика» [9]. Он включает совокупность методов на стыке инженерной геофизики (исследуются масштабные конструкции и значительные объемы грунта) и неразрушающего контроля (исследование ведется регламентированными методиками с высокой разрешающей способностью) и способов их применения при решении геотехнических задач.

Свайные фундаменты являются одним из наиболее распространенных объектов исследования геофизическими методами. Наибольшие объемы испытаний выполняются с применением методик, основанных на анализе распространения направленных упругих волн в теле конструкции.

Сейсмоакустический метод контроля свай (рис. 1а, б) имеет хорошо разработанную теоретическую основу и широкую практику применения [2, 4, 7, 10]. Вспомогательные методики, такие как параллельный сейсмический метод (рис. 1д) [10–15] и профилирование с общим пунктом возбуждения (так называемое «ультрасейсмическое профилирование», рис. 1с) [16–17], применяются в ситуациях, когда отсутствует возможность получения достоверной информации о длине сваи с помощью стандартной методики. Возможности и ограничения данных подходов предлагается обсудить в материале.

Методы исследования

Причиной широкой адаптации волновых методов для исследования свайных фундаментов стали особенности физико-механических свойств системы «свая – грунт». Исследуются железобетонные (в основном) конструкции, характеристики материала и геометрические размеры которых определены требованиями проекта. Предполагается однородность свойств бетона для всего объема сооружения, т. е. дефект является контрастной неоднородностью в сплошной конструкции. Вмещающие грунты имеют акустические свойства, существенно отличающиеся от характеристик материала конструкции [8, 18].

В зависимости от выбранного диапазона частот колебаний применимы различные модели среды: модель тонкого стержня в однородном полупространстве или модель сваи с переменным акустическим импедансом в слоистой среде (рис. 2). Объединяет их использование

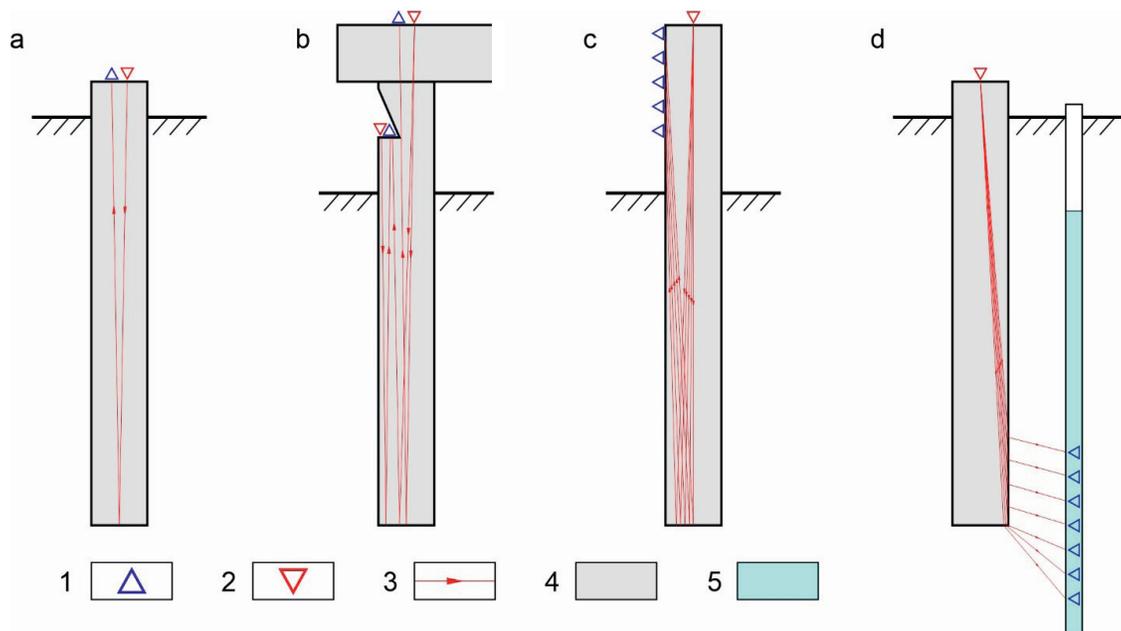


Рис. 1. Методики сейсмоакустического контроля свай [из [10]]: *a* – стандартная; *b* – обследование сваи в составе ростверка; *c* – профилирование с общим пунктом возбуждения (ультрасейсмический метод); *d* – параллельный сейсмический метод. Условные обозначения: 1 – приемник; 2 – источник; 3 – траектории распространения упругих волн; 4 – железобетон; 5 – заполненная водой скважина

Fig. 1. Methods of the pile low strain impact testing [according to [10]]: *a* – standard; *b* – inspection of piles in grade beam footings; *c* – common shot point profiling (ultra-seismic method); *d* – parallel seismic method. Legend: 1 – receiver; 2 – source; 3 – elastic wave propagation trajectories; 4 – reinforced concrete; 5 – water-filled well

линейно-упругого приближения. Это позволяет использовать модель «черного ящика» для описания реакции системы «свая – грунт» на волновой импульс.

Отклик $s(t)$ формируется при передаче в среду, акустические свойства которой описываются функцией Грина $G(t) = F\{\rho V(x, y, z); t\}$, импульса $i(t)$ и выражается следующим образом:

$$s(t) = G(t) \otimes i(t), \tag{1}$$

где \otimes – оператор свертки, $\rho V(x, y, z)$ – изменение акустической жесткости в объеме (ρ – плотность среды, V – скорость распространения упругой волны). Распространение продольной деформации в тонких стержнях описывается волновым уравнением в приближении Сен-Венана:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = V_0^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \tag{2}$$

где $V_0 = \sqrt{E/\rho}$ – стержневая скорость упругой волны в свае (E – модуль Юнга, ρ – плотность материала сваи) [2, 16]. Скорости стержневой и продольной волн на практике необязательно совпадают – их соотношение зависит от коэффициента Пуассона ν материала стержня [9]:

$$V_p = V_0 \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \tag{3}$$

Модель тонкого стержня не учитывает образование в стержне поперечных деформаций при распространении продольной волны (так называемый эффект Пуассона) и потери энергии колебаний из-за влияния вмещающих грунтов (рис. 2а): свая погружена в однородное полупространство, акустическая жесткость которого значительно меньше акустической жесткости материала стержня. По стволу сваи распространяются плоские продольные стержневые волны. Сопротивление поперечного сечения сваи характеризуется акустическим импедансом $Z_p = \rho \cdot V_0 \cdot S$, где S – площадь поперечного сечения сваи. Изменение импеданса приводит к образованию отраженных волн. На регистрируемый отклик оказывают влияние только значительные изменения импеданса, вызывающие интенсивное отражение (конец стержня/сваи или значительное изменение сечения).

Для соответствия исследуемой сваи модели тонкого стержня необходимо выполнение двух основных условий [2, 19]:

$$D/L \ll 1 \text{ и } D/\lambda \ll 1, \tag{4}$$

где D – диаметр сваи, L – длина сваи, λ – длина волны импульса, возбуждаемого ударным источником. В случае полного или частичного невыполнения условий (4) тело сваи нельзя считать одномерным и однородным для распространяющейся деформации. Возбуждаемое точечным источником поле колебаний состоит из нескольких типов волн (стержневые, крутильные, изгибные). Сваи расположены в грунтах различной акустической жесткости $\rho_n V_n$, что приводит к появлению неравномерно изменяющегося трения по боковой поверхности сваи при распространении упругой волны (рис. 2b).

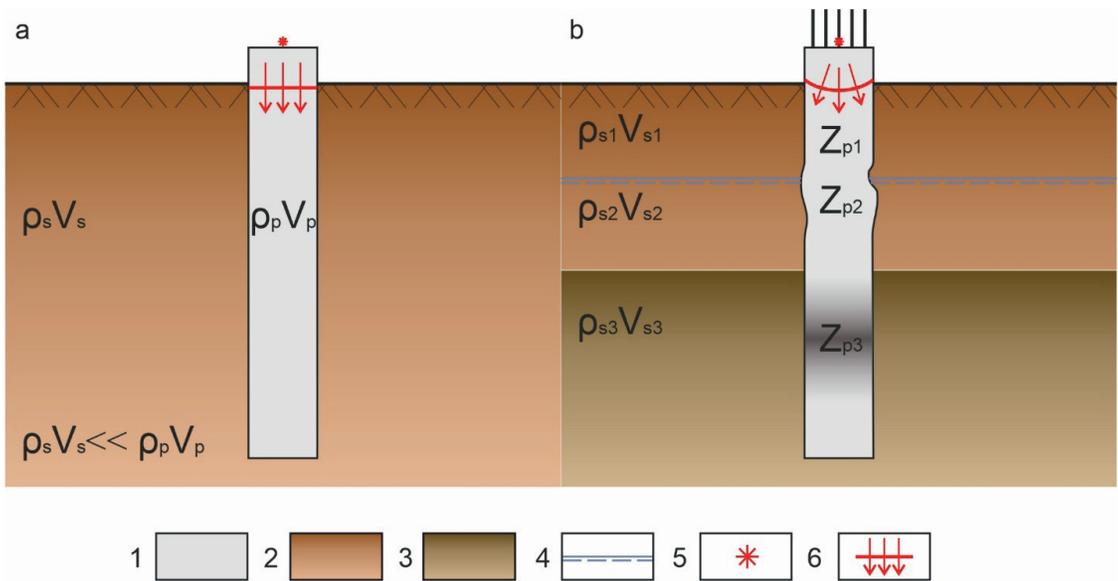


Рис. 2. Модели «свая – грунт» (из [18]): а – тонкий стержень в однородном полупространстве; б – свая с переменным акустическим импедансом, погруженная в слоистую среду. Условные обозначения: 1 – свая; 2–4 – вмещающие грунты; 5 – источник упругих волн; 6 – распространение волн

Fig. 2. “Pile – soil” models [according to [18]]: а – thin rod in the homogeneous half-space; б – pile with the variable acoustic impedance, submerged in the laminar medium. Legend: 1 – pile; 2–4 – enclosing soils; 5 – source of elastic waves; 6 – wave propagation

Чем выше акустическая жесткость вмещающих грунтов и чем больше геометрические размеры свай, тем выше потери энергии сигнала на излучение во вмещающие грунты и образование волн-помех на малых неоднородностях материала свай [18–20]. Эти факторы приводят к снижению информативности сигналов и затрудняют контроль длины и сплошности. Для частичной компенсации этого эффекта возможно использовать комплект ударных источников с различным весом и материалом бойка. Выбор источников производится исходя из геометрических размеров свай и типа вмещающих грунтов и влияет на разрешающую способность методики [6–7, 21]. На практике это приводит к расхождениям в значении длин свай, определенных с применением различных ударников – сказывается эффект частотной дисперсии стержневой скорости [2, 19].

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, 1–2 сейсмоприемника (велосиметра), набор ударных источников. Использовалось три вида ударников: металлические молотки 100–200 г, молотки из твердого пластика 250–350 г, резиновые киянки 300–500 г.

Обработка результатов осуществлялась в программном обеспечении GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия). Использованный граф обработки включал сборку сигналов в отсортированный массив с вводом статических поправок и удалением некондиционных сигналов; амплитудную коррекцию; двумерную сглаживающую фильтрацию для отбраковки случайных помех и прослеживания целевых отражений; определение длины свай по отраженному сигналу и оценку стержневой скорости по сигналу прямого прохождения.

Результаты

Вспомогательные сейсмоакустические методики не являются универсальным средством борьбы с погрешностью метода (оцениваемой в 5–10%), однако позволяют получить дополнительную информацию, повышающую достоверность выводов о длине и сплошности конструкции.

Дополнительные способы расположения датчиков при обследовании фундамента, включенного в ростверк или существующее здание (рис. 1b), позволяют на этапе интерпретации более уверенно выделить отражение от нижнего конца свай. Желательным является закрепление регистрирующего датчика на боковой поверхности самой обследуемой конструкции, хотя в некоторых случаях сохраняется возможность работы с поверхности ростверка.

На рис. 3 показаны примеры определения длины свай в составе существующих сооружений. В первом случае организация площадки для установки датчика на боковую поверхность позволила получить данные высокого качества. Несмотря на массивные габариты обследуемой свай (диаметр 800 мм, проектная длина 22,0 м), сигналы отличаются низким уровнем шумов и позволяют на практике показать явление частотной дисперсии скорости стержневой волны – при одинаковом значении скорости волны, принятом равным 4000 м/с (определено при обследовании свай известной длины, изготовленных из бетона того же класса прочности, на данной площадке), длина для трех ударников отличается. Сигналы для высокочастотного металлического молотка позволяют дать точную оценку

длины сваи (площадка для возбуждения и приема сигнала располагалась на 0,4 м ниже оголовка сваи).

Во втором случае расположение регистратора на подколонном ростверке (интенсивный приток грунтовых вод не позволил обследователям выполнить шурфы ниже уровня пола подвала) привело к осложнению сигналов помехами от ростверка и конструкций монолитного каркаса здания. При ожидаемой глубине заложения фундамента около 10 м и толщине подколонного ростверка в 1,5 м результат обследования с поверхности ростверка дает среднюю длину сваи в 10,4 м (т. е. расхождение более 1 м). Скорость стержневой волны выбрана равной 3600 м/с, это сравнительно низкое значение позволяет избежать переоценки

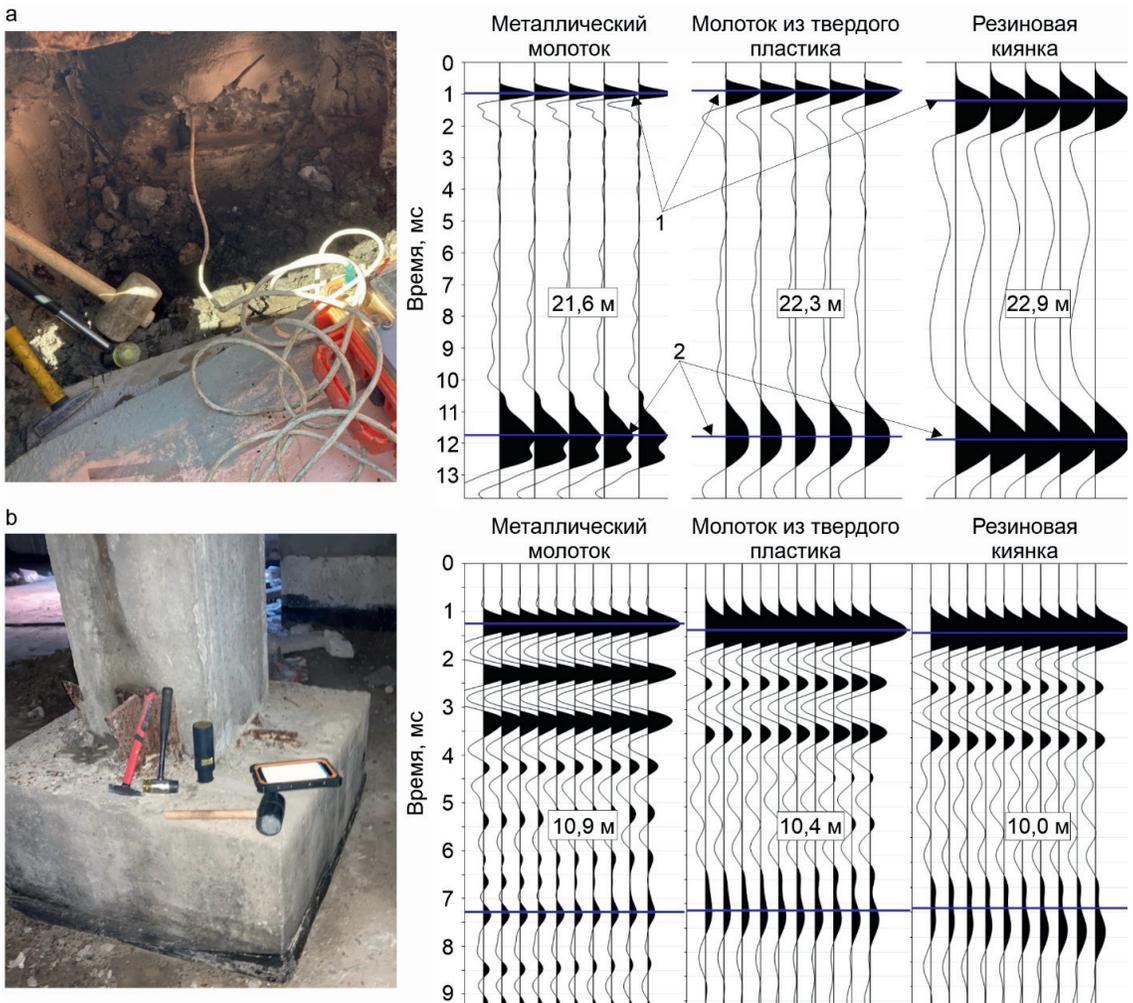


Рис. 3. Обследование свай в составе существующих сооружений: *a* – результаты обследования свай из предварительно подготовленного шурфа; *b* – результаты обследования свай через подколонный ростверк. Условные обозначения: 1 – пикировка момента нанесения удара; 2 – пикировка прихода отражения от низа сваи

Fig. 3. Inspection of piles in existing structures: *a* – results of the pile inspection using the preliminarily prepared pit-hole; *b* – results of the pile inspection through the column-base grade beam footing. Legend: 1 – impact moment picking; 2 – pile bottom reflection arrival picking

глубины заложения свай [7]. Таким образом, разница в определенной и проектной длинах может быть связана как с неправильно выбранным значением скорости, так и с заложением фундамента на меньшую глубину – для однозначного вывода не хватает априорной информации. Интенсивные помехи также не дают возможности сделать однозначный вывод о сплошности фундамента.

Методика профилирования с постоянным положением источника (ультрасейсмический метод) (рис. 1с) позволяет собрать сейсмограмму, на которой по годографу прямой волны дается оценка стержневой скорости. Этот способ получения информации о скорости волны в свае является наиболее точным из возможных (предварительные ультразвуковые измерения или использование априорных зависимостей «скорость – класс прочности» не позволяют однозначно определить стержневую скорость в фундаменте, т. к. она зависит от его геометрии [18]). Применение методики требует от исследователя квалификации и также не является универсальным решением проблемы контроля качества свай.

Рассмотрим ее использование на примере двух наборов данных (рис. 4). В первом случае профилирование по боковой грани недопогруженной забивной сваи позволяет получить значение скорости в материале сваи (4000 м/с) и использовать его при обследовании уже погруженных свай фундамента. Проектная длина свай – 8 м – определяется по годографу отраженной волны с хорошей точностью (рис. 4а).

Во втором случае профилирование выполнялось вдоль участка сваи высотой в 2 м. Точка регистрации сигнала располагалась на удалении 1 м от верхнего торца сваи. Составная свая (проектная длина верхней и нижней секций 6 и 10 м соответственно) была включена в состав эксплуатируемого сооружения. Определенная по годографу первых вступлений стержневая скорость составила ~3800 м/с. На рис. 4б показаны выделенные для данного значения скорости времена прихода отражений от зоны стыка и нижнего конца сваи. Сигналы осложнены помехами, которые затрудняют точное выделение отражений на сейсмограмме. Несмотря на интенсивные акустические аномалии, полученные оценки длины конструкции и глубины расположения зоны стыка сходятся с проектной информацией (6,1 м для зоны стыка и 15,9 м длины сваи соответственно).

При работе параллельным сейсмическим методом (ПСМ) возбуждение сигнала производится с доступной для нанесения удара поверхности конструкции (сваи, ростверка, опоры моста, фундамента глубокого заложения) [12–13, 18]. Испытания выполняются с регистрацией сигналов приемником, перемещающимся в расположенной поблизости от сооружения скважине, глубина которой превышает ожидаемую глубину фундамента. Несмотря на отсутствие на российском рынке специализированных приборов для работ ПСМ, имеется опыт успешного применения геофизической аппаратуры для вертикального сейсмического профилирования для определения глубины заложения фундаментов различной конструкции [6].

Результаты экспериментов по численному двумерному и трехмерному моделированию показывают возможность использования метода для получения выводов о сплошности и/или форме сечения конструкции [15, 18]. Для этого требуется применение нестандартных способов представления данных с применением спектрального анализа (рис. 5). Поскольку возможности и ограничения стандартной методики анализа сигналов ПСМ хорошо изучены, данное направление работ представляется наиболее перспективным для дальнейшего развития метода.

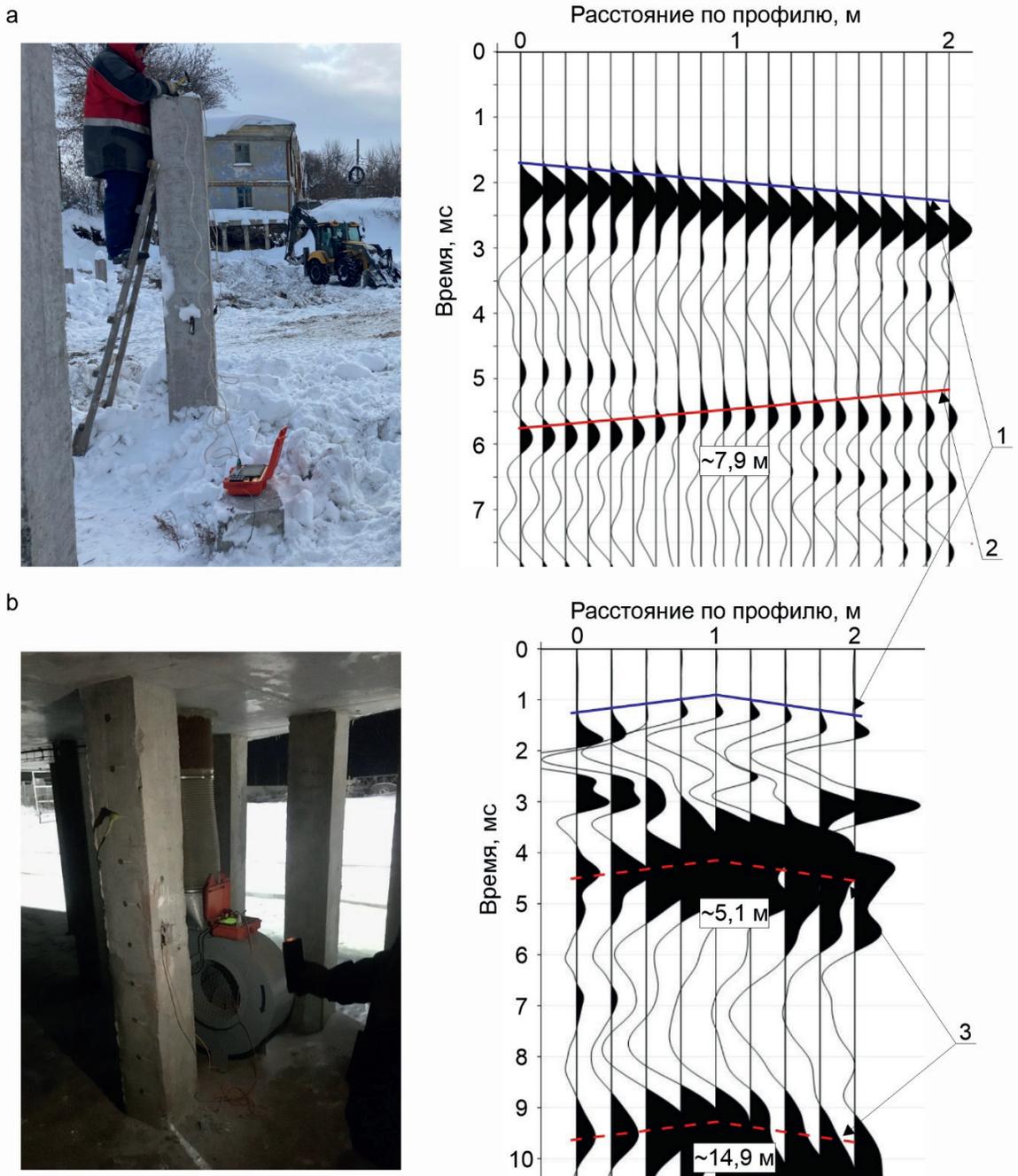


Рис. 4. Обследование свай с применением профилирования с общим пунктом возбуждения (ультрасейсмического метода): *a* – недогруженная забивная свая; *b* – составная забивная свая в составе существующего сооружения.

Условные обозначения: 1 – годограф прямой волны; 2 – годограф отраженной от нижнего конца сваи волны;

3 – времена прихода годографов волн, отраженных от зоны стыка и нижнего конца сваи

Fig. 4. Inspection of piles using the common shot point profiling (ultra-seismic method): *a* – under-submerged driven pile; *b* – composite driven pile in the existing structure. Legend: 1 – direct wave hodograph; 2 – pile lower end reflected hodograph; 3 – hodograph arrival times of the waves, reflected from the joint zone and pile lower end

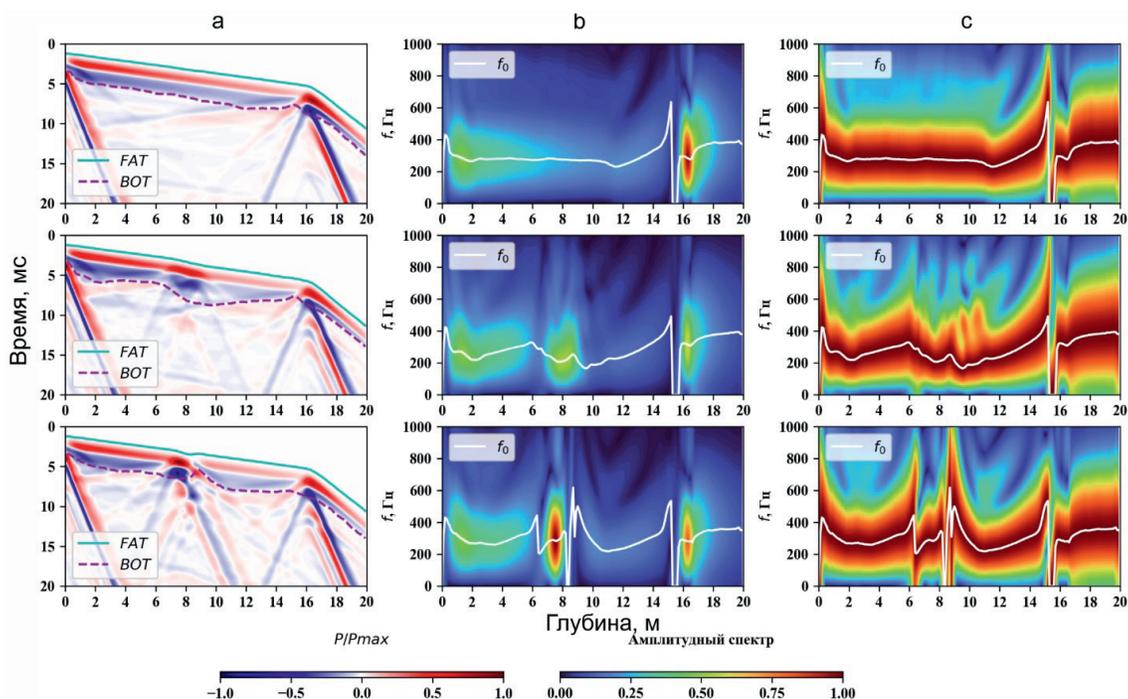


Рис. 5. Способы представления результатов обследования сваи с применением параллельного сейсмического метода [из [15] с изменениями] для трех численных моделей (сверху вниз) – сплошной сваи, сваи с включением бетона пониженной прочности, сваи с сужением сечения: а – во временной области; б, с – в частотной области с различной нормировкой спектральной амплитуды

Fig. 5. Options for representing the results of the pile inspection by the parallel seismic method [according to [15], modified] for three numerical models (from top to bottom) – solid pile, pile with the inclusion of low-strength concrete, pile with section narrowing: a – time-domain; b, c – frequency-domain with various spectral amplitude normalizations

Заключение

Представленная информация о вспомогательных методиках сейсмоакустического контроля позволяет показать их возможности для повышения достоверности результатов исследований. Методики сами по себе не являются гарантией успешного обследования фундамента, так как не устраняют особенностей лежащей в основе метода теоретической модели. Однако их применение позволяет решить ряд важных вопросов.

Альтернативные способы установки датчиков вместе с разночастотным возбуждением позволяют определить длину сваи, включенной в существующее здание или ростверк. Использование профилирования вдоль боковой грани конструкции дает значение скорости стержневой волны, необходимое для успешной интерпретации сигналов. Параллельный сейсмический метод позволяет с высокой точностью дать оценку глубины заложения фундамента вне зависимости от сложности его геометрии и гипотетически может быть использован и для контроля сплошности материала.

Список литературы

1. Webster K., Rausche F., Webster S. Pile and shaft integrity test results, classification, acceptance and/or rejection. In: Proceedings of the TRB 2011 Annual Meeting, Washington, D.C., USA. [internet]. Available at: <https://www.pile.com/wp-content/uploads/2017/03/PileAndShaftIntegrityTestResults.pdf>
2. Капустин В.В. К вопросу о физических основах акустического метода испытания свай. Инженерные изыскания. 2011;{11}:10–15.
3. Coe J.T., Mahvelati S., Asabere P. Application of non-destructive testing and geophysical methods to evaluate unknown foundation geometry. In: Proceedings of 29th Central Pennsylvania Geotechnical Conference, Hershey, Pennsylvania, USA, 2017.
4. Amir J.M. Pile integrity testing: history, present situation and future agenda. In: Proceedings of 3rd Bolivian International Conference Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2017, pp. 17–32.
5. Дзагов А.М., Шейнин В.И., Костенко Е.С., Блохин Д.И. К вопросу о назначении объемов работ по контролю качества бетона набивных и буровых свай. Геотехника. 2017;{1}:64–69.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов. Геотехника. 2018;10(5-6):62–71.
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;25(10):24–32. <https://doi.org/10.14489/td.2022.10.pp.024-032>
8. Loseva E., Osokin A., Mironov D., Dyakonov I. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg. Architecture and engineering. 2020;5(2):38–45. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-2-38-45>
9. Капустин В.В., Владов М.Л. Техническая геофизика. Методы и задачи. Геотехника. 2020;12(4):72–85. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85>
10. Churkin A.A., Ulybin A.V., Kapustin V.V. Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control. Construction of unique buildings and structures. 202;96(3):9603. <https://doi.org/10.4123/CUBS.96.3>
11. Liao S.-T., Tong J.-H., Chen C.-H., Wu T.-T. Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles. International Journal of Solids and Structures. 2006;43(7-8):2279–2298. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.057>
12. Olson L., Sack D. Combined parallel seismic and cone penetrometer testing of existing bridge foundations and levee sheet piles for length and capacity evaluations. In: Proceedings of the SAGEEP 2010, Keystone, USA, 2010. <https://doi.org/10.4133/1.3445494>
13. Niederleithinger E. Improvement and extension of the parallel seismic method for foundation depth measurements. Soils and Foundations. 2012;52(6):1093–1101. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.023>
14. Lu Z.T., Wang Z.L., Liu D.J. A study on the application of the parallel seismic method in pile testing. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2013;55:255–262. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.021>
15. 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;86(1):116–121. <https://doi.org/10.31857/S0367676522010252>
16. Krause M., Dackermann U., Li J. Elastic wave modes for the assessment of structural timber: ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2015;5(2):221–249. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0087-2>
17. Wang H., Nguyen T.V., Wang C.-Y. Vertical Profiling Ultra-Seismic Inspection to Evaluate Model Pile Depths. In: Proceedings of NDE/NDT for Highways & Bridges: SMT, August, 2018.
18. Чуркин А.А. Развитие методики применения геофизического комплекса для контроля качества заглубленных монолитных конструкций [диссертация]. Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова; 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15557.17122>
19. Хмельницкий А.Ю., Капустин В.В., Владов М.Л. Экспериментальные исследования влияния вмещающего грунта на распространение сейсмических волн в свайных конструкциях. Инженерные изыскания. 2012;{6}:16–22.
20. Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method. In: Proceedings of 8th International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piling, Lisbon, 2008, p. 435–441.
21. Капустин В.В., Ушаков А.Л. Применение акустических методов при исследовании сложных свайных конструкций. Геофизика. 2011;{6}:65–70.

References

1. Webster K., Rausche F., Webster S. Pile and shaft integrity test results, classification, acceptance and/or rejection. In: Proceedings of the TRB 2011 Annual Meeting, Washington, D.C., USA [internet]. Available at: <https://www.pile.com/wp-content/uploads/2017/03/PileAndShaftIntegrityTestResults.pdf>.
2. Kapustin V.V. On the question of the physical foundations of the acoustic method of testing piles. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys*. 2011;(11):10–15 (in Russian).
3. Coe J.T., Mahvelati S., Asabere P. Application of non-destructive testing and geophysical methods to evaluate unknown foundation geometry. In: Proceedings of 29th Central Pennsylvania Geotechnical Conference, Hershey, Pennsylvania, USA, 2017.
4. Amir J.M. Pile integrity testing: history, present situation and future agenda. In: Proceedings of 3rd Bolivian International Conference Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2017, pp. 17–32.
5. Dzagov A.M., Sheinin V.I., Kostenko E.S., Blokhin D.I. On the issue of assigning the scope of work on quality control of concrete of packed and drilling piles. *Geotekhnika = Geotechnics*. 2017;(1):64–69 (in Russian).
6. Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Kuvaldin A.V. Possibilities of seismoacoustic and ultrasonic methods for quality control of pile foundations. *Geotekhnika = Geotechnics*. 2018;10(5-6):62–71 (in Russian).
7. Churkin A.A., Loseva E.S., Lozovsky I.N., Syasko V.A. Techniques for increasing the reliability of estimating the length of piles as part of existing structures during the survey by the seismoacoustic method. *Kontrol'. Diagnostika*. 2022;25(10):24–32 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/td.2022.10.pp.024-032>
8. Loseva E., Osokin A., Mironov D., Dyakonov I. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg. *Architecture and engineering*. 2020;5(2):38–45. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2020-5-2-38-45>
9. Kapustin V.V., Vladov M.L. Technical geophysics. Methods and tasks. *Geotekhnika = Geotechnics*. 2020;12(4):72–85 (in Russian). <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85>
10. Churkin A.A., Ulybin A.V., Kapustin V.V. Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control. Construction of unique buildings and structures. 2021;96(3):9603. <https://doi.org/10.4123/CUBS.96.3>
11. Liao S.-T., Tong J.-H., Chen C.-H., Wu T.-T. Numerical simulation and experimental study of parallel seismic test for piles. *International Journal of Solids and Structures*. 2006;43(7-8):2279–2298. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.057>
12. Olson L., Sack D. Combined parallel seismic and cone penetrometer testing of existing bridge foundations and levee sheet piles for length and capacity evaluations. In: Proceedings of the SAGEEP 2010, Keystone, USA, 2010. <https://doi.org/10.4133/1.3445494>
13. Niederleithinger E. Improvement and extension of the parallel seismic method for foundation depth measurements. *Soils and Foundations*. 2012;52(6):1093–1101. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.023>
14. Lu Z.T., Wang Z.L., Liu D.J. A study on the application of the parallel seismic method in pile testing. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013;55:255–262. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.09.021>
15. Shmurak D.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Zhostkov R.A. Spectral analysis of data from the parallel seismic method of underground structures survey. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2022;86(1):79–82 (in Russian). <https://doi.org/10.3103/s1062873822010221>
16. Krause M., Dackermann U., Li J. Elastic wave modes for the assessment of structural timber: ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2015;5(2):221–249. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0087-2>
17. Wang H., Nguyen T.V., Wang C.-Y. Vertical Profiling Ultra-Seismic Inspection to Evaluate Model Pile Depths. In: Proceedings of NDE/NDT for Highways & Bridges: SMT, August, 2018.
18. Churkin A.A. Development of geophysical complex application technique for buried monolithic structures quality control [dissertation]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2020 (in Russian). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15557.17122>
19. Khmelniisky A.Yu., Kapustin V.V., Vladov M.L. Experimental studies of the influence of the host soil on the propagation of seismic waves in pile structures. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys*. 2012;(6):16–22 (in Russian).
20. Liang L., Beim J. Effect of soil resistance on the low strain mobility response of piles using impulse transient response method. In: Proceedings of 8th International Conference on Application of Stress Wave Theory to Piling, Lisbon, 2008, p. 435–441.
21. Kapustin V.V., Ushakov A.L. Application of acoustic methods in the study of complex pile structures. *Geotekhnika = Geophysics*. 2011;(6):65–70 (in Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Андреевич Чуркин, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории новых видов свайных фундаментов ЦИСФ НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: chaa92@mail.ru
тел.: 8 (903) 559-20-32

Aleksei A. Churkin, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of New Types of Pile Foundations, Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: chaa92@mail.ru
tel.: 8 (903) 559-20-32