

УДК 624.154:620.179.1
DOI

ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СПЛОШНОСТИ СВАЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ



И. Н. Лозовский,
Центр геоэлектromагнитных исследований – филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия.
E-mail: i.n.lozovsky@yandex.ru



Е. С. Лосева,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: elizaveta_loseva@mail.ru



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: 9334343@gmail.com

Сейсмоакустический метод контроля железобетонных свай широко применяется благодаря высокой производительности и небольшому объему работ по подготовке свай к испытаниям. При низких значениях отношения сигнал/шум традиционные методы анализа сигналов зачастую не позволяют оценить длину и сплошность испытываемых конструкций. Представлена методика частотно-временного анализа данных сейсмоакустического контроля с использованием непрерывного вейвлет-преобразования, позволяющая выделить информативные составляющие сигналов, осложненных интенсивными помехами. Приведены результаты анализа сигналов с использованием различных материнских вейвлетов, показаны преимущества применения комплексного вейвлета Морле. Для выделения полезной составляющей сигнала предложено выполнять медианное усреднение значений энергии вейвлет-коэффициентов в диапазоне частот, в пределах которого наиболее ярко выражен импульс, отвечающий возбуждению упругих волн в свае. Возможности методики проиллюстрированы на данных сейсмоакустического контроля с добавлением синтетического шума и на результатах испытаний буронабивной сваи большой длины. Применение методики позволит повысить надежность и информативность результатов интерпретации данных сейсмоакустических испытаний свай.

Ключевые слова: сваи, буронабивные сваи, неразрушающий контроль, контроль сплошности свай, сейсмоакустический метод, непрерывное вейвлет-преобразование.

I. N. Lozovsky
(Goelectromagnetic Research Center, Branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (GEMRC IPE RAS), Troitsk, Moscow, Russia);
E. S. Loseva, V. A. Syasko
(Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia)

WAVELET DENOISING FOR LOW STRAIN PILE INTEGRITY TESTING

Low strain impact test is widely used to assess the structural integrity of reinforced concrete piles due to its high productivity and cost effectiveness. However, a low signal-to-noise ratio may prevent proper evaluation of pile length and integrity using the standard data analysis approaches. In this paper, we propose a technique for the time-frequency analysis of low strain test data, which allows us to separate the useful components of a signal from the unwanted ones. The technique is based on the continuous wavelet transform with the complex Morlet wavelet, which is shown to be the most suitable for the low strain test data decomposition. To filter the signal, the moving median of the square modulus of the continuous wavelet transform is calculated in the frequency band of the initial impact pulse. The capabilities of the technique are illustrated by the low strain test signals with the artificial noise and the results of a field test of a 30m long bored pile.

Keywords: piles, bored piles, drilled shafts, non-destructive testing, pile integrity testing, low strain impact integrity testing, continuous wavelet transform, wavelet denoising.



Статья поступила в редакцию 05.05.2022

Received 05.05.2022

Введение

Железобетонные свайные фундаменты широко применяются для передачи нагрузки от зданий и сооружений на грунтовое основание. Для обеспечения безопасной эксплуатации фундаментов их элементы должны строго соответствовать требованиям проектной документации. В связи с отсутствием возможности визуального контроля, низкой информативностью и высокой стоимостью прямых методов испытаний (выбуривание образцов керна, экскавация) контроль качества свай выполняется с применением косвенных методов неразрушающего контроля [1 – 5].

Одним из наиболее распространенных неразрушающих методов контроля качества свай является сейсмоакустический метод, основанный на анализе распространения искусственно возбужденных в теле сваи упругих волн. При испытании свай большой длины и/или свай, изготовленных в грунтах, характеризующихся высокой акустической жесткостью, значительная часть энергии возбужденных волн излучается во вмещающую сваю среду. Повышенное затухание возбужденных волн зачастую не позволяет отделить малоинтенсивные информативные (полезные) составляющие сейсмоакустических сигналов от помех, что препятствует оценке длины и сплошности испытываемой конструкции [3, 6, 7].

Для фильтрации данных сейсмоакустического контроля свай в работах [8, 9] предложено использовать вейвлет-преобразование, переводящее анализируемый сигнал из временного в частотно-временное представление [10 – 13]. Методика получила развитие в статьях [14 – 18], в которых на синтетических и экспериментальных данных показаны преимущества анализа фазы комплексного вейвлет-преобразования. В работе [19] представлен усовершенствованный алгоритм локализации дефектов в сваях, основанный на автоматическом выделении аномальных значений вейвлет-коэффициентов с последующим анализом сечений фазы вейвлет-спектра. Однако анализ фазы вейвлет-преобразования зачастую не позволяет выделить информативную составляющую сигналов, осложненных высокоамплитудными помехами. В настоящей статье предлагается методика анализа энергии вейвлет-спектров сейсмоакустических сигналов, полученных с использованием комплексного материнского вейвлета Морле. Методика проиллюстрирована на сейсмоакустических данных с добавлением синтетического шума и на результатах испытаний буронабивной сваи большой длины.

Методы

Сейсмоакустический контроль сплошности свай

Сейсмоакустический метод контроля (low strain impact integrity testing, sonic-echo, PIT, SIT) основан на регистрации искусственно возбуждаемых в стволе сваи упругих волн в целях получения сведений о ее длине и сплошности [3, 7, 20 – 25]. Упругие волны, возбужденные ударом молотка по оголовку сваи, отражаются от неоднородностей в теле сваи (изменений площади поперечного сечения, включений грунта, бетона с нарушенным составом, бентонита и пр.) и ее подошвы и возвращаются к поверхности оголовка сваи, где регистрируются приемной аппаратурой (рис. 1).

Для оценки длины и сплошности сваи необходимо выделить на прошедших процедуру обработки сигналах особенности, отвечающие регистрации волн, отраженных от ее нижнего конца или неоднородностей (при их наличии). Длина сваи или расстояние до дефекта L определяется по формуле

$$L = \frac{V\Delta t}{2},$$

где V – скорость упругой волны в теле сваи; Δt – время пробега отраженной волны. Скорость распространения волн в свае предполагается постоянной и обычно принимается равной 3600...4400 м/с. Точность определения длины сваи составляет ~10 % [3].

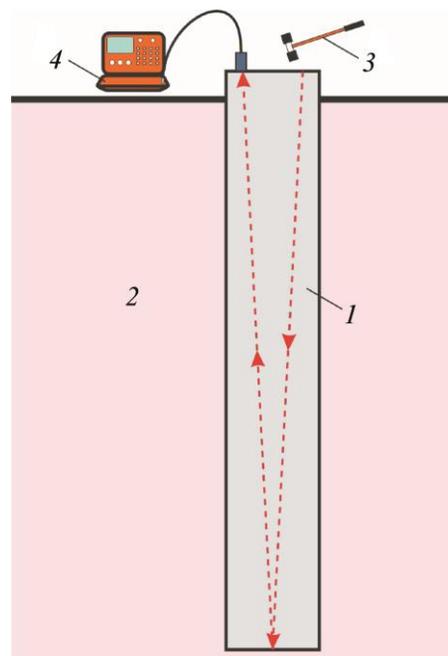


Рис. 1. Схема сейсмоакустического контроля свай:
1 – железобетонная свая; 2 – вмещающий грунт; 3 – источник упругих волн; 4 – оборудование для регистрации данных; красные пунктирные линии – траектории распространения волн

Непрерывное вейвлет-преобразование

Для фильтрации данных сейсмоакустического контроля свай наиболее широко применяются алгоритмы на основе преобразования Фурье. Преобразование Фурье позволяет получить интегральную оценку частотного состава сигнала и не позволяет локализовать изменения частотного состава во времени, что ограничивает информативность анализа нестационарных сигналов.

В настоящей статье предлагается методика анализа данных сейсмоакустического контроля в частотно-временной области с использованием непрерывного вейвлет-преобразования (НВП, continuous wavelet transform, CWT) [10 – 13]. Прямое НВП отображает рассматриваемый сигнал $f(t) \in L^2(R)$ в функцию двух переменных $a, b \in R$, $a > 0$:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt,$$

где функция $\psi(t)$ называется материнским вейвлетом, а символом $*$ обозначена процедура комплексного сопряжения. В качестве материнского вейвлета может быть использована локализованная как во временном, так и в частотном представлении функция с нулевым средним значением, единичной нормой и центром в точке $t = 0$. Параметр a задает степень масштабирования (ширину) материнского вейвлета, а параметр b определяет его положение на оси времени. Увеличение значений параметра a приводит к растяжению материнского вейвлета во временной области, сужению и смещению его фурье-образа в область низких частот. Путем сдвига по переменной $(t - b)$ вейвлет перемещается по всей оси времени входного сигнала. Таким образом, за счет изменения значений параметров a и b НВП позволяет локализовать на всем протяжении сигнала его особенности различной длительности и, соответственно, различного частотного состава. Чем точнее локальная особенность сигнала совпадает с полученной путем масштабирования и сдвига вейвлет-функцией, тем эффективнее она будет выделяться на результатах НВП.

С возможностями вейвлет-анализа и других приемов повышения информативности анализа экспериментальных данных можно ознакомиться в публикациях сотрудников Санкт-Петербургского горного университета [26 – 35].

Выбор материнского вейвлета

Рассмотрим применение НВП с использованием различных материнских вейвлетов для частотно-временного анализа результатов сейсмоакустиче-

ского контроля сплошности свай. В качестве анализируемого сигнала использован результат испытаний буронабивной железобетонной сваи (рис. 2, а). Диаметр сваи – 630 мм, проектная длина – 12 м, класс бетона – В25. Для проведения измерений использован комплект аппаратуры ИДС-1 (ООО «ЛО-ГИС») и легкий молоток с пластиковым бойком. Для компенсации затухания выполнена амплитудная коррекция сигнала (экспоненциальное усиление), также был устранен его низкочастотный тренд. Сигнал характеризуется низким уровнем помех. В моменты времени 0,0 и 5,6 мс на нем явно выделяются два импульса, отвечающие возбуждению упругих волн и приходу волн, отраженных от нижнего конца сваи.

В настоящей статье результаты НВП представлены в виде плоского изображения, где градиациями цветовой шкалы показано распределение энергии коэффициентов вейвлет-преобразования:

$$E(a, b) = |W(a, b)|^2.$$

Дискретные значения параметров a и b выбирали таким образом, чтобы обеспечить высокое разрешение НВП как по времени, так и по частоте. При визуализации результатов значения параметра a были переведены в значения частоты (или, точнее, псевдочастоты) F :

$$F = \frac{F_c}{a},$$

где F_c – центральная частота материнского вейвлета.

Рассмотрим результаты НВП анализируемого сигнала (рис. 2, а), полученные с использованием четырех материнских вейвлетов – mhat-вейвлета («мексиканская шляпа», mexican hat, рис. 2, б), комплексных вейвлетов Гаусса, полученных путем вычисления первой (sgau1, рис. 2, в) и второй (sgau2, рис. 2, г) производных функции Гаусса и комплексного вейвлета Морле с параметром ширины полосы пропускания 0,3 и центральной частотой 1,2 (smor0.3-1.2, рис. 2, д). Результаты НВП для каждого использованного материнского вейвлета уверенно фиксируют положение характерных особенностей сигнала на оси времени и позволяют оценить их частотный состав. При этом предпочтительным выглядит применение комплексного вейвлета Морле, обеспечивающее самое простое разложение, при котором интересующие нас особенности сигнала проявляются в виде одной зоны повышенной энергии коэффициентов вейвлет-преобразования.

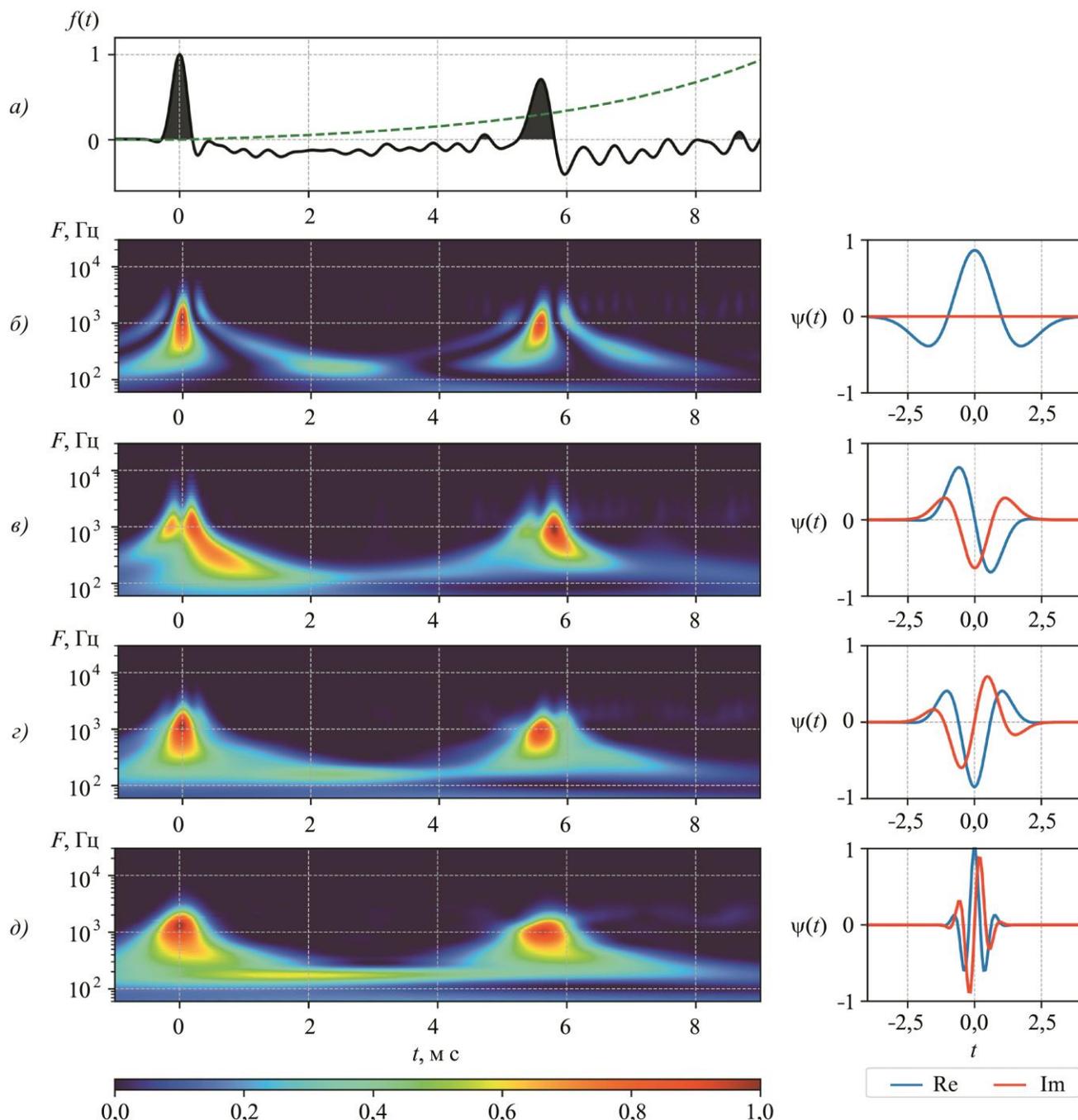


Рис. 2. Результаты НВП сейсмоакустического сигнала с низким уровнем помех (а), полученные с использованием различных материнских вейвлетов $mhat$ (б), $cgau1$ (в), $cgau2$ (з) и $smor0.3-1.2$ (д): справа от результатов НВП приведены действительные (синие линии) и мнимые (красные линии) части материнских вейвлетов; зеленая пунктирная линия на панели а – изменение коэффициента усиления сигнала с течением времени. Амплитуда и вейвлет-спектры анализируемого сигнала нормированы по их максимальным значениям

Дополнительным преимуществом вейвлета Морле является возможность настройки его параметров (ширины полосы пропускания и центральной частоты), что позволяет адаптировать материнскую функцию для сигналов, возбужденных различными ударными источниками, и регулировать частотно-временное разрешение вейвлет-преобразования.

Фильтрация сейсмоакустических сигналов с использованием НВП

Для описания процедуры фильтрации сейсмоакустических данных с использованием вейвлет-преобразования добавим к рассмотренному в предыдущем разделе сигналу (рис. 2, а, 3, а) высокоамплитудный синтетический шум. Синтетический

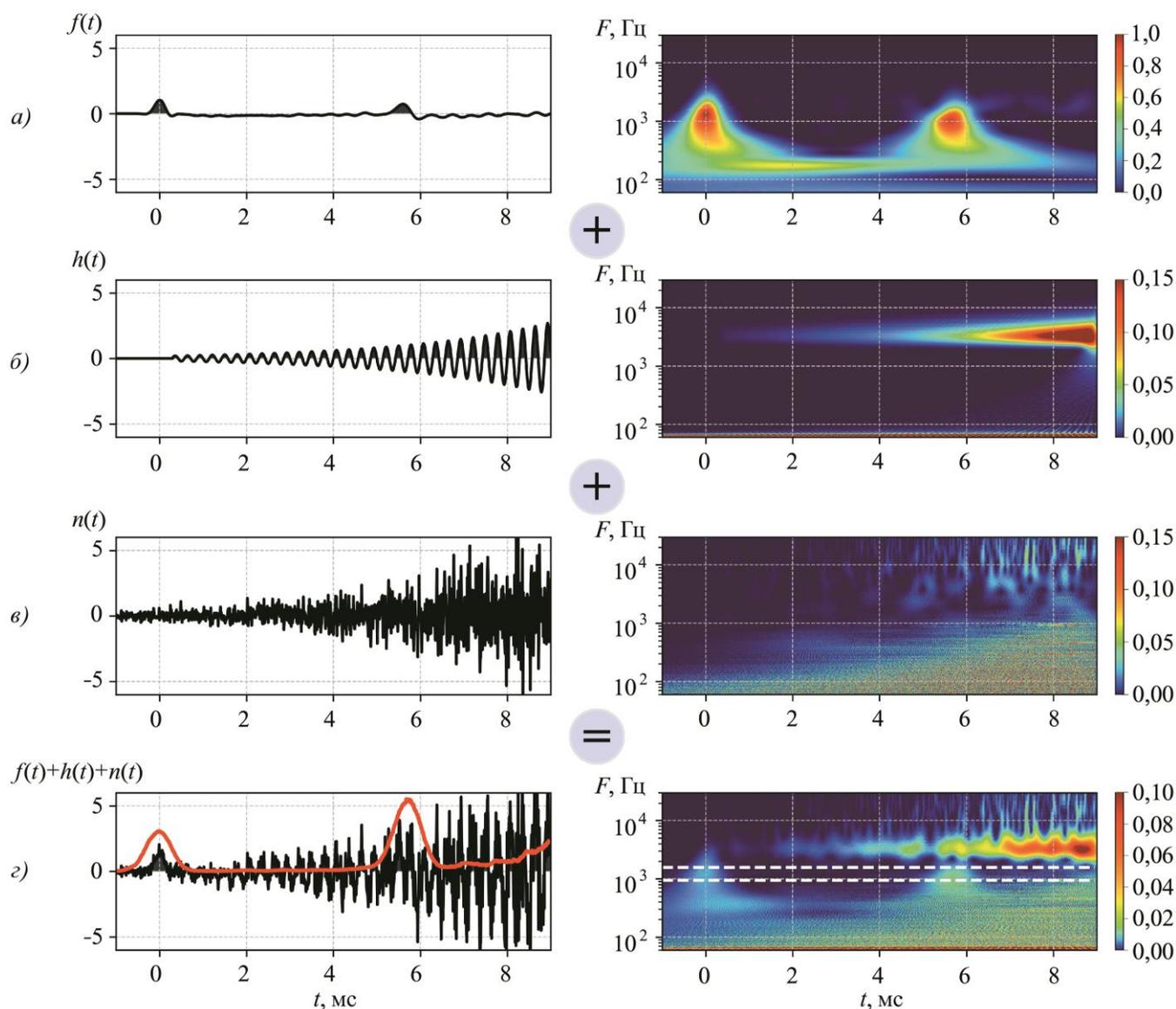


Рис. 3. Результаты вейвлет-анализа сейсмоакустического сигнала с добавленными шумами (материнский вейвлет stog0.3-1.2):

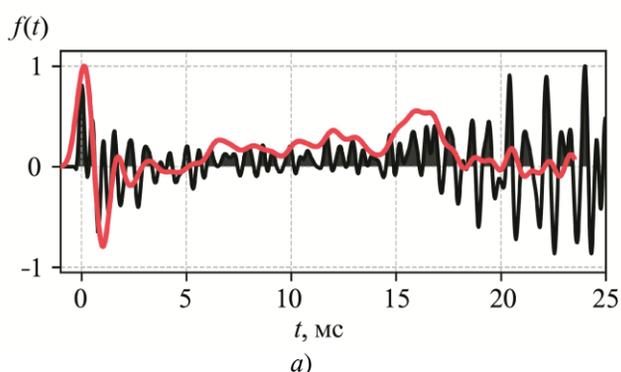
слева – временное представление сигналов, справа – результат их НВП; *a* – исходный сигнал, *б* – гармонический шум, *в* – гауссовский шум, *г* – исходный сигнал с добавленным гармоническим и гауссовским шумом; белые пунктирные линии на панели *г* справа – границы частотного диапазона, в пределах которого выполняется усреднение значений энергии НВП; красная сплошная линия на панели *г* слева – результат усреднения

шум задан с использованием двух различных функций – гармонического сигнала $h(t)$ с центральной частотой 3500 Гц (рис. 3, *б*) и набора нормально распределенных случайных величин $n(t)$ (гауссовский шум, рис. 3, *в*). Функции шума были экспоненциально усилены. Амплитуда шума значительно превышает амплитуду полезного сигнала. Традиционный анализ (во временной области) сигнала, полученного после добавления шумов, не позволяет выделить его особенности, отвечающие регистрации отраженных от нижнего конца сваи волн.

Результаты НВП исходного сигнала, двух функций шума и суммы всех трех сигналов, полученные с использованием материнского вейвлета stog0.3-1.2 , представлены на рис. 3 (справа). На НВП исходного сигнала оба интересующих нас импульса выделяются в виде ярких аномалий, локализованных в близком диапазоне частот и наиболее интенсивных в окрестности 1000...1500 Гц. При этом следует отметить, что импульс, соответствующий отраженным от подошвы сваи волнам, локализуется на более низких частотах. Энергия вейвлет-коэффициентов гармонической функции $h(t)$ сосре-

доточена в окрестности 3500 Гц и возрастает с увеличением значений времени. Для гауссовского шума $h(t)$ аномальные значения вейвлет-коэффициентов проявляются во всем частотном диапазоне и наиболее интенсивны в области низких частот – менее 1000 Гц. Цветовые шкалы НВП подобраны таким образом, чтобы обеспечить визуализацию как более, так и менее интенсивных аномалий.

Вейвлет-анализ результирующего сигнала (суммы полезного сигнала и шумов) позволяет выделить его компоненты, проявляющиеся в различных частотных диапазонах. Для выполнения фильтрации ограничим ось частот НВП диапазоном 950...1550 Гц, в пределах которого наиболее ярко выражен импульс, отвечающий возбуждению упругих волн в свае. Далее выполним усреднение значений энергии вейвлет-коэффициентов в данном частотном диапазоне, рассчитав медиану в скользящем окне. Результат фильтрации показан в условном масштабе красной сплошной линией на рис. 3, *з* (слева). На отметке времени 5,7 мс уверенно выделяется локальный максимум сигнала, соответствующий моменту регистрации волн, отраженных от нижнего конца сваи.



Результаты

Рассмотрим применение предложенных процедур вейвлет-анализа для сейсмоакустических данных, полученных при испытании буронабивной сваи большой длины. Диаметр сваи – 1200 мм, проектная длина – 30 м, класс бетона – В30. Для возбуждения сигнала использовался тяжелый молоток с пластиковым бойком, регистрация проводилась с использованием комплекта аппаратуры ИДС-1.

Полученный в результате испытаний сейсмоакустический сигнал (рис. 4, *а* и 5, *а*, черная линия) осложнен интенсивными помехами. Анализ временного представления сигнала не позволяет выделить на нем особенности, которые можно интерпретировать в качестве прихода волн, отраженных от нижнего конца сваи.

На рис. 4 приведен результат классической фурье-фильтрации сигнала с использованием фильтра нижних частот с частотой среза 800 Гц. Очищенный от высокочастотных составляющих сигнал все еще имеет сложную форму, однако на нем уже можно предположить наличие полезного импульса в окрестности 16 мс. Для повышения достоверности

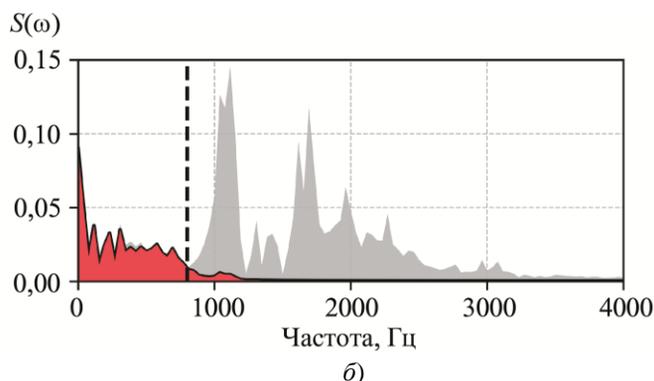


Рис. 4. Результаты фурье-фильтрации сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного при испытании буронабивной сваи с проектной длиной 30 м (фильтр нижних частот, частота среза – 800 Гц):

а – временное представление сигнала до (черная линия) и после (в условном масштабе, красная линия) фильтрации; *б* – амплитудный спектр; серый цвет – удаленные при фильтрации составляющие; пунктирная линия – частота среза

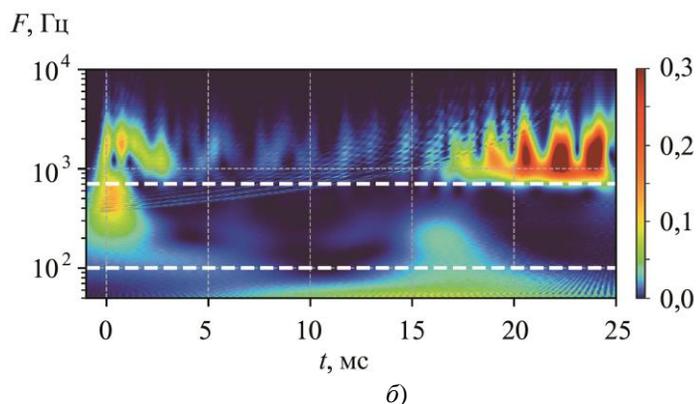
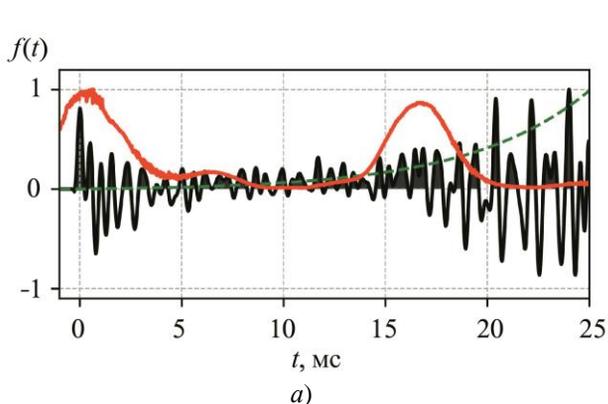


Рис. 5. Результаты вейвлет-анализа сейсмоакустического сигнала, зарегистрированного при испытании буронабивной сваи с проектной длиной 30 м (материнский вейвлет smor0.25-1.1):

а – временное представление сигнала, красная сплошная линия – результат вейвлет-фильтрации; *б* – результат НВП

и однозначности интерпретации рассмотрим результат вейвлет-анализа сигнала по представленной в статье методике.

НВП анализируемого сигнала (рис. 5, б) расчитано с использованием материнского вейвлета Морле с параметром ширины полосы пропускания 0.25 и центральной частотой 1.1 (сморг.0.25-1.1). Вейвлет-преобразование позволило отделить высокочастотные составляющие сигнала (более 1000 Гц), интерпретируемые в качестве помех, и проявить менее интенсивные низкочастотные аномалии. Фильтрация сигнала выполнялась путем медианного усреднения значений энергии вейвлет-коэффициентов в пределах диапазона частот 100...700 Гц – расширенной области частотной локализации импульса, отвечающего возбуждению волн в свае. На результате фильтрации (рис. 5, а, красная сплошная линия) на отметке 16 мс выделяется импульс, интерпретируемый в качестве отражения от нижнего конца сваи, что подтверждает соответствие фактической длины сваи проектному значению (при скорости распространения волн в свае 3750 м/с).

Заключение

В статье представлена методика фильтрации данных сейсмоакустического контроля свай, основанная на анализе энергии вейвлет-спектров зарегистрированных сигналов. Показаны преимущества применения комплексного вейвлета Морле, обеспечивающего простое частотно-временное представление сигналов и возможность настройки параметров материнского вейвлета. Продемонстрировано, что предлагаемая методика позволяет выделить полезные составляющие сейсмоакустических сигналов, осложненных интенсивными помехами, и оценить фактическую длину испытуемых свай. Следующим шагом исследования может стать вейвлет-анализ сейсмоакустических откликов дефектов – с различными геометрическими параметрами и свойствами материала.

Исследования выполнены в рамках темы госзадания ЦГЭМИ ИФЗ РАН, № госзадания FMWU-2022-0023, № гос. регистрации 122040600109-9. Авторы выражают признательность компании ООО «ЭГЕОС» (www.aigeos.ru) за предоставленные для исследований экспериментальные данные.

Библиографический список

1. **Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K.** Piling Engineering. London: Taylor & Francis, 2008. 408 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b22272>
2. **Amir J. M.** Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda // Proc. of the 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, April 27 – 29, 2017. Madison, 2017. P. 17 – 32.
3. **Amir J. M.** Integrity Testing. 2nd ed. 2020. URL: <https://www.piletest.com/show.asp?id=Engineer> (accessed 20 April 2022)
4. **Loseva E. S., Osokin A. I., Mironov D. A., Dyakonov I. P.** Specific Features of the Construction and Quality Control of Pile Foundations in Engineering and Geological Conditions of Saint Petersburg // Architecture and Engineering. 2020. V. 5, No. 2. P. 38 – 45.
5. **Лозовский И. Н., Жостков Р. А., Чуркин А. А.** Численное моделирование ультразвукового контроля сплошности свай // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 3 – 13. URL: <https://doi.org/10.31857/S0130308220010017>
6. **Мухин А. А., Чуркин А. А., Лозовский И. Н.** Ограничения области применения сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай // Транспортное строительство. 2018. № 9. С. 20 – 24.
7. **Мухин А. А., Лозовский И. Н., Чуркин А. А.** СТО ЭГЕОС 1–1.2–001–2017. Стандарт организации. Применение неразрушающего контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом // Геотехника. 2019. Т. 11, № 4. С. 68 – 78.
8. **Addison P. S., Watson J. N.** Wavelet Analysis for Low Strain Integrity Testing of Foundation Piles // Proc. of 5th Intern. Conf. on Inspection, Appraisal, Repairs, Maintenance of Buildings and Structures, Singapore, 1997. P. 15–16.
9. **Watson J. N., Addison P. S., Sibbald A.** The Denoising of Sonic Echo Test Data Through Wavelet Transform Reconstruction // Shock and Vibration. 1999. V. 6. P. 6. URL: <https://doi.org/10.1155/1999/175750>
10. **Grossmann A., Morlet J.** Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape // SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1984. V. 15, No. 4. P. 723 – 736.
11. **Wavelets and their Applications** / ed. Coifman R. Boston: Jones and Barlett, 1992. 434 p.
12. **Нагорнов О. В., Никитаев В. Г., Простокишин В. М. и др.** Вейвлет-анализ в примерах: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 120 с.
13. **Короновский А. А., Храмов А. Е.** Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. 176 с.
14. **Ni S. H., Isenhowe W. M., Huang Y. H.** Continuous Wavelet Transform Technique for Low-Strain Integrity Testing of Deep Drilled Shafts // Journal of GeoEngineering. 2012. V. 7, No. 3. P. 97 – 105. URL: [https://doi.org/10.6310/jog.2012.7\(3\).3](https://doi.org/10.6310/jog.2012.7(3).3)
15. **Ni S. H., Yang Y. Z., Tsai P. H., Chou W. H.** Evaluation of Pile Defects Using Complex Continuous Wavelet Transform Analysis // NDT and E International. 2017. V. 87. P. 50 – 59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.007>
16. **Ni S. H., Yang Y. Z., Lyu C. R.** Application of Wavelet Analysis for the Impulse Response of Pile // Smart Structures and Systems. 2017. V. 19, No. 5. P. 513 – 521. URL: <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.5.513>

17. Ni S. H., Li J. L., Yang Y. Z., Lai Y. Y. Applicability of complex wavelet transform to evaluate the integrity of commonly used pile types // *Journal of GeoEngineering*. 2019. V. 14, No. 1. P. 21 – 30. URL: [https://doi.org/10.6310/jog.201903_14\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.201903_14(1).3)
18. Zheng W., Zheng W., Wang S. et al. Damage Localization of Piles Based on Complex Continuous Wavelet Transform: Numerical Example and Experimental Verification // *Shock and Vibration*. 2020. V. 2020. P. 1 – 9. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/8058640>
19. Liu J. L., Lin C. X., Ye X. J. et al. An improved Algorithm for Pile Damage Localization Based on Complex Continuous Wavelet Transform // *Smart Structures and Systems*. 2021. V. 27, No. 3. P. 493 – 506. URL: <https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.3.493>
20. ASTM D5882-16. Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. West Conshohocken: ASTM International, 2016. URL: <https://doi.org/10.1520/D5882-16>
21. Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R. Identifying Small Defects in Cast-in-Place Piles using Low Strain Integrity Testing // *Indian Geotechnical Journal*. 2022. V. 52, No. 2. P. 270 – 279. URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00583-y>
22. Чуркин А. А., Лозовский И. Н., Жостков Р. А. Численное моделирование сейсмоакустических методов контроля качества свай // *Известия НФУ. Сер/ физическая*. 2020. Т. 84, № 1. С. 124 – 127. URL: <https://doi.org/10.31857/S0367676520010093>
23. Чуркин А. А., Лозовский И. Н., Фролов В. Е. и др. Комплексное исследование качества буронабивных свай на опытной площадке с использованием методов неразрушающего контроля // *Геотехника*. 2018. Т. 10, № 5-6. С. 72 – 83.
24. 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. URL: <http://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3006>
25. Zheng C., Kouretzis G. P., Ding X. et al. Three-Dimensional Effects in Low-Strain Integrity Testing of Piles: Analytical Solution // *Canadian Geotechnical Journal*. 2015. V. 53, No. 2. P. 225 – 235. URL: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0231>
26. Yarmolenko A. S., Skobenko O. V. Application of the Theory of Wavelets for Compression and Filtration of Geoinformation // *Journal of Mining Institute*. 2018. V. 234, No. 6. P. 612 – 623. URL: <http://dx.doi.org/10.31897/pmi.2018.6.612>
27. Ermolin E. Yu., Ingerov O., Yankilevich A. A., Pokrovskaya N. N. AMT Soundings in the Dead Band Within the Chukotka Region (Russian Far East) // *Journal of Mining Institute*. 2019. V. 236, No. 2. P. 125 – 132. URL: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.125>
28. Zhukovskiy Y. L., Kovalchuk M. S., Batueva D. E., Senchilo N. D. Development of an Algorithm for Regulating the load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption Within the Framework of Application of the Demand Response. *Sustainability*. 2021. V. 13, No. 24. P. 1 – 26. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/su132413801>
29. Morenov V., Leusheva E., Lavrik A. et al. Gas-Fueled Binary Energy System with Low-Boiling working fluid for enhanced power generation. *Energies (Basel)*. 2022. V. 15, No. 7. P. 1 – 15. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en15072551>
30. Koteleva N., Valnev V., Frenkel I. Investigation of the Effectiveness of an Augmented Reality and a Dynamic Simulation System Collaboration in oil Pump Maintenance // *Applied Sciences*. 2021. V. 12, No. 1. P. 1 – 18. URL: <https://doi.org/10.3390/app12010350>
31. Bolobov V., Martynenko Y. V., Voronov V. et al. Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector. *Inventions*. 2022. V. 7, No. 1. P. 1 – 10. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7010014>
32. Dvoynikov M., Budovskaya M. Development of a Hydrocarbon Completion System for Wells with Low Bottomhole Temperatures for Conditions of Oil and Gas Fields in Eastern Siberia // *Journal of Mining Institute*. 2022. V. 253. P. 12 – 22. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.4>
33. Islamov S. R., Bondarenko A. V., Gabibov A. F., Mardashov D. V. Polymer Compositions for Well Killing Operation in Fractured Reservoirs // *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. 1st ed. CRC Press, 2020. P. 343 – 351. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003164395-43>
34. Litvinenko V., Tsvetkov P., Dvoynikov M., Buslaev G. Barriers to Implementation of Hydrogen Initiatives in the Context of Global Energy Sustainable Development // *Journal of Mining Institute*. 2020. V. 244. P. 428 – 438. URL: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>
35. Shammazov I. A., Sidorkin D. I., Dzhemilev E. R. Research of the Dependence of the Pipeline Ends Displacement Value when Cutting out Its Defective Section on the Elastic Stresses in the Pipe Body // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. V. 988, No. 2. P. 1 – 9. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022077>

References

1. Fleming K., Weltman A., Randolph M., Elson K. *Piling Engineering*. London: Taylor & Francis, 2008. 408 p. URL: <https://doi.org/10.1201/b22272>
2. Amir J. M. Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda // *Proc. of the 3rd Bolivian International Conference on Deep Foundations, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, April 27 – 29, 2017. Madison, 2017. P. 17 – 32.*
3. Amir J. M. *Integrity Testing*. 2nd ed. 2020. URL: <https://www.piletest.com/show.asp?id=Engineer> (accessed 20 April 2022)
4. Loseva E. S., Osokin A. I., Mironov D. A., Dyakonov I. P. Specific Features of the Construction and Quality Control of Pile Foundations in Engineering and

Geological Conditions of Saint Petersburg // Architecture and Engineering. 2020. V. 5, No. 2. P. 38 – 45.

5. **Лозовский И. Н., Жостков Р. А., Чуркин А. А.** Численное моделирование ультразвукового контроля сплошности свай // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 3 – 13. URL: <https://doi.org/10.31857/S0130308220010017>

6. **Мухин А. А., Чуркин А. А., Лозовский И. Н.** Ограничения области применения сейсмоакустического метода контроля сплошности бетона свай // Транспортное строительство. 2018. № 9. С. 20 – 24.

7. **Мухин А. А., Лозовский И. Н., Чуркин А. А.** СТО ЭГЕОС 1–1.2–001–2017. Стандарт организации. Применение неразрушающего контроля сплошности свай сейсмоакустическим методом // Геотехника. 2019. Т. 11, № 4. С. 68 – 78.

8. **Addison P. S., Watson J. N.** Wavelet Analysis for Low Strain Integrity Testing of Foundation Piles // Proc. of 5th Intern. Conf. on Inspection, Appraisal, Repairs, Maintenance of Buildings and Structures, Singapore, 1997. P. 15–16.

9. **Watson J. N., Addison P. S., Sibbald A.** The Denoising of Sonic Echo Test Data Through Wavelet Transform Reconstruction // Shock and Vibration. 1999. V. 6. P. 6. URL: <https://doi.org/10.1155/1999/175750>

10. **Grossmann A., Morlet J.** Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape // SIAM Journal on Mathematical Analysis. 1984. V. 15, No. 4. P. 723 – 736.

11. **Wavelets and their Applications** / ed. Coifman R. Boston: Jones and Barlett, 1992. 434 p.

12. **Нагорнов О. В., Никитаев В. Г., Простокшин В. М. и др.** Вейвлет-анализ в примерах: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 120 с.

13. **Короновский А. А., Храмов А. Е.** Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003. 176 с.

14. **Ni S. H., Isenhowe W. M., Huang Y. H.** Continuous Wavelet Transform Technique for Low-Strain Integrity Testing of Deep Drilled Shafts // Journal of GeoEngineering. 2012. V. 7, No. 3. P. 97 – 105. URL: [https://doi.org/10.6310/jog.2012.7\(3\).3](https://doi.org/10.6310/jog.2012.7(3).3)

15. **Ni S. H., Yang Y. Z., Tsai P. H., Chou W. H.** Evaluation of Pile Defects Using Complex Continuous Wavelet Transform Analysis // NDT and E International. 2017. V. 87. P. 50 – 59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.007>

16. **Ni S. H., Yang Y. Z., Lyu C. R.** Application of Wavelet Analysis for the Impulse Response of Pile // Smart Structures and Systems. 2017. V. 19, No. 5. P. 513 – 521. URL: <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.5.513>

17. **Ni S. H., Li J. L., Yang Y. Z., Lai Y. Y.** Applicability of complex wavelet transform to evaluate the integrity of commonly used pile types // Journal of GeoEngineering. 2019. V. 14, No. 1. P. 21 – 30. URL: [https://doi.org/10.6310/jog.201903_14\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.201903_14(1).3)

18. **Zheng W., Zheng W., Wang S. et al.** Damage Localization of Piles Based on Complex Continuous Wavelet Transform: Numerical Example and Experimental Verification // Shock and Vibration. 2020. V. 2020. P. 1 – 9. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/8058640>

19. **Liu J. L., Lin C. X., Ye X. J, et al.** An improved Algorithm for Pile Damage Localization Based on Complex Continuous Wavelet Transform // Smart Structures and Systems. 2021. V. 27, No. 3. P. 493 – 506. URL: <https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.3.493>

20. **ASTM D5882-16.** Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. West Conshohocken: ASTM International, 2016. URL: <https://doi.org/10.1520/D5882-16>

21. **Loseva E., Lozovsky I., Zhostkov R.** Identifying Small Defects in Cast-in-Place Piles using Low Strain Integrity Testing // Indian Geotechnical Journal. 2022. V. 52, No. 2. P. 270 – 279. URL: <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00583-y>

22. **Чуркин А. А., Лозовский И. Н., Жостков Р. А.** Численное моделирование сейсмоакустических методов контроля качества свай // Известия НФУ. Сер/ физическая. 2020. Т. 84, № 1. С. 124 – 127. URL: <https://doi.org/10.31857/S0367676520010093>

23. **Чуркин А. А., Лозовский И. Н., Фролов В. Е. и др.** Комплексное исследование качества буронабивных свай на опытной площадке с использованием методов неразрушающего контроля // Геотехника. 2018. Т. 10, № 5-6. С. 72 – 83.

24. **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. URL: <http://doi.org/10.18799/24131830/2021/1/3006>

25. **Zheng C., Kouretzis G. P., Ding X. et al.** Three-Dimensional Effects in Low-Strain Integrity Testing of Piles: Analytical Solution // Canadian Geotechnical Journal. 2015. V. 53, No. 2. P. 225 – 235. URL: <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0231>

26. **Yarmolenko A. S., Skobenko O. V.** Application of the Theory of Wavelets for Compression and Filtration of Geoinformation // Journal of Mining Institute. 2018. V. 234, No. 6. P. 612 – 623. URL: <http://dx.doi.org/10.31897/pmi.2018.6.612>

27. **Ermolin E. Yu., Ingerov O., Yankilevich A. A., Pokrovskaya N. N.** AMT Soundings in the Dead Band Within the Chukotka Region (Russian Far East) // Journal of Mining Institute. 2019. V. 236, No. 2. P. 125 – 132. URL: <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.2.125>

28. **Zhukovskiy Y. L., Kovalchuk M. S., Batueva D. E., Senchilo N. D.** Development of an Algorithm for Regulating the load Schedule of Educational Institutions Based on the Forecast of Electric Consumption Within the Framework of Application of the Demand Response. Sustainability. 2021. V. 13, No. 24. P. 1 – 26. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/su132413801>

29. **Morenov V., Leusheva E., Lavrik A. et al.** Gas-Fueled Binary Energy System with Low-Boiling working fluid for enhanced power generation. Energies (Basel). 2022. V. 15, No. 7. P. 1 – 15. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en15072551>

30. **Koteleva N., Valnev V., Frenkel I.** Investigation of the Effectiveness of an Augmented Reality and a Dynamic Simulation System Collaboration in oil Pump Maintenance // Applied Sciences. 2021. V. 12, No. 1. P. 1 – 18. URL: <https://doi.org/10.3390/app12010350>

31. **Bolobov V., Martynenko Y. V., Voronov V. et al.** Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector. Inventions. 2022. V. 7, No. 1. P. 1 – 10. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7010014>

32. **Dvoynikov M., Budovskaya M.** Development of a Hydrocarbon Completion System for Wells with Low Bottomhole Temperatures for Conditions of Oil and Gas Fields in Eastern Siberia // Journal of Mining Institute. 2022. V. 253. P. 12 – 22. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.4>

33. **Islamov S. R., Bondarenko A. V., Gabibov A. F., Mardashov D. V.** Polymer Compositions for Well Killing

Operation in Fractured Reservoirs // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. 1st ed. CRC Press, 2020. P. 343 – 351. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003164395-43>

34. **Litvinenko V., Tsvetkov P., Dvoynikov M., Buslaev G.** Barriers to Implementation of Hydrogen Initiatives in the Context of Global Energy Sustainable Development // Journal of Mining Institute. 2020. V. 244. P. 428 – 438. URL: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.5>

35. **Shammazov I. A., Sidorkin D. I., Dzhemilev E. R.** Research of the Dependence of the Pipeline Ends Displacement Value when Cutting out Its Defective Section on the Elastic Stresses in the Pipe Body // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 988, No. 2. P. 1 – 9. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/2/022077>

Для цитирования статьи:

Лозовский И. Н., Сясько В. А., Лосева Е. С. Фильтрация данных сейсмоакустического контроля сплошности свай с использованием непрерывного вейвлет-преобразования // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 9. С. 36 – 45.

Лозовский И. Н., Сясько В. А., Лосева Е. С. Фильтрация данных сейсмоакустического контроля сплошности свай с использованием непрерывного вейвлет-преобразования // Контроль. Диагностика. 2022. Т. 25, № 9. С. 36 – 45.