

DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-15

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ СВАИ ПРИ ОТТАИВАНИИ ОКРУЖАЮЩЕГО ГРУНТА

Р. В. Цветков^а, Г. Н. Гусев^б

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Российская Федерация

^аORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9617-407X>, ✉ flower@icmm.ru

^бORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9072-0030>, gusev.g@icmm.ru

Аннотация: свайные фундаменты используются в различных строительных конструкциях, расположенных на грунтах, которые подвержены сезонному замерзанию. Этот процесс может вызывать искажение фундаментов и повреждения конструкций, которые необходимо контролировать с помощью различных датчиков. Работа посвящена исследованию динамических характеристик одиночной сваи, являющейся базовым элементом фундамента, осуществляющим деформационное взаимодействие конструкции с грунтом. При сезонных изменениях температуры в результате оттаивания или замораживания грунтов может происходить заметное изменение их механических свойств, которое оказывает влияние и на деформационное поведение сваи. Для изучения этого процесса был произведен натурный эксперимент, в ходе которого фиксировалось фоновые вибрационные процессы на одиночной свае с грузом в течении нескольких недель. Свая была предварительно заглублена в замерзший грунт в зимний период и находилась в естественных условиях до полного оттаивания грунта. Периодические наблюдения за фоновыми вибрациями сваи с грузом показали, что наблюдается заметное снижение собственных частот (10–20%) при оттаивании грунта, что соответствует изменению жесткости системы «свая–грунт» на 20–40%.

Ключевые слова: свая, мерзлый грунт, Фурье-спектр, собственная частота.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124040500016-9.

Для цитирования: Цветков Р. В., Гусев Г. Н. Исследование изменения собственных частот сваи при оттаивании окружающего грунта. *Успехи кибернетики*. 2024;5(4):110–115. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-15.

Поступила в редакцию: 06.10.2024.

В окончательном варианте: 01.11.2024.

PILE EIGENFREQUENCY SHIFT CAUSED BY SOIL UNFREEZING

R. V. Tsvetkov^а, G. N. Gusev^б

Institute of Continuous Media Mechanics Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

^аORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9617-407X>, ✉ flower@icmm.ru

^бORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9072-0030>, gusev.g@icmm.ru

Abstract: pile foundations are commonly used in buildings located on seasonally freezing soils, where freezing and thawing can distort foundations and damage structures, necessitating monitoring with various sensors. We focused on how seasonal temperature changes, particularly soil thawing and freezing, affect the mechanical properties of soil and, consequently, the strain in piles. We conducted an experiment that recorded the background vibration of a single pile with a weight over several weeks. The pile was buried in frozen soil during winter and left in natural conditions until the soil thawed completely. Periodic vibration measurements revealed a significant decrease in the eigenfrequencies of the pile (10–20%) during thawing, reflecting a reduction in the stiffness of the pile-soil system (20–40%). These findings highlight the impact of soil freezing and thawing on the dynamic properties of pile foundations, offering insights for monitoring and mitigating structural deformation.

Keywords: pile, frozen soil, Fourier spectrum, eigenfrequency.

Acknowledgements: this study is a part of government order 124040500016-9.

Cite this article: Tsvetkov R. V., Gusev G. N. Pile Eigenfrequency Shift Caused by Soil Unfreezing. *Russian Journal of Cybernetics*. 2024;5(4):110–115. DOI: 10.51790/2712-9942-2024-5-4-15.

Original article submitted: 06.10.2024.

Revision submitted: 01.11.2024.

Свайные фундаменты широко применяются при строительстве различных конструкций, таких как здания, мосты, надземные нефте- и газопроводы, эксплуатируемые в том числе на северных территориях и в средней полосе России. Особенностью их эксплуатации является периодическое сезонное замерзание и оттаивание грунтов, которое может вызывать искажение фундаментов и повреждение сооружений. Базовым элементом такого фундамента является свая, которая обеспечивает деформационное взаимодействие конструкции с грунтом. Изучению взаимодействия свай с грунтами посвящено значительное количество работ, в том числе исследованию динамических процессов [1–6], а также особенностям работы свай в мерзлых грунтах [7, 8].

В связи с глобальным потеплением, оттаивание вечной мерзлоты, занимающей значительную территорию России, может негативно влиять на деформационную безопасность конструкций. Поэтому наблюдение за деформационными процессами, происходящими при размораживании грунтов, представляет практический интерес. Целесообразно для анализа этих процессов применять измерительное оборудование, способное зафиксировать отклик конструкций на происходящие естественные фоновые вибрации. Работа посвящена организации периодических наблюдений с применением современных технологий за вибрационными процессами одиночной сваи в грунте и изучению сезонного изменения динамических характеристик системы «свая–грунт». Произведены натурные эксперименты с применением современных технологий и проведена оценка изменений ее жесткостных параметров.

Схема эксперимента

В зимних условиях была произведена установка винтовой сваи в замерзший грунт, предварительно очищенный от снега. Глубина промерзания грунта составляла порядка 0.5 м. Свая представляет собой стальную трубу со следующими размерами: длина — 1.2 м, внешний диаметр — 0.057 м, толщина стенки ~ 3.8 мм. Заглубление сваи в грунт составило 0.95 м. Таким образом, изначально примерно половина погруженной части сваи находилась в незамороженном грунте и столько же в промерзшем грунте. К оголовку сваи прикреплен груз — стальной металлический цилиндр диаметром 0.255 м, высотой 0.105 м и массой m , равной 42 кг.

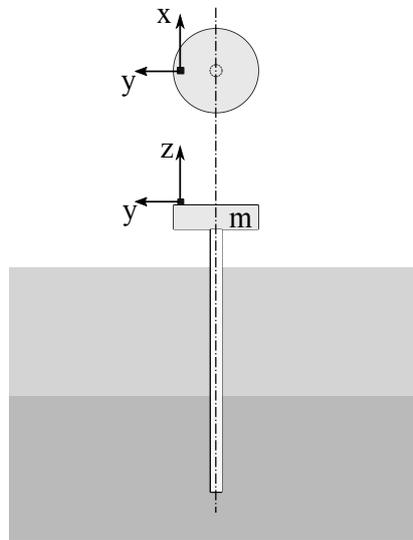


Рис. 1. Схема расположения и ориентации датчика на свае с грузом

Для эксперимента применялся МЭМС акселерометр ADXL355, преобразующий виброускорения по трем взаимно перпендикулярным осям в цифровой сигнал. Оси датчика x и y располагались в горизонтальной плоскости, а ось z — по вертикали, направленной вдоль сваи (см. рис. 1). На микрокомпьютере Raspberry Pi 3b+ посредством Python был реализован алгоритм, который в автоматическом режиме производил опрос акселерометра по шине SPI, датчиков температуры, сохранял данные в виде файлов. Акселерометр имеет частотный диапазон от 0 до 1000 Гц. Высокая чувствительность (20 бит на диапазон $\pm 2g$) и низкий уровень собственных шумов позволяют фиксировать достаточно слабые вибрации. Полуторогодовое тестирование данной экспериментальной схемы [9] показало ее работоспособность.

Результаты эксперимента

После установки сваи в мерзлый грунт при температуре воздуха и грунта -2°C был проведен эксперимент по идентификации собственных частот с помощью внешних воздействий. Для этого производились воздействия по грунту рядом со сваями, которые были зафиксированы акселерометром. Отклики на воздействия по горизонтальным направлениям датчика и их спектры в области низких частот показаны на рисунках 2, 3 и 4.

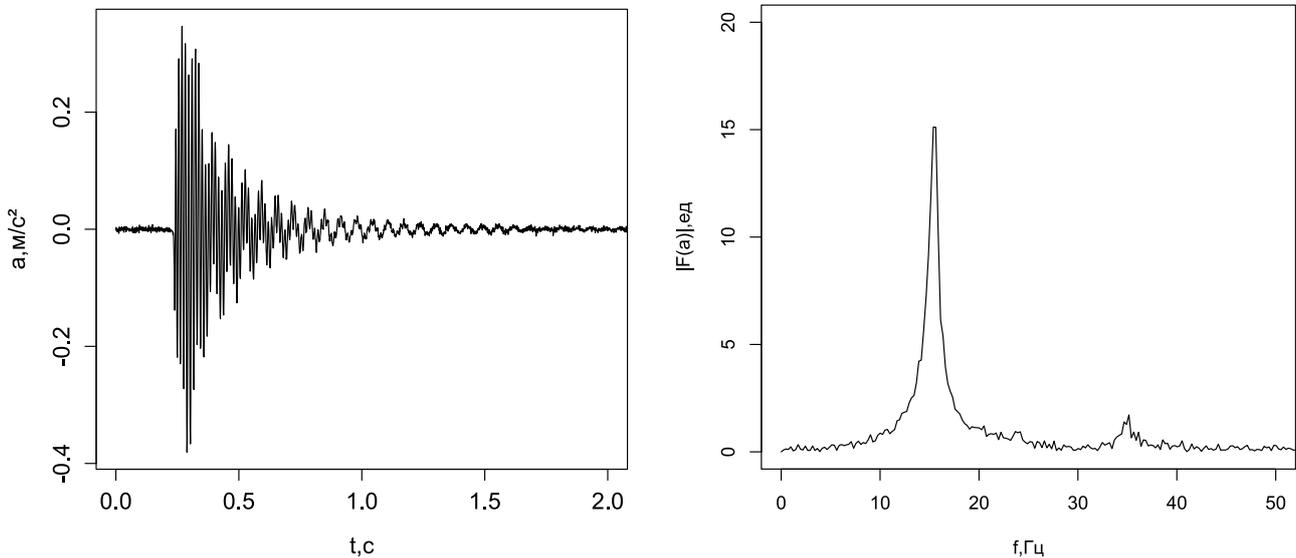


Рис. 2. Отклик на воздействие по оси x и его Фурье-спектр

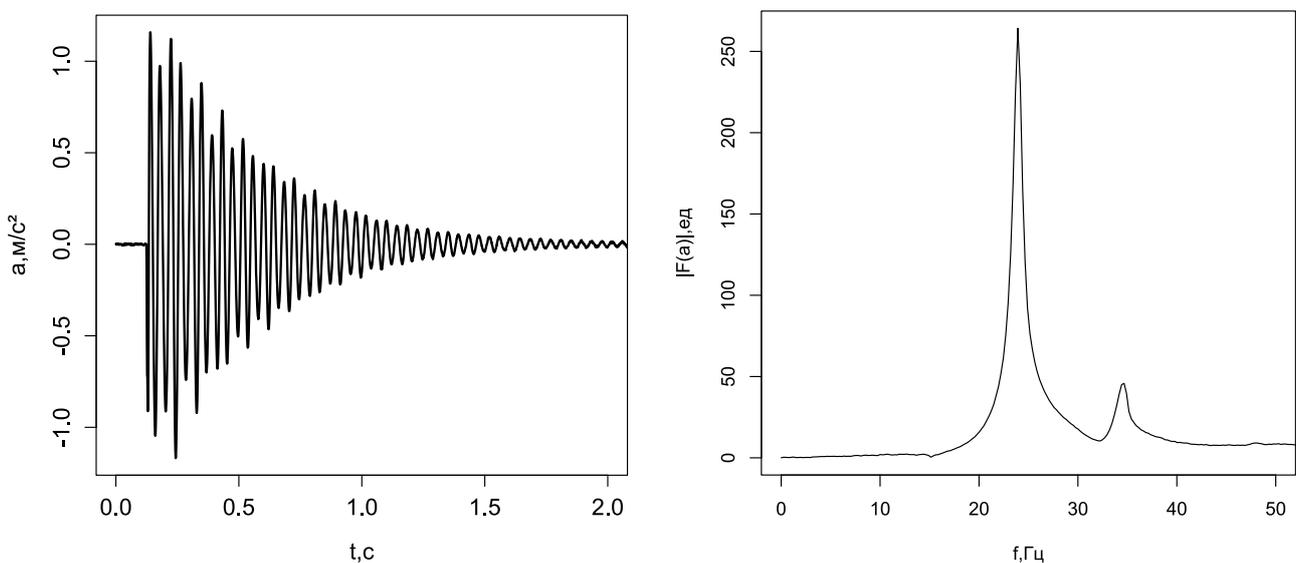


Рис. 3. Отклик на воздействие по оси y и его Фурье-спектр

Как можно видеть из рисунков 2–4, отклик данной системы наблюдается на частотах 14.5, 24 и 34 Гц. Также был измерен отклик системы на естественный фон. Амплитуда фоновых вибраций составляла порядка $0.005 \div 0.01 \text{ м/с}^2$, тем не менее, в спектре Фурье горизонтальных компонент (рис. 5) также отчетливо наблюдались максимумы, соответствующие указанным выше частотам 14.5 Гц и 24 Гц. В спектре вертикальной компоненты фоновых вибраций максимумы проявлялись менее заметно и в данной статье не приведены. В дальнейшем исследовались частоты колебаний, доминирующие на горизонтальных компонентах x и y .

В ходе эксперимента осуществлена регистрация фоновых вибраций в мониторинговом режиме в течении нескольких недель, а также температуры воздуха и температуры внутри сваи на глубине порядка 30 см от поверхности грунта. Измерения производились в период времени, соответствующий

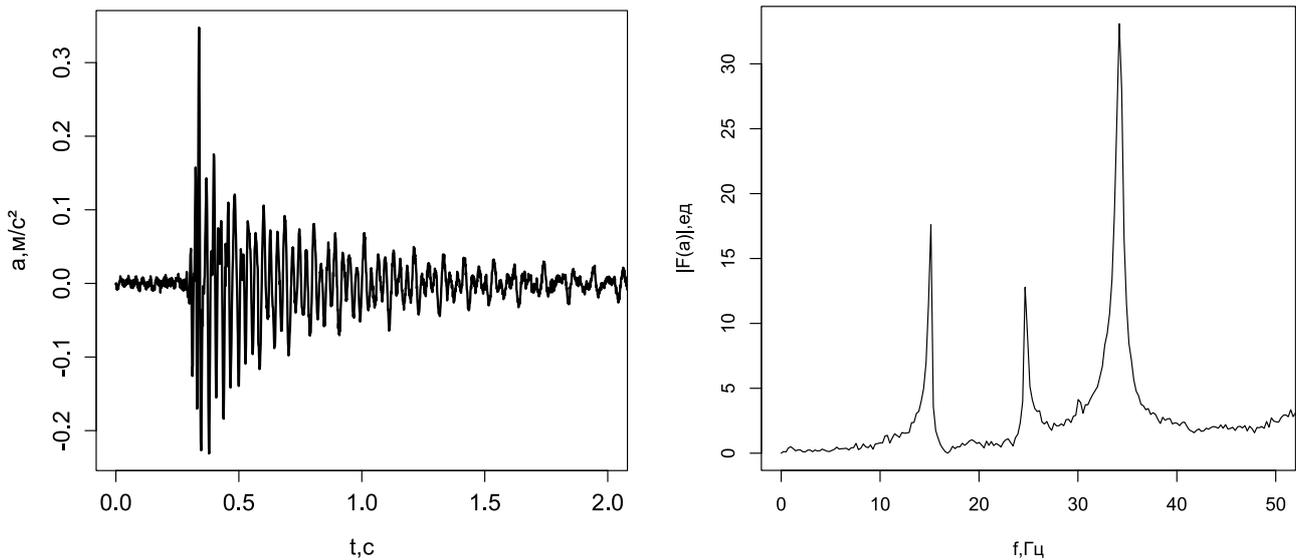


Рис. 4. Отклик на воздействие по оси z и его Фурье-спектр

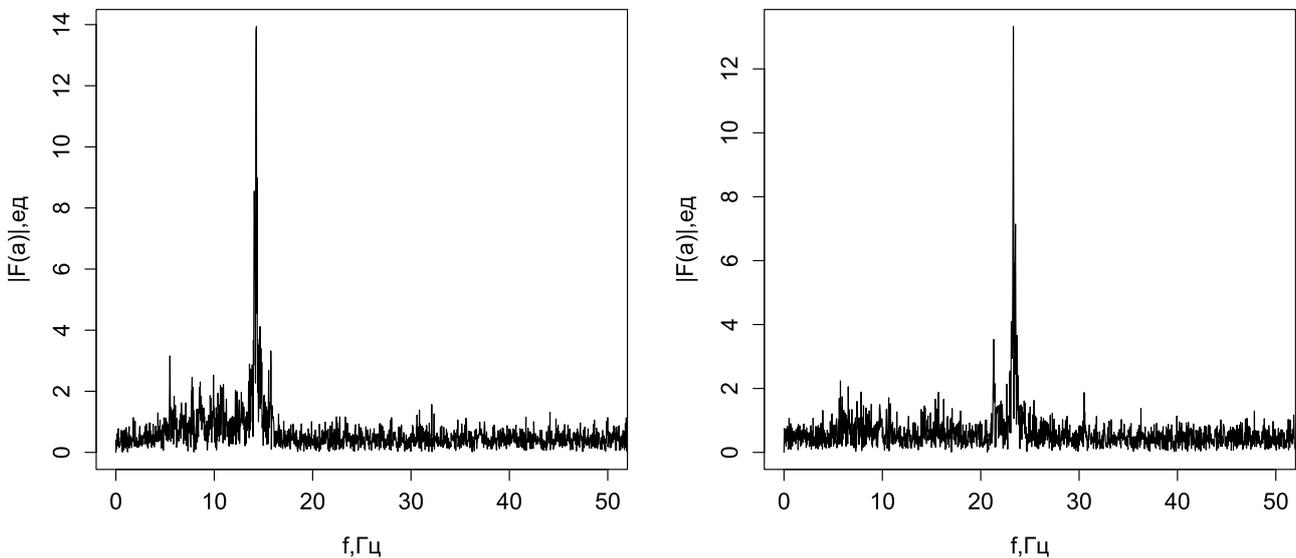


Рис. 5. Фурье-спектр фоновых вибраций по оси x (слева) и y (справа)

сезонному оттаиванию грунта (март–апрель). В ходе эксперимента наблюдалось изменение спектра частот со временем. Для наглядности изменений частот со временем построено тоновое изображение Фурье-спектров, представленное на рисунке 6. Каждая вертикальная полоса соответствует Фурье-спектру на определенные время и дату, где наиболее темные цвета показывают интенсивность сигнала на данной частоте. Нормировка выполнена по максимальному значению каждого Фурье-спектра, взятому за 100%.

Для анализа данных в спектрах были выделены значения частот с максимальным значением модуля коэффициентов Фурье в данный момент времени, а также соответствующие им значения температур воздуха и грунта. Графики этих параметров приведены на рисунке 7, где кружками обозначены значения частот, зеленой линией — температура воздуха, красной линией — температура внутри сваи.

Как показывают графики, при оттаивании грунта наблюдается постепенное снижение величин доминирующих частот системы «грунт–свая–груз»: в направлении оси x на 10% до значений 13 Гц и на 20–22% до значений 18 Гц в направлении оси y . Следует отметить, что в период ночных заморозков заметно кратковременное возрастание частот. В направлении оси y изменения частот в процентном отношении более выражены.

После схода снега и оттаивания грунта снова была осуществлена оценка собственных частот с помощью внешних воздействий. Температура воздуха составляла +15 °С, температура грунта на глу-

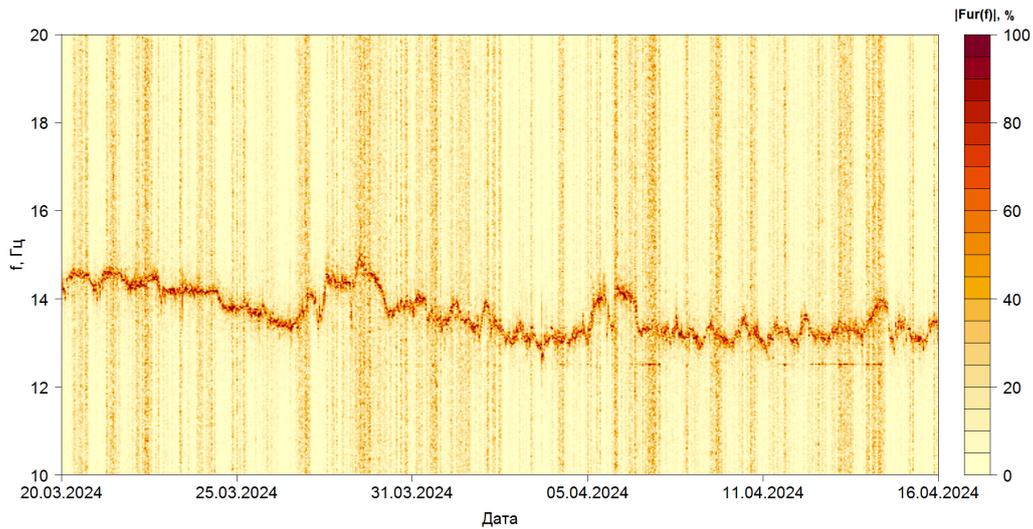


Рис. 6. Тоновое изображение эволюции Фурье-спектров фоновых вибраций по оси x

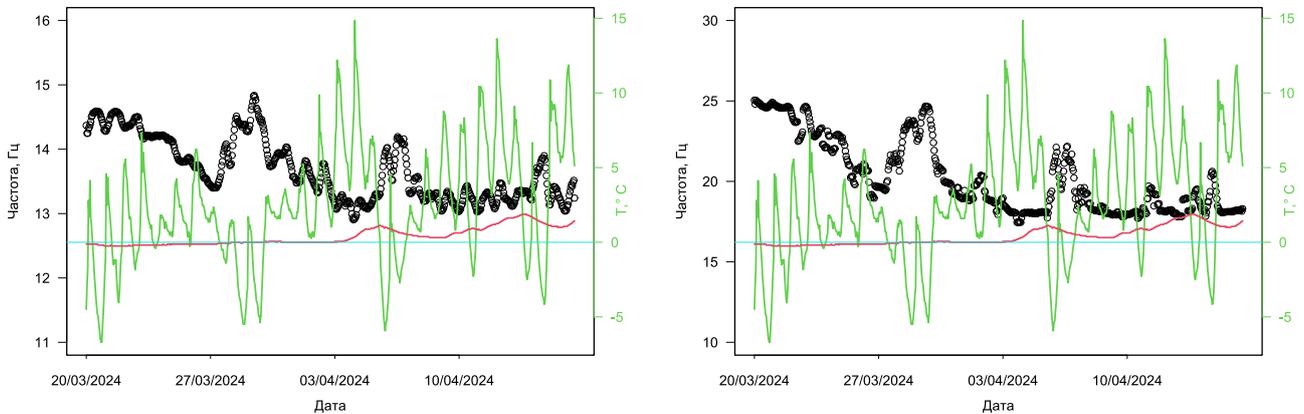


Рис. 7. Изменение собственных частот по оси x (слева) и y (справа), температуры окружающего воздуха (зеленый) и грунта (красный) во время эксперимента

бине 30 см — $+4.5$ °С. Эти эксперименты также показали значения частот 13 Гц в направлении оси x и 18 Гц в направлении оси y , зафиксированные в эксперименте по измерению фоновых вибраций. После оттаивания грунта и с ростом температуры воздуха и грунта дальнейшее снижение частот системы «грунт–свая–груз» не происходит.

Оценка изменения жесткости системы «свая–грунт»

Возможны разные подходы для моделирования взаимодействия свай с грунтом. Для определенного ряда задач, например, при моделировании сооружения с большим количеством свай, целесообразно представлять их взаимодействие с грунтом в виде упругих элементов в каждом направлении. В рамках данной работы для предварительной оценки жесткости этой системы воспользуемся соотношением (1) для свободных колебаний одномассовой системы в направлении оси x :

$$m\ddot{x} + k_x x = 0. \quad (1)$$

При поиске решения в виде $x = x_0 e^{i\omega t}$, получаем условие, при котором оно существует:

$$-\omega^2 m + k_x = 0. \quad (2)$$

Изменение жесткости системы k_x будет пропорционально изменению квадрата круговой частоты $\omega = 2\pi f$. Снижение собственных частот в направлении x на 10% при оттаивании грунта соответствует изменению жесткости системы «свая–грунт» на величину порядка 20%. Аналогичное соотношение для направления y дает изменение жесткости на величину порядка 40%.

Выводы

Проведены эксперименты по исследованию динамического отклика заглубленной в грунт сваи с прикрепленной к ней массой на заданное воздействие. Они позволили установить низшие собственные частоты данной системы, которые также выявляются при естественных фоновых вибрационных воздействиях.

Периодические измерения фоновых вибраций в системе «грунт–свая–груз» показали, что наблюдается изменение собственных частот, связанное с оттаиванием грунта. Изменение значений собственных частот составляет порядка 10–20%.

Проведена оценка изменений жесткостных свойств системы «свая–грунт» на основании данных по изменению собственных частот данной системы, соответствующих грунту в замороженном и незамороженном состояниях. Важно отметить, что взаимодействие грунтового основания со свайей нетривиально и требует дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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;332(1):129–140. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3006.
2. Ставницер Л. Р., Шехтер О. Я. Вынужденные горизонтальные колебания свай при действии сейсмических волн. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1971;5:19–23.
3. Поддубный А. А., Гордон В. А., Семенова Г. А. Изгибные колебания свай, вызванные внезапной осадкой части основания. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2023;5(361):3–20. DOI: 10.33979/2073-7408-2023-361-5-3-20.
4. Liu K., Zhang Z. Dynamic Response of an Inhomogeneous Elastic Pile in a Multilayered Saturated Soil to Transient Torsional Load. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021;5528237:13. DOI: 10.1155/2021/5528237.
5. Chen G. S., Davis D., Hulsey J. L. Measurement of Frozen Soil–Pile Dynamic Properties: A System Identification Approach. *Cold Regions Science and Technology*. 2012;70:98–106. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.08.007.
6. Ma J., Han S., Gao X., Li D., Guo Y., Liu Q. Dynamic Lateral Response of the Partially-Embedded Single Piles in Layered Soil. *Appl. Sci*. 2022;12:1504. DOI: 10.3390/app12031504.
7. Cui C., Liang Z., Xu C., Xin Y., Wang B. Analytical Solution for Horizontal Vibration of End-Bearing Single Pile in Radially Heterogeneous Saturated Soil. *Applied Mathematical Modelling*. 2023;116:65–83. DOI: 10.1016/j.apm.2022.11.027.
8. Аксенов В. И., Геворкян С. Г., Иоспа А. В., Кривов Д. Н., Шмелев И. В., Спиридонов С. И. Особенности работы винтовых свай в мерзлых грунтах. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2014;4:25–30.
9. Гусев Г. Н., Епин В. В., Цветков Р. В. Анализ эволюции фоновых вибрационных воздействий на конструкции здания. *Известия вузов. Строительство*. 2024;8:103–112. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-788-8-103-112.