

УДК: 550.834
OECD: 01.05.LE

Диагностика технического состояния производственного здания в г. Белово (Кемеровская область) по стоячим волнам

Федин К.В.¹, Лукьянова А.Л.^{2*}, Скоробогатко А.В.³

¹ К.т.н., старший научный сотрудник, ^{2,3} Инженер

^{1,2,3} Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), Новосибирск, РФ

Аннотация

В данной статье рассматривается возможность применения пассивного сейсмического метода, основанного на выделении стоячих волн, и метода простукивания для оценки состояния сооружений. Были определены длины и тип закрепления свай (висячая/стойка), локализованы скрытые дефекты, дана оценка остаточного ресурса сооружения по собственным колебаниям и оценена обводненность грунтов. Измерения проводились как в самом сооружении, так и на грунте около здания. По полученным данным были построены карты амплитудного распределения для каждого этажа здания. Приведены карты распределения коэффициента Пуассона. В результате выявлены три аномальные зоны в сооружении, установлено место расположения одной висячей сваи и определено направление движения грунтовых вод. Даны рекомендации по проведению комплекса укрепительных работ.

Ключевые слова: пассивный сейсмический метод, стоячие волны, инженерная сейсмика, сейсмостойкость, неразрушающие методы.

Diagnostics of the technical condition of an industrial building in Belovo (Kemerovo region) by standing waves

Fedin K.V.¹, Lukyanova A.L.^{2}, Skorobogatko A.V.³*

¹ PhD, Senior research scientist, ^{2,3} Engineer

^{1,2,3} Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia

Abstract

This article discusses the possibility of using a passive seismic method based on the allocation of standing waves and the tapping method to assess the condition of structures. The lengths and type of fixing of piles (hanging/bearing) were determined, hidden defects were localized, the residual resource of the structure was estimated by its own vibrations and the water content of the soils was estimated. Measurements were carried out both in the structure itself and on the ground near the building. Based on the data obtained, amplitude distribution maps were constructed for each floor of the building. Maps of the distribution of the Poisson's ratio are given. As a result, three anomalous zones in the structure were identified, the location of one hanging pile was established and the direction of groundwater movement was determined. Recommendations on carrying out the necessary measures for strengthening works are given.

Keywords: *passive seismic method, standing waves, engineering seismic, seismic resistance, non-destructive methods.*

*E-mail: LukyanovaAL@ipgg.sbras.ru (Лукьянова А.Л.)

Введение

В инженерной сейсмике широкое применение нашли исследования, основанные на изучении стоячих волн. Такие исследования позволяют изучать объекты различного масштаба [1, 2]. Так, при обследовании зданий и сооружений по стоячим волнам, можно определить их техническое состояние. Для возбуждения сейсмических колебаний в исследуемых объектах используют, преимущественно, искусственные источники, осуществляющие механическое воздействие на геологическую среду, что позволяет определять динамические характеристики конструкций [3], но требует создания идентичного воздействующего сигнала, значительных временных и материальных затрат.

В последние годы набирают популярность исследования собственных колебаний зданий и сооружений с использованием записей микросейсм. Несмотря на распространенность подобных исследований, на данный момент опубликовано не так много статей, посвященных анализу реальных объектов.

1. Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования в данной работе рассматривается промышленное сооружение (рис. 1), расположенное в г. Белово (Кемеровская область). Эксперименты проводились в летний период года.



Рис. 1. Промышленный объект, на котором проводилось исследование

Для исследования собственных колебаний свай здания и приповерхностных грунтов применялся метод, основанный на выделении стоячих волн из сейсмоакустических шумов.

Суть метода сводится к накоплению большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на осредненных (или накопленных) спектрах появляются регулярные последовательности пиков, соответствующие семействам стоячих волн разных типов.

Цели применения пассивной сейсморазведки, основанной на стоячих волнах:

1. Определение длины и типа свай (висячая или стойка);
2. Локализация скрытых дефектов;
3. Оценка остаточного ресурса сооружения;
4. Оценка обводненности грунтов по коэффициенту Пуассона.

Данный метод неоднократно [4-6] применялся ранее при физическом моделировании стоячих волн в различных объектах и был успешно опробован на натуральных экспериментах [5, 7-10].

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм:

1. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием геофонов: несколько перемещаемых и одного опорного (неперемещаемого) датчика;
2. Нормировка уровня шумов перемещаемых датчиков на уровень опорного для каждого измерения;
3. Разбиение шумовых записей на блоки по 50 секунд;
4. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования;
5. Выделения амплитуды собственного колебания из амплитудных спектров;
6. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади или профиле.

Частотно-амплитудное распределение строилось методом триангуляции с линейной интерполяцией.

При выборе аппаратуры для регистрации сейсмических сигналов необходимо учитывать отсутствие внешнего источника колебаний. Поэтому необходимо использовать аппаратуру, отличающуюся отсутствием или низким уровнем собственных шумов, которые могут накапливаться в процессе регистрации.

В результате сравнения существующей регистрирующей аппаратуры [11], для проведения эксперимента были выбраны трехкомпонентные сейсмоприемники высокой чувствительности GS-ONE LF и регистраторы сейсмических сигналов D-REG (рис. 2а). Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдения составляла 2 минуты (если запись проводится больше двух минут, то спектр не меняется).

Определение скрытых в грунте дефектов свай производилось методом простукивания. Для проведения измерений был использован прибор Спектр 4.3 (НПП Интерприбор) (рис. 2б), принцип работы которого основан на свойстве акустической волны отражаться от границ раздела сред с различным акустическим импедансом [12].

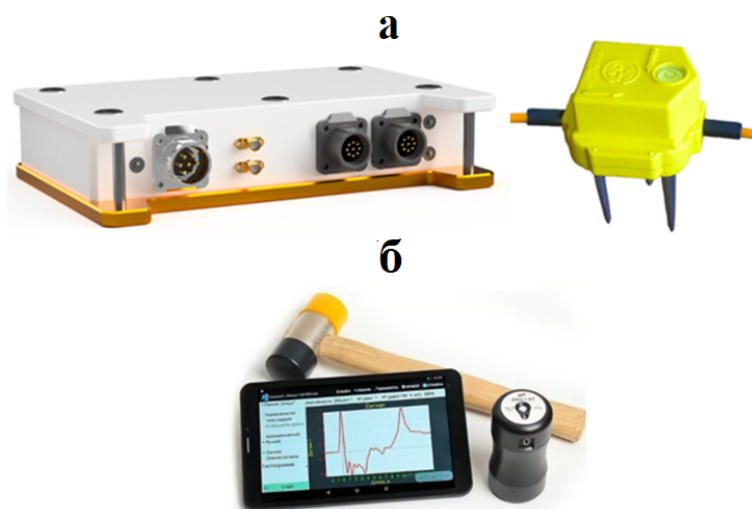


Рис. 2. Измерительное оборудование, состоящее из регистраторов сейсмических сигналов D-REG (слева) и геофонов GS-ONE DA (справа) (а); Устройство для диагностики свай Спектр 4.3 (б)

Цели использования активной сейсморазведки (метода простукивания):

1. Определение длины свай;
2. Определение скрытых дефектов свай;
3. Определение типа закрепления свай (висячая/стойка).

2. Обоснование применяемой методики

В основе применяемого в данной работе метода диагностики технического состояния зданий и сооружений лежит предположение о том, что в пространстве между земной поверхностью и ближайшей к ней резкой границей (верхней поверхностью полости, подошвой зоны малых скоростей (ЗМС)) могут возникать стоячие волны на собственных частотах слоя грунта, выделяемые из шумового поля. Кроме того, спектр сейсмоакустических шумов (микросейсм) содержит частотные составляющие, соответствующие этим собственным частотам. Накапливая амплитудные спектры относительно коротких фрагментов шумовых записей, на осредненном спектре можно выделять регулярные пики, соответствующие стоячим волнам. Показателем того, что это именно стоячие волны, является регулярный характер этих пиков.

Для стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, образующихся над свободной верхней границей полости, как на ней, так и на измеряемой поверхности должны наблюдаться пучности этих волн, а их частоты кратны частоте низшей моды:

$$f_n = \frac{nV_p}{2h}, \quad (1)$$

где n – номер моды стоячих волн, V_p – скорость продольных волн (м/с), h – расстояние от верхней границы полости до поверхности (м).

Если же стоячие волны формируются в более плотной среде, то на ее нижней границе с жесткими породами образуются узлы стоячих волн и частоты последних равны нечетным числам частоты низшей моды:

$$f_n = \frac{(2n-1)V_p}{4h}, \quad (2)$$

где h – глубина до подошвы ЗМС (м).

В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами $\Delta f = (f_{n+1} - f_n)$ равен $\frac{V_p}{2h}$, то есть частоте низшей моды f_1 над полостью или менее жестким грунтом (1), или удвоенной частоте низшей моды f_1 над более жестким основанием (2).

Таким образом, если на каком-либо участке местности распределение регулярных пиков осредненных амплитудных спектров на оси частот соответствует формуле (1), то это свидетельствует о наличии в таком месте подземной полости или иного включения с существенно пониженной относительно вмещающей среды скоростью.

Поскольку в исследуемом здании свайный фундамент, то свойства изгибных стоячих волн могут быть использованы для выявления потери их устойчивости. Если свая теряет устойчивость (например, когда отсутствует опора с одного торца сваи) по вертикали наблюдается частотно-амплитудная зависимость согласно формуле (2). Если же торцы сваи закреплены жестко, то по горизонтальной составляющей квазирегулярное распределение наблюдаться не будет, в то время как по вертикали прослеживается частотно-амплитудная зависимость согласно формуле (1).

3. Обработка данных

На рисунке 3 приведены результаты амплитудных спектров. На рисунке За резких пиков не наблюдается, а значит они не имеют сдвиговую компоненту, в то время

как на рисунке 3б можно наблюдать квазирегулярные пики, указывающие на потерю устойчивости сваи.

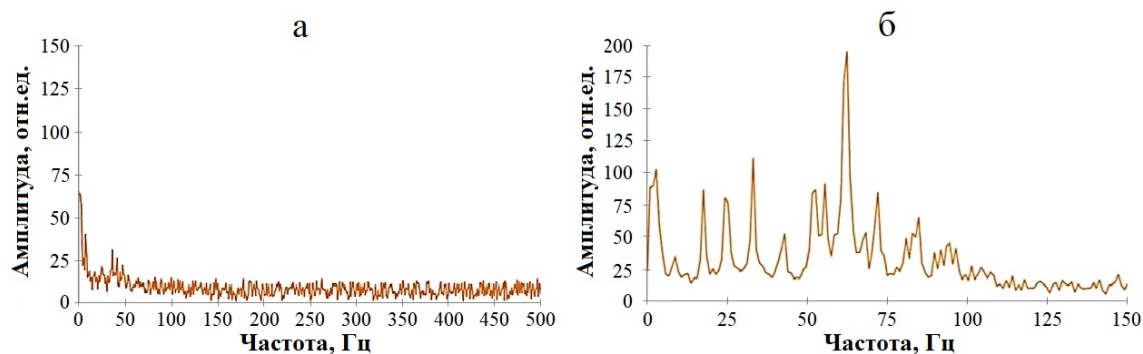


Рис. 3. Пример амплитудных спектров стоячих волн в устойчивых (а) и неустойчивых (б) сваях

Длины свай определялись методом простукивания, то есть акустическая волна возбуждалась в свае с помощью удара. Специальным молотком осуществлялся удар по торцу сваи, после чего волна распространялась по стволу сваи с определенной скоростью, отражаясь от границы раздела сред (бетон - грунт, бетон - инородное включение, трещина, полость и т.д.). Отраженная волна возвращалась к верхней части сваи и регистрировалась датчиком, установленным на торце сваи вблизи места нанесения удара. Акселерометр фиксировал сигнал, после чего сигнал оцифровывался и передавался на компьютер. Затем измерялся временной интервал между моментом удара и приходом отраженной волны на датчик. Таким образом, определение длины сваи сводится к формуле 3:

$$H = \frac{V \Delta t}{2}, \quad (3)$$

где V – скорость распространения волны в свае (для железобетонных свай $V = 4500$ м/с), м/с; Δt – временной интервал (с).

Измерения данным методом показали, что все сваи имеют длину порядка 12 метров, однако в одной из свай жесткое закрепление отсутствует (разуплотнение сваи с грунтом, отсутствует опора с торца сваи), то есть она является висячей.

При проведении площадной съемки использовались четыре датчика: три перемещаемых и один опорный (находится статично в одной точке). С помощью поочередно перемещаемых датчиков покрывается вся исследуемая площадь. Опорный датчик необходим для нормировки уровня шума перемещаемых датчиков. Стоит отметить, что существуют и альтернативные варианты подобных исследований, например, с использованием большего количества регистраторов. Тогда измерения можно проводить еще быстрее, но данный вариант является более затратным и громоздким.

На рисунке 4 изображена схема установки датчиков на первом этаже здания.

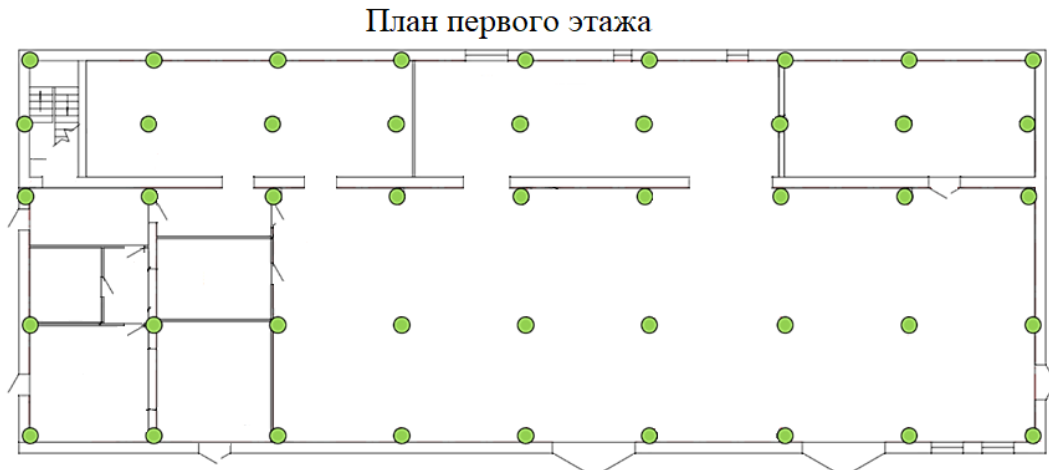


Рис. 4. Схема установки датчиков на первом этаже здания. Датчики обозначены зеленым цветом

По компоненте Z была определена собственная частота первой моды колебаний (рисунок 5), равная 2,68 Гц.

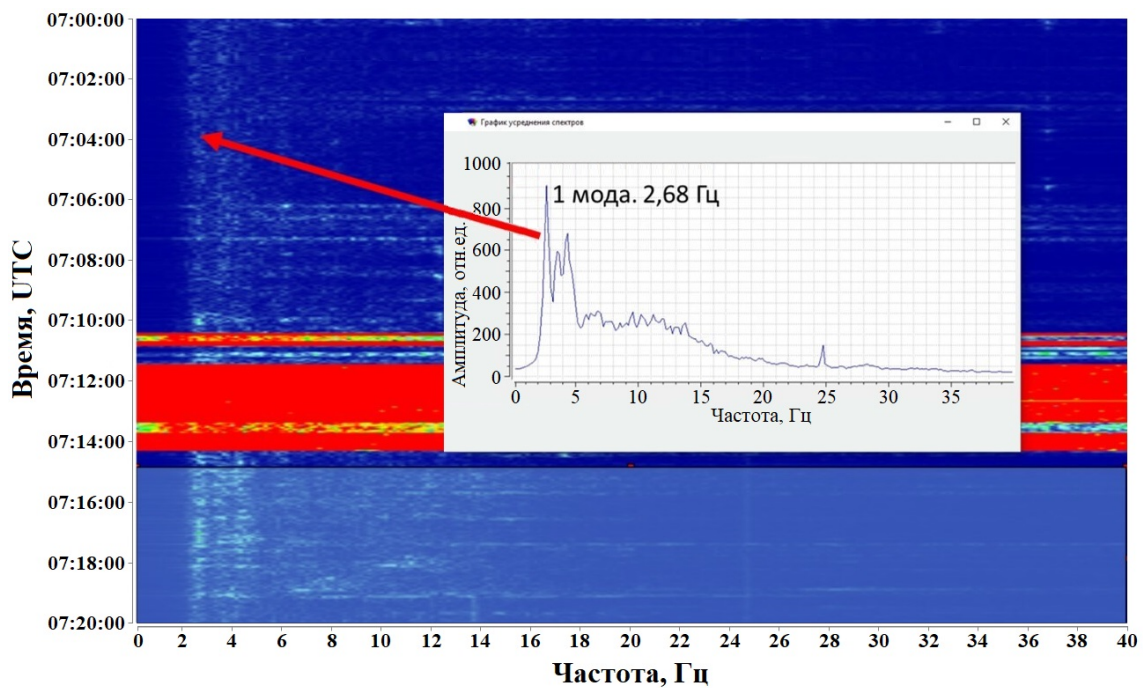


Рис. 5. Спектрограмма, компонента Z . Стрелкой показана первая мода

Ниже приводится амплитудное распределение по сумме трех компонент (X , Y , Z) на первом этаже здания (рис. 6).

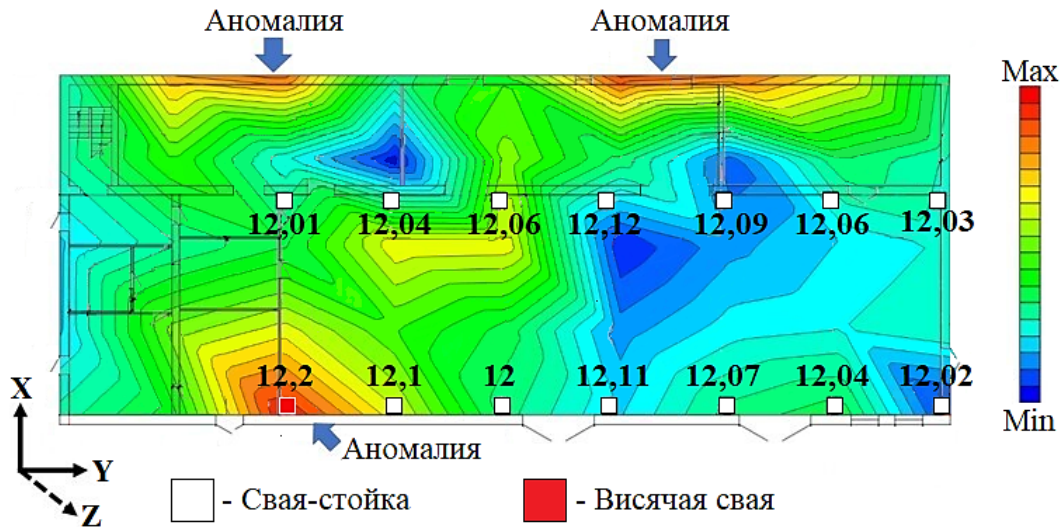


Рис. 6. Площадная съемка. Амплитудное распределение по сумме трех компонент (X, Y, Z) на первом этаже здания. Цифрами обозначены длины свай

Также была проведена съемка второго этажа. На рисунке 7 приведено амплитудное распределение по сумме трех компонент (X, Y, Z) второго этажа здания. Поскольку часть здания имеет потолки высотой в два этажа, на карте амплитудного распределения второго этажа (рис. 7) данная часть отсутствует.

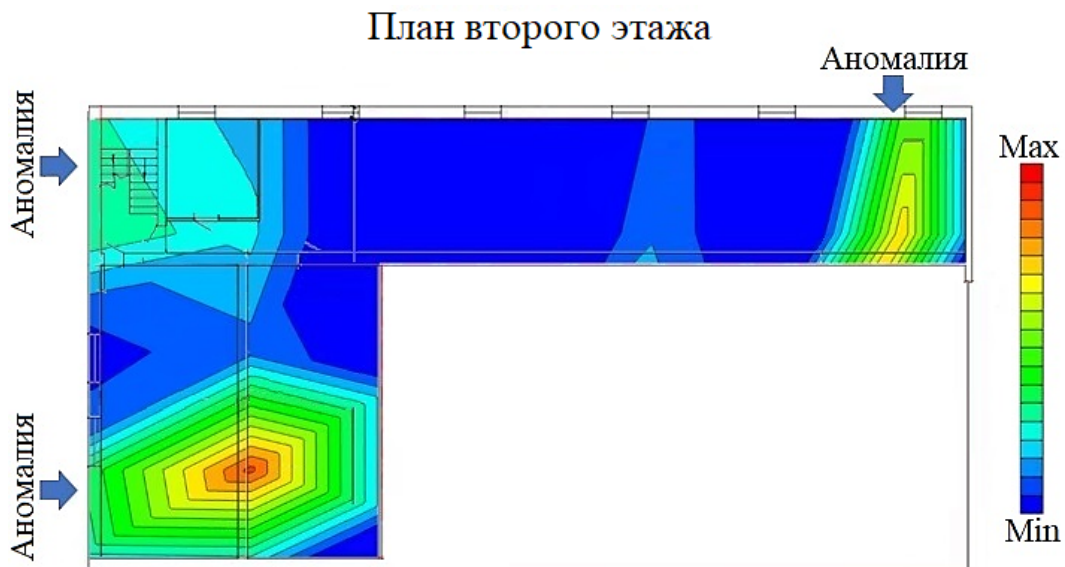


Рис. 7. Площадная съемка. Амплитудное распределение по сумме трех компонент (X, Y, Z) на втором этаже здания

Измерения проводились как внутри здания, так и на территории вокруг него. На рисунке 8 приведена карта распределения коэффициента Пуассона (отношения продольных колебаний к поперечным) приповерхностных грунтов на территории вокруг здания.

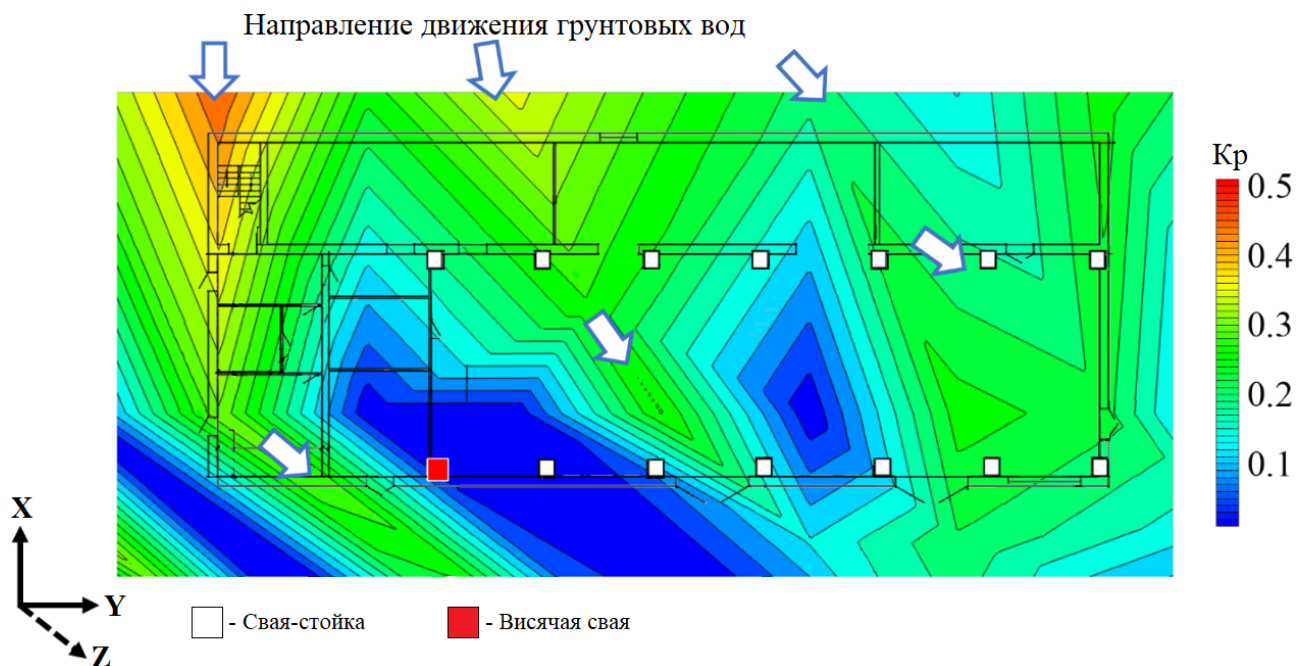


Рис. 8. Карта распределения коэффициента Пуассона приповерхностных грунтов на территории вокруг здания

4. Интерпретация данных

По результатам обработки данных были обнаружены три аномальные зоны амплитудного распределения колебаний первой моды по сумме трех (X , Y , Z) компонент (наглядно видно на рисунках 6 и 7) в околосвайном пространстве, которые хорошо прослеживаются и по карте распределения коэффициента Пуассона (отношения поперечных колебаний к продольным) на прилегающей к зданию территории (рис. 8).

На картах прослеживается аномальная зона, расположенная в нижней левой части фундамента (рис. 6, 7), проявляющаяся резким повышением амплитуд колебаний. Изучение характера закрепления сваи, принадлежащей к данной части здания показало, что свая не имеет жесткого закрепления, то есть является висячей, что подтверждается наличием повышением амплитудного распределения на основании около данной сваи.

Так же прослеживаются аномалии в верхней части здания и в зоне лестницы (верхний левый угол). На карте распределения коэффициента Пуассона видно, что данная часть подполья и грунта находится в воде (об этом свидетельствует увеличение значения коэффициента Пуассона до 0.5). Кроме того, на карте видно направление грунтовых вод, размывающих основание фундамента пристройки здания.

В верхней части здания присутствует еще одна аномалия, прослеживающаяся на рисунках 6, 7. В данных местах с внутренней стороны помещения наглядно наблюдаются трещины, идущие со второго на первый этаж (рисунок 9).



Рис. 9. Трещина на втором этаже здания

Заключение

Методом простукивания были определены длины свай (порядка 12 м) и их скрытые дефекты. Была определена одна висячая свая (разуплотнение свай с грунтом, отсутствует опора с торца свай), под которой следует выполнить цементную инъекцию после проведения работ по водоотведению.

Поскольку фундамент стоит на глинистом грунте (о чем свидетельствует карта распределения коэффициента Пуассона), а его часть находится в воде, то весной и осенью ожидается движение грунта (ранее весной происходили основные подвижки), что, вероятно, ухудшит ситуацию в аномальных зонах. Рекомендуется проведение работ по водоотведению (дренаж).

Остаточный ресурс здания по собственным колебаниям составляет 83% [13], что означает, что его еще можно эксплуатировать при условии проведения своевременного комплекса укрепительных работ.

Список литературы

1. Ахтямов, А. М. Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов / А. М. Ахтямов, В. Р. Шагиев // Вестник Башкирского университета. – 2016. – Т. 21, № 1. – С. 21-26.
2. Еманов, А. Ф. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений / А. Ф. Еманов, В. С. Селезнев, А. А. Бах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 3. – С. 20–24.
3. Аппаратно-программный диагностический комплекс «Стрела-П» | ЦИЭКС : сайт. – URL: <http://www.esrc.ru/III/strela?ysclid=lm8v33iy9b333896847> (дата обращения: 12.12.2023)

4. Колесников, Ю. И. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование / Ю. И. Колесников, К. В. Федин // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 4. – С. 89–96.
5. Колесников, Ю. И. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент / Ю. И. Колесников, К. В. Федин // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 2. – С. 83–91.
6. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66. – No. 2. – P. 342–353.
7. Fedin K. V. Assessment of the technical condition of the Sukhumi Lighthouse, Abkhazia using passive seismic standing waves method / K. V. Fedin, D. A. Pechenegov, Y. I. Kolesnikov [et al.] // Structures. – 2023. – Vol. 55. – P. 2053-2059.
8. Fedin K. V. Assessment of the technical condition of bridges and their ground foundations using the electrical resistivity tomography and the passive seismic standing wave method / K. V. Fedin, V. V. Olenchenko, P. S. Osipova [et al.] // Journal of Applied Geophysics. – 2023. – Vol. 217. – P. 105188.
9. Diagnostics of the Stability of the Palace of Metallurgists of Novokuznetsk / K.V. Fedin, E.E. Kosyakina, A.A. Gritsenko [et al.] // Processes in GeoMedia. – 2023. – Vol. Springer. – P. 61-72.
10. Гриценко А. А. Динамический мониторинг свайных сооружений на примере Дворца культуры г. Норильска / А. А. Гриценко, К. В. Федин, П. В. Громько // Процессы в геосредах. – 2022. – № 3. – С. 1734-1742.
11. Епонешникова, А. Ю. Обоснование выбора регистрирующей аппаратуры для задач сейсмического мониторинга / А. Ю. Епонешникова // Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической школы-конференции (Геологический полигон "Шира", Республика Хакасия, Россия, 30 июля - 5 августа 2018 г.). – Хакасия, 2018. – С. 35-37.
12. СПЕКТР-4.3. Прибор диагностики свай. Руководство по эксплуатации НКПП. 408464.100РЭ. – Челябинск, 2023. – 40 с.
13. ГОСТ 34081-2017. Здания и сооружения. Определение параметров основного тона собственных колебаний : дата введения 2017-11-01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

References

1. Akhtyamov, A. M. Identification of inelastic types of pipeline anchoring / A. M. Akhtyamov, B. P. Shagiev // Bulletin of Bashkir University. – 2016. – Vol. 21, No. 1. – P. 21-26.
2. Emanov, A. F. Coherent reconstruction of standing wave fields as the basis for a detailed seismological survey of engineering structures / A. F. Emanov, V. S. Seleznev, A. A. Bakh // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. – 2007. – No. 3. – P. 20–24.
3. Strela-P hardware and software diagnostic complex – URL: <http://www.esrc.ru/III/strela?ysclid=lm8v33iy9b333896847> (date of the application 12.12.2023).
4. Kolesnikov, Y. I. Detection of underground voids by microseisms: physical modeling / Y. I. Kolesnikov, K. V. Fedin // Seismic exploration technologies. – 2015. – No. 4. – P. 89–96.
5. Kolesnikov, Y. I. Application of the passive method of standing waves in engineering seismics: physical modeling and field experiment / Y. I. Kolesnikov, K. V. Fedin // Seismic exploration technologies. – 2016. – No. 2. – P. 83–91.

6. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // *Geophysical Prospecting*. – 2018. – Vol. 66. – No. 2. – P. 342–353.
7. Fedin K. V. Assessment of the technical condition of the Sukhumi Lighthouse, Abkhazia using passive seismic standing waves method / K. V. Fedin, D. A. Pechenegov, Y. I. Kolesnikov [et al.] // *Structures*. – 2023. – Vol. 55. – P. 2053-2059.
8. Fedin K. V. Assessment of the technical condition of bridges and their ground foundations using the electrical resistivity tomography and the passive seismic standing wave method / K. V. Fedin, V. V. Olenchenko, P. S. Osipova [et al.] // *Journal of Applied Geophysics*. – 2023. – Vol. 217. – P. 105188.
9. Diagnostics of the Stability of the Palace of Metallurgists of Novokuznetsk / K.V. Fedin, E.E. Kosyakina, A.A. Gritsenko [et al.] // *Processes in GeoMedia*. – 2023. – Vol. Springer. – P. 61-72.
10. Gritsenko A. A. Dynamic monitoring of pile structures on the example of the Palace of Culture of Norilsk / A. A. Gritsenko, K. V. Fedin, P. V. Gromyko // *Processes in GeoMedia*. – 2022. – No. 3. – P. 1734-1742.
11. Eponeshnikova, A. Y. Justification of the choice of recording equipment for seismic monitoring tasks / A. Y. Eponeshnikova // *Materials of the V All-Russian Youth Scientific and Practical school-conference (Shira Geological Polygon, Republic of Khakassia, Russia, July 30 - August 5, 2018.)*. – Khakassia, 2018. – P. 35-37.
12. SPECTRUM -4.3. A pile diagnostic device. User Manual. – Chelyabinsk, 2023. – 40 p.
13. State Standard 34081-2017. Buildings and structures. Determination of the parameters of the fundamental tone of natural vibrations : date of introduction 2017-11-01. – Moscow : Standartinform, 2017. – 15 p.