



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРИРУЕМЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМИ ШУМАМИ СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМИКИ

Юрий Иванович Колесников^{1,✉}, Константин Владимирович Федин²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

¹KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1435-434X>

²FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>

Аннотация. В статье приведены примеры применения для решения задач инженерной сейсмологии пассивного сейсмического метода, основанного на выделении из сейсмоакустического шумового поля стоячих волн, генерируемых такими шумами в ограниченных объектах. Исследования выполнялись как на природных, так и на техногенных объектах на разных масштабных уровнях – от первых сантиметров (например, при выявлении пустот под твердым дорожным покрытием) до десятков метров (в частности, для определения собственных частот и форм колебаний зданий и сооружений).

Ключевые слова: натурные эксперименты, сейсмоакустические шумы, пассивные сейсмические наблюдения, накопление амплитудных спектров, стоячие волны

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Благодарности: авторы выражают благодарность Л. Нгомайезве за активное участие в проведении натуральных экспериментов.

Для цитирования: Колесников Ю.И., Федин К.В. Опыт применения генерируемых сейсмоакустическими шумами стоячих волн для решения задач инженерной сейсмологии // Геофизические технологии. 2025. № 4. С. 42–67. doi:10.18303/2619-1563-2025-4-42.

EXPERIENCE OF USING STANDING WAVES GENERATED BY SEISMOACOUSTIC NOISE TO SOLVE ENGINEERING SEISMIC PROBLEMS

Yury I. Kolesnikov^{1,✉}, Konstantin V. Fedin²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1435-434X>

²FedinKV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9710-8944>

Abstract. This article presents examples of the application of a passive seismic method to solve engineering seismic problems. This method is based on the extraction from a seismoacoustic noise field of standing waves generated by such noise within confined objects. The studies were conducted on both natural and man-made objects at various scales – from a few centimeters (e.g., to assess the thickness of ice cover on water reservoirs) to tens of meters (specifically, to determine the natural frequencies and vibration modes of buildings and structures).

Keywords: *in-situ* experiments, seismoacoustic noise, passive seismic observations, amplitude spectral accumulation, standing waves

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

Acknowledgments: The authors would like to thank L. Ngomayezwe for his active participation in conducting the field experiments.

For citation: Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V. Experience of using standing waves generated by seismoacoustic noise to solve engineering seismic problems // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 4. P. 42–67. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-4-42.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы пассивный сейсмический метод стоячих волн достаточно широко применяется в инженерной сейсмологии, в основном для обследования зданий и сооружений [Еманов, Красников, 2015; Еманов и др., 2018–2020; Бах и др., 2025а, б]. Первые такие работы были выполнены в Геофизической службе СО РАН, где была разработана методика выделения стоячих волн из записей микросейсм, зарегистрированных малоканальной аппаратурой на плотной сети наблюдений [Еманов и др., 2002, 2007]. Методика (названная авторами методом стоячих волн) основана на пересчете разновременных шумовых записей, полученных при синхронной регистрации стационарно установленным опорным и небольшой группой передвижных датчиков, к «единому» времени с помощью фильтров Винера. Это позволяет эффективно выделять из шума когерентные колебания, в частности, генерируемые шумом стоячие волны.

В дальнейшем на результатах физического моделирования в ИНГГ СО РАН было показано, что стоячие волны можно успешно выделять из сейсмоакустических шумовых полей и простым суммированием большого числа амплитудных спектров шумовых записей [Колесников, Федин, 2015, 2016]. В этом случае когерентность колебаний в разных точках наблюдений не является необходимым условием, что существенно расширяет круг задач, решаемых методом стоячих волн.

Критерием для идентификации стоячих волн является регулярность резонансных пиков, появляющихся в результате накопления амплитудных спектров шумовых записей (или квазирегулярность для волн с частотной дисперсией скорости, например, для изгибных волн). В настоящей статье приведены примеры применения пассивного метода стоячих волн при решении задач инженерной сейсмологии на разных масштабных уровнях.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Пассивный сейсмический метод стоячих волн основан на регистрации микросейсмических колебаний исследуемого объекта без воздействия искусственного источника упругих волн. В основе метода лежит предположение о том, что в исследуемом объекте в результате воздействия микросейсм (для простоты в дальнейшем будем применять этот термин и к более высокочастотным сейсмоакустическим шумам) могут формироваться стоячие волны. Частоты этих волн равны собственным частотам объекта исследования. Кроме того, предполагается, что спектр микросейсм содержит частотные составляющие, соответствующие этим собственным частотам.

Если это так, то, как показано на результатах физического моделирования [Колесников, Федин, 2015, 2016], накопление амплитудных спектров большого числа шумовых записей позволяет определять частоты (а во многих случаях и относительные амплитуды) стоячих волн, генерируемых микросейсмами в исследуемом объекте. Частотные и амплитудные особенности стоячих волн можно использовать для оценки состояния и мониторинга объектов исследования – об изменениях свойств объекта можно судить

как по изменениям частоты, так и по изменению формы различных мод собственных колебаний. Необходимо только отметить, что возможность анализировать формы мод имеется только в случае доступности наблюдений вдоль профиля стоячих волн (например, на образующей стержня или во внутренних точках объемного объекта). Если такие наблюдения невозможны (например, на дневной поверхности при колебаниях по вертикали приповерхностного слоя), то для идентификации стоячих волн можно использовать свойство регулярности их спектральных пиков на оси частот.

Регулярность частот спектральных пиков стоячих волн наглядно иллюстрируется стоячими волнами в тонких стержнях [Хайкин, 1971]. Так, частоты стоячих волн (собственные частоты) для стержня с двумя свободными или двумя фиксированными концами, на которых образуются, соответственно, пучности или узлы стоячих волн, определяются формулой:

$$f_n = \frac{nV}{2l}, \quad (1)$$

а для стержня с одним свободным и одним фиксированным концом – формулой:

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

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – номера мод стоячих волн, V – скорость волны в стержне, l – длина стержня. Скорость V , в зависимости от типа рассматриваемых колебаний в стержне, может быть равной скоростям, например, продольной стержневой, крутильной или изгибной волн.

В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами в отсутствие частотной дисперсии скорости (то есть зависимости скорости от частоты) равен

$$\Delta f = (f_{n+1} - f_n) = \frac{V}{2l}, \quad (3)$$

хотя согласно формуле (1) он равен частоте низшей моды f_1 , а по формуле (2) – удвоенной частоте низшей моды f_1 . Для продольных стержневых и крутильных колебаний это проявляется в появлении на амплитудных спектрах стоячих волн регулярной последовательности резонансных пиков на собственных частотах стержня. Но для волн с сильной частотной зависимостью, например, для изгибных волн, такая последовательность квазирегулярна (интервал между пиками меняется), что мы и увидим ниже на примере исследуемых протяженных объектов.

Подобный механизм образования стоячих волн наблюдается и в объемных ограниченных объектах. Только в этом случае стоячие волны образуются в результате интерференции объемных продольных или поперечных волн, отраженных от границ, разделяющих среды с различными акустическими жесткостями. Так, собственные частоты поверхностного низкоскоростного слоя на более жестком полупространстве определяются формулой (2) [Kramer, 1996]. Соответственно, частоты стоячих волн, образующихся между свободными границами (например, между подземной полостью и дневной поверхностью) должны соответствовать формуле (1). В приведенных ниже примерах свойство регулярности спектральных пиков стоячих волн использовалось для их идентификации в случаях проведения микросейсмических измерений на дневной поверхности.

Методика проведения измерений заключалась в регистрации микросейсм с помощью сейсмических датчиков, установленных непосредственно на поверхности исследуемого объекта. Для записи микросейсм в герцевом частотном диапазоне использовались цифровые одноканальные

регистраторы RefТек-125А и геофоны GS-20DX. Для измерений на относительно небольших объектах (например, твердом дорожном покрытии, бетонных блоках, ледяном покрове водоемов) применялись цифровой двухканальный осциллограф В-423 и широкополосные пьезокерамические датчики.

При измерениях один из датчиков (опорный датчик) устанавливался стационарно, как правило, в центральной части системы наблюдений. Один или несколько передвижных датчиков обеспечивали получение синхронных с опорным датчиком записей микросейсм во всех точках выбранной системы наблюдений. Записи, полученные от опорного датчика, использовались для нормирования уровня шума, записанного передвижными датчиками в разное время. Это позволило уменьшить влияние возможных резких изменений уровня микросейсм при «сканировании» одним или несколькими датчиками многоточечной системы наблюдений.

При нормировании сначала для каждой цифровой записи A_{ki} , полученной от опорного геофона в k -м сеансе, вычисляется сумма амплитуд $S_k = \sum_{i=1}^N |A_{ki}|$ (N – число отсчетов в записи). Далее вычисляются коэффициенты нормирования $K_k = S_1/S_k$, на которые затем умножаются записи, полученные передвижными приемниками во время k -х сеансов.

Полученные для каждой точки наблюдений нормированные записи микросейсм делятся на блоки равной длины (обычно от 1024 до 8192 отсчетов), для которых вычисляются амплитудные спектры, которые затем осредняются (накапливаются). С увеличением числа накоплений первоначально нерегулярных спектров отдельных блоков на осредненном спектре появляются и затем постепенно возрастают на фоне других частотных составляющих регулярные пики, соответствующие семейству стоячих волн в исследуемом объекте. Амплитуды и частоты (собственные частоты исследуемого объекта) этих пиков в дальнейшем используются для интерпретации результатов обработки микросейсмических данных.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Диагностика крепления трубы к опорам надземного трубопровода

Значительная часть трубопроводов сооружается в надземном исполнении – на опорах, обеспечивающих некоторый зазор между трубой и грунтом. В таких трубопроводах создаются благоприятные условия для формирования стоячих волн на собственных частотах пролетов трубы между соседними креплениями к опорам, что может при определенных условиях приводить к резонансным явлениям, повышающим вероятность повреждения участка трубопровода. Эти частоты зависят от многих факторов, в том числе в значительной степени от качества крепления трубы к опорам и устойчивости самих опор.

Теоретически показано, что собственные частоты изгибных колебаний трубопровода можно использовать для определения краевых условий (т. е. вида закрепления трубы на концах пролетов) [Ахтямов, Шагиев, 2016; Шагиев, Ахтямов, 2018]. Однако только по собственным частотам изгибных колебаний трубопровода невозможно однозначно диагностировать, на каком конце пролета трубы произошло снижение жесткости закрепления, т. к. одинаковое изменение условий крепления на любом из двух концов участка трубы должно приводить к одинаковым изменениям собственных частот участка. Мы провели натурные эксперименты, демонстрирующие эффективность применения метода стоячих волн для обнаружения проблемных мест крепления труб к опорам.

Исследования проводились на надземном трубопроводе (теплотрассе), состоящем из двух параллельных стальных труб диаметром 46 см. Через каждые 10 м трубы жестко приварены к массивным стальным опорам (рис. 1, а), за исключением мест пересечения резких локальных понижений рельефа. В этих местах трубы уложены без закрепления на более высокие стальные стойки (рис. 1, б), что можно рассматривать как некоторый аналог нарушения крепления трубы к опоре.



Рис. 1. Жесткое крепление труб к опоре (а); трубы на опоре без жесткого крепления (б); установленные на трубе регистратор 1 и геофон 2 (в).

В наших экспериментах исследовались два 10-метровых пролета одной из труб теплотрассы: один – жестко закрепленный с двух сторон, второй – закрепленный с одной стороны и лежащий на опоре без жесткого закрепления с другой. Измерения проводились с помощью двух регистраторов RefTek-125A и двух – одного опорного и одного передвижного – вертикальных геофонов GS-20DX (рис. 1, в) в точках, расположенных вдоль верхней образующей трубы с шагом 20 см по всей длине каждого пролета.

Специфика исследований протяженных объектов методом стоячих волн состоит в возможности регистрации шумовых записей непосредственно на профиле стоячих волн, что и реализовано в наших экспериментах. Совместная визуализация накопленных во всех точках профиля амплитудных спектров в плоскости расстояние–частота при отображении амплитуд в соответствии с выбранной цветовой шкалой позволяет оценивать формы стоячих волн, которые проявляются в виде чередования узлов и пучностей на собственных частотах исследуемых объектов.

На рисунке 2 показано распределение накопленных амплитудных спектров шумовых записей, полученных на этих участках трубопровода. Как видно из рисунка, в обоих случаях накопление приводит к выделению на развертках спектров нескольких мод изгибных стоячих волн (чередование в пролетах узлов и пучностей). Однако если в первом случае на обоих концах трубы наблюдаются узловые точки для всех выделенных мод (см. рис. 2, а), то во втором (см. рис. 2, б) у половины мод справа наблюдаются пучности и число выделенных мод стоячих волн в том же частотном диапазоне примерно в два раза больше, чем на рис. 2, а. Это означает, что рис. 2, б отражает колебания двойного пролета трубы.

Отметим, что в обоих случаях соответствующие стоячим волнам пики располагаются на оси частот квазирегулярно – интервал между соседними модами не постоянен. Это является следствием довольно сильной дисперсии (зависимости от частоты) скорости изгибных волн.

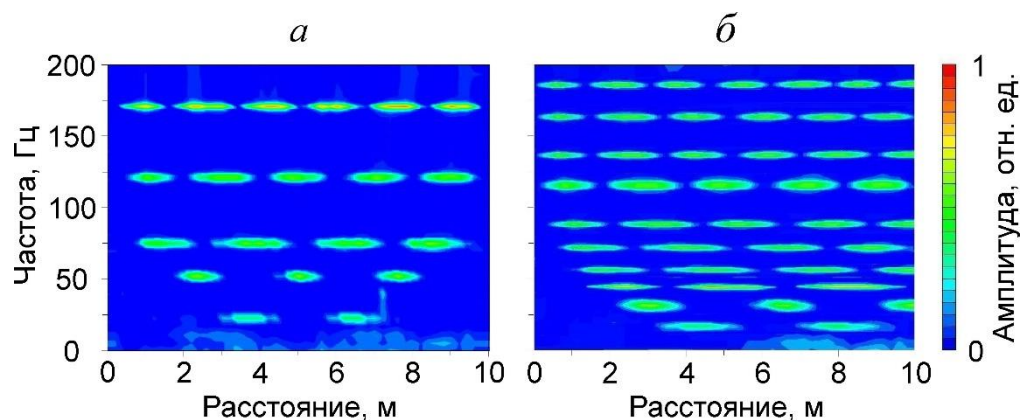


Рис. 2. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей в жестко прикрепленном к опорам с двух сторон участке трубы (а) и при отсутствии жесткого крепления правого конца пролета (б).

Таким образом, резкое увеличение числа мод стоячих волн в каком-либо пролете трубопровода и отсутствие узловых точек у части мод над его опорой свидетельствуют об отсутствии жесткого крепления трубы к этой опоре. Полученные результаты показывают эффективность применения пассивных шумовых измерений для оценки состояния крепления труб к опорам трубопроводов.

Оценка технического состояния мостов и их оснований

Мосты являются неотъемлемой частью транспортной инфраструктуры и нуждаются в регулярном мониторинге технического состояния. Скорость износа и потери устойчивости мостов зависит от множества факторов, в том числе от непостоянства характеристик грунта в их основании. В северных регионах большое число мостов построены на многолетнемерзлых породах. Деградация мерзлоты приводит к образованию таликов и проседанию грунта, а вместе с ним – свай и опор мостов.



Рис. 3. Общий вид мостов на 31-м (а) и 244-м (б) километрах железной дороги «Обская–Бованенково».

Возможности применения пассивного сейсмического метода стоячих волн для обследования мостовых переходов оценивались по результатам микросейсмических наблюдений на двух железнодорожных мостах, расположенных на 31-м (рис. 3, а) и 244-м (рис. 3, б) километрах железной

дороги «Обская–Бованенково» в Ямало-Ненецком автономном округе. Регистрация микросейсмических колебаний проводилась на верхней поверхности мостовых пролетов двумя ориентированными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами GS-20DX с регистраторами RefTek-125A. Один геофон (опорный), был установлен в средней части моста, второй передвигался по профилю вдоль моста от начала первого до конца последнего пролета с шагом 3 м. В каждой точке профиля непрерывная запись микросейсм производилась в течение 5 мин с синхронной регистрацией колебаний в опорной точке.

На рисунке 4 изображена схема моста на 31-м км и развертка накопленных амплитудных спектров вдоль него, на которой можно выделить семь мод стоячих волн, начиная со второй. Это изгибные по горизонтали стоячие волны, т. к. регистрация микросейсм проводилась ориентированными перпендикулярно рельсам горизонтальными геофонами. Для каждой моды между крайними из четырех опор можно видеть несколько пучностей, разделенных низкоамплитудными интервалами в окрестностях узловых точек. Число пучностей на каждой собственной частоте совпадает с номером моды.

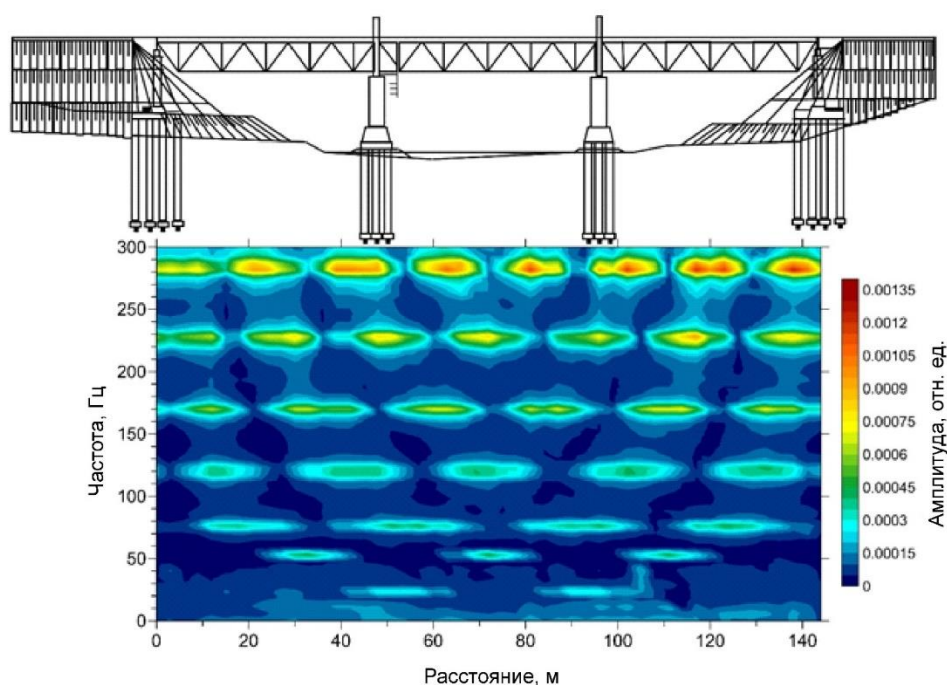


Рис. 4. Схема моста на 31-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково).

Обращает на себя внимание то, что средние опоры не приводят к образованию узлов в местах их контакта с пролетами моста. Это обусловлено шарнирным, а не жестким типом контактов опор с мостовыми пролетами. Подобный эффект наблюдался в экспериментах с трубопроводом (см. рис. 2), где узлы для всех мод находились только в местах жесткого крепления опор к трубе, но не там, где труба свободно лежала на опоре.

В целом же в поле стоячих волн каких-либо осложняющих его существенных аномалий не наблюдается, моды стоячих волн хорошо прослеживаются, распределение пучностей и узлов типично для закрепленного с двух сторон протяженного объекта, что говорит об отсутствии серьезных нарушений в конструкции моста или снижении его устойчивости.

Результаты обследования второго моста приведены на рис. 5. Как и в случае моста на 31-м км (см. рис. 4), этот мост колеблется как единое целое, узловые точки над средними опорами отсутствуют.

Более того, наблюдаются значительно повышенные амплитуды в местах контакта пролетов с двумя средними опорами. Предположительно это может быть связано с частичной потерей устойчивости этих опор из-за оттаивания грунтов под ними. Сложный характер поля стоячих волн в данной мостовой конструкции по сравнению с мостом на 31-м км свидетельствует о необходимости его более тщательного обследования и, возможно, проведения работ по восстановлению устойчивости двух центральных опор.

Проведенные исследования показали, что пассивный сейсмический метод стоячих волн позволяет оценивать техническое состояние мостовых конструкций на предмет их устойчивости и качества крепления пролетов к мостовым опорам. Анализ форм стоячих волн, выделенных из микросейсмических колебаний, показал, что появление искажающих эти формы аномалий (мост на 244-м км) свидетельствует об изменениях в конструкции моста и/или в его основании.

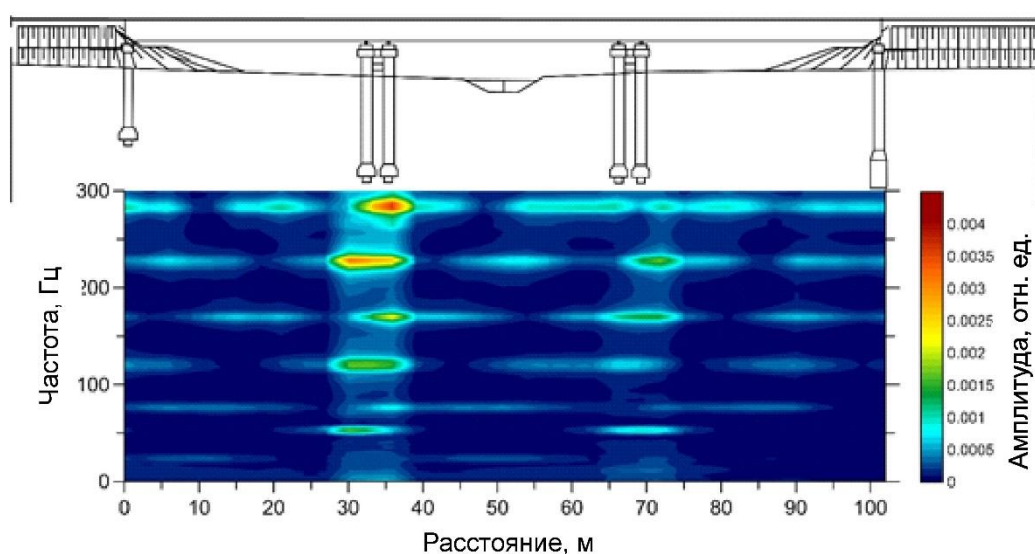


Рис. 5. Схема моста на 244-м км и распределение амплитудных спектров вдоль его длины (в направлении на Бованенково).

Оценка влияния сезонных изменений резонансных свойств верхней части разреза на сейсмобезопасность зданий

При строительстве зданий и инженерных сооружений, особенно в сейсмоактивных регионах, большое внимание уделяется их взаимодействию с основаниями – грунтами, на которых они возводятся. При проектировании таких объектов стараются следить за тем, чтобы их собственные частоты не совпадали с собственными частотами оснований, что позволяет в значительной мере нивелировать возможные резонансные явления при землетрясениях.

Известно, что сезонные промерзания и оттаивания могут влиять на динамические свойства как надземных сооружений, так и их оснований [Yuen, Kuok, 2010; Корепанов, Цветков, 2014]. Для того, чтобы оценить возможное влияние сезонных факторов на реакцию строительных конструкций на внешние вибрации, нами были проведены две серии экспериментов по регистрации сейсмоакустических шумов как внутри одного из жилых домов, так и вне его. Одна серия наблюдений проводилась в конце января, а вторая – в конце июня.

Десятиэтажный дом находится в непосредственной близости от железнодорожной станции «Сеятель» (рис. 6). Соседство с железной дорогой и проходящим вдоль нее междугородним шоссе

приводит к тому, что данное здание испытывает повышенные вибрационные нагрузки, иногда сопровождающиеся, по словам жителей верхних этажей, характерными «поскрипываниями» в строительных конструкциях. Причем эти явления носят сезонный характер, а именно: наблюдаются преимущественно в январе–феврале.



Рис. 6. Расположение жилого дома и гаража, в которых проводились наблюдения, по отношению к железнодорожным путям (а) и общий вид дома (б).

Для исследования собственных колебаний здания и приповерхностных грунтов в данной работе применялся пассивный сейсмический метод стоячих волн. Регистрация сейсмоакустических шумов проводилась зимой и летом в одних и тех же точках в одном из подъездов исследуемого здания, а также в подвале одного из находящихся поблизости неотапливаемых гаражей. Для регистрации использовались регистраторы RefТек-125А и горизонтальные геофоны GS20DX.

В здании регистрация шумов производилась на вертикальном профиле наблюдений на внутренней стене лестничной клетки второго подъезда, находящегося в двухсекционной части дома, ориентированной вдоль железной дороги. То есть регистрировались горизонтальные колебания двухсекционной части дома в направлении, перпендикулярном к железнодорожному полотну. Длительность непрерывной записи в каждой точке наблюдений в здании составляла 30 мин.

На рисунке 7, а показано распределение по высоте дома амплитудных спектров, полученных по результатам зимних наблюдений (летние результаты отличаются лишь в деталях). Из рисунка видно, что амплитуды спектральных пиков меняются по высоте дома закономерно, образуя чередующиеся последовательности узлов и пучностей, причем с ростом частоты число узлов и пучностей возрастает. Такая картина (чередование узлов и пучностей) характерна для стоячих волн в протяженных объектах, поэтому частоты наблюдаемых на спектрах пиков идентифицированы как частоты мод поперечных собственных колебаний изучаемого здания.

На рисунке 7, б приведены обобщенные (осредненные как по времени, так и по всем точкам наблюдений) амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных в здании в июне и январе. Как можно видеть, на обоих спектрах наблюдается ряд пиков (на рисунке они помечены номерами от 1 до 10), частоты которых не зависят от времени года, несколько отличаются лишь их амплитуды.

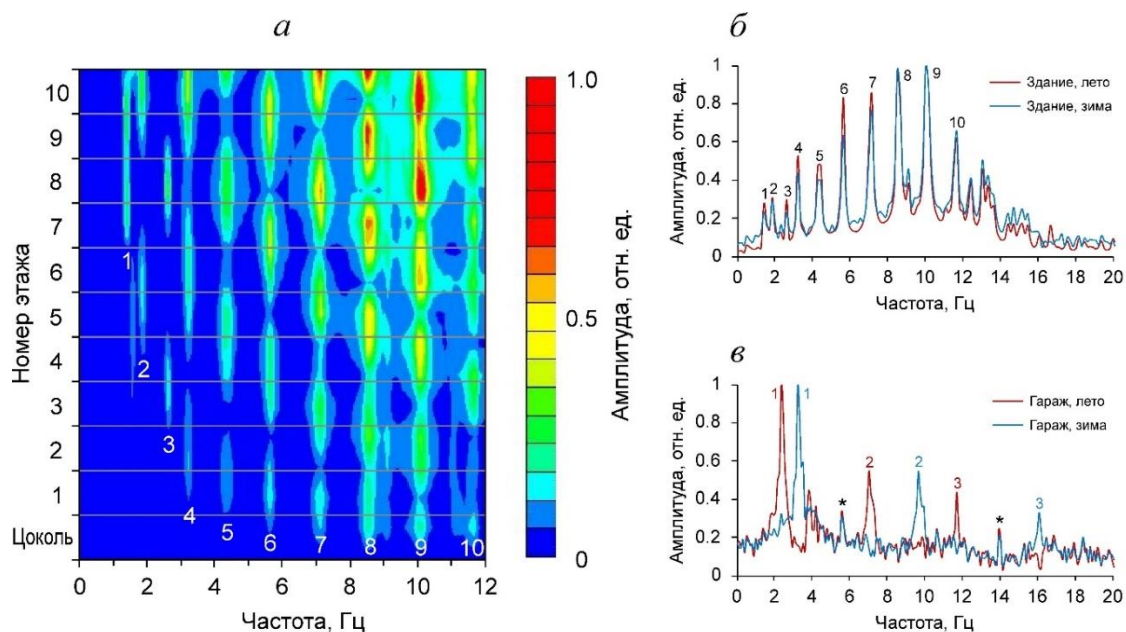


Рис. 7. Распределение осредненных по времени амплитудных спектров по высоте здания (а); сравнение осредненных спектров шумовых записей, полученных в здании (б) и в соседнем холодном гараже (в) в летний и зимний периоды.

Оценка собственных частот для сдвиговых горизонтальных колебаний слоя поверхностных грунтов производилась по амплитудным спектрам микросейсм, зарегистрированных в подвале гаража, расположенного примерно в 60 м от рассматриваемого здания (см. рис. 6, а). Для наблюдений использовался горизонтальный геофон, ориентированный примерно в перпендикулярном к железнодорожным путям направлении.

Продолжительность непрерывной записи микросейсм как в зимний, так и в летний периоды здесь была увеличена примерно до недели. В результате накопления амплитудных спектров фрагментов полученных шумовых записей на осредненных спектрах появились характерные для стоячих волн в приповерхностном грунтовом слое [Kramer, 1996] регулярные пики (рис. 7, в) на частотах, соответствующих формуле (2).

Для обоих спектров на рис. 7, в эта закономерность выполняется для трех отмеченных цифрами пиков (трех низших мод стоячих волн сдвига), погрешность находится на уровне спектральной разрешающей способности. Так частоты пиков, полученные по летним наблюдениям, равны 2.32, 7.08 и 11.72 Гц, а по зимним – 3.17, 9.64 и 16.1 Гц.

Таким образом, собственные частоты для сдвиговых колебаний поверхностного грунтового слоя, определенные по результатам измерений в подвале гаража в январе, превышают частоты, полученные по данным июньских наблюдений, примерно на 37 %. Из этого следует, что в определенные периоды времени частоты некоторых поперечных мод собственных колебаний здания и сдвиговых горизонтальных колебаний приповерхностного слоя могут совпадать, что может вести к снижению сейсмобезопасности данного сооружения.

В этом можно убедиться, если сравнить спектры записей, зарегистрированных в здании и в гараже летом и зимой (см. рис. 7, б, в). Так в июне частота наиболее интенсивной низшей моды собственных сдвиговых колебаний слоя (2.32 Гц) заметно отличается от наиболее близких к ней частот поперечных мод собственных колебаний здания (1.83 и 2.56 Гц). В то же время в январе частота низшей моды

собственных сдвиговых колебаний слоя (3.17 Гц) совпадает с точностью до спектральной разрешающей способности (в нашем случае это 0.12 Гц) с частотой одной из поперечных мод собственных колебаний здания, отмеченной на рис. 7, б цифрой 4, что может приводить к усилению возможных резонансных явлений в здании на этой частоте.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости учета сезонных вариаций резонансных свойств поверхностного грунтового слоя при проектировании различных сооружений, в особенности в районах с климатическими условиями, характеризующимися сменой длительных периодов положительных и отрицательных температур.

Обнаружение пустот под плитами, лежащими на акустически более жестком основании

Строительство гидроэлектростанций (ГЭС) во многих случаях сопровождается возведением грунтовых плотин и дамб, которые в процессе эксплуатации могут подвергаться воздействию различных факторов (давлению волн и льда, внутренней эрозии из-за фильтрационных процессов, сезонных промерзаний и оттаиваний и т. д.), приводящих к изменению их проектных характеристик. На долю грунтовых плотин приходится более половины всех аварий, происходящих на плотинах гидротехнических сооружений [Юзбеков, 2004].

Для защиты подвергающихся динамическому воздействию волн и льда верховых откосов грунтовых плотин и дамб применяются различные виды креплений, в частности, они могут быть укреплены бетонными плитами, как, например, на дамбе Новосибирской ГЭС. Со временем в верховых откосах могут появляться дефекты вследствие изменения состояния грунтов и потери прочности бетона железобетонных плит. Своевременное выявление этих дефектов позволяет вовремя принимать соответствующие меры по их устранению. Ниже представлены результаты применения высокочастотной модификации метода стоячих волн для обнаружения пустот под бетонными плитами, лежащими на более жестком основании, и контроля их толщины.

Объектом исследования в данном случае были верховые откосы дамбы Новосибирской ГЭС. Они, как отмечалось выше, укреплены бетонными плитами (рис. 8) с горизонтальными размерами 10×10 м², уложенными, как значится в проектной документации, на каменную наброску на песчано-глинистом грунте. На поверхности четырех предположительно «проблемных» (со слов сотрудников ГЭС) плит была проведена регистрация акустических шумовых сигналов. Регистрация проводилась на всей поверхности плит по квадратной сетке с шагом 1 м.



Рис. 8. Плиты крепления верхового откоса плотины Новосибирской ГЭС.

Для регистрации использовался двухканальный цифровой осциллограф В-423 и широкополосные пьезокерамические датчики поршневого типа с вертикально направленной осью максимальной чувствительности. Для ускорения измерений рядом с точками наблюдений на бетонные плиты производилось дополнительное шумовое воздействие с помощью щетки с жесткой щетиной. Это позволило сократить время регистрации в каждой точке с 5–10 мин, необходимых при работе с естественными акустическими шумами, до примерно 30 с.

При обработке записи разбивались на фрагменты длительностью примерно 82 мс, после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. На рисунке 9 приведены примеры осредненных спектров шумовых записей, зарегистрированных в двух точках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить как минимум два регулярных резонансных пика, согласующихся с формулами (1) для рис. 9, б или (2) для рис. 9, а.

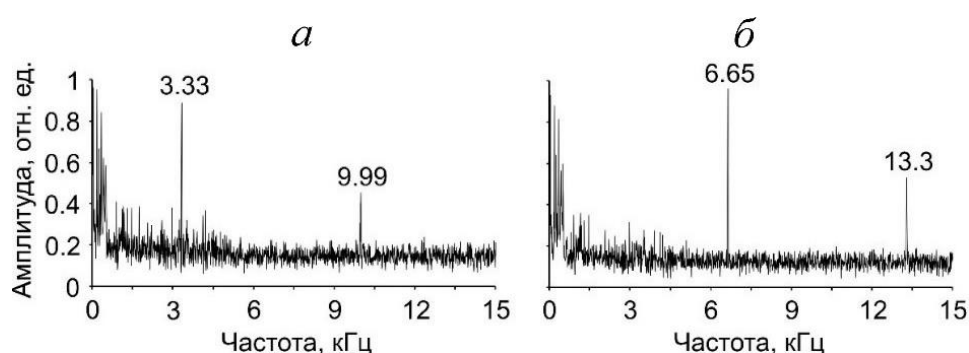


Рис. 9. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на плитах верхового откоса плотины над жестким основанием (а) и над полостью (б).

В частности, для бетонной плиты, лежащей на основании (каменной наброске на песчано-глинистом грунте), характеризующем большей акустической жесткостью, что имело место в большинстве точек наблюдения, эти пики расположены на оси частот в соответствии с формулой (2). Это иллюстрирует спектр, приведенный на рис. 9, а, на котором частоты пиков, соответствующих первым двум модам стоячих волн сжатия–растяжения, равны 3.33 и 9.99 кГц. В то же время над образовавшейся под плитой полостью (рис. 9, б) распределение пиков согласуется с формулой (1) – их частоты равны 6.65 и 13.3 кГц.

Отмеченные спектральные пики соответствуют стоячим волнам вертикального сжатия–растяжения бетонного слоя, что подтверждает сопоставление результатов прямого измерения толщины бетонной плиты в контрольной точке и расчета толщины по формуле:

$$l = \frac{V_p}{2\Delta f}, \quad (4)$$

следующей из (3). В данном случае скорости V в формуле (3) для стоячих волн вертикального сжатия–растяжения соответствует скорость продольных волн V_p , а l – это толщина плиты.

Измеренная рулеткой по торцу незакрепленной снизу (без ее контакта с основанием) плиты толщина бетона составила примерно 30 см. Определенная по записанному рядом с торцом шуму частота низшей моды равна $f_1 = \Delta f = 6.94$ кГц, что при измеренной импульсным методом скорости в бетоне $V_p=4150$ м/с в соответствии с формулой (3) дает практически такую же толщину – 29.9 см.

На рисунке 10, а показано распределение частоты низшей моды f_1 , на поверхности исследуемых плит. Как видно из рисунка, на некоторых участках плит, примыкающих к их торцам, наблюдается примерно двукратное повышение частоты низшей моды. Это свидетельствует о том, что в этих местах нарушен контакт плит с основанием (образовались промоины) или произошло существенное снижение жесткости грунтов основания. В результате частоты стоячих волн в этих местах определяются формулой (1), в отличие от мест, где под плитами находится более жесткое основание – там эти частоты определяются формулой (2). Более слабые флуктуации частоты связаны, по-видимому, с неоднородностью плит по толщине или изменениями свойств бетона.

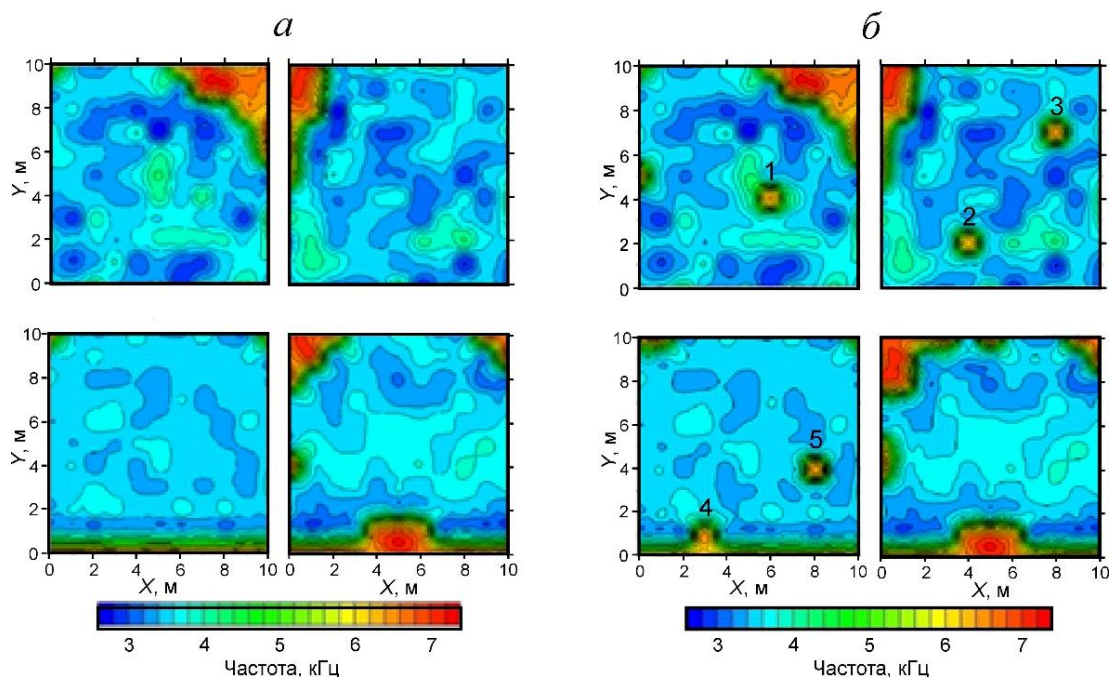


Рис. 10. Карты распределения частоты низшей моды стоячих волн вертикального сжатия–растяжения для предположительно «проблемных» бетонных плит верхнего и нижнего рядов крепления верхового откоса дамбы, полученные в 2019 (а) и 2020 (б) годах. Цифрами отмечены вновь появившиеся аномалии.

Нужно заметить, что на рис. 10, а две верхние карты получены для двух соседних плит из верхнего ряда крепления дамбы, к которым снизу также примыкают другие плиты. Две нижние карты отражают результаты для двух плит с разных участков нижнего ряда, под которыми других плит нет. Это различие проявляется в том, что во втором случае непосредственно возле нижней кромки плит также наблюдается двукратное повышение частоты низшей моды стоячих волн, связанное, по-видимому, с постепенным вымыванием части грунта основания в этих местах.

Повторные измерения на этих же плитах, проведенные через год, показали, что в целом распределение частоты низшей моды по поверхности плит сохранилось (рис. 10, б), но на трех плитах (верхние и левая нижняя карты) появились отмеченные цифрами небольшие аномалии с повышенной в два раза частотой, что свидетельствует о нарушении контакта плиты с ее основанием в этих местах.

Приведенные результаты показали, что метод стоячих волн позволяет надежно диагностировать появление пустот или участков ослабленных грунтов под бетонными плитами крепления откосов дамб, если первоначально лежащие в основании плит грунты имели более высокую в сравнении с бетоном акустическую жесткость.

Обнаружение пустот под твердым дорожным покрытием, лежащем на неконсолидированных грунтах

Одна из актуальных проблем диагностики автомобильных дорог связана с появлением пустот под их асфальтобетонным покрытием. Применение метода стоячих волн для обнаружения пустот под твердым дорожным покрытием, лежащем на неконсолидированных грунтах с меньшей акустической жесткостью, было протестировано на относительно небольшом объекте – промоине в подстилающем грунте, образовавшейся у края асфальтового покрытия тротуара (рис. 11). На поверхности асфальтового слоя над промоиной были проведены записи шумового поля на двух профилях, пересекающих промоину вдоль и поперек кромки тротуара (красные линии на рис. 11).

Из-за небольших размеров объекта исследований регистрация шумовых записей велась высокочастотной аппаратурой – цифровым осциллографом В-423 с вертикально направленным широкополосным пьезокерамическим датчиком. Для ускорения измерений производилось дополнительное шумовое воздействие на асфальтовое покрытие при помощи щетки с жесткой щетиной, что позволило сократить время непрерывной регистрации в каждой точке наблюдений до 6.5 с.

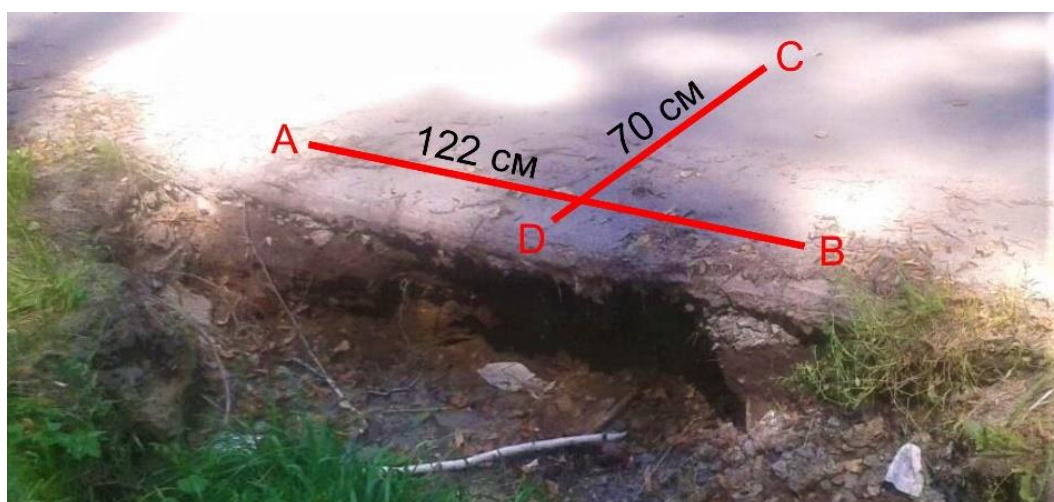


Рис. 11. Промоина под тротуарным асфальтовым покрытием. Красные линии – профили наблюдений.

Примеры осредненных (накопленных) амплитудных спектров для точек наблюдений в стороне от полости и над ней приведены на рис. 12. Как можно видеть, вне полости (см. рис. 12, а) на спектре наблюдаются два резких пика с частотами 37.4 и 74.8 кГц, что согласуется с формулой (1). Эти пики соответствуют двум низшим модам стоячих волн вертикального сжатия–растяжения в асфальтовом слое над грунтом, имеющим меньшую акустическую жесткость. Это подтверждается тем, что такие частоты при известной (измеренной) скорости продольных волн в асфальте ($V_p = 3260$ м/с), согласно формуле (1), соответствуют толщине асфальтового покрытия примерно 4.4 см, что хорошо согласуется с прямыми измерениями толщины слоя над промоиной (4.5 см).

Над полостью (рис. 12, б) осредненный спектр имеет существенные отличия от приведенного на рис. 12, а. Хотя на нем также наблюдаются регулярные пики, соответствующие стоячим волнам сжатия–растяжения практически с теми же, что на рис. 12, а амплитудами, но кроме них в низкочастотной части спектра появляются квазирегулярные пики, которые, как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам.

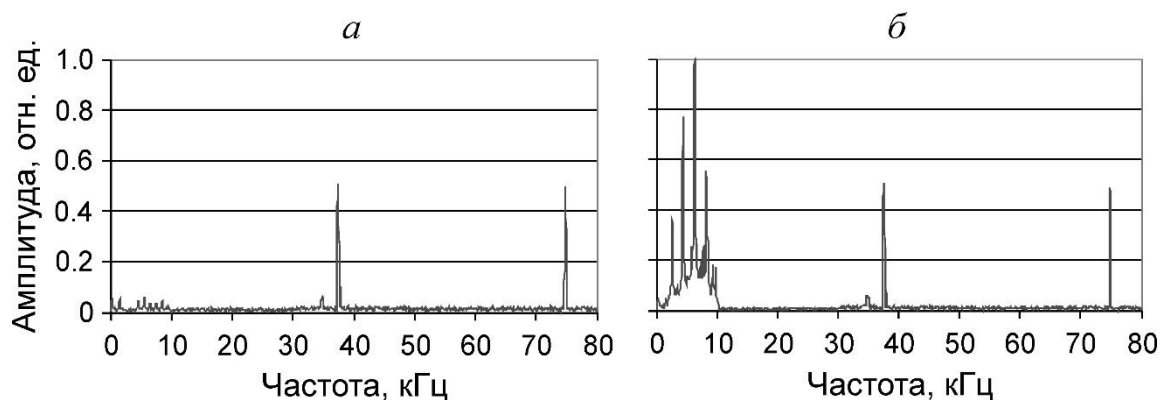


Рис. 12. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, полученных в стороне от промоины (а) и над ней (б).

На рисунке 13 показано распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей вдоль двух профилей, которые показаны на рис. 11 красными линиями. Как можно видеть, амплитуды первой и второй мод стоячих волн вертикального сжатия–растяжения на всей длине профилей не имеют узловых точек, т. к. измерения проводились на дневной поверхности, т. е. в пучностях всех мод этого типа стоячих волн. Во всех точках двух профилей, как и на рис. 12, частота второй моды равна удвоенной частоте первой моды, что согласуется с формулой (1).

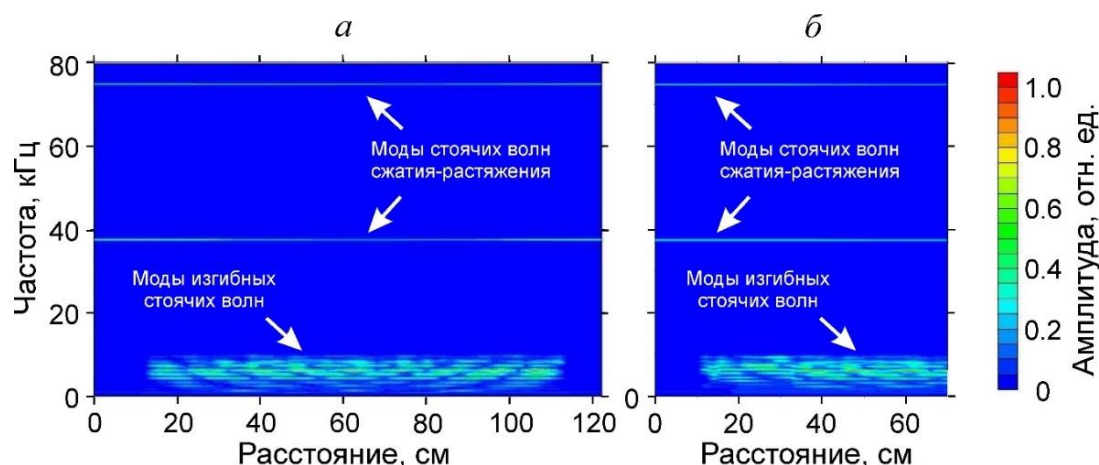


Рис. 13. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей вдоль профилей АВ (а) и CD (б).

В то же время в низкочастотной части спектров на участках профилей, находящихся над промоиной, для каждой моды наблюдается чередование узлов и пучностей, число которых увеличивается с ростом частоты, что характерно при наблюдениях вдоль профиля образующихся в ограниченном теле стоячих волн. В деталях это можно видеть на рис. 14, где в более крупном масштабе представлена низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров.

Наблюдаемые на рис. 14 чередования узлов и пучностей на квазирегулярных частотах отражают формы семейства изгибных стоячих волн, формирующихся под действием акустических шумов в незакрепленном участке асфальтового покрытия над промоиной. То, что это изгибные волны, подтверждается тем, что их частоты существенно ниже частот стоячих волн вертикального сжатия–растяжения и вне промоины колебания на этих частотах отсутствуют.

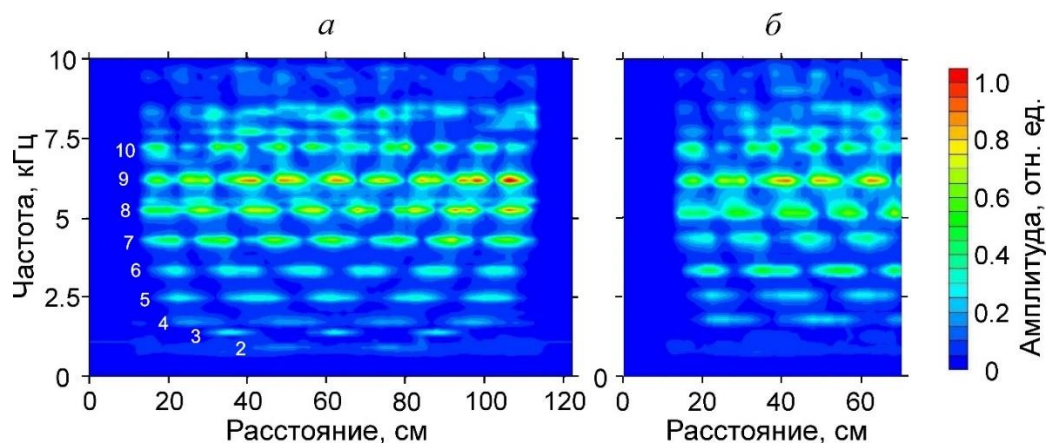


Рис. 14. Низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров, показанных на рис. 13. Цифрами указаны номера мод изгибных стоячих волн.

Проведенный эксперимент показал, что появление полостей под твердым дорожным покрытием приводит к формированию под воздействием акустических шумов на его незакрепленном участке изгибных стоячих волн, которые могут быть использованы для обнаружения таких пустот и оценки их размеров.

Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза

Одним из основных факторов, влияющих на сейсмическую опасность территорий, являются резонансные явления на собственных частотах приповерхностного слоя рыхлого грунта. Для проверки возможности прямого определения резонансных свойств приповерхностных отложений с использованием записей микросейсмических колебаний были проведены эксперименты на территории геофизической обсерватории «Ключи», расположенной примерно в 7 км к востоку от Новосибирского Академгородка (рис. 15, а). На рисунке 15, б показано положение на территории обсерватории 19 точек, в которых регистрировались микросейсм. Восемнадцать пронумерованных на рисунке точек были расположены на неконсолидированных грунтах и одна контрольная точка – на скальной породе в подземном бункере.

Записи микросейсм были получены с помощью регистраторов RefTek-125A и вертикальных и горизонтальных геофонов GS-20DX. Поскольку обсерватория расположена в районе с низким уровнем микросейсм, пассивные сейсмические измерения проводились непрерывно в течение примерно двух недель.



Рис. 15. Географическое положение геофизической обсерватории «Ключи» (а) и схема системы наблюдений на территории обсерватории (б). Треугольниками отмечены места установки сейсмоприемников.

На рисунке 16 показан пример осреднения амплитудных спектров блоков шумовых сигналов длительностью около 8.2 с, записанных вертикальным геофоном в точке номер 1. Как видно на рисунке, осреднение за один день не приводит к появлению резких регулярных пиков в осредненном спектре. Однако после обработки более длительных периодов такие пики появляются (на рис. 16 это пики на частотах 6.06, 18.2 и 30.3 Гц), и их амплитуды постепенно возрастают с увеличением числа осредняемых спектров. При дальнейшем увеличении длительности обрабатываемых записей (более 10 дней) увеличение амплитуд этих пиков резко замедляется.

Регулярность распределения пиков на частотной оси для всех точек наблюдения, расположенных на неконсолидированных грунтах, хорошо согласуется с формулой (2), что указывает на резонансный характер этих пиков. При этом осреднение амплитудных спектров данных микросейсмических колебаний, зарегистрированных на скальной породе в бункере, не приводит к появлению в осредненном спектре каких-либо регулярных пиков.

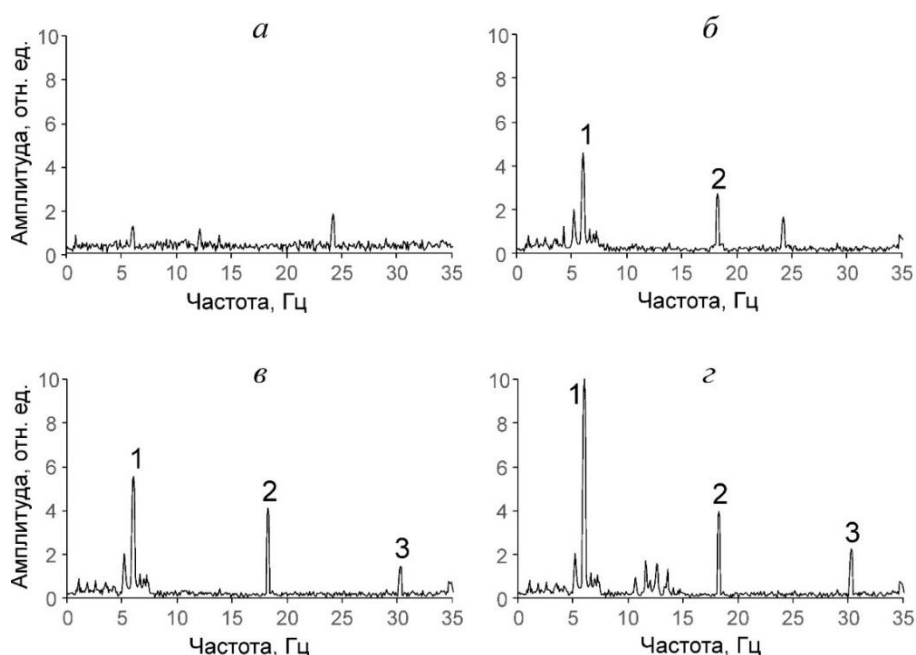


Рис. 16. Результаты накопления амплитудных спектров микросейсм, записанных вертикальным геофоном в точке номер 1 в течение одних (а), трех (б), пяти (в) и десяти (з) суток; цифрами отмечены номера мод стоячих волн.

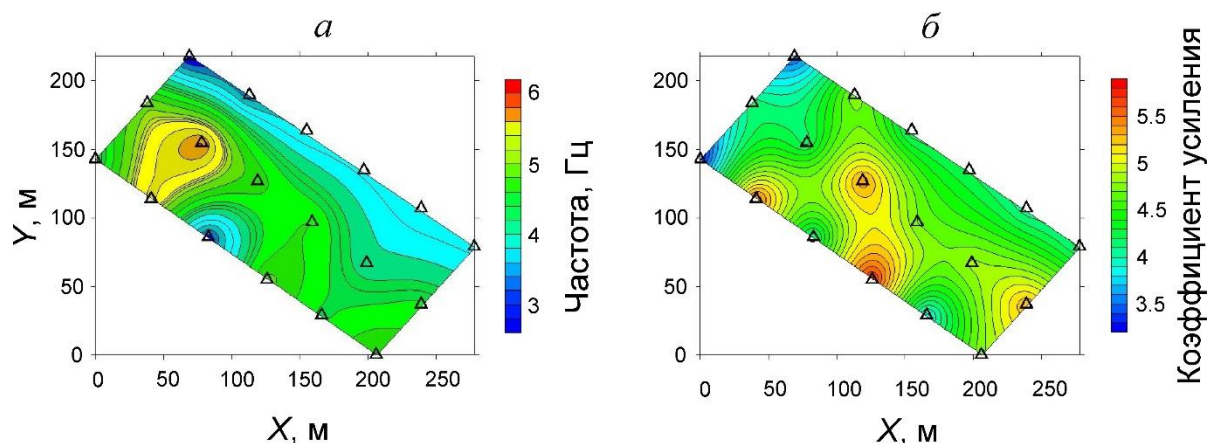


Рис. 17. Карты распределения на участке наблюдений частоты низшей (первой) моды сдвиговых стоячих волн (а) и коэффициента усиления колебаний на этой частоте (б). Треугольниками обозначены точки наблюдений.

После аналогичной обработки микросейсм, зарегистрированных во всех точках наблюдений вертикальными и горизонтальными геофонами, были построены карты частот трех низших мод стоячих волн сжатия–растяжения и сдвига, а также соответствующих коэффициентов усиления колебаний на этих частотах. Примеры таких карт для первой моды сдвиговых стоячих волн приведены на рис. 17. Коэффициенты усиления рассчитывались как отношения амплитуд резонансных пиков к амплитудам соответствующих частотных компонент, полученных для опорной точки на скальной породе в бункере. Карты основаны на данных, зарегистрированных в течение 14 дней.

По найденным частотам стоячих волн сжатия–растяжения и сдвига можно оценить эффективное (среднее по толщине неконсолидированного грунтового слоя) отношение $\gamma = V_s/V_p$, которое, согласно формуле (2), равно отношению частот сдвиговых и продольных стоячих волн одного порядка n . Это позволяет определить эффективный коэффициент Пуассона ν для поверхностных отложений по формуле [Krautkramer, Krautkramer, 1990]:

$$\nu = \frac{1 - 2\gamma^2}{2(1 - \gamma^2)}.$$

На рисунке 18 показано распределение параметров γ и ν на участке наблюдений. Как можно видеть, в пределах зоны наблюдений значения коэффициента Пуассона варьируются в основном в диапазоне 0.1–0.4, что типично для неконсолидированных отложений [Suwal, Kuwano, 2012].

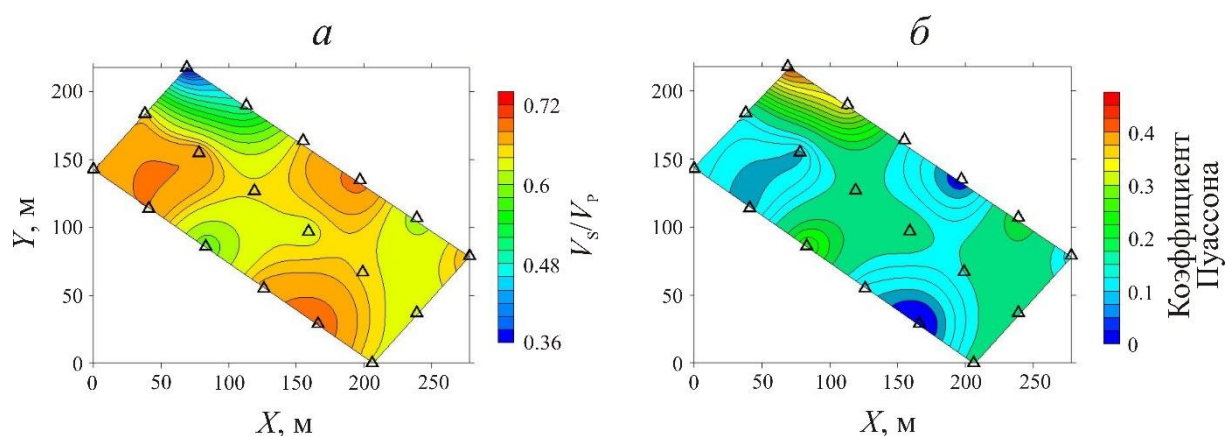


Рис. 18. Карты распределения на участке наблюдений эффективных значений отношения скоростей поперечных и продольных волн (а) и коэффициента Пуассона (б). Точки наблюдения отмечены треугольниками.

В целом, результаты проведенных на территории геофизической обсерватории «Ключи» экспериментов показали, что даже при относительно низком уровне микросейсмических колебаний осреднение амплитудных спектров большого количества шумовых записей позволяет выделить из шумового поля стоячие волны, генерируемые в приповерхностном слое неконсолидированных грунтов. Частоты стоячих волн (собственные частоты слоя) характеризуют приповерхностные резонансные свойства верхней части разреза, а их амплитуды могут быть использованы для расчета коэффициентов усиления относительно колебаний на поверхности скальной породы.

Картирование подземных полостей

Одно из направлений инженерной геофизики связано с поиском и изучением подземных пустот. Это могут быть объекты как естественного, так и искусственного происхождения. К первому типу относятся, в частности, пещеры карстового происхождения.

Для оценки возможностей картирования подземных пустот с использованием метода стоячих волн были проведены микросейсмические наблюдения на поверхности над карстовой пещерой, находящейся примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирска возле с. Барсуково. В настоящее время общая протяженность пещеры считается равной примерно 190–200 м, а доступной для человека части – по разным оценкам от 50 до 100 м. Глубина пещеры в самой глубокой ее части оценивается в 19 м. Вход в пещеру находится в средней части крутого (угол падения 50–70°) каменистого склона высотой несколько десятков метров (рис. 19). Непосредственно выше этого склона земная поверхность имеет более пологий, но местами довольно изрезанный рельеф. На этом участке и были проведены микросейсмические измерения с целью картирования Барсуковской пещеры.



Рис. 19. Склон на правом берегу р. Укроп (а), на котором находится вход в Барсуковскую пещеру (б).

Для записи микросейсм применялись регистраторы RefTek-125A и вертикальные геофоны GS-20DX. Регистрация микросейсм проводилась на площадной системе наблюдений в пределах участка размером примерно 24×34 м² в узлах квадратной сетки с шагом 0.5 м.

Записи от вертикальных геофонов использовались для определения частот стоячих волн сжатия–растяжения, генерируемых микросейсмами в породах над сводами пещеры. Для этого при обработке записи разбивались на фрагменты примерно по 8.2 с, вычислялись их амплитудные спектры и проводилось их осреднение.

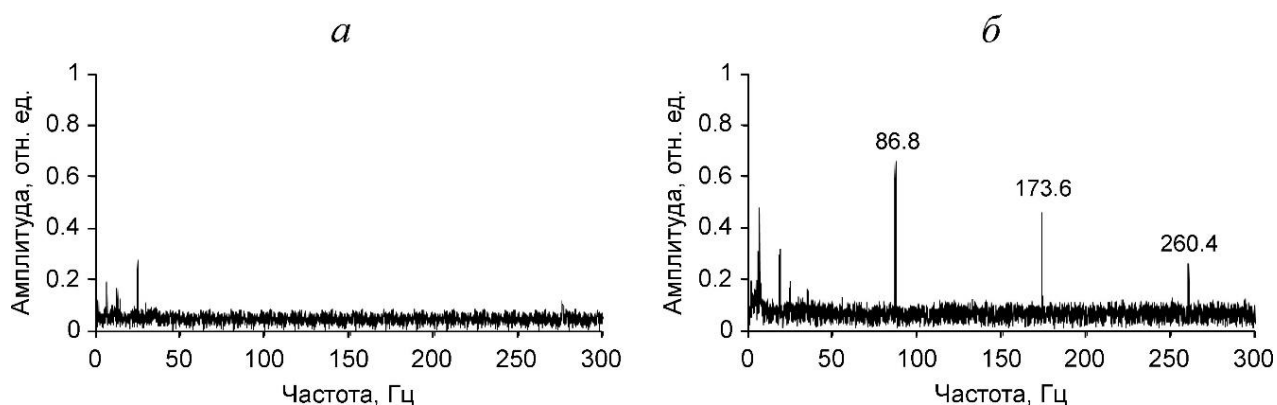


Рис. 20. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над ненарушенным породным массивом (а) и над пещерой (б).

Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над сплошным породным массивом и над одним из гротов пещеры в самой ее глубокой части, приведены на рис. 20. Как можно видеть, над ненарушенным массивом (см. рис. 20, а) на спектре не наблюдается каких-либо регулярных пиков. В то же время над кровлей грота пещеры (см. рис. 20, б) на спектре выделяются три резких пика, частоты которых кратны частоте низшей моды (86.8, 173.6 и 260.4 Гц), что согласуется с формулой (1). Это позволяет с высокой долей уверенности предположить, что это резонансные пики, соответствующие образующимся между земной поверхностью и кровлей пещеры первым трем модам стоячих волн.

Нужно заметить, что в точках наблюдений над ходами и гротами, расположенными на меньших глубинах, из-за ограниченного частотного диапазона геофонов и регистраторов удавалось выделить на спектрах только две, а при мелком залегании сводов пещеры лишь одну низшую моду стоячих волн. В последнем случае только густая сеть наблюдений позволяла уверенно идентифицировать низшую моду при последовательном переходе от точки к точке.

Поскольку только низшая мода стоячих волн вертикального сжатия–растяжения прослеживается над сводами пещеры на всей площади наблюдений, то для картирования использовалась именно эта мода. На рисунке 21 показана карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия–растяжения. Для точек, в которых резонансные пики не выделялись (например, как на рис. 20, а) или измерения не проводились, частота f_1 принималась равной нулю, что формально соответствует слоям бесконечной мощности.

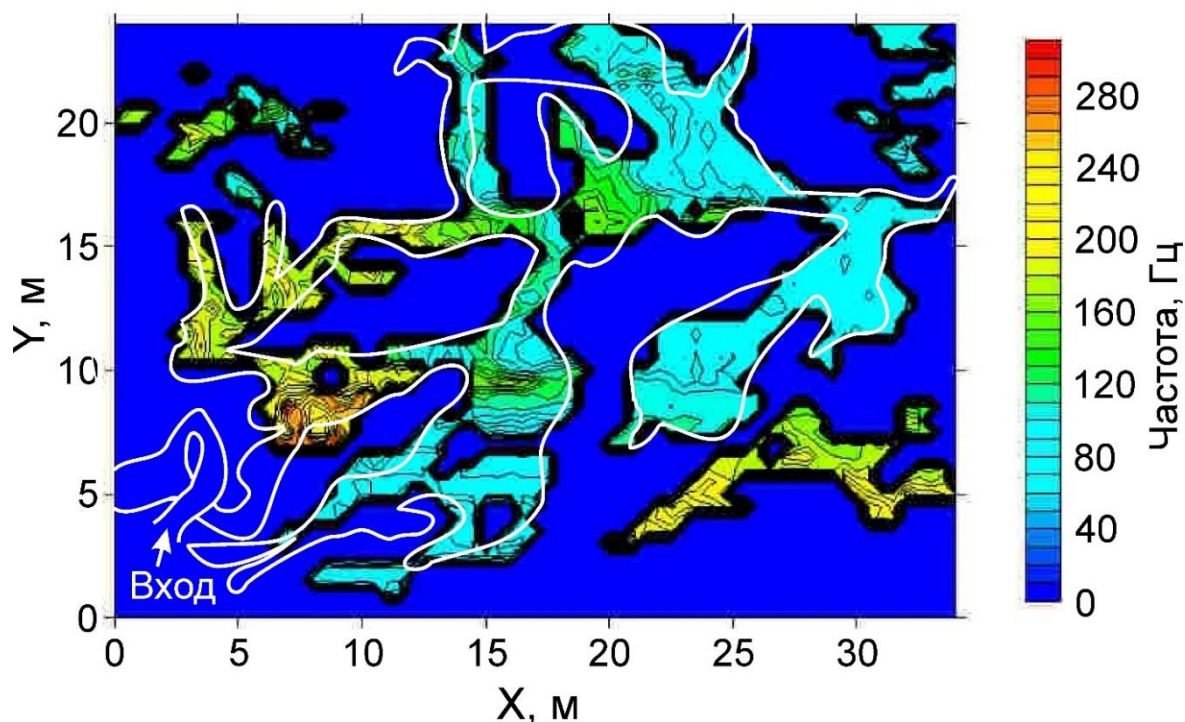


Рис. 21. Карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия–растяжения; белой линией показаны контуры пещеры со схемы, составленной спелеологом С. Пешковым.

Для сравнения на карте белой линией показаны контуры пещеры со схемы, составленной ориентировочно еще в семидесятых–восемидесятых годах прошлого века спелеологом С. Пешковым. Схема скопирована с сайта новосибирского туристского клуба «Экватор» (<http://tk-ekvator.ru>).

В окрестности входа в пещеру экспериментальные данные отсутствуют, т. к. наблюдения там не проводились из-за большой крутизны склона. В остальной же части участка при хорошем совпадении двух карт можно заметить и различия. Например, согласно карте, построенной методом стоячих волн, кроме самой пещеры в ее окрестности находится несколько обособленных пустот меньшего размера.

В целом, согласно полученным результатам, пассивный сейсмический метод стоячих волн показал себя эффективным инструментом для картирования подземных пустот.

Контроль толщины ледяного покрова на водоемах

Необходимость измерения толщины образующегося над водной поверхностью при отрицательных температурах ледяного покрова может возникать при решении множества практических задач: обеспечения безопасного передвижения людей по замерзшим водоемам и транспортных средств по ледовым переправам и автозимникам, прогнозирования паводков и т. д.

Для оценки возможностей применения пассивного метода стоячих волн по определению толщины ледяного покрова проведены натурные эксперименты на двух водоемах возле Новосибирского Академгородка – на небольшой реке Зырянка (приток Оби) и возле береговой линии пляжа «Звезда» на Новосибирском водохранилище. Регистрация шумовых записей проводилась в конце января–начале февраля на двух линейных профилях. На реке профиль длиной 20 м был ориентирован вдоль берегов и находился примерно в ее средней части, причем заведомо над водой. На пляже «Звезда» профиль наблюдений длиной 15 м был примерно перпендикулярен к береговой линии и располагался частично над водой, частично над мерзлым песком. Схематически положение профилей на льду и строение среды под ними показано на рис. 22.

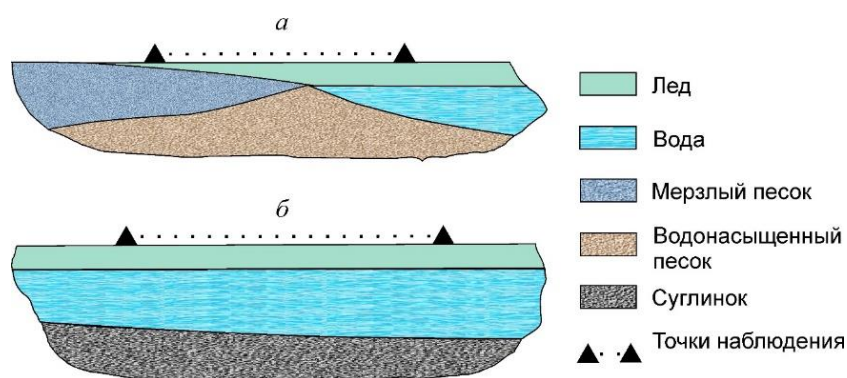


Рис. 22. Схема расположения профилей наблюдений на ледяном покрове на р. Зырянка (а) и в районе пляжа «Звезда» на Новосибирском водохранилище (б).

Регистрация шумовых сигналов производилась на поверхности ледяного покрова водоемов с помощью цифрового осциллографа В-423 и вертикального широкополосного пьезокерамического датчика. Шаг между точками наблюдений на профилях равнялся 1 м, длительность шумовых записей в каждой точке составляла 30 с при наблюдениях на р. Зырянка и 2 мин на пляже «Звезда».

При обработке шумовые записи разбивались на фрагменты длительностью примерно 8.2 мс, после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. Частоты выделяемых на осредненных амплитудных спектрах резонансных пиков использовались для определения по формуле (4) толщины ледяного покрова в точках наблюдений. При этом предполагалось, что скорость продольных волн V_p для льда известна и в разных точках наблюдений меняется незначительно.

На рисунке 23 приведены примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на двух участках наблюдений. Как можно видеть, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить несколько регулярных пиков, отмеченных на рисунке цифрами.

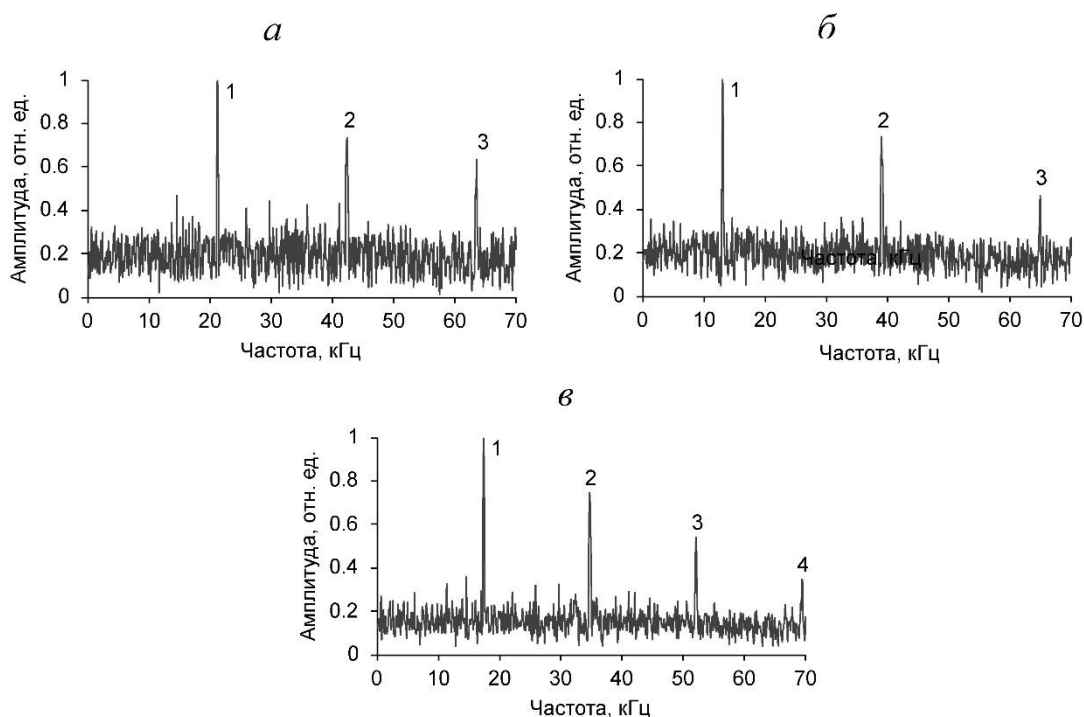


Рис. 23. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных возле береговой линии пляжа «Звезда» на льду, лежащем на воде (а) и над мерзлым песком (б); спектр шумовой записи на ледяном покрове р. Зырянка (в).

Там, где лед покрывает более низкоскоростную относительно него воду (рис. 23, а, в) с меньшей акустической жесткостью, эти пики расположены на оси частот с высокой точностью в соответствии с формулой (1). Например, на рис. 23, а частоты первых четырех мод стоячих волн имеют значения 17.4, 34.8, 52.1 и 69.5 кГц, а на рис. 23, в частоты первых трех мод стоячих волн равны 21.2, 42.4 и 63.6 кГц. В то же время над мерзлым песком (рис. 23, б) частоты пиков равны 13.0, 39.0 и 64.9 кГц, т. е. их распределение на оси частот согласуется с формулой (2). Это говорит о большей акустической жесткости подстилающей среды в сравнении со льдом (в основном, по-видимому, из-за более высокой плотности минеральных зерен песка).

Регулярность пиков на амплитудных спектрах и согласие их частот с формулами (1) для льда над менее акустически жесткой водой и (2) над более акустически жестким мерзлым песком позволяет считать эти пики соответствующими стоячим волнам сжатия–растяжения на собственных частотах ледового слоя. То, что это волны сжатия–растяжения, подтверждает сопоставление результатов прямого измерения толщины льда в контрольной лунке и расчет этой толщины по формуле (4).

Контрольная лунка была пробурена в районе пляжа «Звезда» в нескольких метрах от берега в месте, где подо льдом находилась вода, а не мерзлый грунт. Измеренная рулеткой толщина льда в контрольной лунке составила примерно 10.2 см. Полученный при бурении керн льда был использован для измерения импульсным методом скорости V_p продольных волн. По записанному рядом с лункой шуму

была определена частота низшей моды $f_1=19.9$ кГц, которая в случае льда, покрывающего воду, совпадает с интервалом Δf (как, например, на рис. 23, а, в). Для этой частоты и измеренной в керне льда скорости $V_p=4090$ м/с формула (4) дает значение $l=10.3$ см, близкое к толщине льда, измеренной прямым методом. Таким образом, эти измерения подтверждают корректность применения рассматриваемого метода для определения толщины ледяного покрова водоемов.

На рисунке 24 показано рассчитанное по формуле (4) распределение толщины льда вдоль профилей, на которых были выполнены шумовые измерения. При расчетах использовались определенные по осредненным спектрам интервалы Δf и измеренная скорость продольных волн $V_p=4090$ м/с. Как можно видеть, на р. Зырянка толщина льда составила в среднем примерно 11 см, ее изменения вдоль профиля в основном не превышали 3 см. На Новосибирском водохранилище (возле пляжа «Звезда») толщина льда над водой примерно такая же – порядка 10–11 см. Но на метровом интервале между точками 8 и 9, где в основании ледового слоя мерзлый грунт замещается водой, наблюдается более резкое изменение толщины льда, связанное, вероятно, с уменьшением глубины и наклона поверхности мерзлого грунта подо льдом.

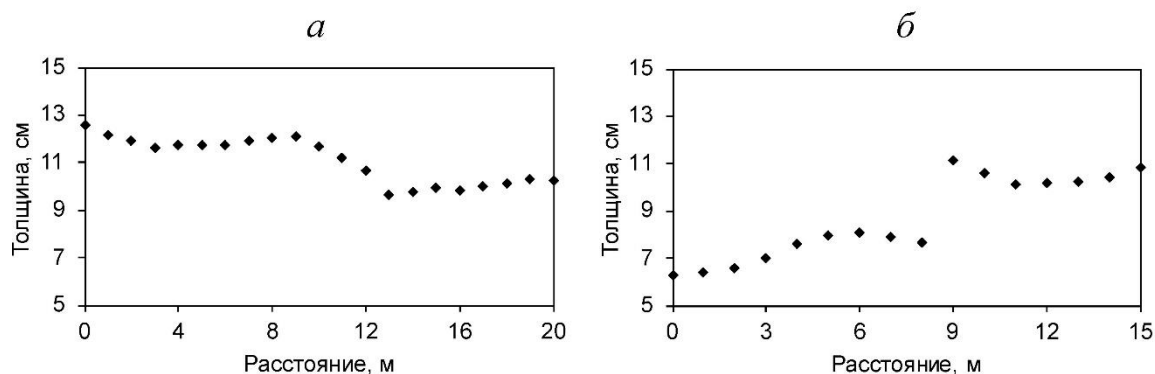


Рис. 24. Распределение толщины льда вдоль профилей наблюдений на р. Зырянка (а) и на пляже «Звезда» (б).

В целом, результаты натурных измерений подтвердили перспективность использования стоячих волн для определения толщины ледового покрова на водоемах, а также типа подстилающей его среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры использования пассивного сейсмического метода стоячих волн в предложенной авторами модификации показали его высокую эффективность при решении широкого класса задач инженерной сейсмологии, а также некоторых подобных задач в акустическом и ультразвуковом диапазонах частот. В данной модификации выделение стоячих волн из шумовых записей, полученных в разных точках системы наблюдений в разные временные периоды, происходит в результате накопления для каждой точки большого числа фрагментов амплитудных спектров микросейсмических (шумовых) записей.

Эксперименты проводились как на природных, так и на техногенных объектах на разных масштабных уровнях – от карстовой пещеры до ледяного покрова водоемов. Информативными параметрами в данном методе являются как частоты, так и амплитуды стоячих волн. На практике из этих двух параметров предпочтительнее использовать частоты, т. к. они менее зависимы от характеристик источника (в данном случае микросейсмического поля) и на точность их определения намного меньше

вливают параметры используемой аппаратуры, в частности ее амплитудно-частотные характеристики. С другой стороны, амплитуды позволяют визуализировать и анализировать формы стоячих волн, но это возможно только в случае регистрации микросейсмических данных вдоль профиля стоячей волны.

В целом эксперименты показали высокую эффективность модифицированного метода стоячих волн и его более широкие возможности в сравнении с первоначальным вариантом метода, который предполагает когерентность колебаний во всех точках наблюдений. А это требование не выполняется для многих объектов исследования, как, например, в некоторых описанных выше экспериментах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Ахтямов А.М., Шагиев В.Р. Идентификация неупругих видов закреплений трубопроводов // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21, № 1. С. 21–26. EDN:XHOQXV.

Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г., Децик Д.В., Еманов А.А., Полянский П.О., Дураченко А.В., Рыбушкин А.Ю. Высокоточные определения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний плотин средненапорных ГЭС // Вопросы инженерной сейсмологии. 2025а. Т. 52, № 1. С. 120–131. doi:10.21455/VIS2025.1-6. EDN:UEYURX.

Бах А.А., Еманов А.Ф., Шеболтасов А.Г., Еманов А.А., Полянский П.О. Высокоточные измерения методом стоячих волн характеристик собственных колебаний здания Иркутской ГЭС // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2025б. № 5. С. 60–72. doi:10.37153/2618-9283-2025-5-60-72. EDN:ENBJUV.

Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 4. С. 37–64. EDN:VOXXGR.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 2. С. 192–207. EDN:AXGPLV.

Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 3. С. 20–24. EDN:IAWNLF.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Клецин В.И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2018. № 4 (35). С. 28–33. EDN:YYWVZR.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов А.А. Инженерно-сейсмологический мониторинг зданий и сооружений: физико-математические основы метода, возможности, результаты // Научный вестник Арктики. 2019. № 7. С. 34–43. EDN:HESZPN.

Еманов А.Ф., Бах А.А., Еманов Ф.А. Изучение вертикальных собственных колебаний зданий методом стоячих волн // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47, № 4. С. 43–54. doi:10.21455/VIS2020.4-3. EDN:FLPPQP.

Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсмам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. 2015. № 4. С. 89–96. doi:10.18303/1813-4254-2015-4-89-96. EDN:VLKGEN.

Колесников Ю.И., Федин К.В. Применение пассивного метода стоячих волн в инженерной сейсмике: физическое моделирование и натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. 2016. № 2. С. 83–91. doi:10.18303/1813-4254-2016-2-83-91. EDN:WTHQBT.

Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 2. С. 153–167. doi:10.15593/perm.mech/2014.2.07. EDN:SHKEPZ.

Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.

Шагиев В.Р., Ахтямов А.М. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот // Математические структуры и моделирование. 2018. № 1 (45). С. 95–107. doi:10.24147/2222-8772.2018.1.95-107. EDN:YSIBSD.

Юзбеков Н.С. Проблемы оценки состояния грунтовых плотин // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (6). С. 62–65. EDN:KVUODV.

Kramer S.L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996. 653 p.

Krautkramer J., Krautkramer H. Ultrasonic testing of materials. 4th Edition. Springer-Verlag, Berlin, 1990. 677 p. doi:10.1007/978-3-662-10680-8.

Suwal L.P., Kuwano R. Poisson's ratio evaluation on silty and clayey sands on laboratory specimens by flat disk shaped piezo-ceramic transducer // Bulletin of ERS. 2012. Vol. 45. P. 141–158.

Yuen K.-V., Kuok S.-C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // Engineering Structures. 2010. Vol. 32 (8). P. 2379–2386. doi:10.1016/j.engstruct.2010.04.012.

REFERENCES

Akhtyamov A.M., Shagiev V.R. Identification of nonelastic fastenings types of pipeline // Bulletin of the Bashkir University. 2016. Vol. 21 (1). P. 21–26 (In Russ.).

Bach A.A., Emanov A.F., Sheboltsov A.G., Decik D.V., Emanov A.A., Polyansky P.O., Durachenko A.V., Rybushkin A.Yu. High-precision determinations of the characteristics of natural oscillations of medium-pressure hydroelectric power station dams by the standing wave method // Seismic Instruments. 2025. Vol. 61 (1). P. 48–57. doi:10.3103/S074792392570029X. EDN:ODOAKL.

Bach A.A., Emanov A.F., Sheboltsov A.G., Emanov A.A., Polyansky P.O. High-precision standing waves measurements of the natural oscillation characteristics of the Irkutsk HPP building // Earthquake Engineering. Constructions Safety. 2025. No. 5. P. 60–72 (In Russ.). doi:10.37153/2618-9283-2025-5-60-72.

Emanov A., Krasnikov A. The use of standing waves method in study of seismically isolated buildings // Problems of Engineering Seismology. 2015. Vol. 42 (4). P. 37–64 (In Russ.).

Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Gritsenko S.A., Danilov I.A., Kuz'menko A.P., Saburov V.S., Tat'kov G.I. Standing waves in engineering seismology // Russian Geology and Geophysics. 2002. Vol. 43 (2). P. 181–196. EDN:TNSYOL.

Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A. Coherent reconstruction of standing-wave fields as a basis for detailed seismological study of engineering structures // Earthquake Engineering. Constructions Safety. 2007. No. 3. P. 20–24 (In Russ.).

Emanov A.F., Bach A.A., Kletsin V.I. Standing waves in the dams of the Boguchan and Chirkean hydroelectric power stations // Natural and Technological Risks. Building Safety. 2018. Vol. 4 (35). P. 28–33. (In Russ.).

Emanov A.F., Bakh A.A., Emanov A.A. Engineering and seismological monitoring of buildings and structures: physical and mathematical foundations of the method, possibilities, results // Scientific Bulletin of the Arctic. 2019. No. 7. P. 34–43 (In Russ.).

- Emanov A.F., Bakh A.A., Emanov F.A.** Studying vertical natural vibrations of buildings by the standing wave method // *Seismic Instruments*. 2021. Vol. 57 (2). P. 163–172. doi:10.3103/s0747923921020225. EDN:TWJAVC.
- Khaykin S.E.** Physical foundations of mechanics (In Russ.). 2nd Ed. Nauka, Moscow, 1971. 752 p.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Detection of underground cavities using microtremor: physical modelling // *Seismic Technologies*. 2015. No. 4. P. 89–96 (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2015-4-89-96.
- Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.** Application of passive standing wave method in engineering seismics: physical modelling and field experiment // *Seismic Technologies*. 2016. No. 2. P. 83–91 (In Russ.). doi:10.18303/1813-4254-2016-2-83-91.
- Korepanov V.V., Tsvetkov R.V.** Seasonal changes in eigenfrequencies of structures supported on pile foundation // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 2. P. 153–167 (In Russ.). doi:10.15593/perm.mech/2014.2.07.
- Kramer S.L.** Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1996. 653 p.
- Krautkramer J., Krautkramer H.** Ultrasonic testing of materials. 4th Edition. Springer-Verlag, Berlin, 1990. 677 p. doi:10.1007/978-3-662-10680-8.
- Shagiev V.R., Akhtyamov A.M.** Identification of pipe fastening using the minimum number of natural frequencies // *Mathematical Structures and Modeling*. 2018. No. 1 (45). P. 95–107 (In Russ.).
- Suwal L.P., Kuwano R.** Poisson's ratio evaluation on silty and clayey sands on laboratory specimens by flat disk shaped piezo-ceramic transducer // *Bulletin of ERS*. 2012. Vol. 45. P. 141–158.
- Yuen K.-V., Kuok S.-C.** Ambient interference in long-term monitoring of buildings // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32 (8). P. 2379–2386. doi:10.1016/j.engstruct.2010.04.012.
- Yuzbekov N.S.** Problems of assessing the condition of earth dams // *Civil Security Technology*. 2004. No. 2 (6). P. 62–65 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЛЕСНИКОВ Юрий Иванович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: физическое моделирование сейсмических волновых полей, пассивный метод стоячих волн, инженерная сейсмология, натурные сейсмические эксперименты.

ФЕДИН Константин Владимирович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмологии Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. Основные научные интересы: экспериментальная сейсмология, инженерная сейсмология, физическое и компьютерное моделирование стоячих волн.

*Статья поступила в редакцию 30 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 12 февраля 2026 г.,
принята к публикации 12 февраля 2026 г.*