

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

К. В. ФЕДИН

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ
СТОЯЧИХ ВОЛН
НА СООРУЖЕНИЯХ
ДЛЯ ГЕОЛОГО-ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2021

УДК 550.344.33:550.837(075.8)

Ф 326

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук *Г. М. Митрофанов*

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. *И. В. Михайлов*

Работа подготовлена на кафедре геофизических систем
и предназначена для студентов старших курсов,
специализирующихся в геофизике и геофизических методах
разведки полезных ископаемых

Федин К. В.

Ф 326 Практическое применение стоячих волн на сооружениях
для геолого-инженерных изысканий: учебное пособие / К. В. Фе-
дин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 63 с.

ISBN 978-5-7782-4541-9

Рассматривается теория и практика геофизических методов исследова-
ния, а именно выделение стоячих волн из микросейсм, измерение
скоростей на образцах, математическое моделирование методом ко-
нечных элементов, приводится пример применения стоячих волн на
предмет диагностики состояния дорожного покрытия, а также возмож-
ность определения пустот под бетонными плитами крепления верхо-
вых откосов плотины по акустическим шумам, приводится пример кар-
тирования карстовых пещер.

Приведена область применения данных методов. Обсуждаются ре-
зультаты, которые необходимо получить в ходе данного курса.

Предназначено для студентов старших курсов, которые специали-
зируются по геофизике и геофизическим методам разведки полезных
ископаемых.

УДК 550.344.33:550.837(075.8)

ISBN 978-5-7782-4541-9

© Федин К. В., 2021

© Новосибирский государственный
технический университет, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Диагностика твердого дорожного покрытия по упругим стоячим волнам	6
1.1. Обоснование применения упругих стоячих волн для диагностики твердых дорожных покрытий	7
1.2. Объект исследования и методика наблюдений	9
1.3. Результаты обработки шумовых данных, полученных над полостью и рядом с ней	11
1.4. Возможности контроля толщины твердого дорожного покрытия и качественной оценки жесткости его основания по стоячим волнам сжатия-растяжения	17
Выводы	19
2. Определение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС по акустическим шумам	20
2.1. Метод акустического исследования	22
2.2. Результаты экспериментов акустическим методом	23
Выводы	28
3. Глубинность метода обнаружения подземных пустот по микросейсам	30
3.1. Обоснование применения упругих стоячих волн для обнаружения подземных пустот	31
3.2. Объект исследования и методика наблюдений	32
3.3. Результаты обработки шумовых данных	34
Выводы	35

4. Картирование подземных пустот методом стоячих волн (на примере Барсуковской пещеры)	37
4.1. Объект исследования	39
4.2. Обоснование метода выделения стоячих волн из микросейсма для картирования пещеры	41
4.3. Методика наблюдений и обработки экспериментальных данных	46
4.4. Результаты картирования пещеры и их обсуждение	51
Выводы	54
Вопросы для самоконтроля и задачи	56
Приложение. Задачи по гармоническим колебаниям	57
Библиографический список	59

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее издание является продолжением учебного пособия «Практическое применение стоячих волн на инженерных сооружениях» (Часть 1) и представляет собой введение в теорию и практику экспериментальных методов в геофизике. Здесь приведены примеры обнаружения пустот для различных инженерных задач.

Изложена теория и практика методов геофизических исследований, а именно: отделение стоячих волн от микросейсмов, измерение скоростей проб, математическое моделирование методом конечных элементов, пример использования стоячих волн для диагностики состояния дорожного покрытия, а также возможность определения пустот под бетонными плитами для закрепления откосов вверх по течению, плотин акустического шума, приведен пример картирования карстовых каверн.

Рассмотрена сфера применения этих методов. Кроме того, обсуждены результаты, которые будут получены в ходе изучения этого курса.

Предназначено для студентов старших курсов, приобретающих знания по специальностям геофизика и геофизические методы разведки полезных ископаемых.

1. ДИАГНОСТИКА ТВЕРДОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ ПО УПРУГИМ СТОЯЧИМ ВОЛНАМ

Для обеспечения безопасной эксплуатации автомобильных дорог необходимо периодически контролировать состояние дорожного покрытия. Такой контроль может осуществляться различными методами: с помощью визуального осмотра, бурением с отбором и последующим анализом керна, измерением прогиба дефлектометрами и т. д.

В последнее время для исследования качества и состояния дорожных покрытий все шире применяются методы малоглубинной геофизики. Наиболее часто для решения таких задач используют георадарные технологии [1–9], но известны также примеры применения для исследования состояния дорог и других геофизических методов, например, электротомографии [10], емкостного метода [11], сейсмоакустики [12–13].

Несмотря на разнообразие применяемых для контроля дорожного покрытия методов и решаемых с их помощью задач, точность и достоверность получаемых результатов не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Например, наиболее массово применяемые в последнее время для диагностики твердых дорожных покрытий георадарные технологии уверенно выделяют контрастные неоднородности под дорожным покрытием, но зачастую не позволяют определить их тип, а именно отличить образовавшуюся под покрытием полость от каких-то иных неоднородностей.

В то же время одна из актуальных проблем диагностики автомобильных дорог связана именно с появлением пустот под их асфальтобетонным покрытием. Такие пустоты могут возникать вследствие

размыва подстилающих твердое дорожное покрытие грунтов, сезонных изменений, вызванных вспучиванием грунта при замерзании и проседанием при оттаивании и т. д. Опасность существования таких пустот связана, в частности, с тем, что, не проявляясь визуально, при определенных условиях (увеличении их размеров, нагрузки от проходящего транспорта и др.) они могут привести к мгновенному разрушению твердого дорожного покрытия над ними, что может спровоцировать аварийную ситуацию на дороге.

В настоящей работе приведены результаты исследования возможности применения упругих стоячих волн для обнаружения и оконтуривания пустот под твердым дорожным покрытием, а также для контроля его толщины и оценки соотношения акустических жесткостей покрытия и нижележащего слоя.

1.1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТВЕРДЫХ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

В ранее опубликованных работах [14–16] для обнаружения подземных пустот был предложен пассивный сейсмический метод, основанный на выделении из шумового поля стоячих волн, образующихся под воздействием микросейсм в пространстве между дневной поверхностью и ближайшей к ней резкой границей – верхней поверхностью полости или подошвой зоны малых скоростей (ЗМС). Как показали результаты физического моделирования и натуральных экспериментов, накопление большого числа амплитудных спектров относительно коротких фрагментов шумовых записей приводит к появлению на осредненном спектре регулярных пиков, соответствующих стоячим волнам. Критерием 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 дневной 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; h – расстояние от верхней границы полости до дневной поверхности.

Если же стоячие волны формируются вне полости (над подошвой ЗМС), то на нижней границе ЗМС с жесткими породами образуются узлы стоячих волн, и частоты последних равны нечетным числам частоты низшей моды:

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

здесь h – глубина до подошвы ЗМС. И в том и другом случае интервал между соседними собственными частотами $\Delta f = (f_{n+1} - f_n)$ равен $V_p / 2h$.

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.

Однако в случае твердого дорожного покрытия, уложенного на более мягкое основание, очевидно, что при неизменных упругих свойствах и толщине покрытия частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в нем практически не должны зависеть от того, лежит оно на грунте или под ним образовалась пустота. И в том и другом случае как на верхней, так и на нижней границе покрытия будут наблюдаться пучности стоячих волн, а их частоты определяются формулой (1). Таким образом, частоты стоячих волн сжатия-растяжения не могут быть использованы для обнаружения пустот под покрытием, хотя, как будет показано ниже, они вполне могут служить индикатором изменения толщины покрытия и характера подстилающего слоя.

В то же время, если горизонтальные размеры находящейся под покрытием полости существенно превышают его толщину, то часть покрытия над полостью может рассматриваться как закрепленная по ее периметру (или его части) пластина, в которой возможно формирование изгибных стоячих волн. Свойства этих волн существенно отличаются

от свойств стоячих волн вертикального сжатия-растяжения. Во-первых, частоты этих волн должны быть значительно ниже частот стоячих волн сжатия-растяжения из-за более низкой скорости изгибных волн и преобладания горизонтальных размеров незакрепленной части пластины над вертикальными. Во-вторых, при достаточно детальном измерении на поверхности пластины можно наблюдать формы разных мод изгибных стоячих волн, их узлы и пучности. В-третьих, в этом случае связанные со стоячими волнами квазирегулярные пики должны располагаться на оси частот осредненных спектров не на равном расстоянии друг от друга из-за сильной частотной зависимости (дисперсии) скорости изгибных волн.

Как будет показано ниже, указанные свойства изгибных стоячих волн могут быть использованы для выявления пустот под твердым дорожным покрытием и для оценки их размеров.

1.2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Для оценки возможности диагностики твердых дорожных покрытий по упругим стоячим волнам были проведены опытные работы по регистрации шумовых записей на тротуаре (ул. Пирогова в Новосибирском Академгородке, рис. 1, *а*). Тротуар имеет твердое покрытие, верхняя часть которого – слой асфальта толщиной, по визуальным оценкам, в среднем 4...4,5 см. На тротуаре были выполнены как профильные наблюдения с шагом 10 м на всем протяжении улицы (общей длиной порядка 1800 м), так и детальное площадное наблюдение над промоиной, образовавшейся под асфальтовым покрытием у его кромки (рис. 1, *б*).

Размеры промоины составляли примерно 105 см вдоль кромки тротуара и 65...70 см в самом широком месте в поперечном направлении. На этом участке измерения проводились в узлах квадратной сетки на площадной системе наблюдений с размерами 120 см в направлении вдоль тротуара и 70 см – поперек него с шагом 2 см между соседними точками наблюдений. Из-за неровного края тротуарного покрытия вблизи его кромки (в полосе, шириной примерно 7...10 см) наблюдения

не проводились. Об относительных размерах системы наблюдений и промоины под асфальтовым покрытием дают представление два перпендикулярных профиля, показанные на рис. 1, б красными линиями. Данные для этих профилей анализировались более детально, чем для остальных точек площадной системы наблюдений.



a



б

- Улица Пирогова
- ← Пересечения с автомобильными въездами
- ← Примерное положение промоины
- Профили наблюдений

Рис. 1. Схема участка проведения работ (*a*); положение двух перпендикулярных профилей площадной системы наблюдений над образовавшейся под асфальтовым покрытием промоиной (*б*)

По предварительным оценкам, частоты нескольких низших мод семейств, исследуемых в данной работе стоячих волн (изгибных и вертикального сжатия-расширения), для объектов типа асфальтовых покрытий и полостей под ними должны находиться в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц. Поэтому для регистрации шумовых сигналов была использована уже применявшаяся в лабораторных экспериментах

по физическому моделированию [14–16] аппаратура, обеспечивающая запись сигналов в таком частотном диапазоне – цифровой осциллограф В-423 с частотой дискретизации 1 МГц и широкополосный пьезокерамический датчик поршневого типа диаметром 2 мм.

Для сокращения времени наблюдений на асфальтовое покрытие производилось дополнительное шумовое воздействие при помощи щетки с жесткой щетиной. При этом длительность шумовых записей в каждой точке составляла примерно 6,5 с, что оказалось достаточным для уверенного выделения стоячих волн из шума. Заметим, что для достижения аналогичного эффекта при регистрации естественных шумов пришлось бы проводить измерения в каждой точке в течение не менее 20 мин.

1.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ШУМОВЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ НАД ПОЛОСТЬЮ И РЯДОМ С НЕЙ

При обработке шумовые записи разбивались на фрагменты, равные примерно 33 мс ($2^{15} = 32\,768$ отсчетов) каждый, после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. Примеры осредненных (накопленных) амплитудных спектров для точек наблюдений в стороне от полости и над ней показаны на рис. 2. Как видим, вне полости на спектре наблюдаются два резких пика с частотами 37,4 и 74,8 кГц, что соответствует формуле (1).

Эти пики (см. рис. 2) соответствуют стоячим волнам вертикального сжатия-растяжения. Их частоты при известной скорости V_p продольных волн в асфальте позволяют оценить по формуле (1) толщину асфальтового покрытия. Измерения, выполненные импульсным методом на поверхности асфальта, дали примерное значение скорости $V_p = 3260$ м/с. Для скорости V_p и определенной по осредненному спектру частоте низшей моды стоячих волн ($f_1 = 37,4$ кГц) толщина слоя асфальта (согласно формуле (1)) равна примерно 4,4 см, что соответствует визуальным оценкам в 4,5 см.

Над полостью (рис. 2, б) осредненный спектр имеет существенные отличия от спектра, изображенного на рис. 2, а. Хотя на рис. 2, б также

наблюдаются регулярные пики, соответствующие стоячим волнам сжатия-растяжения, практически с теми же, что изображены на рис. 2, *a* частотами и амплитудами. Кроме них в низкочастотной части спектра появляются квазирегулярные пики, которые, как будет показано ниже, соответствуют изгибным стоячим волнам.

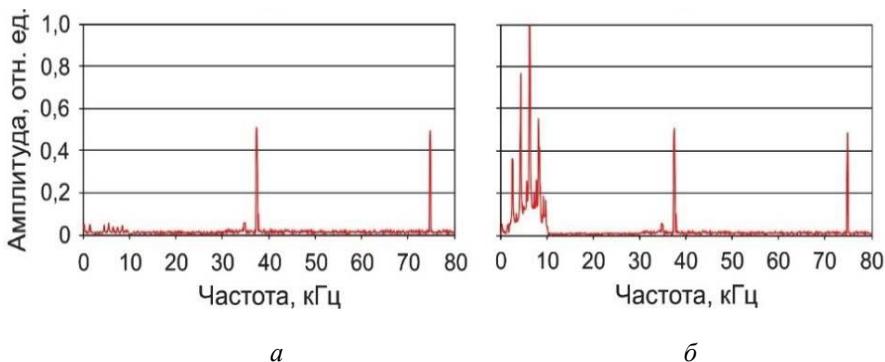


Рис. 2. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, полученных в стороне от промоины (*a*) и над ней (*б*)

На рис. 3 представлены средненные амплитудные спектры шумовых записей, зарегистрированных во всех точках двух профилей, которые показаны на рис. 1 красными линиями. Как видим, амплитуды первой и второй моды стоячих волн вертикального сжатия-растяжения на всей длине профилей не имеют узловых точек, так как измерения проводились на дневной поверхности, т. е. в пучностях всех мод этого типа стоячих волн. Во всех точках двух профилей, как показано на рис. 2, частота второй моды равна удвоенной частоте первой моды, что соответствует формуле (1), так как в основании асфальтового покрытия в данном месте либо лежит менее жесткий грунт, либо таковой отсутствует (в области полости).

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

увидеть на рис. 4, где в более крупном масштабе представлена низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров.

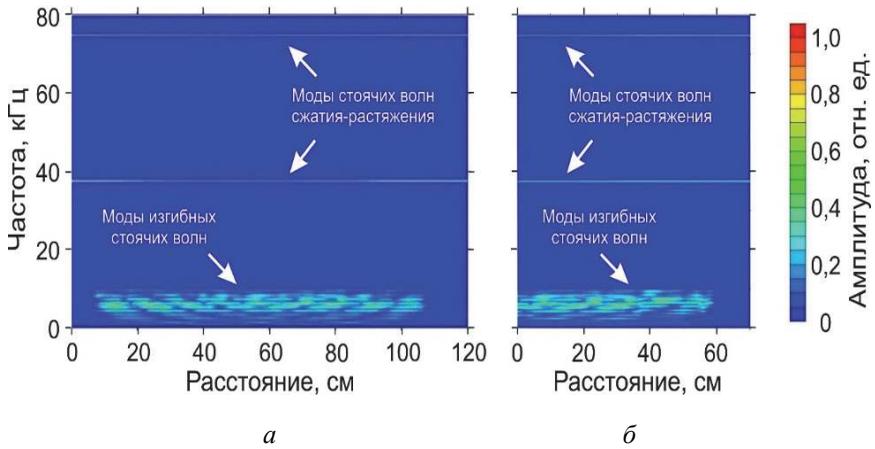


Рис. 3. Распределение осредненных амплитудных спектров шумовых записей вдоль профилей *AB* (а) и *CD* (б)

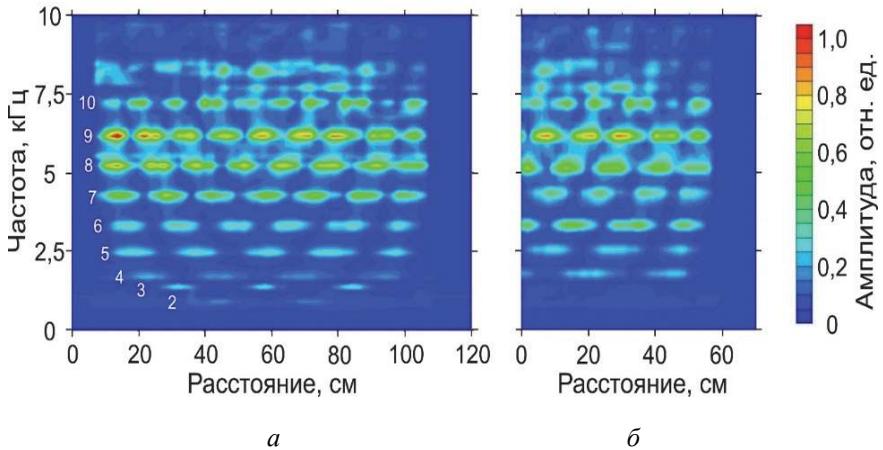


Рис. 4. Низкочастотная часть осредненных амплитудных спектров, показанных на рис. 3; цифрами отмечены условные номера мод изгибных стоячих волн

Наблюдаемые на рис. 4 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 именно изгибные волны, подтверждается тем, что их частоты расположены существенно ниже частот стоячих волн вертикального сжатия-растяжения, и вне промоины колебания на этих частотах практически отсутствуют. Кроме того, интервал между частотами соседних мод стоячих волн на спектрах непостоянен, что говорит о характерной для изгибных волн частотной дисперсии скорости.

Белыми цифрами на рис. 4, *a* отмечены условные номера мод изгибных стоячих волн. Заметим, что в двумерных телах типа мембран, особенно, если они неправильной формы, о нумерации мод стоячих волн можно говорить лишь условно ввиду многообразия возможных форм таких волн. Это подтверждают результаты проведенных численных экспериментов в программной среде MSCNastran [40]. Примеры форм изгибных колебаний для численной модели покрытия над промоиной, которая будет рассмотрена ниже, показаны на рис. 5. В настоящей работе была использована условная нумерация, отражающая число пучностей изгибных стоячих волн на профиле *AB* над полостью.

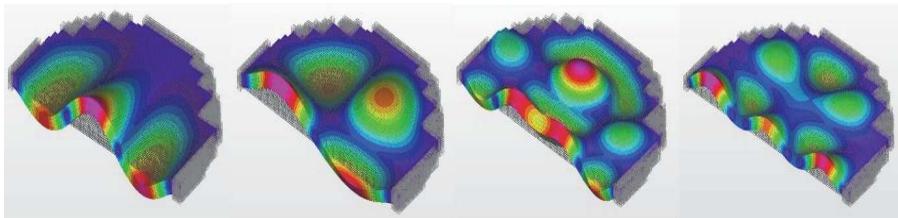


Рис. 5. Примеры расчета нескольких форм изгибных колебаний в численной модели покрытия над промоиной

Поперечный профиль *CD* не доходил до кромки асфальта, так как она была достаточно сильно деформирована (см. рис. 1), поэтому с уверенностью определить номера мод по числу пучностей и узлов на участке этого профиля над промоиной не удастся. Однако, судя по тому, что частоты наблюдаемых на рис. 4, *б* мод практически совпадают с частотами мод,

отмеченных на рис. 4, *a* номерами 4–10, можно предположить, что это моды тех же изгибных стоячих волн. Это проиллюстрировано на рис. 6, *a*, на котором показано распределение на площади наблюдений амплитуд моды с номером 2 (на частоте 0,88 кГц).

Для сравнения на рис. 6, *б* представлены результаты компьютерного моделирования этой моды методом конечных элементов. Расчеты были проведены с помощью программного комплекса MSC Nastran. Модель задавалась в виде двухслойного параллелепипеда размером $100 \times 100 \times 100 \text{ м}^3$. В верхней части нижнего слоя, имитирующего основание асфальтового покрытия, находилась моделирующая промоину выемка глубиной 15 см с горизонтальными размерами, примерно соответствующими размерам изображенной на рис. 1 промоины. Форма горизонтального сечения части выемки, находящейся под площадью наблюдений, показана на рис. 6, *б* пунктиром. Слой с выемкой перекрывался слоем постоянной мощности толщиной 4,5 см. На границе слоев, исключая область выемки, задавались условия жесткого контакта.

При расчетах для верхнего слоя принимались экспериментально определенные параметры асфальта: плотность $\rho = 2,43 \text{ г/см}^3$, скорость продольных волн $V_p = 3260 \text{ м/с}$. Скорость поперечных волн не измеряли, при расчетах она задавалась на уровне примерно 0,6 от скорости продольных волн, т. е. $V_s = 1960 \text{ м/с}$.

Параметры нижнего слоя на изгибные стоячие волны в верхнем слое практически не влияют, они принимались следующими: $\rho = 1,75 \text{ г/см}^3$, $V_p = 800 \text{ м/с}$, $V_s = 460 \text{ м/с}$.

Расчеты проводились для частотного диапазона 0,8...7,5 кГц. В результате наряду с другими модами были получены девять мод изгибных колебаний, частоты которых хорошо согласуются с определенными экспериментально для пронумерованных на рис. 4 мод, – отличие в расчетах не превышает 5 %. На рис. 6, *б* показано распределение на площади наблюдений рассчитанных амплитуд моды с частотой 0,89 кГц, наиболее близкой к экспериментально определенной частоте 0,88 кГц моды, отмеченной на рис. 4, *a* условным номером 2. Как следует из рис. 6,

полученное экспериментально распределение амплитуд по площади наблюдений на качественном уровне согласуется с результатами численного моделирования.

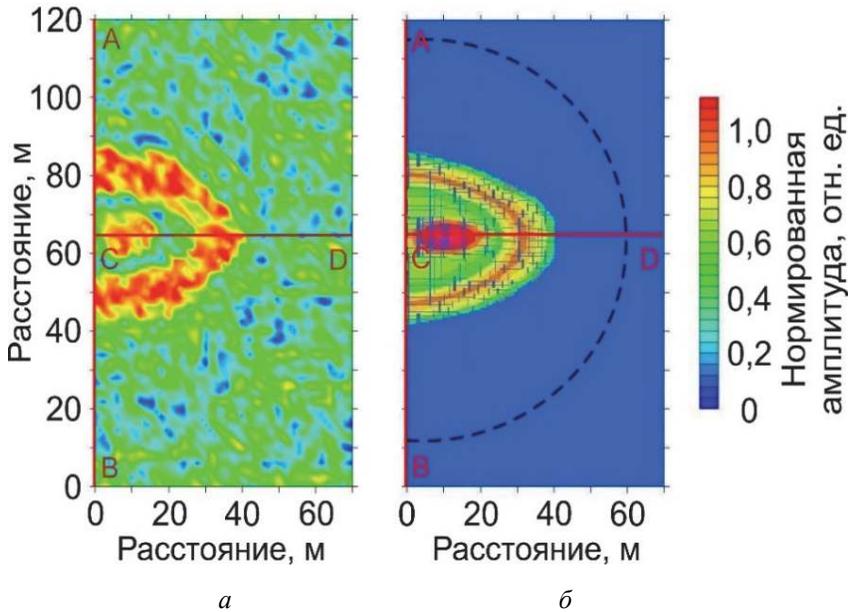


Рис. 6. Распределение на площади наблюдений амплитуд моды с частотой 0,88 кГц (условный номер 2, рис. 4) по экспериментальным данным (а) и моды с частотой 0,89 кГц по результатам численного моделирования (б); красными линиями показано положение профилей AB и CD , пунктиром – положение границы полости в численной модели

Таким образом, проведенный натурный эксперимент показал, что появление полостей под твердым дорожным покрытием приводит к формированию под воздействием акустических шумов на его незакрепленном участке изгибных стоячих волн, параметры которых могут быть использованы для обнаружения таких пустот и оценки их размеров. Однако нужно иметь в виду, что по модам стоячих волн только низких порядков можно получить существенно заниженные оценки размеров полости, что хорошо видно на рис. 6. Это связано

с тем, что при понижении порядка моды крайние пучности смещаются от краев полости к ее центральной части (рис. 4). По модам высоких порядков можно получить более достоверные оценки реальных размеров полости.

1.4. ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ТВЕРДОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ И КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ ЕГО ОСНОВАНИЯ ПО СТОЯЧИМ ВОЛНАМ СЖАТИЯ-РАСТЯЖЕНИЯ

Параметры стоячих волн вертикального сжатия-расширения в случае твердого дорожного покрытия, лежащего на более мягком основании, для определения полостей неинформативны, но они могут использоваться для контроля толщины покрытия и типа его основания (подстилающего слоя). Чтобы продемонстрировать это, кроме измерений в области промоины были проведены точечные измерения шумов на всем протяжении этого же тротуара. Как отмечено выше, общая длина тротуара составляет 1800 м, наблюдения на его поверхности проводились с шагом 10 м.

График, изображенный на рис. 7, показывает, как изменяется частота низшей (первой) моды стоячих волн вертикального сжатия-расширения вдоль тротуара, начиная от начала ул. Пирогова возле нового корпуса НГУ и до ее окончания (см. рис. 1, *a*). Как показано на графике, наблюдаются как относительно небольшие (до 10...15 %) флуктуации, так и существенные (примерно в два раза) изменения частоты низшей моды. Небольшие флуктуации связаны, очевидно, в основном с изменением толщины асфальтового покрытия. Резкие же изменения вызваны сменой материала подстилающего слоя, скорее всего, со сменой песчано-гравийной смеси на бетон, и наоборот.

Так, на интервале 0...210 м тротуар проходит вдоль недавно построенного нового корпуса Новосибирского государственного университета (НГУ). По-видимому, в ходе реконструкции тротуара он был усилен бетонным основанием под слоем асфальта. Наличие бетонного основания можно предполагать и в районе отметок 980 и 1120 м, так как здесь точки наблюдений попали на пересечение тротуара с автомобильными

въездами на территорию Центральной клинической больницы СО РАН (ЦКБ СО РАН). На рис. 1, *a* места пересечения тротуара с автомобильными въездами отмечены стрелками.

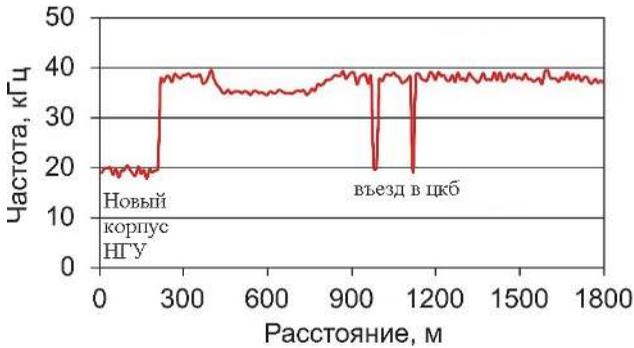


Рис. 7. Изменение амплитуды низшей (первой) моды стоячих волн сжатия-растяжения вдоль тротуара

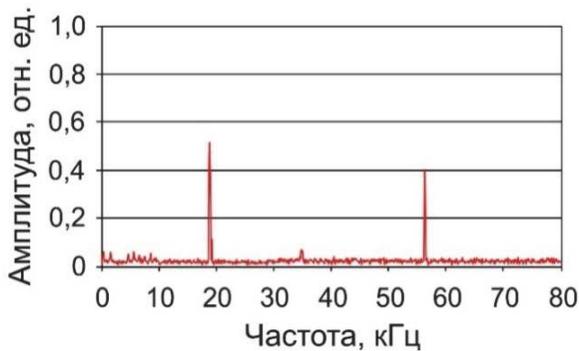


Рис. 8. Средний амплитудный спектр шумовой записи, полученной на пересечении тротуара с автомобильным въездом в больничный городок, отмеченным верхней стрелкой на рис. 2, *a*

Изменение материала подстилающего слоя с более мягкого на более жесткий, чем материал покрытия, приводит и к изменению характера

распределения пиков стоячих волн на оси частот. Если на большей части тротуара это распределение соответствует формуле (1), как, например, на спектре, изображенном на рис. 2, *a*, то в местах, где подстилающий слой имеет большую, чем у покрытия, акустическую жесткость, оно соответствует формуле (2). Пример такого спектра показан на рис. 7. При этом интервал между соседними собственными частотами, как и на других участках тротуара, составляет 35...40 кГц.

Важно также сказать, что на отметке 760 м тротуар также пересекается еще с одним въездом на территорию больничного городка, но в этом месте резкого изменения характера распределения пиков стоячих волн на оси частот не наблюдается. Можно предположить, что в месте этого пересечения асфальтовое дорожное покрытие не было усилено подстилающим бетонным основанием.

ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты показали, что метод стоячих волн может с успехом применяться для обнаружения пустот под твердым дорожным покрытием, а также для контроля его толщины и оценки соотношения акустических жесткостей покрытия и нижележащего слоя. Стоячие волны могут быть выделены из шумового поля с помощью накопления большого числа амплитудных спектров шумовых сигналов, зарегистрированных на поверхности дорожного покрытия.

Хотя предложенный метод в данной модификации не очень технологичен, однако его с успехом можно использовать для детального исследования участков дорожного покрытия, на которых периодически возникают промоины или полости другой природы, а также для уточнения результатов более производительных, но менее точных методов. Вместе с этим технологичность метода может быть повышена, например, путем применения более мощных искусственных источников как шумового, так и не шумового типа, а именно вибраторов в режиме излучения свип-сигналов с достаточно широким частотным диапазоном.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУСТОТ ПОД БЕТОННЫМИ ПЛИТАМИ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВЫХ ОТКОСОВ ПЛОТИНЫ НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

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

Для защиты подвергающихся динамическому воздействию волн и льда верховых откосов грунтовых плотин и дамб применяются различные виды креплений. В частности, на Новосибирской ГЭС верховые откосы укреплены бетонными плитами. Появление дефектов в верховых откосах происходит вследствие изменения состояния грунтов и потери прочности бетона железобетонных плит. Своевременное выявление этих дефектов позволяет вовремя принимать соответствующие меры по их устранению.

При обследовании плотин, как правило, проводят их визуальный осмотр или телевизионные наблюдения, например, с использованием авиации или космических аппаратов. Однако с учетом того, что изменения состояния бетона плит и грунтов под ними, как правило, скрыты, для поиска дефектов могут применяться косвенные методы диагностики, в частности, различные геофизические методы.

Для Новосибирской ГЭС важной практической задачей является обнаружение пустот под бетонными плитами крепления верховых откосов (рис. 9). Вместе с тем желательно также контролировать толщину бетонных плит в точках измерения. Наиболее распространенный метод решения задач такого рода, применяемый, например, для обследования дорожных покрытий, основан на электромагнитном зондировании дорожных покрытий и их оснований георадаром [5–9]. Этот метод характеризуется высокой производительностью и достаточно хорошей точностью, но при большой изменчивости электрических параметров исследуемой среды может требоваться периодическая калибровка аппаратуры. Кроме того, бетонные плиты, как правило, армированы стальными сетками, что также ограничивает возможности георадара.



Рис. 9. Плиты крепления верхового откоса плотины Новосибирской ГЭС

Для обследования жестких покрытий применяются также акустические методы, например эхолокация [12, 17]. Этот метод дает хорошие результаты при контроле толщины покрытия, но малоэффективен для выявления пустот и ослабленных зон под ним.

Ниже представлены примеры применения методики для обнаружения пустот под бетонными плитами и контроля их толщины акустическим методом, основанном на выделении стоячих волн из записанного на поверхности бетонной плиты акустического шума.

2.1. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Этот метод уже применялся ранее, например, при проведении физического моделирования и натуральных экспериментов по определению пустот в грунтовых отложениях, контролю дорожного покрытия и определению толщины льда [16; 18]. Метод сводится к регистрации акустических шумов на поверхности исследуемого объекта и накоплению амплитудных спектров большого числа шумовых записей. Это позволяет выделять из шума формирующиеся под его воздействием в объекте стоячие волны.

В нашем случае объектами исследования являются бетонные слои (плиты), под которыми находятся либо более жесткое основание (песчаный грунт с каменной набережной), либо, при наличии дефектов основания, более мягкий грунт или полости, заполненные воздухом или водой.

В таких слоях (плитах) при формировании стоячих волн между нижней и верхней границей должно укладываться, в зависимости от условий отражения на них, либо целое число полудлин, либо нечетное число четвертей длин стоячих волн (подобно стоячим волнам в незакрепленном стержне или закрепленном с одного конца) [19].

Как упоминалось выше, частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в слое в этих двух случаях определяются соответственно формулами (1) и (2).

В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами равен $\Delta F = (f_{n+1} - f_n) = V_p / 2h$. На осредненных в результате накопления амплитудных спектрах это проявляется при возникновении регулярной последовательности резонансных пиков на частотах стоячих волн. Таким образом, при известных скорости V_p и частотах

каких-либо двух соседних (по порядку моды) стоячих волн вертикального сжатия-растяжения толщина бетонной плиты h может быть определена по формуле

$$h = \frac{V_p}{2\Delta F}. \quad (3)$$

Заметим также, что для формулы (1) $\Delta F = f_1$, а для формулы (2) $\Delta F = 2f_1$, т. е. над водой, воздухом или мягким грунтом интервал ΔF равен частоте низшей моды, а над жестким грунтом – ее удвоенной величине.

2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Для оценки возможностей применения акустического метода стоячих волн для обследования креплений верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС были проведены натурные эксперименты на четырех предположительно «проблемных» плитах. Размер плит в плане составляет $10 \times 10 \text{ м}^2$. Регистрация шумовых записей проводилась на всей поверхности плит по квадратной сетке с шагом 1 м. Для регистрации использовался двухканальный цифровой осциллограф В-423 с частотой дискретизации 100 кГц. Схема эксперимента показана на рис. 10.

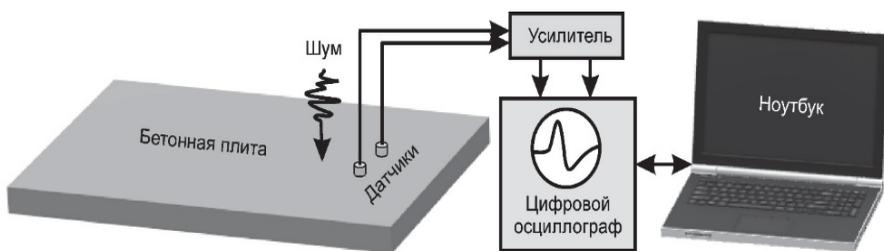


Рис. 10. Схема эксперимента

В качестве приемников использовались два широкополосных пьезо-керамических датчика поршневого типа с вертикально направленной

осью максимальной чувствительности, которые при измерениях устанавливались непосредственно на очищенную поверхность плит. Сигналы от датчиков регистрировались цифровым осциллографом и записывались на жесткий диск компьютера (ноутбука) для последующей обработки. Для ускорения измерений рядом с точками наблюдений на бетонные плиты производилось дополнительное шумовое воздействие с помощью щетки с жесткой щетиной, приводимой в движение с помощью электрического шуруповерта. Это позволило сократить время регистрации в каждой точке с 5...10 мин, необходимых при работе с естественными акустическими шумами, примерно до 30 с.

При обработке записи разбивались на фрагменты длительностью по 8192 отсчетов (примерно 82 мс), после чего проводилось накопление амплитудных спектров этих фрагментов. На рис. 11 даны примеры осредненных спектров шумовых записей, зарегистрированных в двух точках наблюдений. Как видим, даже при относительно малой длительности регистрации шумов на их спектрах можно уверенно выделить как минимум два регулярных резонансных пика, согласующихся с формулами (1) или (2).

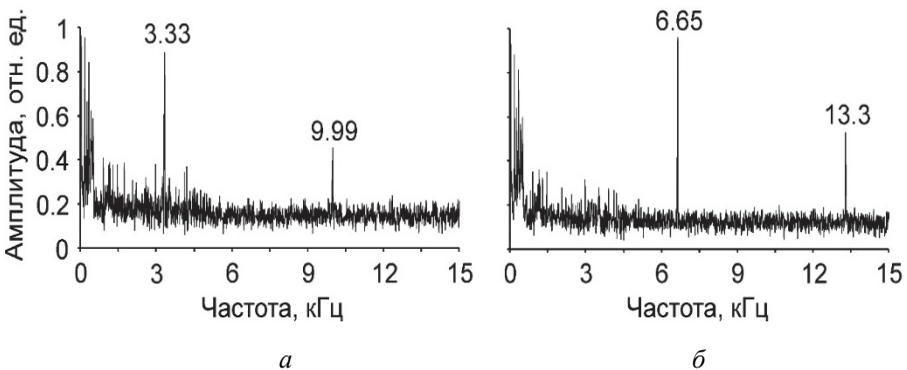


Рис. 11. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных на плитах верхового откоса плотины над жестким основанием (а) и над полостью (б)

В частности, для бетонной плиты, лежащей на более жестком основании (каменной наброске на песчаном грунте), что имело место

в большинстве точек наблюдения, эти пики расположены на оси частот в соответствии с формулой (1). Это иллюстрирует спектр, представленный на рис. 11, *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. 11, *б*) распределение пиков согласуется с формулой (2) – их частоты равны 6,65 и 13,3 кГц.

То, что из шумовых записей выделяются стоячие волны вертикального сжатия-растяжения бетонного слоя, а не волны других типов, обусловлено применением при измерениях датчиков, регистрирующих преимущественно вертикальную компоненту акустического шума. Подтверждение такой природы стоячих волн дает сопоставление результатов прямого измерения толщины бетонной плиты в контрольной точке и расчет толщины по формуле (3).

Измеренная рулеткой по торцу незакрепленной снизу плиты толщина бетона составила примерно 30 см. Определенная по записанному рядом с торцом шуму частота низшей моды равна $f_1 = \Delta F = 6,9$ 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 рис. 11–13 показано распределение частоты низшей моды по поверхности исследуемых плит по результатам измерений, проведенных летом 2019 года, и повторных измерений на этих же плитах, выполненных летом 2020 года.

Как видно из рисунков, 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 плиты с основанием (образовалась промоина) или произошло существенное снижение жесткости грунтов основания. В результате частоты стоячих волн в этих местах определяются формулой (1), а в местах, где под плитами находится более жесткое основание, – эти частоты определяются формулой (2). Более слабые флуктуации частоты связаны, по-видимому, с неоднородностью плит по толщине или изменением свойств бетона.

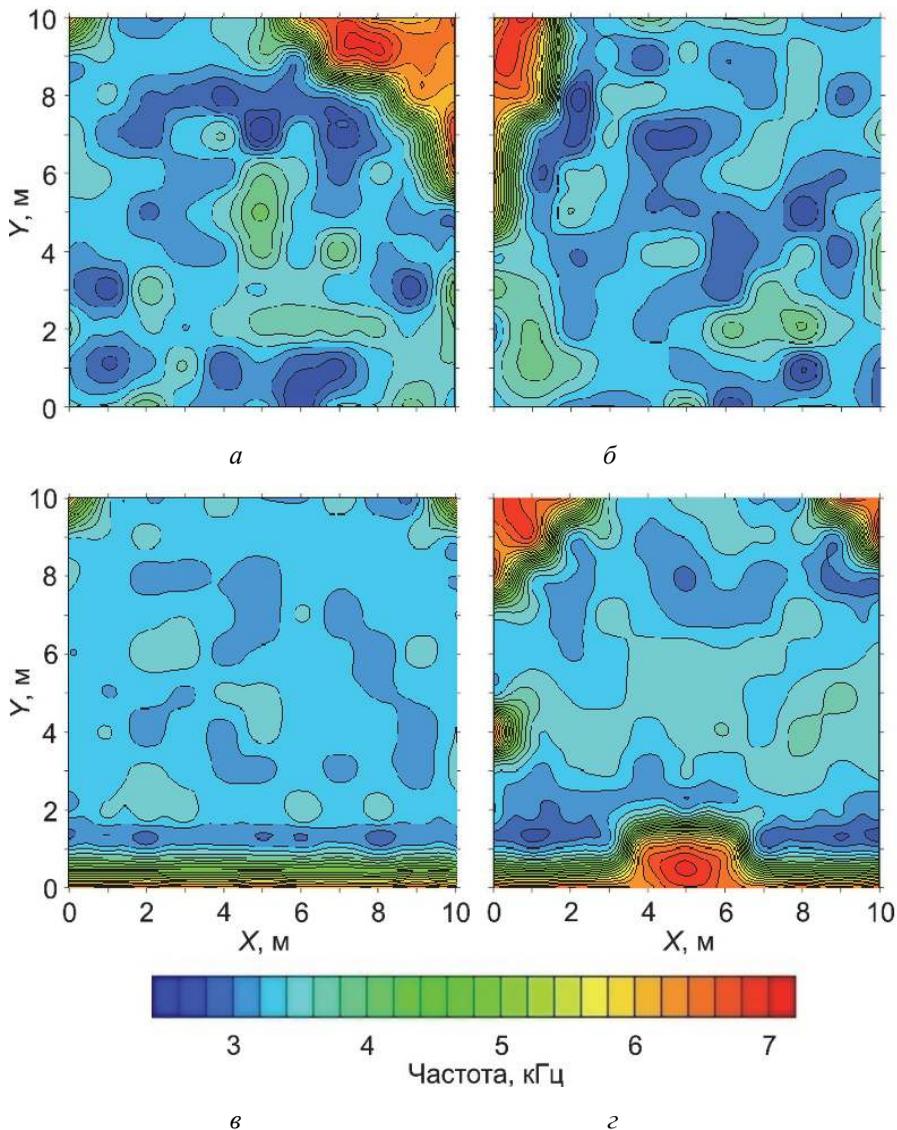


Рис. 12. Распределение частоты низшей моды стоячих волн по поверхностям бетонных плит верхнего (*а–б*) и нижнего (*в–г*) рядов (лето 2019 года)

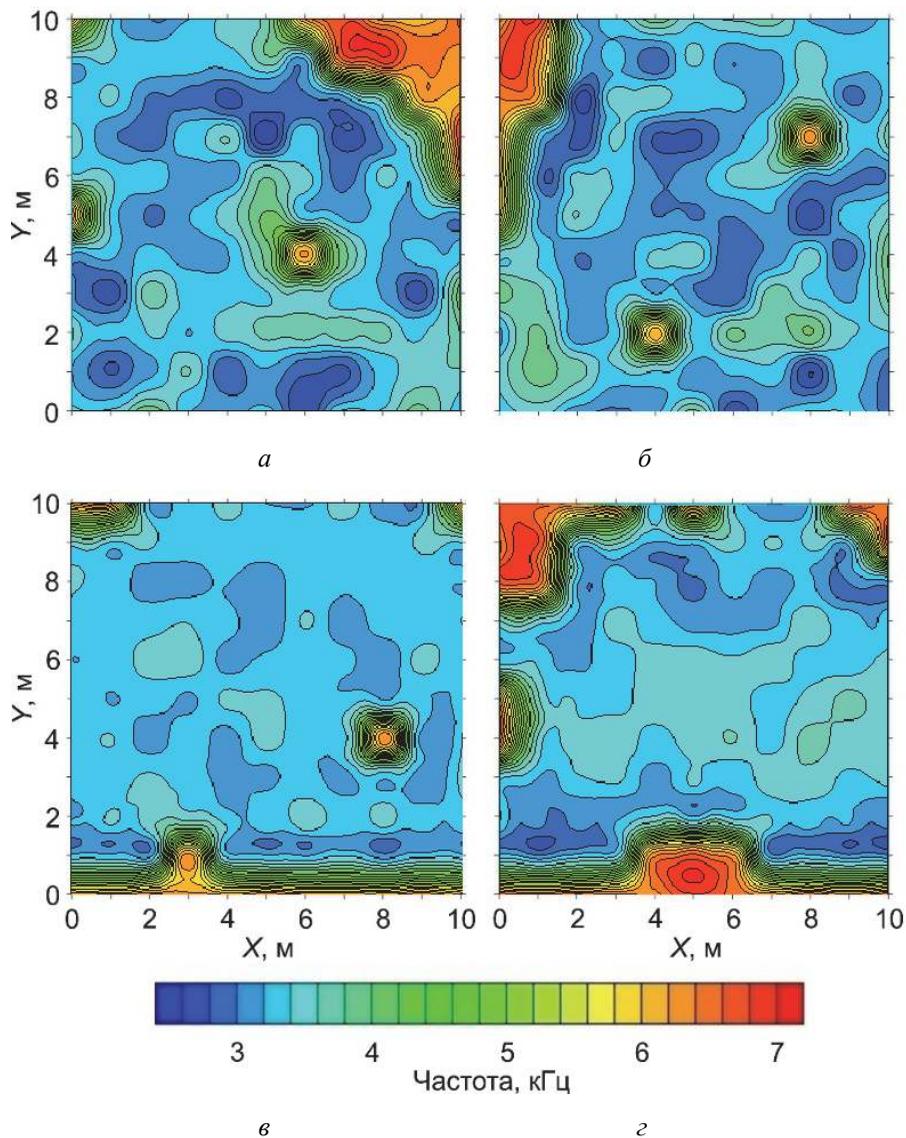


Рис. 13. Распределение частоты низшей моды стоячих волн по поверхностям бетонных плит верхнего (*а–б*) и нижнего (*в–г*) рядов (лето 2020 года)

Следует заметить, что на рис. 12, *а, б* и 13, *а, б* показаны результаты исследований для двух соседних плит из верхнего ряда, к которым снизу также примыкают другие плиты, а на рис. 12, *в, г* и 13, *в, г* – результаты исследований 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 снижение частоты низшей моды стоячих волн, связанное, очевидно, с постепенным вымыванием части грунта основания в этих местах.

Сравнивая рис. 12 и 13, заметим, что за год увеличились размеры аномальных зон некоторых из наблюдавшихся ранее, а также появились новые, хотя пока и небольшие высокочастотные аномалии. Это свидетельствует о дальнейшем размывании грунта под исследованными «проблемными» плитами крепления верховых откосов плотины Новосибирской ГЭС.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов показали, что метод стоячих волн, основанный на регистрации шумовых акустических сигналов, может успешно применяться для диагностирования и мониторинга качества крепления откосов плотин и дамб гидротехнических сооружений.

ВЫВОДЫ

На примере Новосибирской ГЭС исследованы возможности применения метода стоячих волн для обнаружения пустот и мест разуплотнения грунтов под бетонными плитами крепления откосов плотин и дамб гидротехнических сооружений. Эксперименты показали, что накопление амплитудных спектров шумовых записей позволяет уверенно определять собственные частоты стоячих волн сжатия-растяжения, генерируемых шумами в бетонных плитах крепления. Резкое повышение частот стоячих волн, в частности их низшей моды, является индикатором появления под плитами пустот или разуплотнения грунтов основания.

Предложенный метод стоячих волн позволяет надежно диагностировать изменения в грунтах основания бетонных плит крепления откосов дамб и плотин, в частности, выявлять образовавшиеся пустоты и участки разуплотненных грунтов. Производительность метода при поиске дефектов и надежность их выявления являются конкурентными в сравнении с другими методами, применяемыми для решения подобных задач.

3. ГЛУБИННОСТЬ МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ ПО МИКРОСЕЙСМАМ

Для решения задач по поиску и изучению подземных пустот наряду с достаточно трудоемкими прямыми методами такими, как бурение, вскрытие грунта канавами, шурфами и другими, применяются и намного менее трудоемкие геофизические методы, в частности, инженерная сейсморазведка. Несмотря на разнообразие применяемых подходов, возможности традиционных активных (с искусственными источниками) сейсмических методов во многих случаях ограничены из-за относительно малых по сравнению с длиной волны размерами неоднородностей.

В работе [14] предложен и опробован на данных физического моделирования пассивный сейсмический метод обнаружения подземных пустотелых объектов. Метод основан на выделении из микросейсмического поля стоячих волн, формирующихся между земной поверхностью и либо подошвой низкоскоростного приповерхностного слоя, либо верхней поверхностью пустотелого объекта. Выделить из шумового поля стоячие волны можно, например, путем накопления (усреднения) амплитудных спектров большого числа шумовых записей. Так как частоты и амплитуды стоячих волн над пустотелым объектом и в его отсутствие должны отличаться, эти параметры могут быть использованы для обнаружения подземных пустотелых объектов, а при определенных условиях и для оценки их формы и глубины залегания. Возможность выделения стоячих волн из микросейсма в верхней части разреза подтверждена и в натуральных экспериментах [15, 16].

Следствием того, что резкие пики, если они выделяются на осредненных спектрах, соответствуют стоячим волнам, может служить регулярный характер этих пиков. В приповерхностных стоячих волнах на земной поверхности должны наблюдаться пучности, а на ближайшей к ней резкой отражающей границе (в зависимости от условий отражения) либо пучности, либо узлы (подобно стоячим волнам в незакрепленном или закрепленном одним концом стержне [20]). Соответственно на расстоянии между этими границами должно укладываться в первом случае целое число полудлин, а во втором – нечетное число четвертей длин стоячих волн.

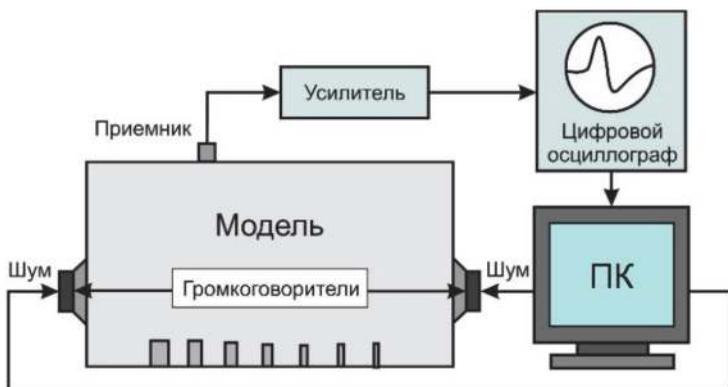
3.1. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СТОЯЧИХ ВОЛН ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ

Собственные частоты для вертикального сжатия-растяжения слоя в этих двух случаях определяются соответственно формулами (1) и (2).

Ранее на основании анализа результатов физического моделирования подземных труб разного диаметра был сделан вывод, что глубинность метода, основанного на выделении стоячих волн из шумового поля, ограничена примерно 5...8 минимальными горизонтальными размерами пустотелых объектов (в данном случае 5...8 диаметрами труб) [15]. В то же время шаг между точками применявшейся в этих экспериментах системы наблюдений в два раза превышал диаметр наименьшей трубы. Было сделано предположение, что применение более детальной системы и увеличение времени наблюдений может позволить повысить глубинность метода. Ниже представлены результаты физического моделирования, подтверждающие справедливость этого предположения.

3.2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Схема экспериментов представлена на рис. 14, а. Для моделирования заглубленных полостей использовали блок из плексигласа размером $12 \times 20 \times 25 \text{ см}^3$, в нижней грани которого были просверлены несколько цилиндрических отверстий сверлами разного диаметра и с разной формой режущей поверхности (рис. 14, б). Отверстия располагались вдоль большей средней линии нижней наибольшей грани блока с шагом примерно 2 см. Диаметры и максимальная глубина отверстий приведены в таблице.



а



б

Рис. 14. Схема эксперимента (а) и конфигурация полостей возле нижней поверхности модели (б)

Параметры полостей и число накопленных спектров

Номер полости	Диаметр, мм	Максимальная глубина, мм	Длительность записи, мин
1	12	15,5	6,5
2	8	15	6,5
3	6,5	13	6,5
4	5	11	6,5
5	4	12	13
6	3	10	26
7	1,5	8,5	65

Для возбуждения акустического шумового поля, имитирующего микросейсмы, на противоположных боковых гранях модели были установлены два электродинамических громкоговорителя, на которые с двухканального аудиовыхода компьютера (ПК) подавались генерируемые программой Audacity (<http://audacity.sourceforge.net/>) в режиме белого шума независимые электрические сигналы. Регистрация шумовых данных проводилась на верхней грани блока на профиле, проходящем над просверленными на нижней грани отверстиями. Шаг по профилю составлял 2 мм.

Для регистрации шумовых сигналов использовался широкополосный пьезокерамический датчик поршневого типа диаметром 2 мм. Ось максимальной чувствительности датчика была ориентирована по нормали к поверхности модели, поэтому регистрировались преимущественно ее вертикальные колебания. Сигналы от датчика регистрировались цифровым осциллографом В-423 с частотой дискретизации 1 МГц и записывались на жесткий диск компьютера для последующей обработки. Общая длительность записей в разных точках варьировалась от 6,5 до 65 с (см. таблицу).

3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ШУМОВЫХ ДАННЫХ

Обработка экспериментальных данных сводилась к расчету и последующему осреднению амплитудных спектров большого числа последовательных фрагментов шумовых записей длительностью 4,1 мс (4096 отсчетов при частоте дискретизации 1 МГц). Такая длительность обеспечивала достаточную для исследуемого диапазона спектральную разрешающую способность ($\Delta f = 1/T$) на уровне примерно 240 Гц.

На рис. 15 представлены осредненные амплитудные спектры, полученные по шумовым записям разной длительности, зарегистрированным на верхней поверхности модели на профиле, проходящем над центрами высверленных на ее нижней грани полостей. Как можно видеть, на всех спектрах выделяются пять мод стоячих волн. То, что это именно стоячие волны, подтверждает их регулярность. Например, между отверстиями частота низшей моды равна $f_1 = 11,7$ кГц. Этой частоте при измеренной импульсным методом скорости продольных волн в плексиглазе 2 785 м/с соответствует полудлина волны 11,9 см, приблизительно равная толщине блока. Частоты второй, третьей и четвертой моды имеют значения: $f_2 = 23,3$ кГц, $f_3 = 34,9$ Гц и $f_4 = 46,7$ кГц, приблизительно кратные f_1 , что согласуется с формулой (3).

Аналогичные свойства имеют частоты пиковых значений над отверстиями (положение проекций центров отверстий на профиль наблюдений показано на рис. 15 стрелками), но частоты стоячих волн здесь выше, так как они формируются на меньшей базе – между верхней гранью блока и вершинами просверленных с нижней грани отверстий. Нужно заметить, что для уверенного выделения стоячих волн над отверстиями 1–4 оказалось достаточно шумовых записей длительностью 6,5 с, но для отверстий меньшего диаметра длительность записей пришлось увеличивать (см. таблицу). Кроме того, при шаге по профилю 2 мм над отверстиями относительно большого диаметра частоты стоячих волн в общих чертах согласуются с формой торцевых поверхностей отверстий, а для малых отверстий этого, естественно, не наблюдается.

Тем не менее полученные результаты позволяют сделать вывод о существенно большей глубинности данного метода, чем это оценивалось ранее [14].

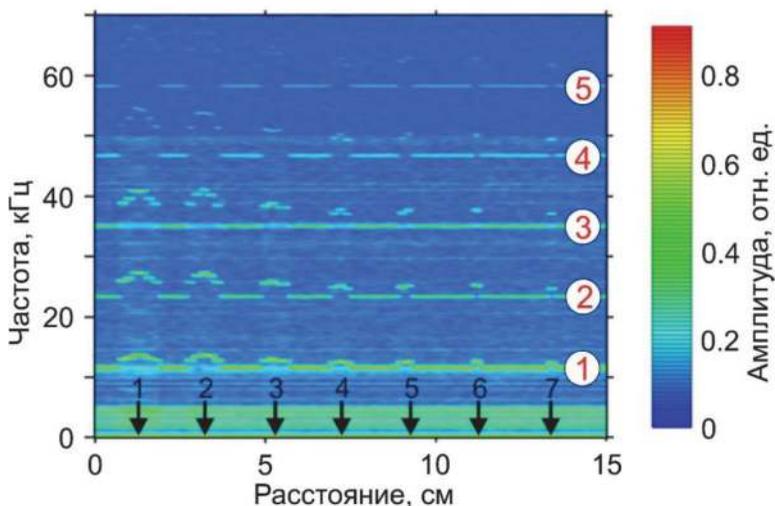


Рис. 15. Изменение осредненных амплитудных спектров вдоль профиля наблюдений: стрелками показано положение проекций центров отверстий на профиле наблюдений, черными цифрами – их номера, красные цифры – номера мод стоячих волн

В частности, наименьшее отверстие может быть уверенно идентифицировано по стоячим волнам (см. рис. 15), хотя его диаметр (1,5 мм) примерно в 74 раза меньше глубины до полости (см. рис. 14).

ВЫВОДЫ

Отметим, что в наших экспериментах роль нижней границы приповерхностного слоя выполняла свободная нижняя грань блока, поэтому частоты стоячих волн, формирующихся между ней и верхней гранью модели, определяются формулой (3). В натуральных же условиях в отсутствие полостей по поверхностным записям микросейсм уверенно выделяются стоячие волны, формирующиеся между дневной поверхностью и ближайшей к ней резкой границей, например, подошвой зоны малых скоростей [14]. Частоты этих волн определяются формулой (1). Однако при отсутствии резких приповерхностных границ с нижележащими породами выделение стоячих волн может оказаться вообще невозможным.

Тем не менее полученные в наших экспериментах результаты показывают, что при использовании детальных систем наблюдений и длительных записей микросейсм по их спектрам могут быть выделены стоячие волны, формирующиеся над пустотелыми объектами, которые находятся на глубинах, превышающих их горизонтальные размеры в десятки раз. Регулярность соответствующих этим волнам спектральных пиков и их согласие с формулой (3) могут служить индикатором наличия полостей, а по частотам стоячих волн при известном скоростном разрезе можно оценивать глубину их залегания.

4. КАРТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ПУСТОТ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН (НА ПРИМЕРЕ БАРСУКОВСКОЙ ПЕЩЕРЫ)

К образованию естественных пещер могут приводить различные процессы, например тектонические, эрозионные, вулканические, карстовые и т. д. Наиболее многочисленны пещеры карстового происхождения, образующиеся в результате растворения горных пород, таких как известняк, доломит, мрамор, мел и некоторых других, водой или водными растворами. Карстовую природу имеет большинство известных пещер мира [21], а карстовые образования в целом, по некоторым оценкам, в той или иной степени распространены примерно в 10...20 % в верхней части разреза [22].

Для исследования пещер наряду с прямыми методами, такими как визуальное обследование, фото-, видео-, топографическая съемка и другие, в последнее время активно применяются и косвенные, в том числе геофизические – электрометрия, микрогравиметрия, электромагнитные, сейсмические и др. [23]. Эффективность применения геофизических методов обусловлена резким контрастом физических свойств вещества, заполняющего пещеры (чаще всего это воздух и/или грунтовые воды), и вмещающих горных пород. Из геофизических методов для исследования подземных полостей разного масштаба, в том числе пещер, наиболее часто применяются геоэлектрические на постоянном токе, в частности, электротомография [24–33]. Эти методы достаточно эффективны, так как полости, особенно заполненные воздухом, имеют почти бесконечное электрическое сопротивление по сравнению с горными породами, что приводит к резким аномалиям электрического поля. Однако

методы на постоянном токе имеют и ряд ограничений. В частности, не всегда имеется возможность обеспечения удовлетворительного качества контакта электродов с породами.

Георадары обычно используются для картирования подземных полостей, залегающих на небольшой глубине [24, 25; 34, 35], хотя есть отдельные примеры успешного применения низкочастотных георадаров для глубин в несколько десятков метров [36]. Для георадаров характерны высокие производительность, детальность и разрешение по глубине. Их основными недостатками являются ограниченная глубина проникновения, особенно в случае часто встречающихся на закарстованных территориях низкоомных покрывающих пород, и высокая чувствительность к внешним шумам.

Высокий контраст плотности горных пород и воздуха позволяет использовать для обнаружения полостей в верхней части разреза и микрогравиметрическую съемку [27; 28; 31; 33]. Основная проблема этого метода заключается в том, что его применение требует точного учета топографии [37]. Сейсмические методы, в основном их томографические модификации, также являются потенциальным инструментом для обнаружения полостей [24, 25]. Кроме того, известны примеры применения для исследования подземных пустот магнитометрии [38; 24, 25; 33] и радиометрии [33]. Тем не менее вопрос поиска надежных методов выявления и картирования подземных полостей остается актуальным и в настоящее время.

В работах [14–16] на основе результатов физического моделирования и натурного эксперимента доказано, что по записям сейсмических шумов (микросейсм) можно определять частоты стоячих волн, генерируемых шумами в пространстве между земной поверхностью и кровлей подземных пустотелых объектов. Эти частоты могут быть использованы для обнаружения и картирования подобных пустот. В настоящей работе приводятся результаты применения такой методики на реальном природном объекте – пещере карстового происхождения.

4.1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Барсуковская пещера находится в Маслянинском районе Новосибирской области (Россия), примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирск (рис. 16, а).

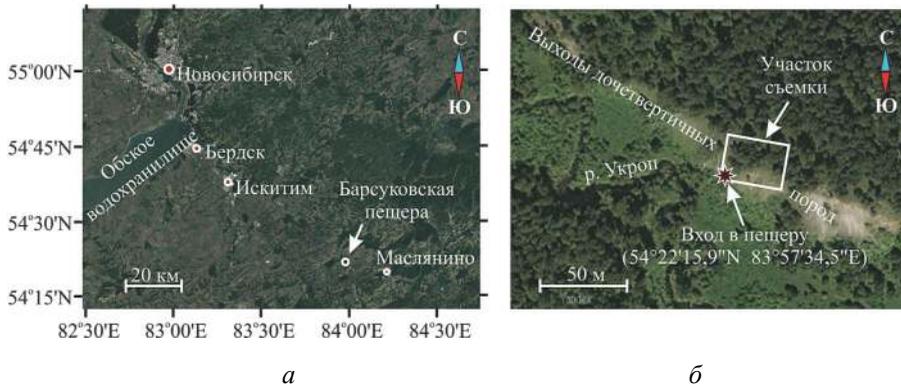


Рис. 16. Географическое положение Барсуковской пещеры (а) и взаимное расположение входа в пещеру и участка съемки (б)

Она образовалась в результате карстовых явлений в массиве карбонатных пород (преимущественно кристаллического известняка с примесями глинистых минералов, доломита, кварца, пирита, мела, гипса), выходящих на поверхность на скалистом правом берегу р. Укроп примерно в 2,5 км к юго-востоку от с. Барсуково. Спелеологи относят эту пещеру к коридорно-лабиринтовому типу [39]. В 2000 г. она вместе с прилегающей территорией площадью 37 га объявлена памятником природы областного значения, так как является крупнейшей не только в Новосибирской области, но и на всем юго-востоке Западной Сибири зимовочной колонией летучих мышей [39]. По словам местных жителей, раньше в пещеру было несколько входов, и ее общая протяженность составляла около 3 км. Но в результате проводившейся в середине прошлого века добычи щебня большая ее часть стала недоступна из-за образовавшихся завалов. В настоящее время общая протяженность пещеры считается равной примерно 190...200 м, а доступной для исследования части, по разным оценкам, от 80 до 100 м. Глубина

пещеры в самой глубокой ее части оценивается в 19 м, а вход имеет размеры примерно 1,2 м по горизонтали и 1 м по вертикали и находится в средней части крутого (угол падения 50...70°) каменистого склона высотой несколько десятков метров (рис. 17).

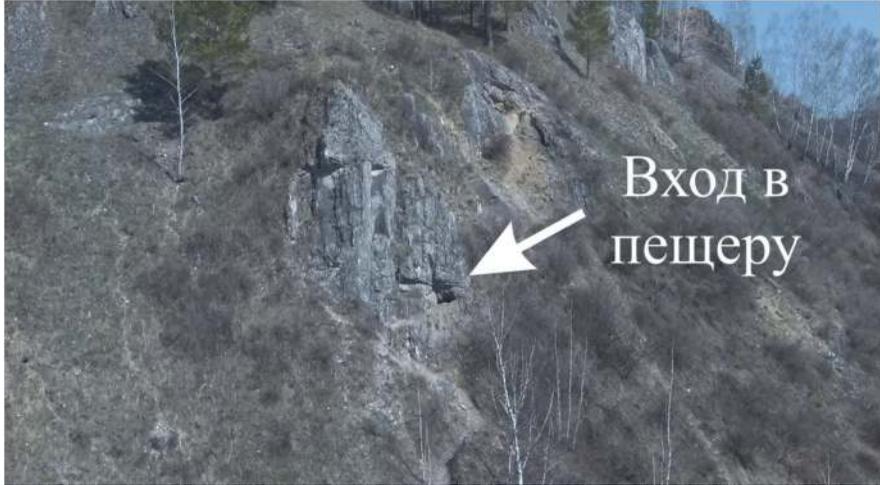


Рис. 17. Скальное обнажение на правом берегу р. Укроп, в котором находится вход в Барсуковскую пещеру

Непосредственно выше этого склона земная поверхность имеет более пологий, но местами довольно изрезанный рельеф, колебания высот в пределах участка, на котором проводились исследования, доходили до нескольких метров. Выходы скальных обнажений здесь перемежаются с относительно тонкими (примерно до 20...30 см) слоями задернованных песчано-глинистых отложений. На этом частично залесенном (в основном небольшими березами и соснами) участке и были проведены микросейсмические измерения с целью картирования Барсуковской пещеры.

Положение участка наблюдений относительно входа в пещеру показано на рис. 16, б.

4.2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ВЫДЕЛЕНИЯ СТОЯЧИХ ВОЛН ИЗ МИКРОСЕЙСМА ДЛЯ КАРТИРОВАНИЯ ПЕЩЕРЫ

В основе использованного для картирования пещеры пассивного сейсмического метода стоячих волн лежит предположение о том, что в пространстве между земной поверхностью и сводом пещеры в результате воздействия сейсмических шумов (микросейсм) могут возникать стоячие волны. Частоты этих волн равны собственным частотам слоя породы со свободными границами, мощность которого равна глубине от земной поверхности до свода пещеры. Кроме того, предполагается, что спектр микросейсм содержит частотные составляющие, соответствующие этим собственным частотам. Если это так, то, как показано в работах [14–16], накопление амплитудных спектров большого числа шумовых записей позволяет определять частоты стоячих волн, генерируемых микросейсмитами в пространстве между земной поверхностью и подземным пустотелым объектом. При формировании стоячих волн между нижней и верхней границей слоя с двумя свободными границами должно укладываться целое число полудлин стоячих волн. По механизму образования они подобны стоячим волнам в незакрепленном тонком стержне [19]. Частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в таком слое (собственные частоты) определяются формулой (1).

Интервал ΔF между любыми соседними по порядку моды собственными частотами равен $V_p / 2h$. На осредненных в результате накопления амплитудных спектрах это должно проявляться в возникновении регулярной последовательности резонансных пиков на частотах стоячих волн. В таком случае, если известны скорость V_p в породном массиве и интервал ΔF , то можно определить толщину слоя, в котором образуются стоячие волны сжатия-растяжения, по формуле

$$h = \frac{V_p}{2\Delta F}.$$

Заметим также, что $\Delta F = f_1$, поэтому вычислять толщину слоя можно и по частоте низшей моды.

В ограниченных объектах упругие стоячие волны возникают чаще всего в результате интерференции бегущих волн, отраженных от разных границ. Ходы и гроты Барсуковской пещеры имеют поперечные горизонтальные размеры существенно меньше, чем расстояние от их кровли до земной поверхности на участке съемки. Соответственно они намного меньше длин, по крайней мере, нескольких низших мод стоячих волн, которые могут возникать в породном массиве над пещерой. В таких условиях стоячие волны могут формироваться, в частности, в результате интерференции волн, дифрагированных на ходах и гротах пещеры, с волнами, отраженными от земной поверхности. Поскольку интенсивность дифрагированных волн значительно ниже, чем интенсивность волн, отраженных от свободной границы, то возможности используемого метода по картированию небольших в сравнении с глубиной залегания пустот были исследованы на основании данных физического и компьютерного моделирования.

Физический эксперимент описан выше – это моделирование заглубленных полостей, для которых использовался блок из плексигласа. С нижней грани его были просверлены несколько цилиндрических отверстий сверлами разного диаметра и разной формы режущей поверхности.

Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить глубинность и разрешающую способность данного метода. В частности, как видно из рис. 15, даже наименьшее отверстие может быть уверенно идентифицировано по стоячим волнам, хотя его диаметр примерно в 74 раза меньше глубины до его торцевой поверхности.

Компьютерное моделирование проводилось для относительно простой, но более приближенной к натурному объекту (Барсуковской пещере) модели методом конечных элементов в программной среде MSC Nastran [40]. Модель задавалась в виде куба размером $50 \times 50 \times 50 \text{ м}^3$. Элементы расчетной сетки – кубические ячейки с ребром длиной 0,1 м. Верхняя и одна из боковых граней модели оставались свободными и имитировали земную поверхность над пещерой и крутой склон, остальные поверхности демпфировались для минимизации краевых эффектов. Элемент пещеры моделировался двумя полыми прямыми круговыми цилиндрами диаметром 1,6 м каждый.

Координаты $(x; y; z)$ средних точек торцевых поверхностей одного цилиндра в метрах: 22,5; 30,0; 20,0 и 36,5; 30,0; 10,0, угол падения его оси в плоскости $y = 30,0$ м составляет примерно $35,5^\circ$.

Координаты соответствующих точек второго цилиндра в метрах: 36,0; 30,0; 10,0 и 36,0; 18,5; 15,0, угол падения в плоскости $x = 36,0$ м составляет примерно $23,5^\circ$. Скорости продольных и поперечных волн, а также плотность материала модели принимались равными средним значениям, полученным при измерениях на нескольких образцах доломитизированного известняка, отобранных возле входа в пещеру: $V_p = 3120$ м/с, $V_s = 2030$ м/с, $\rho = 2,4$ г/см³. На две свободные грани модели задавалось распределенное по площади воздействие динамической нагрузки с характеристиками «белого шума». В результате были рассчитаны частоты и амплитуды вертикальных составляющих собственных мод колебаний для верхней грани модели в диапазоне 0...300 Гц. Расчеты проводились для «точек наблюдения» в узлах квадратной сетки с шагом 0,5 м.

Примеры рассчитанных мод для некоторых точек этой грани представлены на рис. 19. Как можно видеть, в исследуемом частотном диапазоне над полыми цилиндрами (рис. 18, а–в) наблюдаются от 2 до 3 мод с амплитудами, существенно превышающими амплитуды других мод. Частоты этих мод кратны частоте низшей моды, что согласуется с формулой (1). Кроме того, эти частоты в среднем понижаются с увеличением глубины z полостей относительно верхней грани, что говорит о том, что данные моды соответствуют стоячим волнам, образующимся в пространстве между цилиндрическими полостями и верхней свободной гранью модели.

Нужно отметить, что рассчитанные методом конечных элементов частоты высокоамплитудных мод несколько выше, чем частоты, вычисленные для данных точек по формуле (1). Согласно этой формуле минимальная частота низшей моды над наиболее глубокой точкой верхней поверхности цилиндров (с учетом радиуса цилиндров примерно 19,4 м) должна быть равной примерно 80 Гц, а максимальная частота этой моды над наиболее мелкой точкой кровли полостей (9,3 м) – около 168 Гц. В то же время минимальная и максимальная частоты высокоамплитудных пиков, рассчитанных методом конечных

элементов, равны примерно 78 и 128 Гц. Таким образом, если для глубокой части модели результаты численных расчетов хорошо согласуются с оценкой по формуле (1), то при приближении поверхности цилиндров к свободной границе эта формула дает все более завышенные оценки частот рассматриваемых мод. Предположительно, это связано с тем, что формула (1) справедлива для плоскопараллельных границ, а численные расчеты проведены для наклонных цилиндрических полостей под плоской свободной границей.

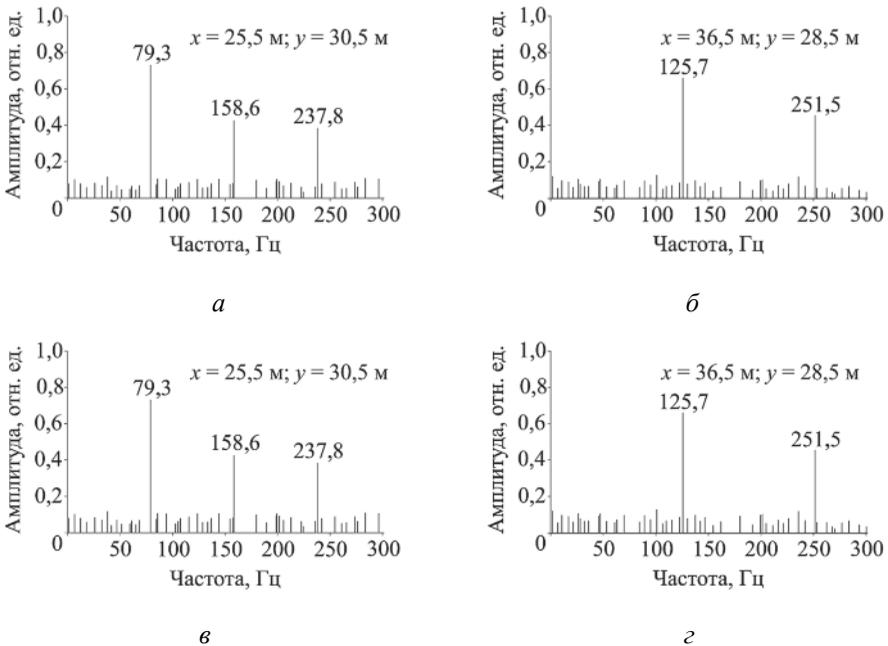


Рис. 18. Примеры вертикальных составляющих собственных мод колебаний верхней грани модели, рассчитанных методом конечных элементов над цилиндрическими полостями (а–в) и в стороне от них (г)

В точках, находящихся вне проекции полостей на верхнюю грань модели, высокоамплитудных мод не наблюдается (пример приведен на рис. 18, г). Нужно также отметить, что результаты расчетов не показали наличия в разных точках наблюдений мод с совпадающими частотами.

Поскольку диаметр обоих полых цилиндров не менялся по их длине, то это свидетельствует либо об относительной слабости эффектов реверберации в самих полых цилиндрах, либо о том, что их частоты находятся выше рассмотренного частотного диапазона.

На рис. 19, *а* показано распределение частоты низшей из высокоамплитудных мод на центральной участке верхней грани модели. Для точек, в которых регулярные высокоамплитудные пики отсутствуют (например, как показано на рис. 18, *з*), эта частота принималась равной нулю, что формально соответствует слою бесконечной мощности.

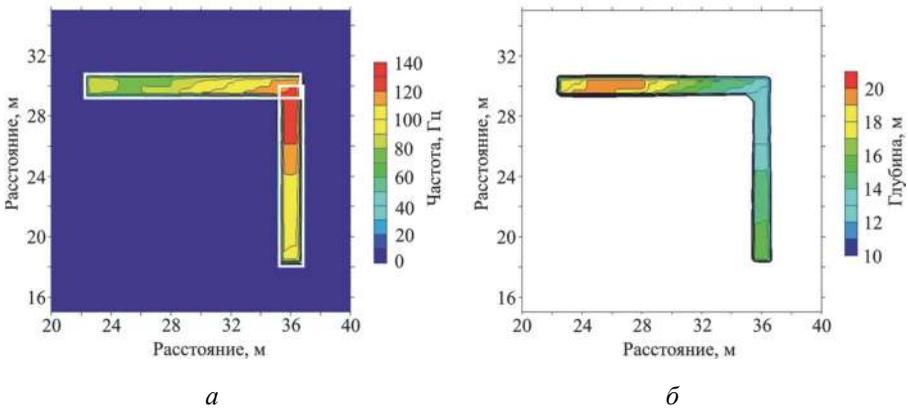


Рис. 19. Распределение частоты низшей из высокоамплитудных собственных мод на верхней грани модели; белыми линиями показаны проекции полостей на верхнюю грань (*а*), карта построенных по этим частотам глубин кровли полостей (*б*)

Как видно из рис. 19, *а*, область ненулевых значений частот, т. е. область, в которой в результатах моделирования присутствуют регулярные высокоамплитудные пики, хорошо согласуется с формой, показанной белыми линиями проекции цилиндров на верхнюю грань модели.

По частотам, показанным на рис. 19, *а*, с использованием формулы (2) были рассчитаны глубины до верхней поверхности цилиндров (с учетом того, что $\Delta F = f_1$). Карта глубин изображена на рис. 19, *б*.

Как видим, восстановленные таким образом из результатов компьютерного моделирования глубины на качественном уровне согласуются с заданными при моделировании геометрическими параметрами цилиндров. В то же время полученные оценки глубин несколько занижены, особенно над наиболее мелко залегающими концами цилиндров. Причина этого, как и отмеченного выше завышения оценок частот, в том, что формула (2) справедлива для плоскопараллельных границ, а численные расчеты проведены для границ более сложной формы.

Таким образом, результаты физического и компьютерного моделирования показали, что пассивный метод стоячих волн может быть с успехом использован для картирования подземных пустот, находящихся на глубинах, существенно превышающих их горизонтальные размеры.

4.3. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пассивные сейсмические наблюдения (регистрация микросейсм) проводились на площадной системе наблюдений в пределах участка размером примерно $24 \times 34 \text{ м}^2$ (см. рис. 16, б) в узлах квадратной сетки с шагом 0,5 м. Из-за особенностей рельефа и значительного объема наблюдений (более 2 тыс. точек) измерения проводились не на всей площади участка. В частности, измерений не было на крутом склоне над входом в пещеру. Расположение точек наблюдения на участке проиллюстрировано на рис. 20. Кроме того, на этом рисунке черными линиями показаны контуры проекции пещеры на горизонтальную плоскость, скопированные со схемы пещеры, составленной спелеологом С. Пешковым ориентировочно в 1970–1980-х гг.

Эта схема размещена на нескольких туристических сайтах, в частности, на сайте <http://tk-ekvator.ru> Новосибирского туристского клуба «Экватор». Для последующего корректного сравнения с результатами картирования контуры пещеры, показанные на схеме С. Пешкова, и участок наблюдений, представленный на рис. 20, приведены к единому масштабу и ориентации относительно сторон света.

Для записи микросейсм применялись одноканальные цифровые регистраторы Texan (RefTek-125A) с частотой дискретизации 1 кГц, а в качестве датчиков – вертикальные геофоны GS-20DX. Всего было задействовано 27 комплектов аппаратуры. Полученные записи использовались для определения частот стоячих волн сжатия-растяжения, генерируемых шумами в приповерхностных породах.

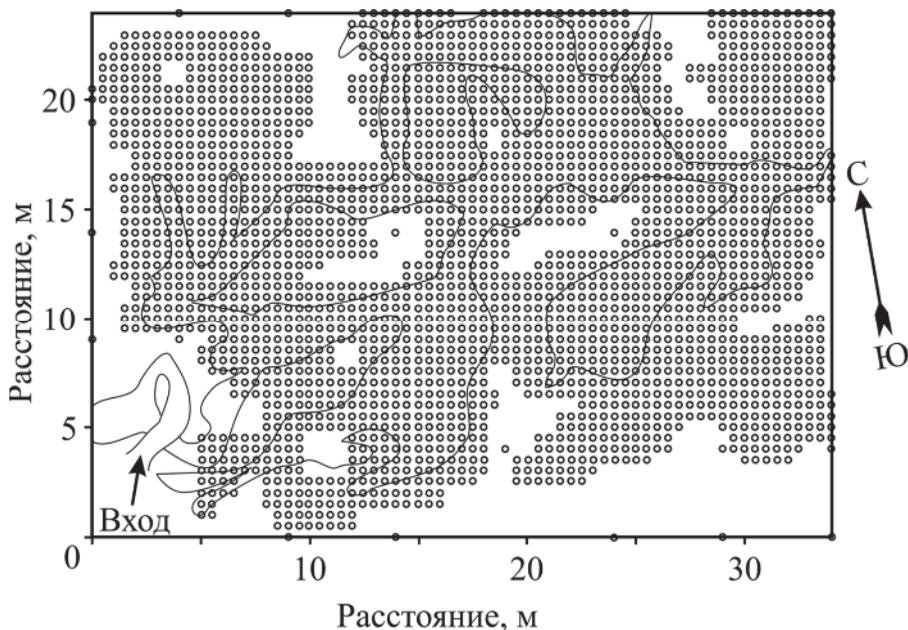


Рис. 20. Расположение точек наблюдения на участке съемки. Линиями отмечен контур Барсуковской пещеры, воспроизведенный со схемы спелеолога С. Пешкова

Для этого при обработке записи разбивались на фрагменты по 8192 отсчета (примерно по 8,2 с), вычислялись их амплитудные спектры и проводилось осреднение. Примеры фрагментов шумовых записей показаны на рис. 21.

Появление на осредненном спектре регулярных пиков, согласующихся с формулой (1), трактовалось как свидетельство существования под данной точкой наблюдений подземного пустотелого объекта.

Над самыми глубокими частями пещеры достаточная для идентификации стоячих волн длительность непрерывной записи составляла максимум 90 мин. Над более мелко залегающими ходами и гротами она сокращалась до 20...40 мин, что было достаточно для уверенного выделения стоячих волн из сейсмического шума.

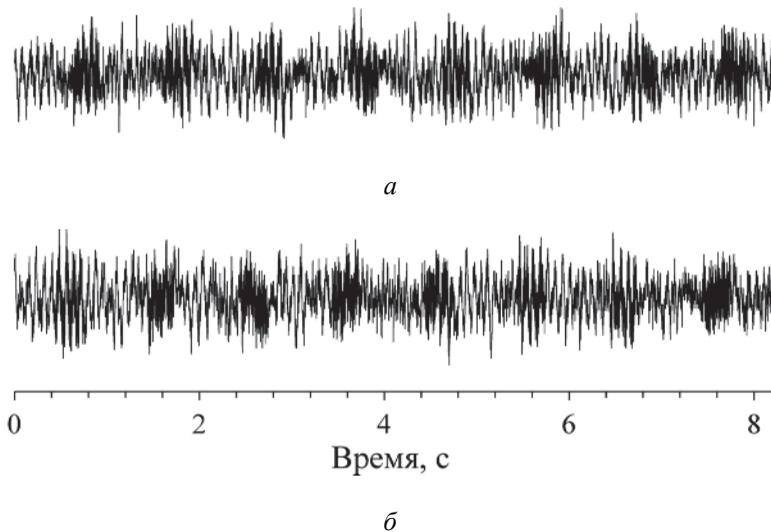


Рис. 21. Примеры фрагментов шумовых записей, полученных над ненарушенным породным массивом (а) и над кровлей пещеры (б)

На рис. 22, а в качестве примера показаны результаты накопления амплитудных спектров для различного количества блоков шумовых записей для точки с координатами, в метрах, 18,0; 4,5, расположенной несколько в стороне от известных границ пещеры. Следовательно, с увеличением количества накоплений происходит постепенное уменьшение колебаний амплитуд спектральных составляющих, но при этом не наблюдается резких пиков. На рис. 22, б показан пример аналогичного накопления амплитудных спектров для точки с координатами 16,5; 4,5, расположенной над одной из самых глубоких гротов пещеры. В этом случае накопление спектров приводит к появлению резких пиков и постепенному увеличению их амплитуд с увеличением числа накоплений.

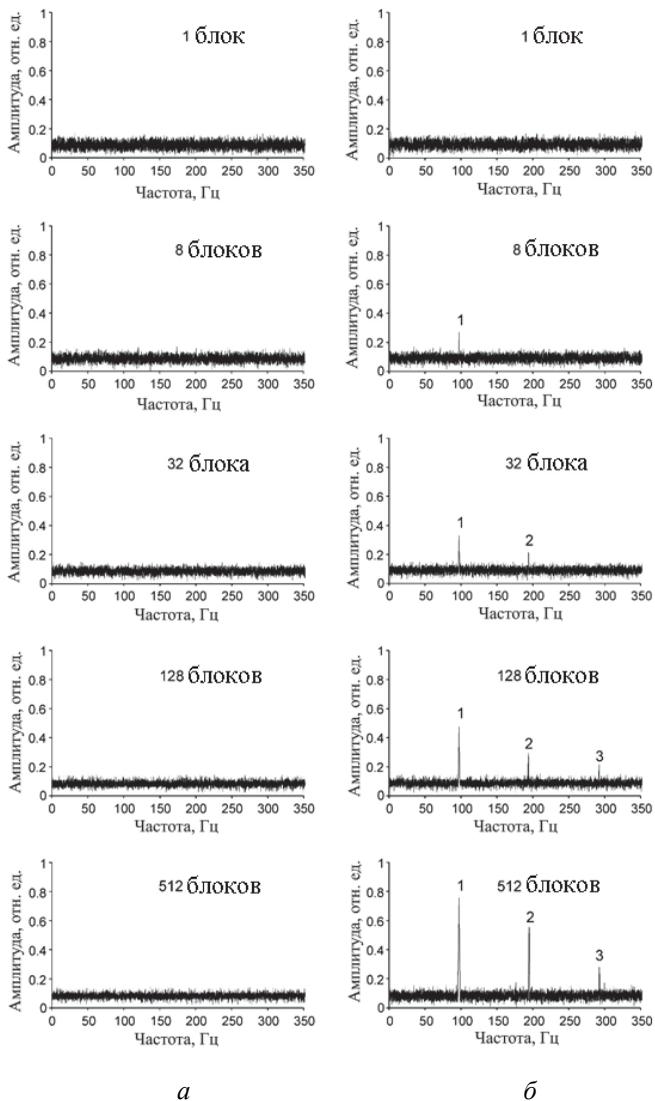


Рис. 22. Примеры накопления амплитудных спектров для различного количества блоков данных шумом длительностью 8192 отсчета: над массивом горных пород (*а*); над пещерой (*б*). Цифры указывают номер моды стоячей волны

Частоты этих пиков кратны частоте самого низкого пика (97,5; 194,9; и 292,4 Гц), что согласуется с уравнением (1). Это позволяет нам с высокой степенью уверенности предположить, что это резонансные пики, соответствующие первой, второй и третьей моде стоячих волн, образующихся между поверхностью земли и кровлей пещеры.

Как видно из рис. 22, *а*, над ненарушенным массивом на спектре не наблюдается каких-либо регулярных пиков. В то же время над кровлей грота пещеры (рис. 22, *б*) на спектре выделяются три резких пика, частоты которых кратны частоте низшей моды стоячих волн (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.

Конкретная длительность записей для разных частей исследуемого участка определялась по результатам предварительных опытных работ по редкой сети наблюдений. При проведении этих предварительных работ продолжительность измерений во всех точках составляла 90 мин. Последующий анализ этих данных с постепенным уменьшением длительности обрабатываемого фрагмента каждой записи позволил определить, какая длина записей достаточна для уверенного выделения из шума стоячих волн в разных местах участка наблюдений. Это позволило существенно сократить общее время проведения экспериментов. Кроме того, положение точек наблюдения, в которых стоячие волны не выделялись даже при максимальной длительности записей (90 мин), позволило приблизительно определить места, под которыми пустоты отсутствуют.

Необходимо отметить, 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 критерий регулярности резонансных пиков, т. е. их согласие с формулой (1), проверить было невозможно, но густая сеть наблюдений позволяла уверенно идентифицировать низшую моду при последовательном переходе от точки к точке.

4.4. РЕЗУЛЬТАТЫ КАРТИРОВАНИЯ ПЕЩЕРЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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 рис. 23 показана карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения (далее для простоты называется картой частот). Для точек, в которых резонансные пики не выделялись (например, как показано на рис. 23, а), частота f_1 принималась равной нулю, что формально соответствует слою бесконечной мощности. Нулю эта частота также приравнивалась и в тех точках исследуемого участка, где измерения не проводились.

Для сравнения на рис. 23 белой линией показаны контуры горизонтального сечения пещеры, скопированные с упоминавшейся ранее схемы спелеолога С. Пешкова.

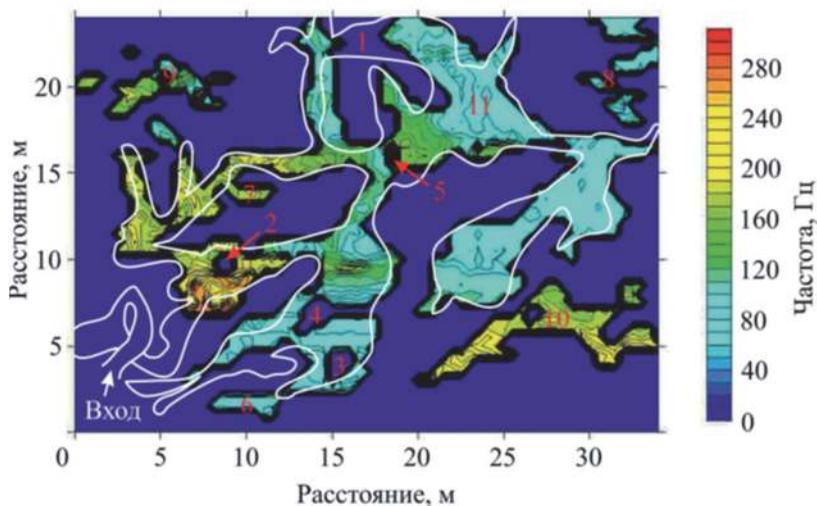


Рис. 23. Карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения. Обозначения: белые линии – контуры пещеры, соответствующие схеме, составленной спелеологом С. Пешковым; цифровые обозначения даны в тексте

Сравнить две карты в районе входа в пещеру в самой юго-западной части участка невозможно, так как наблюдения там не проводились из-за большой крутизны склона. В остальной же части участка в целом при хорошем совпадении двух карт можно заметить и различия. Причину некоторых из них можно проанализировать на основе свидетельств спелеологов о деталях строения Барсуковской пещеры в ее современном состоянии.

Так, в месте, обозначенном на рис. 23 цифрой 1, где ранее проходил сквозной ход пещеры, подземные пустоты согласно карте частот отсутствуют. По словам спелеологов, в настоящее время этот ход действительно перекрыт вследствие обвала породы. Появился завал и в месте, отмеченном цифрой 2, размеры которого близки к отображенному на карте участку нулевых частот. В местах, отмеченных цифрами 3, 4, 5, также присутствуют завалы, хотя и несколько меньших размеров, чем на карте частот. Кроме того, правее завала, отмеченного цифрой 4, проход по пещере завален частично, что также находит отражение на карте частот.

Спелеологи отмечают, что в Барсуковской пещере имеются относительно узкие ходы, недоступные для исследователей, которые, естественно, не могли быть нанесены на схему С. Пешкова. По-видимому, места проявления именно таких ходов отмечены на карте частот цифрами 6 и 7. Кроме того, согласно карте частот можно предположить наличие изолированных от Барсуковской пещеры полостей, места которых на карте отмечены цифрами 8, 9, 10. Возможно, некоторые из этих пустот раньше были связаны с пещерой, но стали недоступны после обвалов при упомянутых выше работах по добыче щебня.

Как уже отмечалось, при известной скорости продольных волн по частотам стоячих волн сжатия-растяжения можно оценить мощность слоя, в котором они образуются. Эта мощность определяется формулой (2), в которой ΔF можно заменить на f_1 . Таким образом, при известной скорости V_p во вмещающем массиве и частотах низшей моды стоячих волн над ходами и гротами пещеры можно оценить расстояние от земной поверхности до их сводов (но не до подошвы) в точках наблюдений.

Трудно сказать, насколько определенная по взятому с поверхности скального обнажения образцу скорость $V_p = 3120$ м/с отражает реальную скорость продольных волн в породном массиве над сводами пещеры, который может быть к тому же неоднородным. Тем не менее с использованием формулы (2) и полученных в точках наблюдений частоты f_1 низшей моды вертикальных стоячих волн сжатия-растяжения (см. карту, на рис. 23) была построена соответствующая этой скорости карта глубин от земной поверхности до сводов пещеры (рис. 24). Для точек, в которых наблюдения не проводились или для которых на спектрах шумовых записей не выделялись резонансные пики, частота f_1 , как отмечалось выше, приравнивалась к нулю, т. е. глубина в таких точках формально считалась бесконечной, – на карте (см. рис. 24) ей соответствует белый цвет.

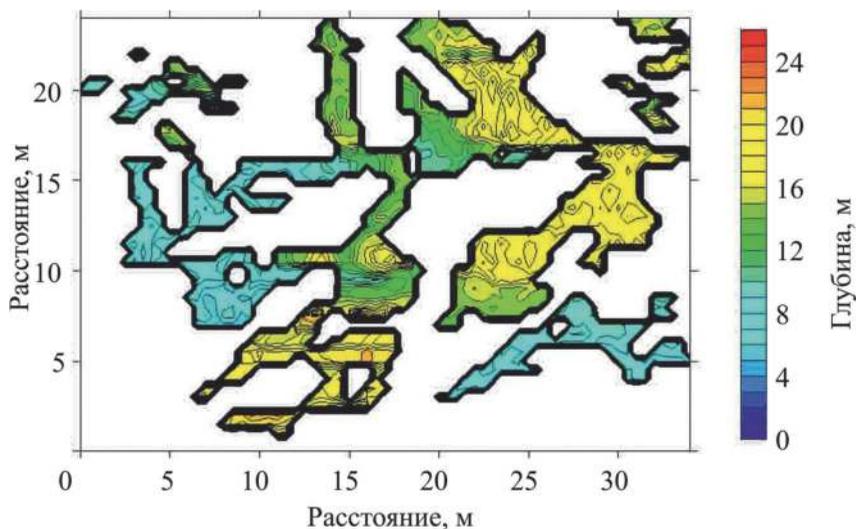


Рис. 24. Карта глубин сводов пещеры относительно земной поверхности

Как было отмечено, скорость V_p в породном массиве может существенно отличаться от принятого значения, полученного по отобранным на внешней поверхности склона образцам. В случае однородного породного массива заниженная или завышенная скорость

приводит соответственно к пропорциональному уменьшению или увеличению всех глубин, определяемых по формуле (2). Кроме того, на рис. 24 представлены глубины кровли пещеры относительно земной поверхности, имеющей на участке съемки достаточно изрезанный рельеф. Тем не менее полученные оценки глубин на качественном уровне согласуются с данными спелеологов, согласно которым самые глубокие ходы и гроты пещеры расположены в ее тупиковых ответвлениях, а ближе к входу в пещеру глубина ходов и гротов постепенно уменьшается.

Необходимо отметить, что, как было показано ранее на результатах физического моделирования [14], кривизна верхних границ подземных полостей может приводить к некоторому занижению получаемых оценок их горизонтальных размеров. Это замечание в полной мере относится к представленным в данном пособии результатам, так как своды ходов и гротов пещер в большинстве случаев имеют достаточно сложную форму.

ВЫВОДЫ

Проведенные на участке Барсуковской пещеры площадные пассивные сейсмические наблюдения показали, что под воздействием сейсмического шума (микросейсм) в пространстве между земной поверхностью и кровлей пещеры образуются стоячие волны сжатия-растяжения. Накопление амплитудных спектров большого числа шумовых записей позволило определить частоты от одной до четырех первых мод этих волн над ходами и гротами пещеры. В других местах стоячие волны не наблюдались.

Построена карта распределения частоты низшей моды на участке наблюдений, которая позволила оконтурить пещеру в плане. Полученные при этом результаты в целом совпадают с данными картирования спелеологов. По частотам низшей моды построена карта глубин сводов пещеры от земной поверхности, которая на качественном уровне также согласуется с данными картирования спелеологов.

В целом согласно приведенным результатам пассивный сейсмический метод стоячих волн показал себя как эффективный инструмент для

картирования подземных пустот. Одно из основных ограничений метода – невозможность определения нижних границ подземных полостей, так как выделяемые из микросейсмического поля стоячие волны образуются в пространстве между сводами пещеры и земной поверхностью. Соответственно отсутствует возможность оценить вертикальные размеры ходов и гротов пещеры и ее объем.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ И ЗАДАЧИ

1. В каком частотном диапазоне находятся рассматриваемые частоты при картировании пещеры?
2. Какие типы мод рассматриваются при диагностики состояния дорожного покрытия?
3. Собственные моды колебаний и их виды.
4. Как происходит регистрация данных? Какая частота дискретизации должна быть?
5. В каких объектах присутствуют изгибные моды колебаний?
6. Какая глубинность метода?
7. Зачем нужно математическое моделирование?
8. Суть метода конечных элементов.
9. Чем обусловлена интерференция бегущих волн различной физической природы?
10. Скорость распространения упругих волн в дорожном покрытии составляет 4440 м/с, значение низшей моды (сжатия-расширения) равно 16 кГц. Какова толщина дорожного покрытия?

Далее в приложении представлены задачи по гармоническим колебаниям.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Задачи по гармоническим колебаниям

Задача № 1. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 6 м/с, и за 10 с совершает 20 колебаний. Каково расстояние между соседними гребнями волн?

Задача № 2. Голосовые связки певца, поющего тенором (высоким мужским голосом), колеблются с частотой от 100 до 500 Гц. Определите максимальную и минимальную длину излучаемой звуковой волны в воздухе. Скорость звука в воздухе 333 м/с.

Задача № 3. Скорость звука в эбоните 2300 м/с, а в кирпиче – 3500 м/с. В каком веществе звуковому сигналу требуется большее время для распространения? Во сколько раз?

Задача № 4. Расстояние между ближайшими гребнями волн в море 7 м. Лодка качается на волнах, распространяющихся со скоростью 2,5 м/с. Какова частота ударов волн о корпус лодки?

Задача № 5. Наблюдатель, находящийся на расстоянии 3 км 160 м от источника звука, слышит звук, пришедший по воздуху, на 4,8 с позднее, чем звук от того же источника, пришедший по воде. Определите скорость звука в воде, если скорость звука в воздухе равна 325 м/с.

Задача № 6. Охотник выстрелил, находясь на расстоянии 150 м от лесного массива. Через сколько времени после выстрела охотник услышит эхо?

Задача № 7. Мимо неподвижного наблюдателя, стоящего на берегу озера, за 6 с прошло 3 гребня волны. Расстояние между первым и третьим гребнем равно 12 м. Определить период колебания частиц волны, скорость распространения и длину волны.

Задача № 8. Скорость звука в воде 1250 м/с. На каком расстоянии находятся ближайшие точки, совершающие колебания в противоположных фазах, если частота колебаний равна 525 Гц?

Задача № 9. Длина волны в воздухе 7 см (при скорости 340 м/с). Найти скорость распространения звука в теле, в котором при той же частоте колебаний длина волны равна 2,02 м.

Задача № 10. ОГЭ Расстояние между гребнями волн в море $\lambda = 5$ м. При встречном движении катера волна за $t = 1$ с ударяет о корпус катера 6 раз, а при попутном 3 раза. Найти скорость катера и волны.

Задача № 11. ОГЭ Звуковые колебания, имеющие частоту $\nu = 400$ Гц и амплитуду $A = 0,25$ мм, распространяются в воздухе. Длина волны $\lambda = 70$ см. Найти скорость распространения колебаний ν и максимальную скорость частиц среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулижников А.М. Применение георадарных технологий в дорожном хозяйстве // Разведка и охрана недр. – 2001. – № 3. – С. 32–34.
2. Кулижников А. М. Георадиолокационные обследования ледовых переправ // Инженерные изыскания. – 2016. – № 8. – С. 22–29.
3. Федорова Л.Л., Саввин Д.В., Мандаров Д.А., Федоров М.П. Георадиолокационная диагностика криогенных процессов в грунтах оснований автодорог г. Якутска // Инженерные изыскания. – 2017. – № 9. – С. 66–73.
4. Benedetto A., Pensa S. Indirect diagnosis of pavement structural damages using surface GPR reflection techniques // Journal of Applied Geophysics. – 2007. – Vol. 62, Issue 2. – Pp. 107–123.
5. Derobert X., Fauchard C., Côte P., Le Brusq E., Guillanton E., Davignac J.Y., Pichot C. Step-frequency radar applied on thin road layers // Journal of Applied Geophysics. – 2001. – Vol. 47, Issues 3-4. – Pp. 317–325.
6. Kassem E., Chowdhury A., Scullion T., Masad E. Application of ground-penetrating radar in measuring the density of asphalt pavements and its relationship to mechanical properties // International Journal of Pavement Engineering. – 2016. – Vol. 17, Issue 6. – Pp. 503–516.
7. Khamzin A.K., Varnavina A.V., Torgashov E.V., Anderson N.L., Sneed L.H. Utilization of air-launched ground penetrating radar (GPR) for pavement condition assessment // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 141. – Pp. 130–139.
8. Li J., Walubita L.F., Simate G.S., Alvarez A.E., Liu W. Use of ground-penetrating radar for construction monitoring and evaluation of perpetual pavements // Natural Hazards. – 2015. – Vol. 75, Issue 1. – Pp. 141–161.
9. Saarenketo T., Scullion T. Road Evaluation with Ground Penetrating Radar // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – Vol. 43, Issues 2-4. – Pp. 119–138.

10. Оленченко В.В., Кондратьев В.Г. Геофизические исследования в пределах участка деформаций автодороги, построенной на мерзлом основании // Вестник Северо-Восточного государственного университета. – 2017. – № 27. – С. 116–119.
11. *Dashevsky Y.A., Dashevsky O.Y., Filkovsky M.I., Synakh V.S.* Capacitance sounding: a new geophysical method for asphalt pavement quality evaluation // Journal of Applied Geophysics. – 2005. – Vol. 57, Issue 2. – Pp. 95–106.
12. *Baker M. R., Crain K., Nazarian S.* Determination of Pavement Thickness with a New Ultrasonic Device // Research Report 1966-1. Center for Highway Materials Research, University of Texas, El Paso. – 1995.
13. *Celaya M., Nazarian S.* Seismic Testing to Determine Quality of Hot-Mix Asphalt // Journal of the Transportation Research Board. – 2006. – No. 1946. – Pp. 113–122.
14. Колесников Ю.И., Федин К.В. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 4. – С. 89–96.
15. Колесников Ю.И., Федин К.В. Прямое определение резонансных свойств верхней части разреза по микросейсам: натурный эксперимент // Технологии сейсморазведки. – 2017. – № 3. – С. 5–21.
16. *Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V.* Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment // Geophysical Prospecting. – 2018. – Vol. 66. – No. 2. – Pp. 342–353.
17. *Choi W.Y., Park K.K.* Array type miniaturized ultrasonic sensors to detect urban sinkholes // Measurement. – 2019. – Vol. 141. – P. 371–379.
18. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Определение толщины льда по стоячим волнам // Процессы в геосредах. – 2019. – № 4 (22). – С. 528–533.
19. Хайкин С.Э. Физические основы механики. – М.: Наука, 1971. – 752 с.
20. *Lependin L.F.* Akustika. – М.: Vysshajashkola, 1978. – 448 s.
21. Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н. Генетическая классификация подземных полостей. Геоморфология. – 1993. – № 1. С. 31–37.
22. *Palmer A.N.* Origin and morphology of limesone caves. Geological Society of America Bulletin. – 1991. – Vol. 103. – No. 1. – Pp. 1-21, doi:10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3CO;2.
23. *Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., Bosch F.P.* Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. Hydrogeology Journal. – 2011. – Vol. 19. – No. 6. – Pp. 1169–1180, <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>.

24. *Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A., Di Filippo G.* Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*. – 2010. – Vol. 58. – No. 4. – Pp. 685–695, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>.
25. *Cardarelli E., Fischanger F., Piro S.* Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). *Near Surface Geophysics*. – 2008. – Vol. 6. – No. 1. – Pp. 15–20, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>.
26. *Carden E.P. and Fanning P.* Vibration based condition monitoring: a review // *Structural Health Monitoring*. – 2004. – 3. – 355–377.
27. *Gambetta M., Armadillo E., Carmisciano C., Stefanelli P., Cocchi L., Tontini F.C.* Determining geophysical properties of a nearsurface cave through integrated microgravity vertical gradient and electrical resistivity tomography measurements. *Journal of Cave and Karst Studies*. – Vol. 73. – No. 1. – Pp. 11–15, <https://doi.org/10.4311/jcks2009ex0091>.
28. *Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R.* Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn Cave, Harz Mountains, Germany. *Geophysics*. – 2011. – Vol. 76. – No. 3. – Pp. B71–B77, <https://doi.org/10.1190/1.3560245>.
29. *Mihevč A., Stepišnik U.* Electrical resistivity imaging of cave Divaška jama, Slovenia. *Journal of Cave and Karst Studies*. 2012. – Vol. 74. – No. 3. – Pp. 235–242. [Doi:10.4311/2010ES0138R1](https://doi.org/10.4311/2010ES0138R1).
30. *Muhlestein K., Meissner L., Klar R., Green R.T.* Three-dimensional electrical resistivity for detection of subsurface karst associated with Friesenhahn Cave. *Journal of Cave and Karst Studies*. – 2018. – Vol. 80. – No. 4. – Pp. 206–211.
31. *Negri S., Margiotta S., Quarta T.A.M., Castiello G., Fedi M., Florio G.* Integrated analysis of geological and geophysical data for the detection of underground man-made caves in an area in southern Italy. *Journal of Cave and Karst Studies*. – 2015. – Vol. 77. – No. 1. – Pp. 52–62, [doi:10.4311/2014ES0107](https://doi.org/10.4311/2014ES0107).
32. *Pánek T., Margielewski W., Tábořík P., Urban J., Hradecký J., Szura C.* Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: Case studies from the Polish Flysch Carpathians. *Geomorphology*. 2010. – Vol. 123. – No. 1–2. – Pp. 165–180.
33. *Putiška R., Kušnirák D., Dostál I., Lačný A., Mojzeš A., Hók J., Pašteka R., Krajnák M., Božanský M.* Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia. *Journal of Cave and Karst Studies*. – 2014. – Vol. 76. – No. 3. – Pp. 155–163, [doi: 10.4311/2013ES0112](https://doi.org/10.4311/2013ES0112).
34. *Lyskowski M., Mazurek E., Ziętek J.* Ground penetrating radar investigation of limestone karst at the Odstrzelona Cave in Kowala, Świętokrzyskie Mountains,

Poland. *Journal of Cave and Karst Studies*. – 2014. – Vol. 76. – No. 3. – Pp. 184–190, <https://doi.org/10.4311/2014EX0001>.

35. *Ronen A., Ezersky M., Beck A., Gatenio B., Simhayov R.B.* Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*. – 2019. – Vol. 328. – Pp. 28–43, doi.org/10.1016/j.Geor-morph.2018.11.030.

36. *Gosar A.* Analysis of the capabilities of low frequency ground penetrating radar for cavities detection in rough terrain conditions: the case of Divača Cave, Slovenia. *Acta Carsologica*. – 2012. – Vol. 41. – No. 1. – Pp. 77–88, <https://doi.org/10.3986/ac.v41i1.49>.

37. *Debeglia N., Dupont F.* Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*. – 2002. Vol. 50. – No. 4. – Pp. 435–454, [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00194](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00194).

38. *Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Новикова П.Н.* Опыт-но-методические геофизические работы на территории историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера». *Вестник КРА-УНЦ. Науки о Земле*. – 2014. – № 2(24). – С. 191–197.

39. Памятники природы: Улантова гора, каменистая степь у села Новососе-дово, Барсуковская пещера, Бердские скалы. Особо охраняемые природные территории Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Новосибирской области, Новосибирского государственного краеведческого музея, Новосибирск, 2006.

40. *Рычков С.П.* MSC.visualNASTRAN для Windows. – Москва: ИТ Пресс, 2004.

Константин Владимирович Федин

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТОЯЧИХ ВОЛН
НА СООРУЖЕНИЯХ ДЛЯ ГЕОЛОГО-ИНЖЕНЕРНЫХ
ИЗЫСКАНИЙ**

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 30.11.2021. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 3,72. Печ. л. 4,0. Изд. № 186. Заказ № 731. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20