

И. Ю. Сильвестров¹, К. В. Федин^{2}, А. Л. Лукьянова², А. А. Гриценко²*

Использование стоячих сейсмических волн для обнаружения карстовых полостей в пустынных областях: лабораторный эксперимент

¹ Saudi Aramco, EXPEC Центр Передовых Научных Разработок

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты серии лабораторных экспериментов по обнаружению пустотелых объектов в грунте, имитирующих карстовые пустоты, методом стоячих волн. В основе предлагаемого метода лежит предположение о том, что в пространстве между земной поверхностью и верхней поверхностью полости могут возникать стоячие волны на собственных частотах слоя грунта. Таким образом, по распределению частот и амплитуд стоячих волн можно судить о наличии или отсутствии пустот в исследуемом грунте. Для имитации приповерхностных полостей в нижний слой бетона помещались пустотелые предметы малого и большого диаметров и изменялась толщина верхнего слоя песка. Для возбуждения акустического шумового поля, имитирующего микросейсм, на противоположных боковых гранях модели были установлены два электродинамических громкоговорителя. Регистрация шумовых сигналов производилась широкополосными пьезокерамическими датчиками. Для применения предлагаемой методики к реальным объектам разных масштабов была приведена формула для определения индекса сходства. По полученным данным были построены карты распределения первой выделяемой моды собственных частот и представлены примеры осредненных спектров для моделей с разной толщиной верхнего слоя и диаметрами полости. Проведенные эксперименты показали, что наличие даже тонкого слоя песка достаточно сильно влияет на возможность обнаружения подземной полости и необходимое для накопления время записи, а также возникает уменьшение частоты первой моды.

Ключевые слова: микросейсм, карстовые пустоты, лабораторный эксперимент

I. Y. Silvestrov¹, K. V. Fedin^{2}, A. L. Lukyanova², A. A. Gritsenko²*

Using seismic standing waves for karst voids detection in desert environments: laboratory experiment

¹ Saudi Aramco, EXPEC Advanced Research Center

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: FedinKV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of a series of laboratory experiments on the detection of hollow objects in the ground, simulating karst voids, using the standing wave method. The proposed method is based on the assumption that standing waves at the natural frequencies of the soil layer can arise in the space between the earth's surface and the upper surface of the cavity. Thus, by the distribution of frequencies and amplitudes of standing waves, one can judge the presence or absence of voids in the soil under study. To simulate near-surface cavities, hollow objects of small and large diameters were placed in the lower layer of concrete and the thickness of the upper layer of sand was

changed. To excite an acoustic noise field simulating microseisms, two electrodynamic loudspeakers were installed on opposite side faces of the model. Noise signals were recorded using broadband piezoceramic sensors. To apply the proposed methodology to real objects of different scales, a formula was given to determine the similarity index. Based on the obtained data, maps of the distribution of the first identified mode of natural frequencies were constructed and examples of averaged spectra for models with different thicknesses of the upper layer and cavity diameters were presented. Experiments have shown that the presence of even a thin layer of sand has a strong effect on the possibility of detecting an underground cavity and the recording time required for accumulation, and a decrease in the frequency of the first mode also occurs.

Keywords: microseisms, karst voids, laboratory experiment.

Введение

Известно, что даже на относительно небольших участках земной поверхности могут изменяться геологические условия, свойства и структура горных пород. Наибольшие изменения касаются верхней части разреза (ВЧР), которая, как правило, резко отличается от нижележащих толщ по физическим свойствам.

Возникновение карстовых пустот при нефтедобыче может привести как к экологическим (загрязнение подземных вод), так и к инфраструктурным (обрушения буровых установок) авариям, поэтому прогнозирование изменений структуры и морфологии горных пород, а также возможных деформаций внутри карстующегося массива является актуальной задачей.

Одной из задач геофизики при инженерных изысканиях является обнаружение и картирование пустот, имеющих естественное (карстовые пустоты, пещеры) и искусственное (горные выработки, подземные ходы) происхождения. Так как по результатам бурения скважин при изыскательских работах не всегда можно детально описать исследуемый объект, поэтому на практике для поиска и изучения таких объектов наряду с прямыми методами применяются и различные геофизические методы.

Наибольшее распространения получили различные электроразведочные методы [1, 2] для решения ряда задач экологической и археологической геофизики [3, 4]. В силу резкого контраста проводимости пустот и вмещающих пород этим методом во многих случаях могут быть получены достаточно хорошие результаты. Однако результаты интерпретаций могут быть сильно искажены из-за присутствия даже тонкого слоя с повышенной проводимостью [5].

Существует несколько подходов к определению отклика земной поверхности, вызванного сейсмическими воздействиями. Одним из наиболее точных является метод, основанный на выявлении высокочастотных вибраций, возникающих при столкновении горных пород, например, в зонах активных разломов [6]. Данный метод позволяет спрогнозировать и объяснить возникновение повторных землетрясений [7]. Однако, данный метод подходит только для районов с повышенной сейсмической активностью. Кроме того, для локализации слабых землетрясений требуются записи с регистраторов, представленных плотной сетью станций в течении длительного периода наблюдений. Существуют и ме-

тоды, основанные на изучении свойств пород верхней части разреза, в частности, амплитудно-частотных характеристик для сейсмического микрорайонирования [8], но такие измерения являются достаточно длительными и затратными.

Долгое время основным средством изучения поверхностных неоднородностей являлся метод преломленных волн, основанный на регистрации первых вступлений, однако он не может обеспечить высокую точность при определении нескольких границ, наблюдающихся при достаточно большой мощности зоны малых скоростей (ЗМС), что зачастую приводит к тому, что становится невозможным однозначно интерпретировать данные [9]. Существуют и различные модификации метода отраженных волн (МОВ), например, метод общей глубинной точки (МОГТ), позволяющий проследивать конфигурацию границ и выявлять их изменения, которые могут быть связаны с различными геологическими неоднородностями и объектами. Оптимальным является комплексирование данных МОГТ и метода преломленных волн (МПВ) – установкой такого типа можно получить детальную модель ВЧР [10]. Однако, такие методы являются более трудоемкими и дорогими с экономической точки зрения [11].

На сегодняшний день широкое распространение получили методы с использованием записей микросейсм для оценки реакции земной поверхности на различные сейсмические воздействия [12, 13, 14, 15]. При применении данной методики изучаются как амплитудные характеристики, так и преобладающие периоды исследуемого грунта. Такие методы хоть и являются довольно дешевыми и не требуют больших временных затрат, но их нельзя назвать высокоточными, в особенности при работе с малокаанальной аппаратурой.

Описание методики микросейсм для обнаружения пустот

Существуют различные методики обнаружения пустот в верхней части разреза. Так, обнаружение воздушных полостей и их границ возможно при регистрации акустической эмиссии [16]. В этом случае резонаторами выступают пещеры и подземные сооружения.

Одним из способов повышения точности сейсмического микрорайонирования с использованием записей микросейсм, полученных малокаанальной аппаратурой является методика, основанная на пересчете данных к единому времени с использованием синхронных записей [17, 18], что позволяет более эффективно выделять стоячие волны, формирующиеся в ВЧР из микросейсмического поля.

Данная методика опробована как на объектах с заданными геометрическими характеристиками и свойствами (физическое моделирование) [19], так и на реальных объектах [20].

В основе предлагаемого метода обнаружения подземных пустот лежит предположение о том, что в пространстве между земной поверхностью и верхней поверхностью полости могут возникать стоячие волны на собственных частотах слоя грунта, мощность которого равна расстоянию между этими поверхностями. Второе предположение состоит в том, что спектр сейсмоакустических шумов (микросейсм) содержит частотные составляющие, соответствующие этим собственным частотам. Таким образом, накапливая амплитудные спектры шумовых

записей, можно выделить на них пики, соответствующие стоячим волнам, образующимся под действием микросейсм в пространстве между дневной поверхностью и искомым объектом. Критерием того, что выделяемые пики соответствуют стоячим волнам, является их регулярность на оси частот.

Это следует из того, что в возникающей в слое стоячей волне на земной поверхности образуется пучность, а на нижней поверхности, в зависимости от условий отражения, либо пучность на границе с полостью или акустически менее жесткой средой, либо узел на границе с акустически более жесткой средой (подобно стоячим волнам в незакрепленном или закрепленном одним концом стержнях [21]). При этом на толщине слоя должно укладываться в первом случае целое число полудлин, а во втором – нечетное число четвертей длин стоячих волн. Из этого следует, что регулярный характер пиков, выделяющихся на осредненном спектре, соответствует стоячим волнам, так как интервал между соседними собственными частотами любого слоя равен частоте низшей моды стоячих волн в таком слое со свободными границами.

Собственные частоты для колебаний слоя типа вертикального сжатия-растяжения в этих двух случаях определяются, соответственно, формулами:

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

для слоя над полостью (менее жесткой средой) или

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

для слоя над более жесткой средой, где n – номер моды стоячих волн; V_p – скорость продольных волн в слое; h – толщина слоя. В обоих случаях интервал между соседними собственными частотами $\Delta f = (f_{n+1} - f_n)$ равен $V_p / 2h$, т. е. т. е. частоте низшей моды f_1 над полостью или менее жестким грунтом (1), или удвоенной частоте низшей моды f_1 над более жестким грунтом (2).

Следовательно, по распределению частот и амплитуд стоячих волн можно судить о наличии или отсутствии пустот в грунте. Кроме того, при известной скорости V_p во вмещающей среде, используя формулу (1), по собственным частотам можно оценить глубину залегания верхней границы полости.

На формирование стоячих волн в пространстве между пустотелым объектом и поверхностью в реальных условиях могут влиять такие факторы, как неоднородность приповерхностных грунтов, кривизна земной поверхности и поверхности объекта и т. д. Тем не менее, приведенные ниже результаты физического моделирования демонстрируют принципиальную возможность обнаружения пустот по сейсмоакустическим шумам.

Лабораторный эксперимент

Схема экспериментов приведена на рис. 1. Эксперименты проводились на трехмерных моделях двухслойных сред с пустотами в нижнем слое. Модели имели форму параллелепипедов с горизонтальным сечением $0.3 \times 0.3 \text{ м}^2$. Нижний бетонный слой был изготовлен из смеси цемента М400 и речного песка с максимальным размером зерен 0.3 мм в соотношении 1:1, тонкий верхний слой – из речного песка. Для имитации приповерхностных полостей в нижний слой при изготовлении модели помещались пустотелые предметы, после чего модели выдерживались несколько дней до отвердевания бетонного слоя.

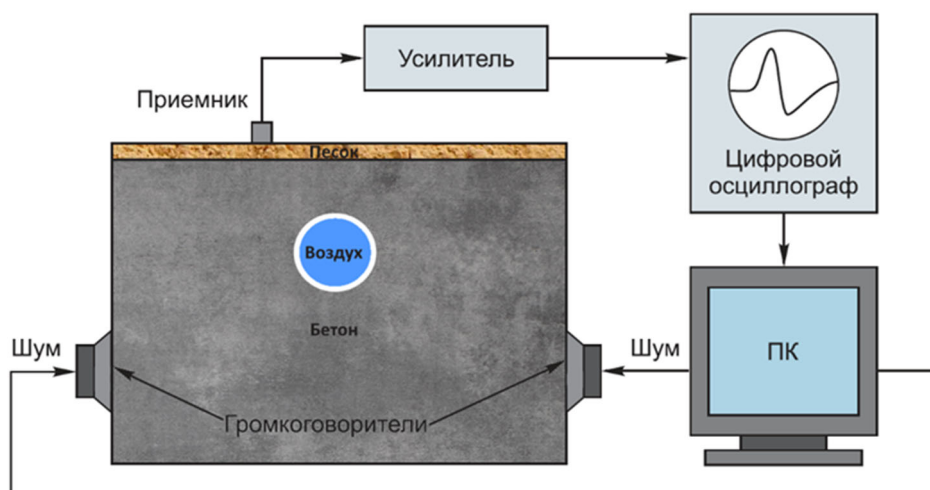


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Для возбуждения акустического шумового поля, имитирующего микросейсм, на противоположных боковых гранях модели были установлены два электродинамических громкоговорителя, на которые с двухканального аудиовыхода компьютера (ПК) подавались независимые электрические сигналы, генерируемые программой в режиме белого шума.

Регистрация шумовых сигналов производилась широкополосными пьезокерамическими датчиками поршневого типа диаметром 0.002 м. Оси максимальной чувствительности датчиков были ориентированы по нормали к поверхности модели (рис. 2а), поэтому регистрировались преимущественно ее вертикальные колебания. Сигналы от датчиков с помощью цифрового осциллографа В-423 записывались на жесткий диск компьютера для последующей обработки. Длительность регистрации при каждом положении датчиков варьировалась в зависимости от получаемого результата для выявления критерия достаточного времени записи на разных конфигурациях модели. Измерения проводились на верхних гранях моделей на площади $0.2 \times 0.2 \text{ м}^2$ (0.05 м с каждой стороны исключались из процесса измерений для избежания краевых эффектов, рис. 2б), система наблюдений – квадратная сетка с шагом 0.01 м.

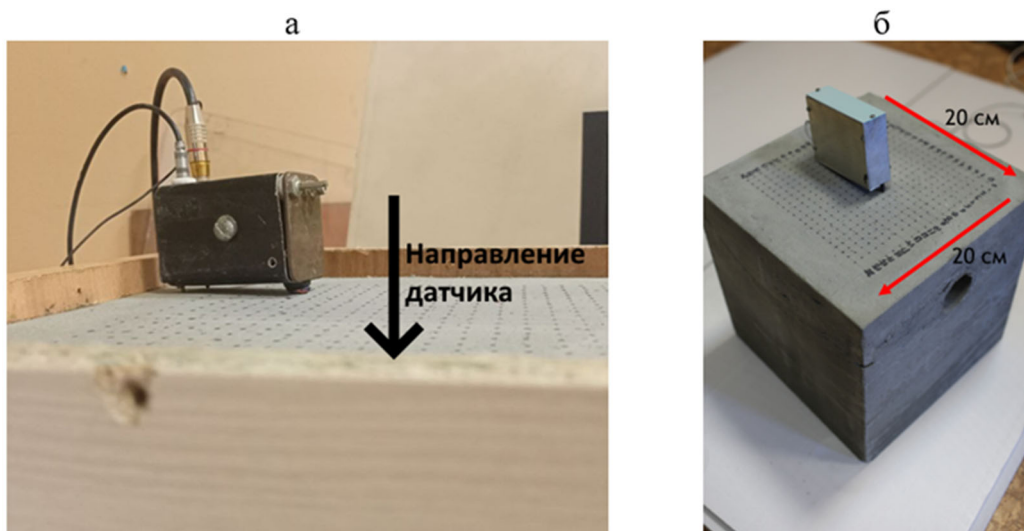


Рис. 2. Система наблюдений в физическом моделировании. а – положение датчика на отдельно взятой точке наблюдения; б – сетка расстановки датчика

Результаты лабораторного эксперимента

Первые 3 эксперимента были проведены на модели, имитирующей карст (цилиндрическую полость) диаметра (рис. 3).

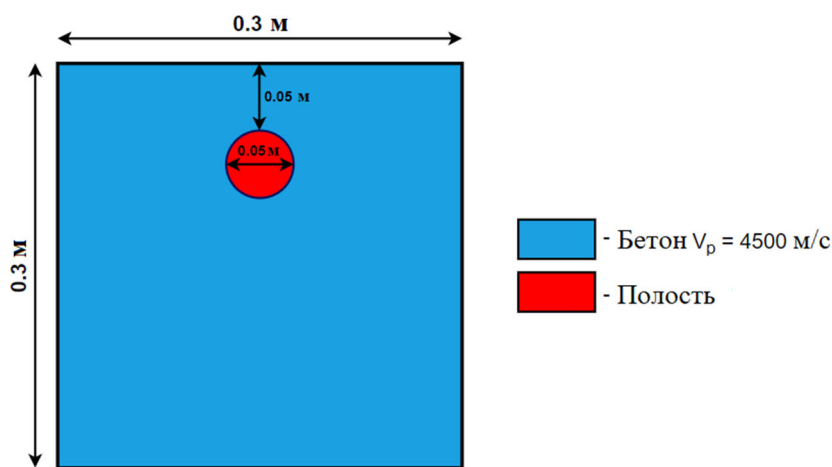


Рис. 3. Схематичное изображение лабораторной модели карста малого диаметра

В результате были построены карты распределения частот первой выделяемой моды собственных колебаний и представлены примеры осредненных спектров для моделей с разной толщиной верхнего слоя и малой полостью.

При отсутствии песка неоднородность четко выделяется за 10 секунд записи (рис. 4). Первая (45.33 кГц) мода доминирует на осредненном спектре, ее частота практически совпадает с рассчитанной по формуле (1) частотой 45 кГц (рис. 4б). Также хорошо выделяются вторая (90.6 кГц) и четвертая (181.3 кГц) моды, частоты которых кратны частоте первой моды.

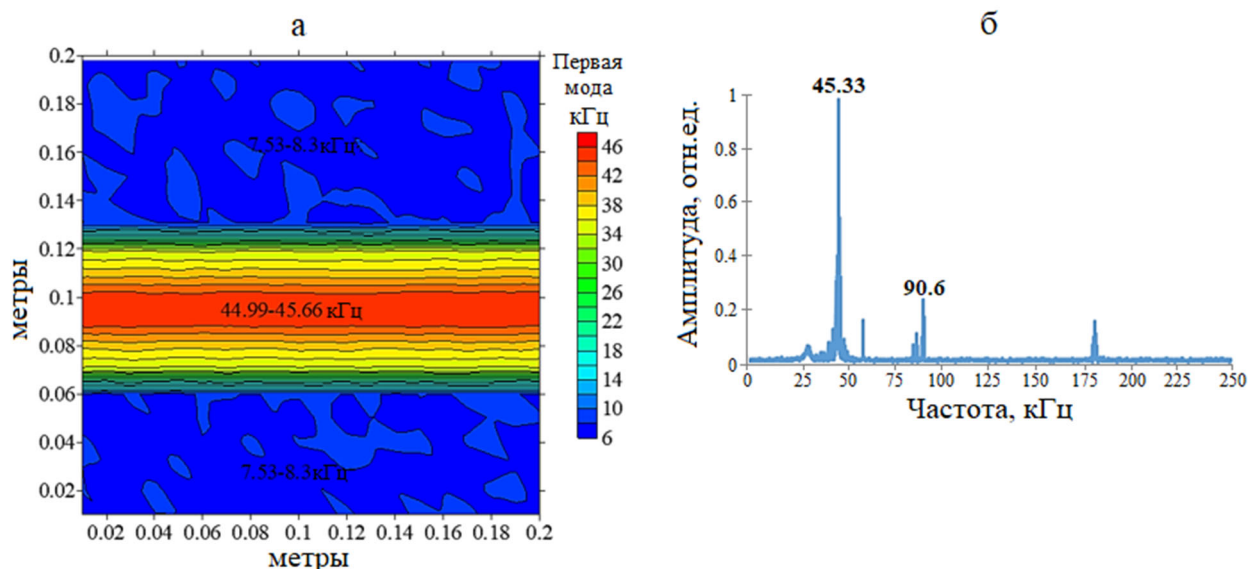


Рис. 4. Карта распределения частот первой моды собственных колебаний (а) и пример отдельно взятого спектра (б)

Не совсем понятно, с чем связано отсутствие на осредненном спектре пика третьей моды, возможно с геометрическими особенностями модели (с краевыми эффектами).

Выделение неоднородности для случая с наличием тонкого слоя песка (0.02 м) заняло больше времени, а именно 60 секунд. На карте распределения частоты первой моды (рис. 5а) хуже выделяются очертания полости. Первая мода на спектре (рис. 5б) имеет значение меньше расчетного (порядка 32 кГц).

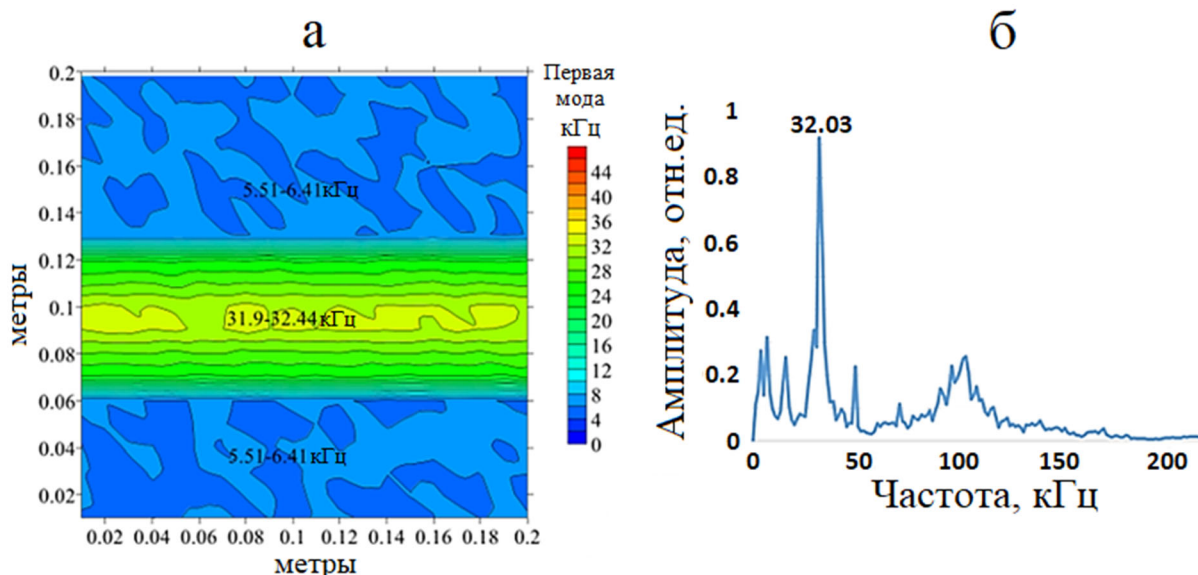


Рис. 5. Карта распределения частот первой моды собственных колебаний (а) и пример отдельно взятого спектра (б)

По-видимому, это связано с некоторым увеличением за счет песка суммарной толщины слоя, в котором образуются стоячие волны между верхними поверхностями модели и полости, и со снижением, также из-за песка, средней скорости в этом двойном слое.

Результат в случае со слоем песка в 0.03 м аналогичен предыдущему. Частота (рис. 6б) вновь уменьшилась (порядка 18 кГц) относительно расчетных значений и предыдущего эксперимента с 0.02 м песка. Потребовалось больше времени на накопление сигнала (510 сек) для выделения на карте (рис. 6а) неоднородности.

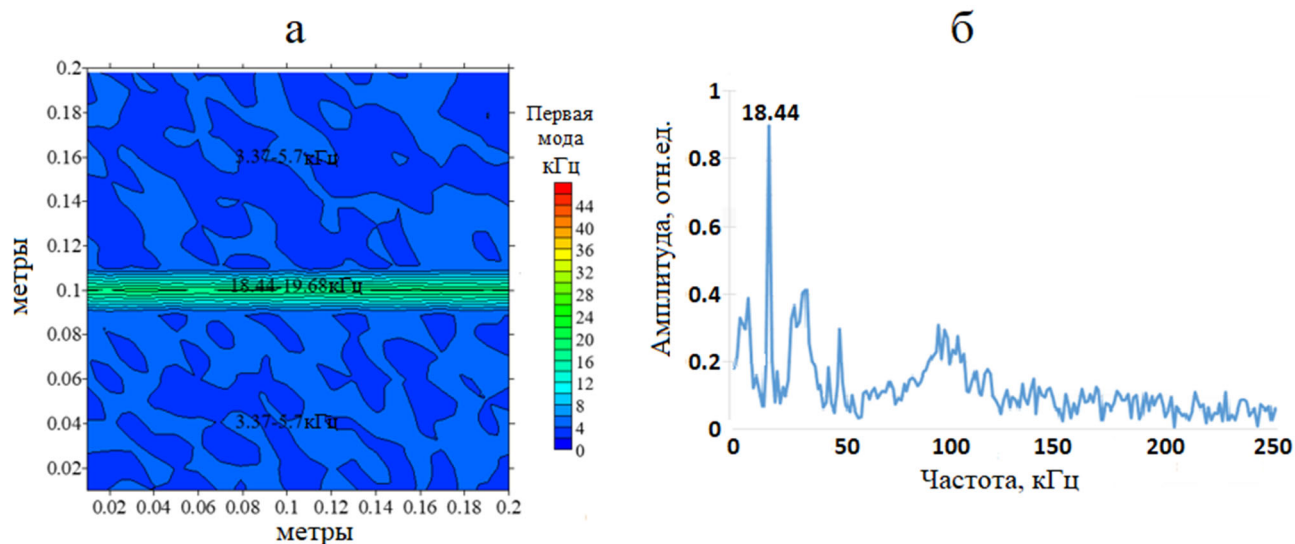


Рис. 6. Карта распределения частот первой моды собственных колебаний (а) и пример отдельно взятого спектра (б)

Заключение

На данных трехмерного физического моделирования продемонстрирована принципиальная возможность обнаружения пустотелых объектов, моделирующих карстовые пустоты, по записям микросейсм. Данный метод основан на выделении стоячих волн, формирующихся под воздействием шумов в пространстве между земной поверхностью и верхней границей полости. Были проведены эксперименты по регистрации шумовых данных на площадной поверхностной системе наблюдений для двух моделей с полостями разных диаметров, расположенных на близких к диаметру глубинах. В результате осреднения амплитудных спектров разбитых на блоки шумовых данных построены карты распределения частот первой моды собственных колебаний и представлены примеры осредненных спектров. Проведенные эксперименты показали, что наличие даже тонкого слоя песка достаточно сильно влияет на возможность обнаружения подземной полости и необходимое для накопления время записи, а также возникает уменьшение частот стоячих волн, что связано с тем, что песчаный слой имеет низкую скорость распространения сейсмических волн, а также несколько увеличивает глубину залегания полости. Предложенный подход может быть использован для

развития пассивных сейсмических методов обнаружения и исследования приповерхностных пустотелых объектов различного происхождения, в том числе карстовых пустот, пещер, тоннелей, подземных трубопроводов.

Благодарности

Мы выражаем благодарность Андрею Бакулину, Ахмаду Рамдани, Ю. И. Колесникову и Марвану Шарара за их непосредственный существенный вклад в результаты данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Georadar investigations to detect cavities in a historical town damaged by an earthquake of the past / F. T. Gizzi [et al.] // *Advances in Geosciences*. – 2010. – V. 24. – P. 15-21.
2. The electrical resistivity tomography method in the detection of shallow mining cavities. A case study on the Victoria Cave, Cartagena (SE Spain) / P. Martinez-Pagan [et al.] // *Engineering Geology*. – 2013. – V. 156. – P. 1-10.
3. Dahlin T., Leroux V., Nissen J. Measuring techniques in induced polarization imaging // *Journal of Applied Geophysics*. – 2002. – V. 50, N. 3. – P. 279-298.
4. Pellerin L. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations // *Surveys in Geophysics*. – 2002. – V. 23, N. 2. – P. 101–132.
5. Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia / R. Putiška [et al.] // *Journal of Cave and Karst Studies*. – 2014. – V. 76, N. 3. – P. 155-163.
6. Tsai V.C., Hirth G. Elastic Impact Consequences for High-Frequency Earthquake Ground Motion // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – V. 47, N. 5. – P. 1-8.
7. Seismic and geodetic evidence for extensive, long-lived fault damage zones / E. S. Cochran [et al.] // *Geology*. – 2009. – V. 37, N. 4. – P. 315-318.
8. Influence of the upper section on the amplitude-frequency content of a seismic signal by the example of seismic stations in the Baikal and the Transbaikal region / A. F. Drennov, V. I. Dzhurik, S. P. Serebrennikov, N. N. Drennova // *Seismic Instruments*. – 2011. – V. 47, N. 1. – P. 57-65.
9. Liu Z., Wang J. Periods of refracted P-waves in coal seams and their applications in coal thickness estimations // *Applied Geophysics*. – 2020. – V. 68. – P. 1753-1762.
10. Yilmaz Ö. *Seismic data processing* / Ö. Yilmaz. – Tulsa, OK : Society of Exploration Geophysicists, 1987. – 526 с.
11. Park C., Mille R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) // *Geophysics*. – 1999. – V. 64., N. 3. – P. 800-808.
12. The earthquake on 12 April 1998 in the Krn mountains (Slovenia): ground-motion amplification study using microtremors and modelling based on geophysical data / A. Gosar, R. Stopar, M. Car, M. Mucciarelli // *Journal Applied Geophysics*. – 2001. – Vol. 47, N. 2. – P. 153-167.
13. Parolai S., Bormann P., Milkereit C. New relationships between V_s , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany) // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2002. – Vol. 92. – № 6. – P. 2521-2527.
14. Gosar A. Microtremor HVSR study for assessing site effects in the Bovec basin (NW Slovenia) related to 1998 Mw5.6 and 2004 Mw5.2 earthquakes // *Engineering Geology*. – 2007. – V. 91, N. 2-4. – P. 178-193.
15. Active seismic and passive microtremor HVSR for assessing site effects in Jammu city, NW Himalaya, India – A case study / A.K. Mahajan [et al.] // *Journal Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 77. – P. 51–62.
16. Патент № 2501041 Российская Федерация, МПК G01V 1/00. Неразрушающий способ обнаружения пустот в верхней части разреза земной коры : № 2010142339/03 : заявл. 15.10.2010 : опубл. 10.12.2013 / Бурдакова Е. В. – 8 с.

17. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях / А. Ф. Еманов [и др.] // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 192-207.
18. Резонансные свойства верхней части разреза / А. Ф. Еманов [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 26–36.
19. Федин К. В. Резонансные свойства верхней части разреза (ВЧР) по данным физического моделирования. // Проблемы недропользования. – 2014. – № 1. – С. 59-64.
20. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л. Картирование подземных пустот методом стоячих волн (на примере Барсуковской пещеры) // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. 14, № 2. – С. 52-63.
21. Хайкин С. Э. Физические основы механики. – М.: Наука, 1971. – 752 с.

© И. Ю. Сильвестров, К. В. Федин, А. Л. Лукьянова, А. А. Гриценко, 2024