

И. Ю. Сильвестров¹, К. В. Федин^{2}, А. Л. Лукьянова², В. И. Карпухин²*

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

¹ Сауди Арамко, 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 полевых 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 зарывались две мишени в песок с разными условиями. Регистрация шумовых сигналов производилась специализированной низкошумной аппаратурой. По полученным полевым данным обнаружены две мишени (полые объекты) на расстоянии до трёх метров от дневной поверхности.

Ключевые слова: микросейсмы, карстовые пустоты, полевой эксперимент

I. Y. Silvestrov¹, K. V. Fedin^{2}, A. L. Lukyanova², V. I. Karpukhin²*

Detection of near-surface cavities using vibration analysis (field 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 field 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, two targets were buried in sand under different conditions. Noise signals were recorded using specialized low-noise equipment. According to the field data obtained, two targets (hollow objects) were discovered at a distance of up to three meters from the daylight surface.

Keywords: microseisms, karst voids, field experiment

Введение

Геофизические методы используются для обнаружения и исследования карстовых пустот, которые представляют собой подземные полости и пещеры, образованные в результате вымывания растворимых пород (таких как известняк, доломит, мел, гипс) подземными водами.

Основные геофизические методы, используемые для поиска и изучения карстовых пустот:

1. Магнитометрия: Этот метод основан на измерении магнитного поля Земли. Вблизи карстовых пустот магнитное поле может быть искажено из-за наличия магнитных минералов в растворимых породах [1].

2. Электроразведка: Этот метод использует измерение электрического сопротивления пород для определения их состава. Растворимые породы обычно имеют более низкое сопротивление, чем окружающие нерастворимые породы [2, 3, 4, 5, 6].

3. Гравиметрия: Метод основан на измерении гравитационного поля Земли. Карстовые пустоты могут вызвать локальные изменения в гравитационном поле, что может быть обнаружено с помощью гравиметра [7].

4. Сейсморазведка – это метод, основанный на анализе скорости и амплитуды сейсмических волн. Карстовые полости могут отражать или поглощать сейсмические волны, что позволяет выявить их наличие и характеристики [8, 9, 10, 11, 12, 13].

В наше время для определения реакции поверхности земли на сейсмические действия часто используются методики, которые базируются на анализе показаний микроземлетрясений. В процессе применения таких методик анализируются как амплитудные особенности, так и основные периоды изучаемого грунта. Несмотря на то, что такие методы достаточно экономичны и не занимают много времени, их точность оставляет желать лучшего, особенно когда используется малоканальное оборудование [14, 15, 16, 17].

Описание методики микросейсм для обнаружения пустот

Существуют различные методы обнаружения пустот в верхних слоях грунта [18, 19, 20]. Один из них - регистрация акустической эмиссии, в ходе которой резонаторами могут выступать пещеры и подземные сооружения. Другой метод - это методика сейсмического микрорайонирования, основанная на преобразовании данных ко времени с использованием одновременных записей. Этот метод позволяет более точно выделить стоячие волны в верхней части грунта из микросейсмического поля. Эта методика была проверена как на объектах с известными геометрическими характеристиками (физическое моделирование), так и на реальных объектах [21, 22]. Основной принцип этого метода обнаружения полостей заключается в том, что стоячие волны могут образовываться на собственных частотах грунта между поверхностью земли и верхней границей полости [23].

Таким образом, распределение частот и амплитуд стоячих волн может указывать на наличие или отсутствие пустот в земле. Более того, зная скорость рас-

пространения волн во вмещающем материале, можно оценить глубину расположения верхней границы полости по собственным частотам.

На образование стоячих волн между пустотным объектом и поверхностью могут повлиять такие факторы, как неоднородность верхних слоев грунта, неровность поверхности земли и объекта и так далее. Однако результаты полевого моделирования, приведенные далее, показывают принципиальную возможность определения пустот с помощью сейсмоакустических шумов.

Полевой эксперимент

Для регистрации использовались трехкомпонентные геофоны и трехканальные автономные цифровые регистраторы с частотой дискретизации 5кГц. Конкретные регистраторы (были выбраны в силу того, что они обладают более низким уровнем внутреннего шума, в сравнении с другими регистрирующими аппаратами (рис. 1), что в нашем случае значительно повышало качество выходных данных [24].

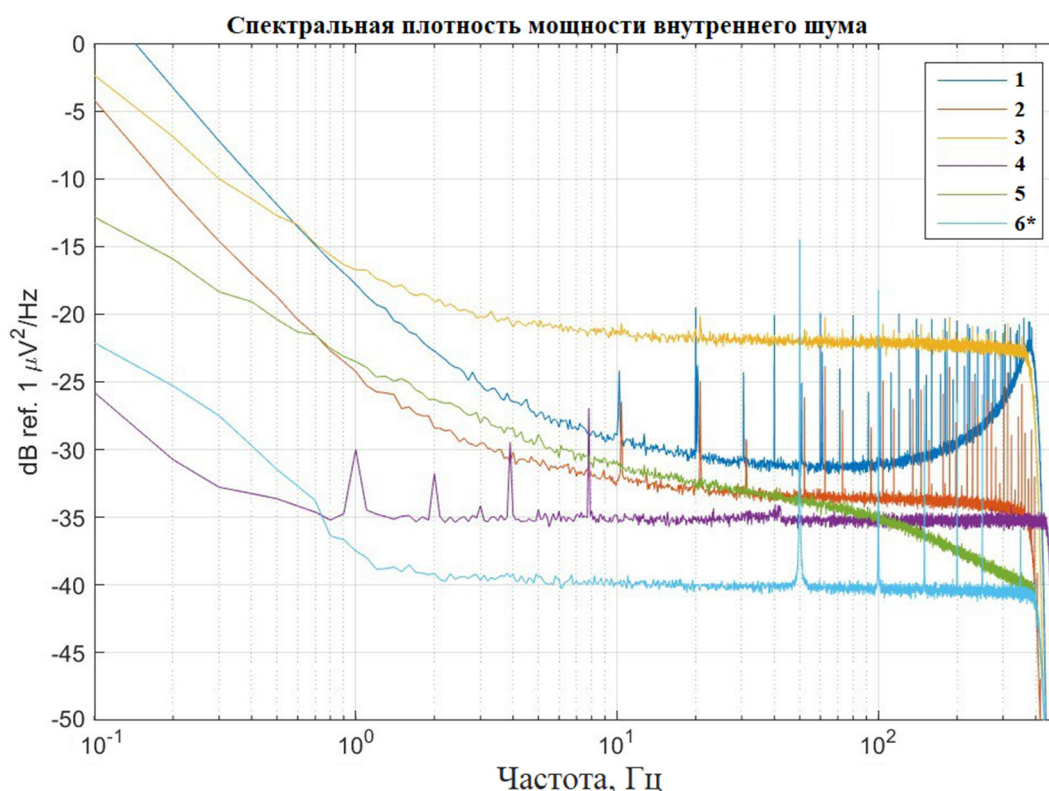


Рис. 1. Уровень внутреннего шума для различных цифровых регистратором. В данной работе использовался регистратор под номером 6.

Данные регистраторы были выбраны в силу того, что они обладает более низким уровнем внутреннего шума, в сравнении с другими регистрирующими аппаратами, что в нашем случае значительно повышало качество выходных данных.

Полость была создана в песчаном отвале путем погребения пустотелых мишеней, в качестве которых выступали – пластиковый бак объемом 90 литров и пластиковая канистра объемом 20 литров (рис. 2).



Рис. 2. Мишени для поиска

Для проведения эксперимента была выбрана песчаная насыпь, в которой прокапывались ямы таким образом, чтобы поместить в них мишень, а расстояние от кровли погребенной мишени до дневной поверхности было около 1 метра. После установки мишени закапывались (рис. 3). Место погребения представляло из себя небольшую песочную насыпь.



Рис. 3. Погребенная мишень объемом 20 литров

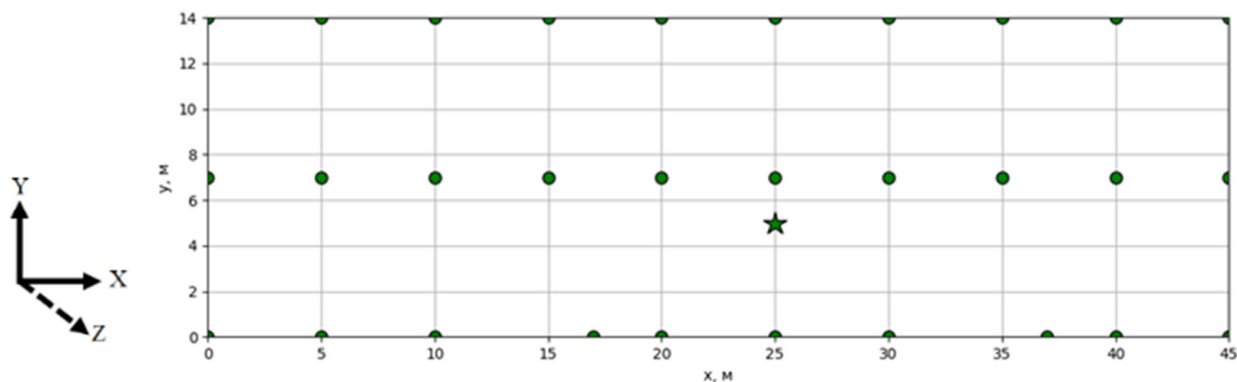


Рис. 4. Система наблюдения. Круги – пункты измерения, звезда – опорный пункт

Для поиска 90-литровой мишени производилась регистрация шумов в каждой точке наблюдения в течение 20 минут. Система наблюдения состоит из опорного датчика, расположенного посередине исследуемой области, регистраторы перемещались вдоль трёх профилей, расстояние между соседними профилями – 7 метров. Каждый профиль содержит 10 точек измерений, расположенных с шагом – 5 метров.

Процесс регистрации данных показан на рисунке 5.



Рис. 5. Процесс регистрации данных (20-литровая мишень)

Методика обработки и полученные результаты

Алгоритм выделения стоячих волн из микросейсм состоит в следующем:

1. Проверка датчиков на идентичность записи. Датчики устанавливаются в бункере на постаменте для проверки аппаратуры на идентичность. Установка

производилась на полигоне “Ключи” недалеко от Новосибирского Академгородка.

2. Регистрация когерентных «паразитных» шумов, для последующего учета при обработке полученных данных.

3. Регистрация шумовых записей на исследуемом объекте для выделения в них стоячих волн с использованием двух датчиков – статично зафиксированного в одной точке и перемещаемого.

4. Нормировка уровня шумов перемещаемого датчика на уровень опорного для каждого измерения.

5. Разбиение шумовых записей на блоки (в данном случае по 8192 отчета).

6. Преобразование Фурье для каждого блока и усреднение полученных амплитудных спектров путем их суммирования.

7. Построение карт амплитудно-частотного распределения на исследуемой площади методом триангуляции с линейной интерполяцией.

В итоге после обработки данных на амплитудном распределении на конкретной частоте видны аномалии, которые соответствуют двум мишеням. Аномалия слева (обозначена стрелкой) соответствует 90-литровой пустоте, справа - 20-литровой (рис. 6).

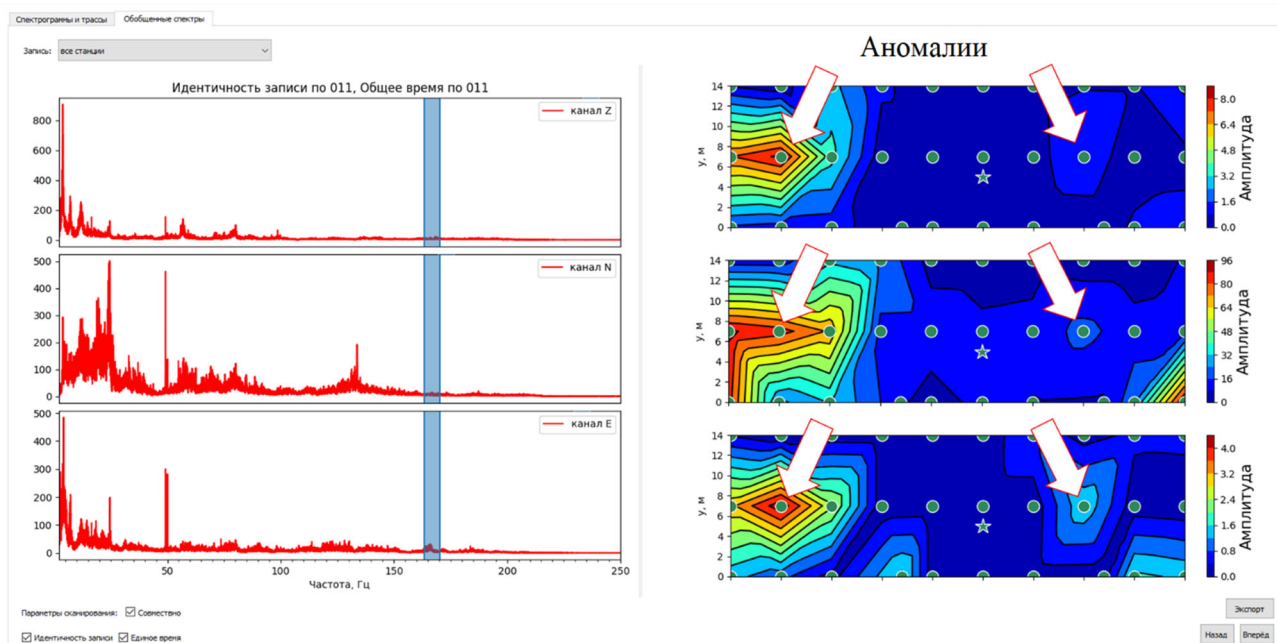


Рис. 6. Процесс обработки данных, примерно на 160 Гц на амплитудном распределении видны две аномалии, обозначенные стрелками

Также были проведены дополнительные эксперименты с шагом измерений через 20 см, чтобы определить на каком расстоянии на поверхности можно обнаружить аномалию. Всего было проведено восемь полевых экспериментов на разных песочных сопках.

В таблице 1 представлены условия проведения экспериментов (время регистрации, размер и глубина расположения мишени), а также частоты мод и максимальный горизонтальный отступ датчика от мишени L_{MAX} , при котором возможно их обнаружение.

Таблица 1

Параметры и результаты экспериментов

Размер мишени	Толщина песка, м	Время регистрации, сек	Регистрируемые низшие моды, Гц	L_{MAX} , м
90 литров	1	120	155.03-164.84	2, 8
90 литров	2	340	139.65-143.23	1,7
90 литров	3	630	119,95-124.29	1
90 литров	4	~ 45000	–	–
20 литров	1	120	155.03-164.84	0,7
20 литров	2	340	139.65-143.23	0,5
20 литров	3	630	119,95-124.29	0,2
20 литров	4	~ 45000	–	–

Заключение

Проведена серия экспериментов по обнаружению пустот большого (90 литров) и малого (20 литров) размеров, расположенных на разной глубине при расположении датчиков на разных удалениях. Для объектов данных размеров возможно обнаружение до глубины – 3 метра. Получены необходимые параметры частоты и удаления датчиков, позволяющие обнаружить полые тела.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Плоткин В.В., Дядьков П.Г., Овчинников С.Г. Оценки тензора анизотропии электропроводности в нижней мантии по геомагнитным данным // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 12. – С. 2240-2249.
2. 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.
3. 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.
4. Dahlin T., Leroux V., Nissen J. Measuring techniques in induced polarization imaging // Journal of Applied Geophysics. – 2002. – V. 50, N. 3. – P. 279-298.
5. Pellerin L. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations // Surveys in Geophysics. – 2002. – V. 23, N. 2. – P. 101–132.
6. 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.

7. Первые итоги и перспективы нового подхода к исследованию активных геологических процессов с использованием космических и наземных инструментальных измерений (на примере Камчатки и Центрально-Азиатского горного пояса) / Н. Л., Добрецов [и др.] // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62, № 1. – С. 58-84.
8. 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.
9. 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.
10. 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 Instrumens.* – 2011. – V. 47, N. 1. – P. 57-65.
11. 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.
12. Yilmaz Ö. *Seismic data processing* / Ö. Yilmaz. – Tulsa, OK : Society of Exploration Geophysicists, 1987. – 526 с.
13. Park C., Mille R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves (MASW) // *Geophysics*. – 1999. – V. 64., N. 3. – P. 800-808.
14. 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.
15. Parolai S., Bormann P., Milkereit C. New relationships between Vs, 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях / А. Ф. Еманов [и др.] // *Геология и геофизика*. – 2002. – Т. 43, № 2. – С. 192-207.
20. Резонансные свойства верхней части разреза / А. Ф. Еманов [и др.] // *Физическая мезомеханика*. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 26–36.
21. Федин К. В. Резонансные свойства верхней части разреза (ВЧР) по данным физического моделирования. // *Проблемы недропользования*. – 2014. – № 1. – С. 59-64.
22. 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.
23. Хайкин С. Э. *Физические основы механики*. – М.: Наука, 1971. – 752 с.
24. Епонешникова Л.Ю., Дергач П.А. Обоснование выбора регистрирующей аппаратуры для задач сейсмического мониторинга. Дни науки НГТУ-2018: Материалы научной студенческой конференции (итоги научной работы студентов за 2017-2018 гг.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – С. 66-67.

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