

ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ

ISSN 1997-8650 (Print)
ISSN 2587-8255 (Online)

ENGINEERING SURVEY

Vol. XIV • Том XIV 2/2020

МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

При поддержке:

Саморегулируемая организация



Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве»



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Разумов В.В., Богданова Н.Д., Разумова Н.В., Висхаджиева К.С., Князев А.П.

Активность основных оползневых массивов в бассейнах рр. Урсдон и Ардон (Республика Северная Осетия-Алания)10

Миронюк С.Г., Росляков А.Г., Иванова А.А., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Мартын А.А.

Изучение субвертикальных зон дезинтеграции («труб дегазации») в осадочном чехле морских нефтегазоносных бассейнов (на примере Охотского моря)28

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Владов М.Л., Стручков В.А., Судакова М.С., Шмурак Д.В.

Томографические просвечивания при больших межскважинных расстояниях: негативные факторы42

Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л.

Картирование подземных пустот методом стоячих волн (на примере Барсуковской пещеры)52

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

Федосеев Ю.Е.

Объединение разрозненных топографических материалов с применением фильтра Колмогорова-Винера64

Отраслевые новости72

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);	25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);
05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);	25.00.28 – Океанология (географические науки);
25.00.03 – Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);	25.00.28 – Океанология (геолого-минералогические науки);
25.00.07 – Гидрогеология (геолого-минералогические науки);	25.00.28 – Океанология (физико-математические науки);
25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (географические науки);	25.00.31 – Гляциология и криология Земли (географические науки);
25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);	25.00.31 – Гляциология и криология Земли (геолого-минералогические науки);
25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);	25.00.32 – Геодезия (технические науки);
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки);	25.00.33 – Картография (географические науки);
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физико-математические науки);	25.00.33 – Картография (технические науки);
25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки);	25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (технические науки);
25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);	25.00.35 – Геоинформатика (географические науки);
25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (геолого-минералогические науки);	25.00.35 – Геоинформатика (геолого-минералогические науки);
	25.00.35 – Геоинформатика (технические науки);
	25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (географические науки);
	25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (геолого-минералогические науки).

ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Razumov V.V., Bogdanova N.D., Razumova N.V., Viskhadzhieva K.S., Knyazev A.P.

Activity of the main landslide massifs in the Ursdon and Ardon River basins (Republic of North Ossetia-Alania)10

Mironyuk S.G., Roslyakov A.G., Ivanova A.A., Terekhina Ya.E., Tokarev M.Yu., Martyn A.A.

Study of subvertical disintegration zones (“degassing pipes”) in the sedimentary cover of offshore oil and gas bearing basins (a case study of the Sea of Okhotsk)28

GEOFYSICAL STUDIES

Vladov M.L., Struchkov V.A., Sudakova M.S., Shmurak D.V.

Tomographic surveying at large cross-well distances: negative factors42

Fedin K.V., Kolesnikov Yu.I., Ngomayezwe L.

Mapping underground cavities using standing wave method (a case study of Barsukovskaya Cave)52

ENGINEERING-GEODESIC SURVEYS

Fedoseev Yu.E.

Combining disparate topographic materials using Kolmogorov-Wiener filter64

Industry News72



https://static.wixstatic.com/media/f9e927_0ed141bcfa03427fa763a26b11e47602-mv2.jpg



Источник: <https://pbs.twimg.com/media/EXOU36-XgAA5NSD.jpg>

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

ФЕДИН К.В.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия, FedinKV@ipgg.sbras.ru

Адрес: пр. Академика Коптюга, д. 3, г. Новосибирск, 630090, Россия

КОЛЕСНИКОВ Ю.И.*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия, KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

НГОМАЙЕЗВЕ Л.

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, Lngomayezwe@gmail.com

Адрес: ул. Пирогова, д. 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 20.03.2020 / Принята к публикации 25.04.2020 / Дата публикации 30.04.2020

© ООО «Геомаркетинг», 2020

Аннотация: пассивный сейсмический метод стоячих волн использован для исследования Барсуковской карстовой пещеры. Территориально она расположена в Новосибирской области примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирск и является памятником природы областного значения. Ходы и гроты пещеры общей длиной около 200 м образовались в массиве карбонатных пород, выходящих на поверхность на крутом правом берегу р. Укроп. Их максимальная глубина от поверхности земли достигает нескольких десятков метров. Использованный для исследования пещеры метод основан на эффекте генерации микросейсмами семейства стоячих волн в породном массиве между земной поверхностью и кровлей пещеры. Характерной особенностью этих волн является кратность их частот частоте самой низшей моды стоячих волн. Накопление большого числа амплитудных спектров записей микросейсм, зарегистрированных вертикальными геофонами, позволяет определять частоты нескольких первых мод стоячих волн сжатия-растяжения, возникающих над сводами пещеры. Площадные пассивные сейсмические наблюдения на земной поверхности над пещерой позволили построить карту распределения частоты низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения, формирующихся над сводами пещеры. Так как над ненарушенным породным массивом стоячие волны не наблюдались, то эта карта отражает строение пещеры в плане, что подтверждает сравнение со схемой пещеры, составленной ранее одним из спелеологов. Определенная по отобранным возле входа в пещеру образцам породы скорость продольных волн $V_p = 3120$ м/с была использована для построения карты глубин сводов пещеры относительно земной поверхности. Эта карта на качественном уровне также согласуется с данными спелеологов.

Ключевые слова: карстовая пещера; пассивный сейсмический метод; площадные наблюдения; микросейсмы; стоячие волны; натурный эксперимент

Благодарности: работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг., проект № 0331-2019-0009 «Динамический анализ сейсмических данных для построения реалистичных моделей геологической среды на основе математического и физического моделирования».

Ссылка для цитирования: Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л., 2020. Картирование подземных пустот методом стоячих волн (на примере Барсуковской пещеры). Инженерные изыскания, Том XIV, № 2, с. 52–63, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-2-52-63>.

MAPPING UNDERGROUND CAVITIES USING STANDING WAVE METHOD (A CASE STUDY OF BARSUKOVSKAYA CAVE)

KONSTANTIN V. FEDIN

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Novosibirsk, Russia;

FedinKV@ipgg.sbras.ru

Address: Bld. 3, Academica Koptiyuga Ave, 630090, Novosibirsk, Russia

YURY I. KOLESNIKOV*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Novosibirsk, Russia;

KolesnikovYI@ipgg.sbras.ru

LUCKYMORE NGOMAYEZWWE

Novosibirsk State University; Novosibirsk, Russia; Lngomayezwe@gmail.com

Address: Bld. 1, Pirogova St., 630090, Novosibirsk, Russia

Original paper

Received 20 March 2020 / Accepted 25 April 2020 / Published 30 April 2020

© Geomarketing LLC, 2020

Abstract: it was used passive seismic method of standing waves to study the Barsukovskaya karst cave. It's located in the Novosibirsk Oblast about 100 km to the south-east from Novosibirsk. Barsukovskaya Cave is a natural monument of regional significance. Cave passages and grottoes with a total length of about 200 m were formed in a massif of carbonate rocks that emerge to the surface on the steep right bank of the Ukrop River. Their maximum depth from the earth's surface reaches several tens of meters. The method used to study the cave is based on the effect of generation by microtremor of a family of standing waves in the rock mass between the earth's surface and the roof of the cave. A characteristic feature of these waves is the multiplicity of their frequencies to the frequency of the lowest mode. The accumulation of a large number of amplitude spectra of microseismic records recorded by vertical geophones allows us to determine the frequencies of the first few modes of standing compression waves arising above the cave roof. Areal passive seismic observations on the earth's surface above the cave made it possible to construct a frequency distribution map for the lowest mode of standing compression waves forming over the cave roof. Since no standing waves were observed over the undisturbed rock mass, this map reflects the cave structure in plan, which confirms the comparison with the cave scheme drawn up earlier by one of the speleologists. The longitudinal wave velocity $V_p = 3120$ m/s determined from the rock samples selected near the entrance to the cave was used to develop a map of the depths of the cave roof relative to the earth's surface. This map on a qualitative level is also consistent with the data of speleologists.

Key words: karst cave; passive seismic method; areal observations; microseisms; standing waves; field experiment

Acknowledgments: this work was supported by the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences for 2013–2020, project No. 0331-2019-0009 “Dynamic analysis of seismic data for the construction of realistic models of the geological environment based on mathematical and physical modeling”.

For citation: Fedin K.V., Kolesnikov Yu.I., Ngomayezwe L., 2020. Mapping underground cavities using standing wave method (a case study of Barsukovskaya Cave). *Engineering Survey*, Vol. XIV, No. 2, pp. 52–63, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2020-14-2-52-63>.

Введение

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 [2], а карстовые образования в целом, по некоторым оценкам, в той или иной степени распространены под примерно 10–20% земной поверхности [24].

Для исследования пещер наряду с прямыми методами, такими как визу-

альное обследование, фото, видео-, топографическая съемка и др., в последнее время активно применяются и косвенные, в т.ч. геофизические — электрометрия, микрогравиметрия, электромагнитные, сейсмические и др. [11]. 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 т.ч. пещер, наиболее часто применяются геоэлектрические на постоянном токе, в частности, электро-томография [9, 10, 13, 17, 21–23, 25, 26].

Эти методы достаточно эффективны, т.к. 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 есть возможность обеспечить удовлетворительное качество контакта электродов с породами.

Георадары обычно используются для картирования подземных полостей, залегающих на небольшой глубине [10, 19, 27], хотя есть отдельные примеры успешного применения низкочастотных георадаров для глубин в несколько десятков метров [14, 16]. Для георадаров

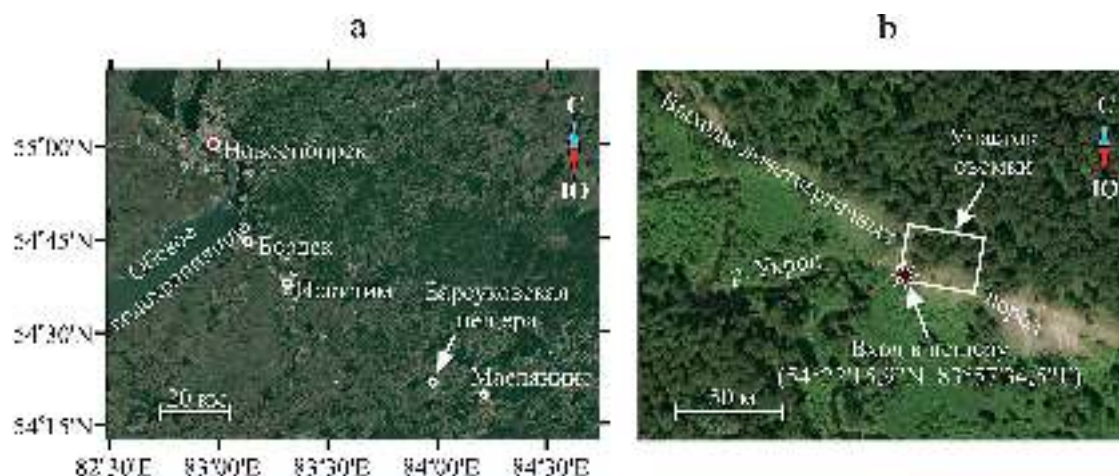


Рис. 1. Географическое положение Барсуковской пещеры (а) и взаимное расположение входа в пещеру и участка съемки (б)

Fig. 1. Geographical location of Barsukovskaya Cave (a) and the relative location of the entrance to the cave and the survey site (b)



Рис. 2. Скальное обнажение на правом берегу р. Укроп, в котором находится вход в Барсуковскую пещеру

Fig. 2. Rocky slope on the right bank of the Ukrop River with the entrance to the Barsukovskaya Cave

Объект исследования

Барсуковская пещера находится в Маслянинском районе Новосибирской области (Россия), примерно в 100 км к юго-востоку от г. Новосибирск (рис. 1, а). 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 [4]. В 2000 г. она вместе с прилегающей территорией площадью 37 га объявлена памятником природы областного значения, т.к. является крупнейшей не только в Новосибирской области, но и на всем юго-востоке Западной Сибири зимовочной колонией летучих мышей [4].

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. 2).

Непосредственно выше этого склона земная поверхность имеет более пологий, но местами довольно изрезанный

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 [13, 17, 20, 23, 26, 28]. Основная проблема этого метода заключается в том, что его применение требует точного учета топографии [12]. Сейсмические методы, в основном их томографические модификации, также являются потенциальным инструментом для обнаружения полостей [1, 9, 15]. Кроме того, известны примеры

применения для исследования подземных пустот магнитометрии [5, 10, 26] и радиометрии [26]. Тем не менее, вопрос поиска надежных методов выявления и картирования подземных полостей остается актуальным и в настоящее время.

В работах [3, 18] 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 данной статье приводятся результаты применения такой методики на реальном природном объекте — пещере карстового происхождения.

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 задержанных 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. 1, *b*.

Обоснование метода 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 [3, 7, 18], 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 границами слоя с двумя свободными границами должно укладываться целое число полудлин стоячих волн. По механизму образования они подобны стоячим волнам в незакрепленном тонком стержне [8]. Частоты стоячих волн вертикального сжатия-растяжения в таком слое (собственные частоты) определяются формулой:

$$f_n = nV_p/2h, \quad (1)$$

где n — номер моды стоячей волны, V_p — скорость продольных волн в материале слоя, h — расстояние между границами слоя.

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 воз-

никновении 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:

$$h = V_p/2\Delta F. \quad (2)$$

Также следует отметить, что $\Delta F = f_1$, поэтому вычислять толщину слоя можно и по частоте низшей моды.

Оценка глубинности и разрешающей способности метода по данным моделирования

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 данных физического и компьютерного моделирования.

Для физического моделирования заглубленных полостей использовался блок из плексигласа размером $25 \times 20 \times 12$ см³, с нижней грани которого были просверлены несколько цилиндрических отверстий сверлами разного диаметра и с разной формой режущей поверхности. Отверстия диаметром от 1,5 до 12,0 мм и глубиной от 8,5 до 15,5 мм располагались вдоль большей средней линии нижней наибольшей грани блока с шагом 2 см. Фотография нижней части модели с просверленными отверстиями приведена на рис. 3, *a*.

Для возбуждения акустического шумового поля, имитирующего микросейсм, на противоположных боковых

гранях модели были установлены два электродинамических громкоговорителя, на которые с двухканального аудиовыхода компьютера 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 центрами просверленных на нижней грани отверстий. Для регистрации использовались пьезокерамический датчик поршневого типа диаметром 2 мм и цифровой осциллограф В-423. Шаг по профилю составлял 2 мм, частота дискретизации — 1 МГц.

Детально эксперимент описан в [7]. В данной статье приведены лишь результаты накопления большого числа (до 16 000 над самыми небольшими отверстиями) амплитудных спектров, которые рассчитывались для последовательных фрагментов шумовых записей длительностью по 4096 отсчетов каждый, после чего производилось их осреднение. Распределение осредненных спектров вдоль проходящего над отверстиями профиля показано на рис. 3, *b*. Как можно видеть, в исследованном частотном диапазоне на всех спектрах выделяются пять мод стоячих волн. То, что это именно стоячие волны, подтверждает их регулярность. Например, на участках профиля, непосредственно под которыми отверстий не было, частота низшей моды равна $f_1 = 11,7$ кГц. Этой частоте при измеренной импульсным методом скорости продольных волн в плексигласе 2785 м/с соответствует полудлина волны 11,9 см, приблизительно равная толщине блока. Частоты второй, третьей, четвертой и пятой мод имеют значения $f_2 = 23,3$ кГц, $f_3 = 35,0$ кГц, $f_4 = 46,7$ кГц и $f_5 = 58,4$ кГц, приблизительно кратные f_1 , что согласуется с формулой (1).

Аналогичные свойства имеют частоты пиковых значений над отверстиями (положение проекций центров отверстий на профиль наблюдений показано на рис. 3, *b* стрелками), но частоты стоячих волн здесь выше, т.к. они формируются на меньшей базе — между верхней гранью блока и вершинами просверленных с нижней грани отверстий. Кроме того, над отверстиями относительно большого диаметра частоты стоячих волн в общих чертах согласуются с формой торцевых поверхностей отверстий, а для малых отверстий при интервале наблюдений 2 мм этого, естественно, не наблюдается.

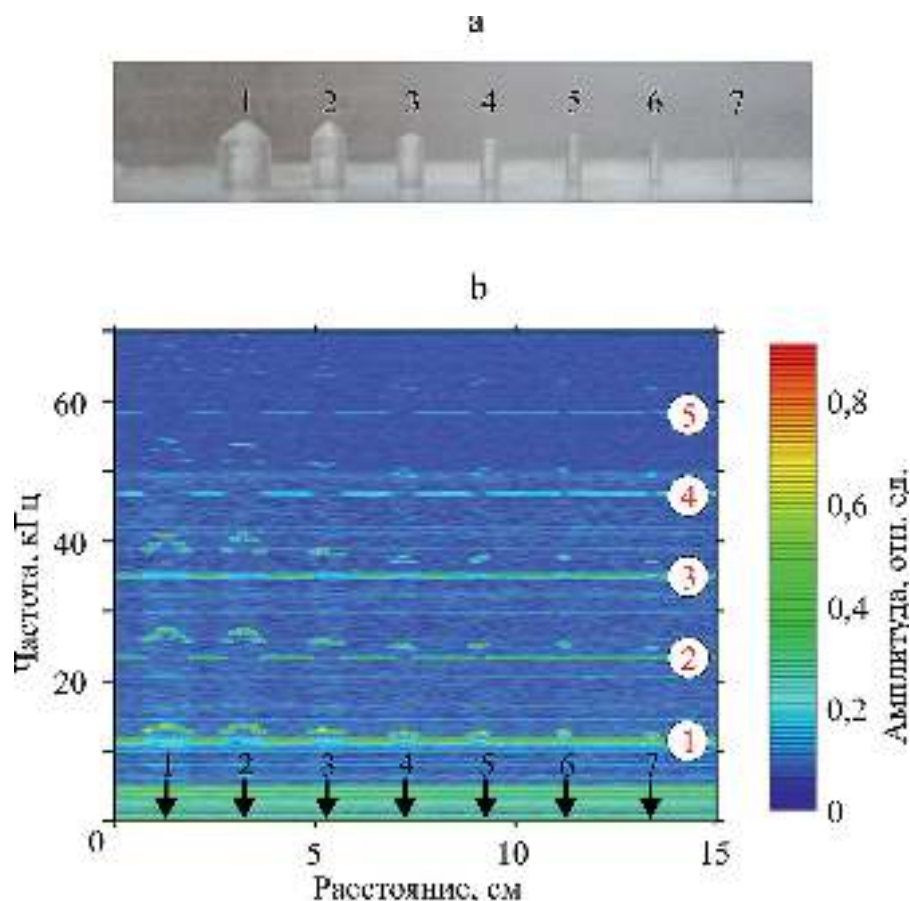


Рис. 3. Фотография цилиндрических отверстий, просверленных с нижней грани плексигласового блока (а), и распределение накопленных амплитудных спектров шумовых записей вдоль профиля, проходящего по верхней грани над отверстиями (б). Обозначения: стрелки показывают положение проекций центров отверстий на профиле наблюдений; черные цифры — их номера; красные цифры — номера мод стоячих волн

Fig. 3. Photo of cylindrical holes drilled from the bottom bound of the plexiglas block (a) and the distribution of the accumulated amplitude spectra of noise records along the profile passing along the upper bound above the holes (b). Designations: arrows show the positions of the projections of the hole centers on the observation profile; black numerals — their numbers; red numerals — standing wave mode numbers

Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить глубинность и разрешающую способность данного метода. В частности, как видно из рис. 3, б, 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 [6]. Модель задавалась в виде куба размером $50 \times 50 \times 50$ м³. Элементы расчетной сетки — кубические ячейки с ребром длиной 0,1 м. Верхняя и одна из боковых граней модели оставались свободными, имитируя земную поверхность над пещерой и крутой склон, остальные поверхности демпфи-

ровались 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 — (36,0; 30,0; 10,0) и (36,0; 18,5; 15,0), угол падения в плоскости $x = 36,0$ м — 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 рас-

пределенное 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 приведены на рис. 4. Как можно видеть, в исследуемом частотном диапазоне над полыми цилиндрами (рис. 4, а-с) 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 глубинной 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.

В точках, находящихся вне проекции полостей на верхнюю грань модели, высокоамплитудных мод не наблюдается (пример приведен на рис. 4, д). Также нужно отметить, что результаты расчетов не показали наличия в разных точках наблюдений мод с совпадающими частотами. Поскольку диаметр обоих

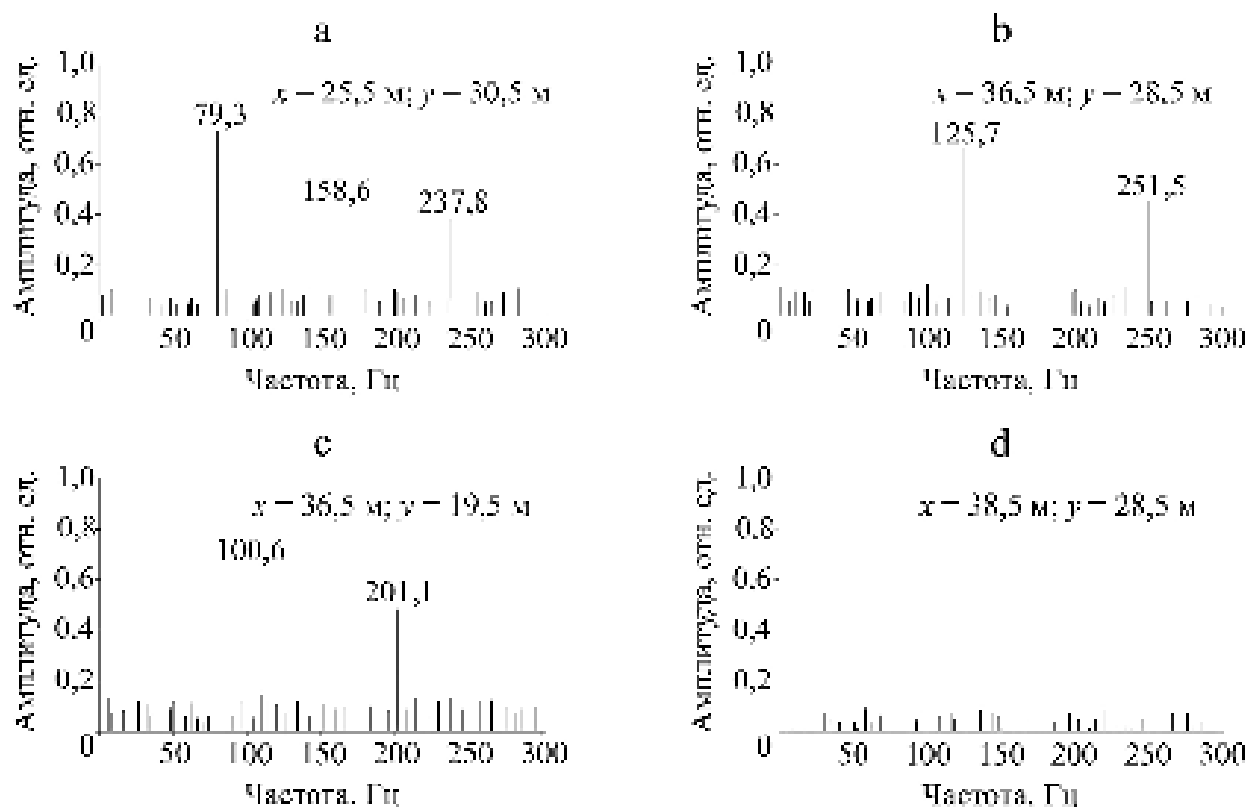


Рис. 4. Примеры вертикальных составляющих собственных мод колебаний верхней грани модели, рассчитанных методом конечных элементов над цилиндрическими полостями (а-с) и в стороне от них (d)

Fig. 4. Examples of vertical components of the natural vibration modes of the upper bound of the model, calculated by the finite element method above cylindrical cavities (a-c) and away from these cavities (d)

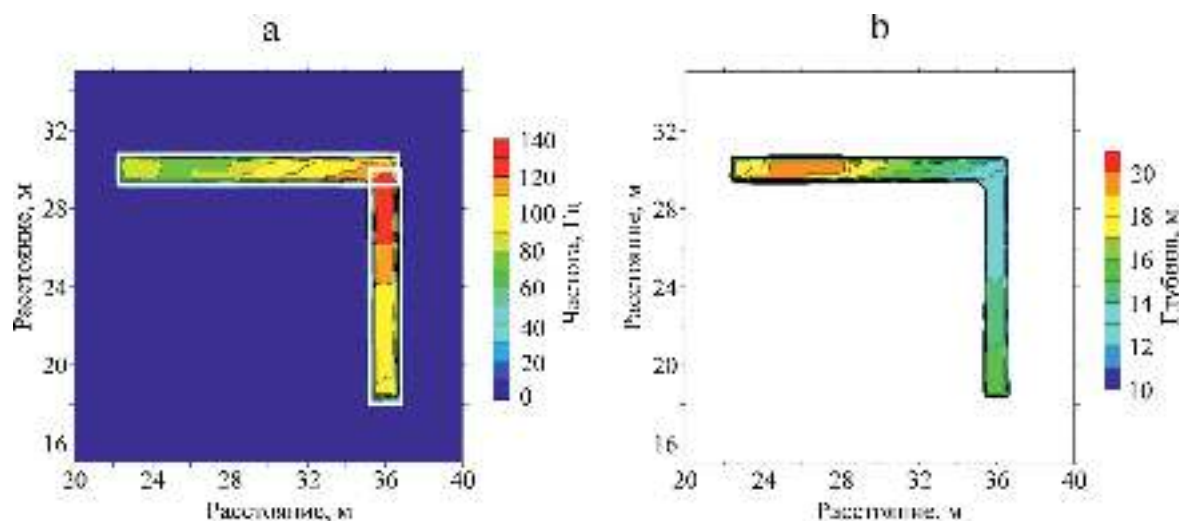


Рис. 5. Распределение частоты низшей из высокоамплитудных собственных мод на верхней грани модели, белыми линиями показаны проекции полостей на верхнюю грань (а), карта построенных по этим частотам глубин кровли полостей (b)

Fig. 5. Frequency distribution for the lowest high-amplitude eigenmodes at the upper bound of the model, white lines show the projection of the cavities on the upper bound (a), map of cavity roof depths plotted from these frequencies (b)

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. 5, а показано распределение частоты низшей из высокоамплитудных

мод на центральном участке верхней грани модели. Для точек, в которых регулярные высокоамплитудные пики отсутствуют (например, как на рис. 4, d), эта частота принималась равной нулю, что формально соответствует слою бесконечной мощности. Как видно из рис. 5, 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, приведенным на рис. 5, а, с использованием формулы (2)

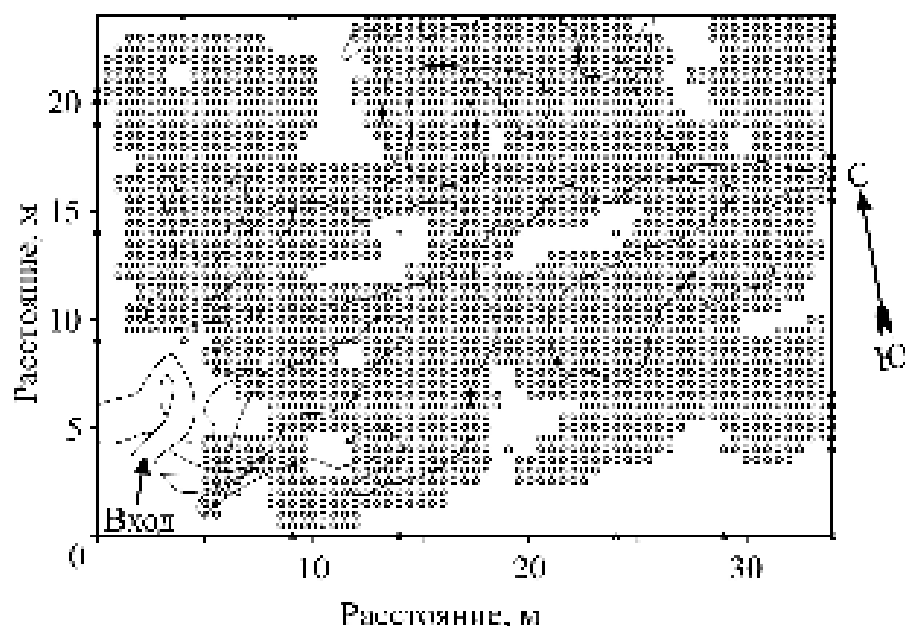


Рис. 6. Расположение точек наблюдения на участке съемки. Линиями отмечен контур Барсуковской пещеры, воспроизведенный со схемы спелеолога С. Пешкова

Fig. 6. Location of observation points on the survey site. Lines marks the contour of the Barsukovskaya Cave, reproduced from the scheme of the speleologist S. Peshkov

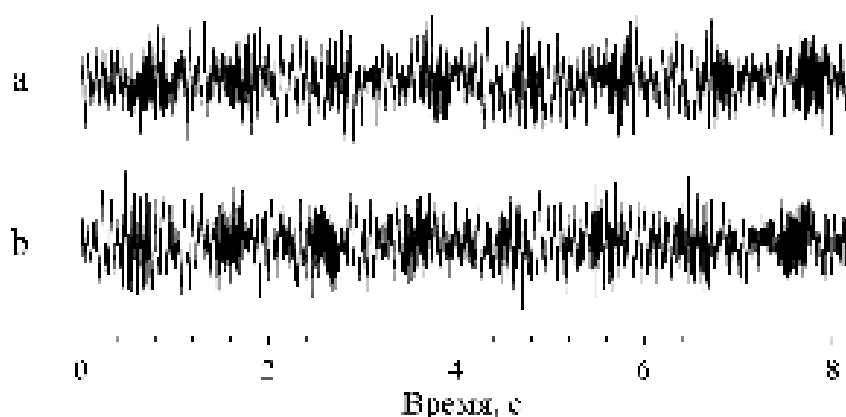


Рис. 7. Примеры фрагментов шумовых записей, полученных над ненарушенным породным массивом (а) и над кровлей пещеры (б)

Fig. 7. Examples of fragments of noise records obtained over undisturbed rock mass (a) and over the roof of the cave (b)

были рассчитаны глубины до верхней поверхности цилиндров (с учетом того, что $\Delta F = f_1$). Карта глубин приведена на рис. 5, б. Как можно видеть, 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 числен-

ные 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.

Методика наблюдений и обработки экспериментальных данных

Пассивные сейсмические наблюдения (регистрация микросейсм) проводились на площадной системе наблюде-

ний в пределах участка размером примерно 24×34 м² (см. рис. 1, 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. 6. 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 со схемы С. Пешкова и участок наблюдений приведены на рис. 6 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. 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 приведены на рис. 7.

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.

Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над сплошным породным массивом и над одним из гротов пещеры в самой ее глубокой части, приведены на рис. 8. Как можно видеть, над ненарушенным массивом (рис. 8, а) на

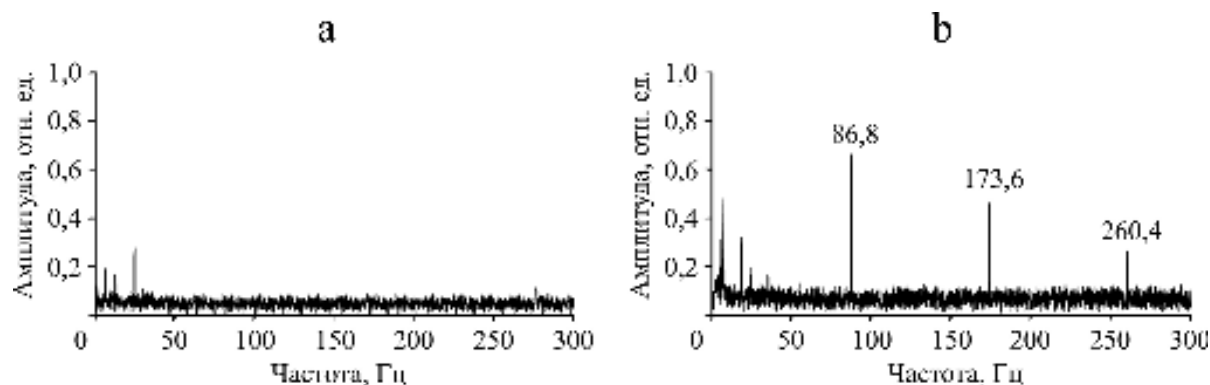


Рис. 8. Примеры осредненных амплитудных спектров шумовых записей, зарегистрированных над ненарушенным породным массивом (a) и над пещерой (b)

Fig. 8. Examples of averaged amplitude spectra of noise records made over an undisturbed rock mass (a) and over the cave (b)

спектре не наблюдается каких-либо регулярных пиков. В то же время над кровлей грота пещеры (рис. 8, b) на спектре выделяются три резких пика, частоты которых кратны частоте низшей моды стоячих волн (86,8 Гц; 173,6 Гц 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.

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.

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. 9 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 на рис. 8, a), частота f_1 принималась равной нулю, что формально соответствует слою бесконечной

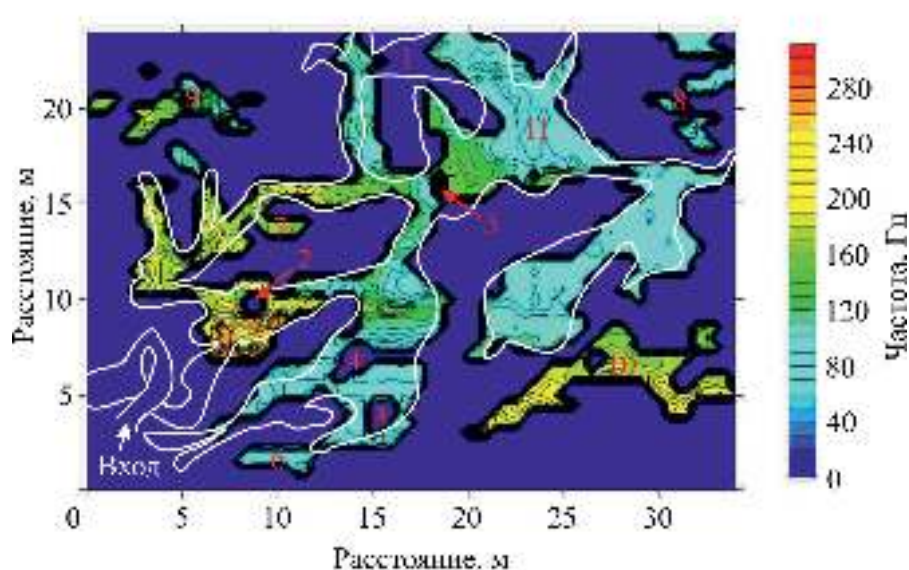


Рис. 9. Карта распределения на участке наблюдений частоты f_1 низшей моды стоячих волн сжатия-растяжения. Обозначения: белые линии — контуры пещеры, соответствующие схеме, составленной спелеологом С. Пешковым; цифровые обозначения даны в тексте

Fig. 9. Map of distribution of frequency f_1 of the lowest mode of standing compression waves at the observation site. Designations: white lines show the contours of the cave corresponding to the scheme drawn up by the speleologist S. Peshkov

мощности. Нулю эта частота также приравнивалась в тех точках исследуемого участка, где измерения не проводились.

Для сравнения на рис. 9 белой линией показаны контуры горизонтального сечения пещеры, скопированные с упоминавшейся ранее схемы спелеолога С. Пешкова. Сравнить две карты в районе входа в пещеру в самой юго-западной части участка невозможно, т.к. наблюдения там не проводились из-за большой крутизны склона. В остальной же части участка при в целом 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. 9 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 изображенному на карте участку нулевых частот. В местах, отмеченных цифрами 3–5, 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 свое отражение на карте частот.

Спелеологи отмечают, что в Барсуковской пещере имеются относительно

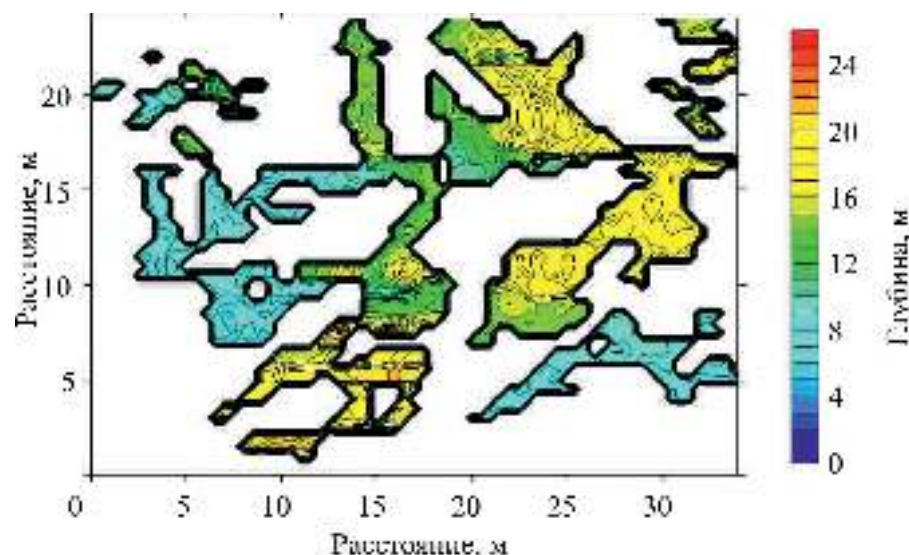


Рис. 10. Карта глубин сводов пещеры относительно земной поверхности

Fig. 10. Map of the depths of the cave top boundary relative to the earth's surface

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 8–10. 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 мо-

жет быть к тому же неоднородным. Тем не менее, используя формулу (2) и полученные в точках наблюдений частоты f_1 низшей моды вертикальных стоячих волн сжатия-растяжения (см. карту на рис. 9), была построена соответствующая этой скорости карта глубин от земной поверхности до сводов пещеры (рис. 10). Для точек, в которых наблюдения не проводились или для которых на спектрах шумовых записей не выделялись резонансные пики, частота f_1 , как отмечалось выше, приравнялась к нулю, т.е. глубина в таких точках формально считалась бесконечной и на приведенной карте (см. рис. 10) ей соответствует белый цвет.

Как уже отмечалось, скорость V_p в породном массиве может существенно отличаться от принятого авторами 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. 10 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 спелео-

логов, согласно которым самые глубокие ходы и гроты пещеры расположены в ее тупиковых ответвлениях, а ближе ко входу в пещеру глубина ходов и гротов постепенно уменьшается.

Необходимо отметить, что, как было показано ранее на результатах физического моделирования [3, 18], кривизна верхних границ подземных полостей может приводить к некоторому занижению получаемых оценок их горизонтальных размеров. Это замечание в полной мере относится к представленным в данной статье результатам, т.к. своды ходов и гротов пещер в большинстве случаев имеют достаточно сложную форму.

Заключение

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 спелеологов. По частотам низшей моды построена карта глубин сводов пещеры от земной поверхности, которая на качественном уровне также согласуется с данными 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. 

Список литературы

1. Давыдов В.А., 2013. Обнаружение подземных пустот антропогенного характера с помощью геофизических методов. Инженерные изыскания, № 7, с. 52–57.

2. Дублянский В.Н., Андрейчук В.Н., 1993. Генетическая классификация подземных полостей. Геоморфология, № 1, с. 31–37.
3. Колесников Ю.И., Федин К.В., 2015. Обнаружение подземных пустот по микросейсам: физическое моделирование. Технологии сейсморазведки, № 4, с. 89–96, <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-4-89-96>.
4. Памятники природы: Улантова гора, каменистая степь у села Новососедово, Барсуковская пещера, Бердские скалы. Особо охраняемые природные территории Новосибирской области, 2006. Изд-во Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Новосибирской области, Новосибирского государственного краеведческого музея, Новосибирск.
5. Пугин А.В., Мичурин А.В., Симанов А.А., Хохлова В.В., Новикова П.Н., 2014. Опыт-методические геофизические работы на территории историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера». Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, № 2(24), с. 191–197.
6. Рычков С.П., 2004. MSC.visualNASTRAN для Windows. NT Press, Москва.
7. Федин К.В., Колесников Ю.И., Нгомайезве Л., 2018. О глубинности метода обнаружения подземных пустот по микросейсам. Интерэкспо ГЕО-Сибирь, Том 4, с. 296–301, <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-4-296-301>.
8. Хайкин С.Э., 1971. Физические основы механики. Наука, Москва.
9. Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A., Di Filippo G., 2010. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. Geophysical Prospecting, Vol. 58, No. 4, pp. 685–695, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>.
10. Cardarelli E., Fischanger F., Piro S., 2008. Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). Near Surface Geophysics, Vol. 6, No. 1, pp. 15–20, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>.
11. Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., Bosch F.P., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. Hydrogeology Journal, Vol. 19, No. 6, pp. 1169–1180, <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>.
12. Debeglia N., Dupont F., 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. Journal of Applied Geophysics, Vol. 50, No. 4, pp. 435–454, [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00194-5).
13. Gambetta M., Armadillo E., Carmisciano C., Stefanelli P., Cocchi L., Tontini F.C., 2011. Determining geophysical properties of a near-surface 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>.
14. Gosar A., 2012. 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, Vol. 41, No. 1, pp. 77–88, <https://doi.org/10.3986/ac.v41i1.49>.
15. Grandjean G., 2006. Imaging subsurface objects by seismic P-wave tomography: numerical and experimental validations. Near Surface Geophysics, Vol. 4, Issue 5, pp. 279–287, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005051>.
16. Kalenda P., Tengler R., Šebela S., Blatnik M., Gosar A., 2018. Detection of Divaška Jama corridors behind (to the SW) Trhlovca Cave using low frequency high power ground penetrating radar. Acta Carsologica, Vol. 47, No. 2–3, pp. 153–167, <https://doi.org/10.3986/ac.v47i2-3.5187>.
17. Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R., 2011. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn Cave, Harz Mountains, Germany. Geophysics, Vol. 76, No. 3, pp. B71–B77, <https://doi.org/10.1190/1.3560245>.
18. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., 2018. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. Geophysical Prospecting, Vol. 66, Issue 2, pp. 342–353, <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12540>.
19. Łyskowski M., Mazurek E., Ziętek J., 2014. Ground penetrating radar investigation of limestone karst at the Odstrzelona Cave in Kowala, Świętokrzyskie Mountains, Poland. Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 76, No. 3, pp. 184–190, <https://doi.org/10.4311/2014EX0001>.
20. Martínez-Moreno F.J., Galindo-Zaldívar J., Pedrera A., Teixidó T., Peña J.A., González-Castillo L., 2015. Regional and residual anomaly separation in microgravity maps for cave detection: the case study of Gruta de las Maravillas (SW Spain). Journal of Applied Geophysics, Vol. 114, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.01.001>.
21. Mihevc A., Stepišnik U., 2012. Electrical resistivity imaging of cave Divaška Jama, Slovenia. Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 74, No. 3, pp. 235–242, <https://doi.org/10.4311/2010ES0138R1>.
22. Muhlestein K., Meissner L., Klar R., Green R.T., 2018. Three-dimensional electrical resistivity for detection of subsurface karst associated with Friesenhahn Cave. Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 80, No. 4, pp. 206–211.
23. Negri S., Margiotta S., Quarta T.A.M., Castiello G., Fedi M., Florio G., 2015. 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, Vol. 77, No. 1, pp. 52–62, <https://doi.org/10.4311/2014ES0107>.
24. Palmer A.N., 1991. Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, Vol. 103, No. 1, pp. 1–21, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2).
25. Pánek T., Margielewski W., Tábořík P., Urban J., Hradecký J., Szura C., 2010. Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: case studies from the Polish Flysch Carpathians. Geomorphology, Vol. 123, Issues 1–2, pp. 165–180, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.008>.
26. Putiška R., Kušnirák D., Dostál I., Lačný A., Mojzeš A., Hók J., Pašteka R., Krajňák M., Božanský M., 2014. Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia. Journal of Cave and Karst Studies, Vol. 76, No. 3, pp. 155–163, <https://doi.org/10.4311/2013ES0112>.

27. Ronen A., Ezersky M., Beck A., Gatenio B., Simhayov R.B., 2019. Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*, Vol. 328, pp. 28–43, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.030>.
28. Saddek B., Chemseddine F., Djamel B., Nabil B., 2019. Surface and subsurface investigations for the detection and mapping of underground karst Cavities in MChentel area, Cheria basin, Northeast of Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, Vol. 93, No. 2, pp. 228–234, <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1157-1>.

References

1. Davydov V.A., 2013. Detection of anthropogenic underground cavities by means of geophysical methods. *Engineering Survey*, No. 7, pp. 52–57. (in Russian)
2. Dublyansky V.N., Andreychuk V.N., 1993. Genetic classification of underground cavities. *Geomorfologiya*, No. 1, pp. 31–37. (in Russian)
3. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., 2015. Detection of underground cavities using microtremor: physical modelling. *Tekhnologii seismorazvedki*, No. 4, pp. 89–96, <https://doi.org/10.18303/1813-4254-2015-4-89-96>. (in Russian)
4. Natural monuments: Ulantova Mountain, rocky steppe near the Novososedovo village, Barsukovskaya Cave, Berdsky Rocks. Specially protected natural areas of the Novosibirsk Oblast, 2006. Publishing house of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Novosibirsk Oblast, Novosibirsk State Local History Museum, Novosibirsk. (in Russian)
5. Pugin A.V., Michurin A.V., Simanov A.A., Khohlova V.V., Novikova P.N., 2014. Experimental-methodological geophysical works on the territory of the historical-natural complex “Ice Mountain and Kungur Ice Cave”. *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”*. *Earth Sciences*, No. 2(24), pp. 191–197. (in Russian)
6. Rychkov S.P., 2004. *MSC.visualNASTRAN for Windows*. NT Press, Moscow. (in Russian)
7. Fedin K.V., Kolesnikov Yu.I., Ngomayezwe L., 2018. On the depth of investigation in the method of detecting underground cavities using microtremor. *Interexpo GEO-Siberia*, Vol. 4, pp. 296–301. (in Russian)
8. Khaykin S.E., 1971. *Physical fundamentals of mechanics*. Nauka, Moscow. (in Russian)
9. Cardarelli E., Cercato M., Cerreto A., Di Filippo G., 2010. Electrical resistivity and seismic refraction tomography to detect buried cavities. *Geophysical Prospecting*, Vol. 58, No. 4, pp. 685–695, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2009.00854.x>.
10. Cardarelli E., Fischanger F., Piro S., 2008. Integrated geophysical survey to detect buried structures for archaeological prospecting. A case-history at Sabine Necropolis (Rome, Italy). *Near Surface Geophysics*, Vol. 6, No. 1, pp. 15–20, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2007027>.
11. Chalikakis K., Plagnes V., Guerin R., Valois R., Bosch F.P., 2011. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, Vol. 19, No. 6, pp. 1169–1180, <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>.
12. Debeglia N., Dupont F., 2002. Some critical factors for engineering and environmental microgravity investigations. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 50, No. 4, pp. 435–454, [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00194-5](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00194-5).
13. Gambetta M., Armadillo E., Carnisciano C., Stefanelli P., Cocchi L., Tontini F.C., 2011. Determining geophysical properties of a near-surface 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>.
14. Gosar A., 2012. 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*, Vol. 41, No. 1, pp. 77–88, <https://doi.org/10.3986/ac.v41i1.49>.
15. Grandjean G., 2006. Imaging subsurface objects by seismic P-wave tomography: numerical and experimental validations. *Near Surface Geophysics*, Vol. 4, Issue 5, pp. 279–287, <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005051>.
16. Kalenda P., Tengler R., Šebela S., Blatnik M., Gosar A., 2018. Detection of Divaška Jama corridors behind (to the SW) Trhlova Cave using low frequency high power ground penetrating radar. *Acta Carsologica*, Vol. 47, No. 2–3, pp. 153–167, <https://doi.org/10.3986/ac.v47i2-3.5187>.
17. Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R., 2011. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn Cave, Harz Mountains, Germany. *Geophysics*, Vol. 76, No. 3, pp. B71–B77, <https://doi.org/10.1190/1.3560245>.
18. Kolesnikov Yu.I., Fedin K.V., 2018. Detecting underground cavities using microtremor data: physical modelling and field experiment. *Geophysical Prospecting*, Vol. 66, Issue 2, pp. 342–353, <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12540>.
19. Łyskowski M., Mazurek E., Ziętek J., 2014. Ground penetrating radar investigation of limestone karst at the Odrzelenka Cave in Kowala, Świętokrzyskie Mountains, Poland. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 76, No. 3, pp. 184–190, <https://doi.org/10.4311/2014EX0001>.
20. Martínez-Moreno F.J., Galindo-Zaldívar J., Pedrera A., Teixidó T., Peña J.A., González-Castillo L., 2015. Regional and residual anomaly separation in microgravity maps for cave detection: the case study of Gruta de las Maravillas (SW Spain). *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 114, pp. 1–11, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.01.001>.
21. Mihevc A., Stepišnik U., 2012. Electrical resistivity imaging of cave Divaška Jama, Slovenia. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 74, No. 3, pp. 235–242, <https://doi.org/10.4311/2010ES0138R1>.
22. Muhlestein K., Meissner L., Klar R., Green R.T., 2018. Three-dimensional electrical resistivity for detection of subsurface karst associated with Friesenhahn Cave. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 80, No. 4, pp. 206–211.

23. Negri S., Margiotta S., Quarta T.A.M., Castiello G., Fedi M., Florio G., 2015. 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*, Vol. 77, No. 1, pp. 52–62, <https://doi.org/10.4311/2014ES0107>.
24. Palmer A.N., 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 103, No. 1, pp. 1–21, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1991\)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1991)103<0001:OAMOLC>2.3.CO;2).
25. Pánek T., Margielewski W., Tábořík P., Urban J., Hradecký J., Szura C., 2010. Gravitationally induced caves and other discontinuities detected by 2D electrical resistivity tomography: case studies from the Polish Flysch Carpathians. *Geomorphology*, Vol. 123, Issues 1–2, pp. 165–180, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.008>.
26. Putiška R., Kušnirák D., Dostál I., Lačný A., Mojzeš A., Hók J., Pašteka R., Krajňák M., Bošanský M., 2014. Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia. *Journal of Cave and Karst Studies*, Vol. 76, No. 3, pp. 155–163, <https://doi.org/10.4311/2013ES0112>.
27. Ronen A., Ezersky M., Beck A., Gatenio B., Simhayov R.B., 2019. Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology*, Vol. 328, pp. 28–43, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.11.030>.
28. Saddek B., Chemseddine F., Djamel B., Nabil B., 2019. Surface and subsurface investigations for the detection and mapping of underground karst Cavities in MChentel area, Cheria basin, Northeast of Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, Vol. 93, No. 2, pp. 228–234, <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1157-1>.

Информация об авторах

ФЕДИН КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

Старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, к.т.н., г. Новосибирск, Россия

КОЛЕСНИКОВ ЮРИЙ ИВАНОВИЧ

Главный научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, д.т.н., доцент, г. Новосибирск, Россия

НГОМАЙЕЗВЕ ЛАКИМОРЕ

Магистрант геолого-геофизического факультета Новосибирского национального исследовательского государственного университета, г. Новосибирск, Россия

Information about the authors

KONSTANTIN V. FEDIN

PhD (Technics); Senior Researcher Scientist in the Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Novosibirsk, Russia

YURY I. KOLESNIKOV

DSc (Technics); Chief Researcher Scientist in the Laboratory of Seismic Dynamic Analysis, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences; Associate Professor; Novosibirsk, Russia

LUCKYMORE NGOMAYEZWE

Master Student of the Department of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University; Novosibirsk, Russia



Источник: <https://rulandinfo.ru/upload/iblock/cb6/barsukovskaya-peshchera.jpg>