

Выявление карста геофизическими методами с применением микросейсмических зондирований

Вадим Анатольевич ДАВЫДОВ*

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Цель работы – опробование методики обнаружения погребенного карста с помощью микросейсмических зондирований, базирующихся на спектральном усилении горизонтальных смещений. К основным задачам исследований относятся построение и анализ геоэлектрических и микросейсмических разрезов.

Методология. Регистрация микросейсмического фона осуществлялась с помощью автономной сейсмической станции ОМАР-2с (Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург) в полосе частот 1–1000 Гц. В качестве датчиков использовались низкочастотные горизонтальные сейсмоприемники фирмы OYO Geospace Corporation. Вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) с использованием симметричной установки Шлюмберже на частоте 4,88 Гц при токах 5–50 мА. Обработка ВЭЗ заключалась в количественной одномерной инверсии по программе IPI2Win (МГУ, г. Москва).

Результаты. Проведены опытно-методические работы по изучению микросейсм, сопровождаемые ВЭЗ, на двух закарстованных участках Свердловской области. По результатам обработки построены геоэлектрические и микросейсмические разрезы, позволяющие определить условия залегания коренных пород и покрывающих их рыхлых отложений, а также выделить локальные аномалии, связанные с проявлениями карста. Результаты электроразведки и сейсмометрии хорошо согласуются между собой и подтверждаются геологическими данными.

Выводы. Вертикальные электрические зондирования позволяют выделять карст по высокой контрастности сопротивлений вмещающих коренных пород (известняков) и терригенного материала-заполнителя (глины, суглинки). Микросейсмические зондирования дают возможность оконтурить карстовые зоны по высоким значениям спектрального усиления слабо консолидированных карстовых отложений относительно низкого уровня микросейсм в коренных породах. Таким образом, на основании комплексных электрических и микросейсмических зондирований можно уверенно идентифицировать области развития карстовых процессов.

Ключевые слова: микросейсмический фон, спектральное усиление, карст, тектоника, комплексные геофизические исследования, разрезы физических параметров.

Введение

Изучение закарстованных территорий с помощью геофизических методов применяется уже достаточно давно и успешно [1, 2]. Стоит упомянуть, что в некоторых регионах России с широким распространением карстовых процессов (Башкирия, Нижегородская область) применение геофизики при инженерных изысканиях под строительство является обязательным (ТСН 302-50-95 РБ, ТСН 22-308-98 НН). Основными методами исследований являются электроразведка и сейсморазведка, в некоторых случаях используют гравиразведку и каротаж скважин [3–6]. Появляются и отдельные сообщения по использованию пассивных сейсмических наблюдений при изучении карста [7, 8].

Уже достаточно давно подмечено существование связи амплитудных спектров микросейсмических колебаний с особенностями геологического разреза. Чтобы избавиться от мешающих факторов, используют нормализацию спектров через их отношения. Например, в методе Накамуры изучаются спектральные соотношения горизонтальных и вертикальных компонент ми-

кросейсм (Horizontal to Vertical Spectral Ratios – HVSR) в точке наблюдений [9]. Другим способом нормирования является отношение профильных наблюдений амплитудных спектров микросейсмического сигнала к измерениям на опорном пункте (ОП). Получаемая величина называется сейсмической реакцией грунта, или спектральным усилением [10]. При этом ОП устанавливается в районе развития «эталонных» грунтов, характеризующихся минимальной мощностью рыхлых отложений. Основной вклад в микросейсмический шум вносят поверхностные волны, имеющие как продольные, так и поперечные компоненты смещений. Зная скорости распространения сейсмических волн, можно строить разрезы спектрального усиления микросейсм для изучения глубинного строения и инженерных изысканий. Так, известен метод микросейсмических зондирований, базирующийся на использовании вертикальных составляющих микросейсм с преобладанием волн Релея [11, 12]. С нашей точки зрения, более инфор-

*davyde@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>

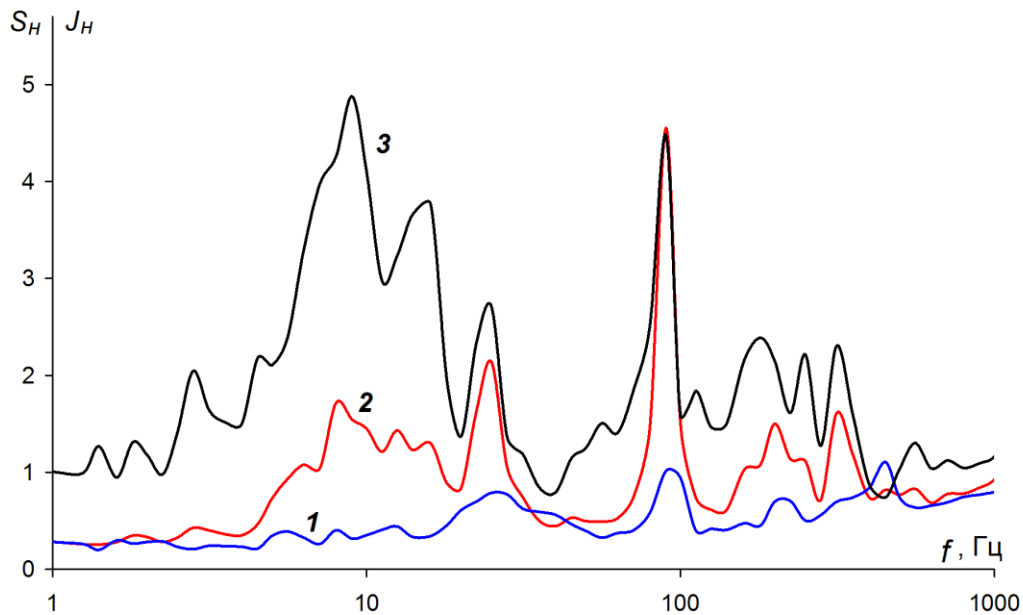


Рисунок 1. Спектры микросейсмических сигналов на эталонных грунтах (1), в зоне карста (2) и их спектральные отношения (3)
Figure 1. Spectra of microseismic signals on reference soils (1), in the karst zone (2) and their spectral ratios (3)

мативными являются горизонтальные компоненты микросейсм, в которых доминирующими являются волны Лява. Настоящая работа посвящена опробованию микросейсмических зондирований (МСЗ), базирующихся на спектральном усилении горизонтальных смещений, с целью обнаружения погребенного карста. К основным задачам исследований относятся построение и анализ геоэлектрических и микросейсмических разрезов.

Методика работ

Полевые наблюдения за микросейсмками проводились в полосе частот 1–1000 Гц. Регистрация микросейсмического фона осуществлялась с помощью автономной сейсмической станции ОМАР-2с, разработанной в Институте геофизики УрО РАН. В качестве датчиков использовались низкочастотные горизонтальные сейсмоприемники фирмы ООО Geospace Corporation. За счет схемотехнической частотной коррекции достигнута линейная амплитудно-частотная характеристика сейсмического тракта во всей области измерений. Обоснование и основные методические приемы наблюдений и обработки микросейсм уже описывались ранее [13], поэтому приведем только основополагающие моменты. На каждом пункте наблюдений станция приводилась в горизонтальное положение и ориентировались по сторонам света. После контроля по индикаторам уровня сигнала осуществлялась запись микросейсмического шума в течение 3–10 мин. Информация в реальном масштабе времени проходила аналого-цифровое преобразование и сохранялась во флэш-памяти цифрового регистратора в виде файла в импульсно-кодовой модуляции. По окончании работ полученные записи переписывались, редактировались и обрабатывались с помощью специального пакета программ. Амплитудные спектры и спектральные отношения сигналов (рис. 1) вычислялись с помощью быстрого преобразования Фурье.

Конечными результатами являлись значения спектрального усиления микросейсмических колебаний в горизонтальной плоскости:

$$J_H = S_H(f)_{\text{пк}} / S_H(f)_{\text{оп}},$$

где $S_H(f)_{\text{пк}}$ – спектр горизонтальных компонент микросейсм на пункте наблюдений; $S_H(f)_{\text{оп}}$ – спектр горизонтальных компонент микросейсм в опорном пункте; f – частота колебаний.

Для окончательного представления полученные результаты переводились из частотной области в диапазон глубин с построением сводных разрезов. Глубинность исследований определялась для модели резонирующего слоя на полупространстве, равняющейся четверти длины поперечной волны λ , как и в способе Накамуры (СП 283.1325800.2016):

$$h = \lambda/4 = v_s/4f,$$

где v_s – скорость поперечных волн;

Скорость поперечных волн приблизительно оценивалась по скорости распространения поверхностных волн Релея: $v_s \approx 1,07v_R$ с использованием вертикальных сейсмоприемников [14]. Более точно это можно сделать с помощью дисперсионных методов анализа, производящих инверсию и построение скоростных разрезов поперечных волн. К ним относятся: спектральный анализ поверхностных волн (Spectral Analysis of Surface Waves – SASW) [15], метод преломленных микросейсм (Refraction Microtremor – ReMi) [16] и многоканальный анализ поверхностных волн (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) [17].

Опытно-методические работы по изучению микросейсм сопровождалась вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ). Электроразведочные работы классическим методом ВЭЗ выполнялись по стандартной методике [18]. Измерения проводились комплектом аппаратуры ЭРА-МАКС (НПП «ЭРА», г. Санкт-Петербург) с использованием симметричной установки Шлюмберже на частоте 4,88 Гц при токах 5–50 мА. Обработка ВЭЗ заключалась в количественной одномерной инверсии по программе IPI2Win, разработанной в МГУ. Результаты интерпретации зондирований экспортировались в файлы

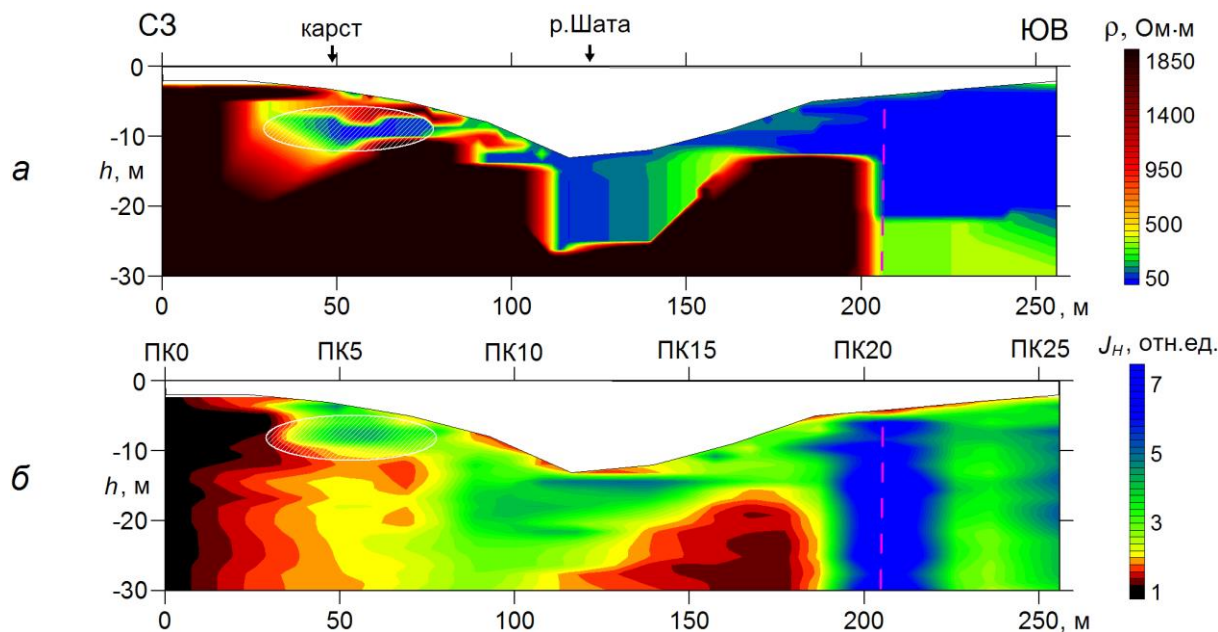


Рисунок 2. Результаты геофизических исследований в долине р. Шата: а – геоэлектрический разрез; б – микросейсмический разрез; заштрихованным овалом выделена карстовая полость, пунктирной линией – тектонический контакт

Figure 2. The results of geophysical studies in the valley of the Shata river: а – geoelectric section; б – microseismic section; the shaded oval highlights the karst cavity, the dotted line – tectonic contact

пространственных данных (гриды) для построения геоэлектрических разрезов.

Результаты исследований

Карст на реке Шата

Геофизические работы в долине р. Шата Сухоложского района Свердловской области проводились в составе инженерно-геологических изысканий под строительство теплотрассы. К задачам исследований относилось определение условий залегания коренных пород и покрывающих их рыхлых отложений, а также выявление изменений, вызванных процессами карстообразования (присутствие возможных карстовых пустот и зон разуплотнения грунтов). Все они возлагались на электроразведочные работы методом ВЭЗ, в помощь которым в качестве дополнительного метода были добавлены микросейсмические зондирования.

По геологическим данным участок работ располагается в зоне сочленения карстующихся рифогенных известняков и вулканогенных пород среднего девона с высокой степенью тектонической нарушенности. Карстовые образования в основном перекрыты поверхностными отложениями. Пустоты заполнены глиной, суглинком и другими терригенными породами. Основанием для выявления карста является значительная разница электрофизических свойств коренных карбонатных пород (известняков) и терригенного заполнителя. Удельные электрические сопротивления (УЭС) известняков составляют 1000–5000 Ом × м и более. УЭС осадочных пород лежат в пределах от 10–12 Ом × м (глины) до 100–400 Ом × м (пески). Результаты работ ВЭЗ позволили выделить две области залегания коренных пород с различными электрическими свойствами. В пределах высокоомных коренных пород, ассоциируемых с рифогенными известняками (ПК0–ПК20), выявлены аномально низкоомные зоны, связанные с карстом и речными отложениями (рис. 2, а).

Первая аномалия (ПК3–ПК8) наиболее полно соответствует представлению о карстовой полости: она изолирована со всех сторон высокоомными породами (1200–4300 Ом × м) и заполнена глиной (12 Ом × м). Следует отметить, что в районе пикетов ПК4–ПК6 в нескольких местах наблюдается просадка дневной поверхности в форме концентрических воронок, что подтверждает процессы карстообразования. Вторая низкоомная зона (ПК11–ПК16) соответствует аллювиальным суглинисто-песчаным (40–160 Ом × м) отложениям долины реки Шата. Между пикетами ПК20 и ПК21 наблюдается резкое изменение свойств геоэлектрического разреза, что говорит об изменении геологической обстановки. Мощность рыхлых отложений здесь увеличивается до 20 м, а УЭС коренных пород снижается до 300 Ом × м. Геологические данные и петрофизические свойства свидетельствуют о том, что в конце профиля (ПК21–ПК26) залегают туфы андезит-базальтового состава. Контакт между известняками и туфами в районе ПК21 выделяется на микросейсмическом разрезе аномально высокими значениями спектрального усиления J_n (рис. 2, б). Поскольку высокий уровень микросейсмических шумов характерен для разрывных нарушений, вероятнее всего, что контакт имеет тектоническую природу. Повышенный микросейсмический фон обычно наблюдается над слабо консолидированными грунтами, и карстовые отложения не являются исключением. Форма и положение погребенного карста довольно четко определяется аномалией спектрального усиления горизонтальных компонент микросейсм в том же месте, что и на геоэлектрическом разрезе. Палеодолина р. Шата выделяется на микросейсмическом разрезе схожим образом, но выглядит более широкой, чем на геоэлектрическом разрезе. Вероятно, кроме аллювиальных отложений, высокий уровень микросейсм присутствует и в примыкающих коренных породах, ослабленных в результате эрозионной

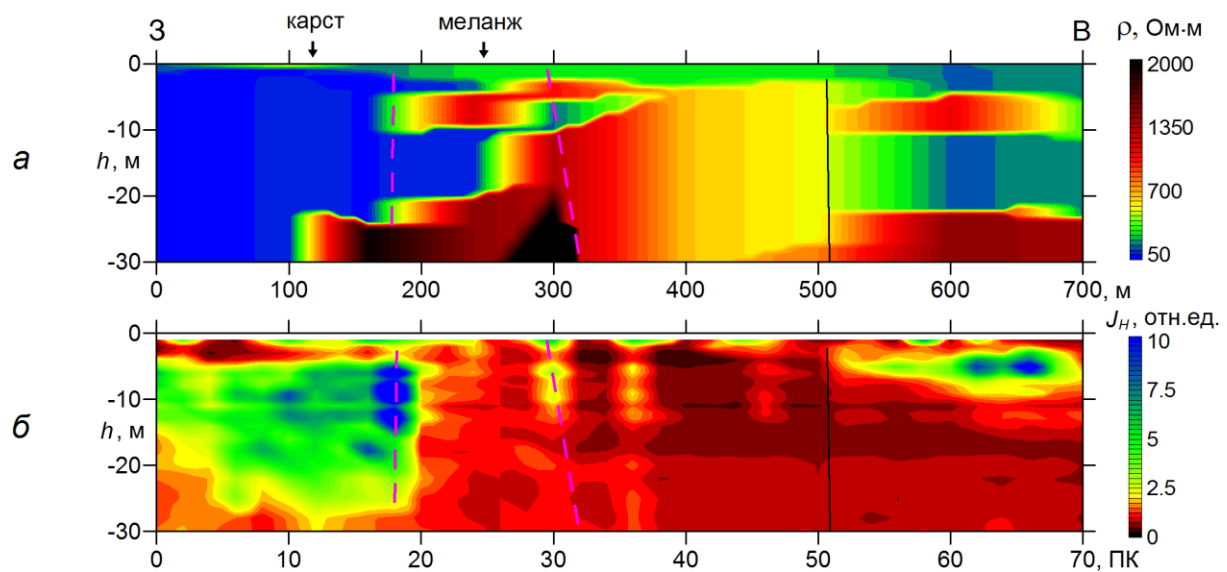


Рисунок 3. Результаты геофизических исследований на Крылатовском профиле: а – геоэлектрический разрез; б – микросейсмический разрез; пунктирными линиями выделены тектонические нарушения, сплошной линией – контакт горных пород
Figure 3. Results of geophysical studies on the Krylatov profile: а – geoelectric section; б – microseismic section; dotted lines indicate tectonic disturbances, solid line – contact of rocks

деятельности реки, русло которой ранее располагалось к северо-западу относительно современного положения. По результатам МСЗ геологические объекты на участке работ характеризуются следующими значениями спектрального усиления J_n : рифогенные известняки – 1–2; вулканические туфы – 2,5–3; аллювий – 2–5,5; карстовые отложения – 3–5; тектонический контакт – 6–8. В качестве референтных грунтов выступили коренные известняки, перекрытые метровым слоем рыхлых отложений (ПК0).

Крылатовский профиль

Профиль располагается к западу от Крылатовского золотокварцевого месторождения, в зоне развития Серовско-Маукского разлома, разделяющего Тагильский прогиб и Восточно-Уральское поднятие. К зоне меланжа разлома приурочено силикатно-никелевое оруденение контактово-карстового типа. Данный тип оруденения локализуется в карстовых полостях верхней части карбонатной толщи. Так, в километре к северу располагается Кунгурское никель-кобальтовое месторождение, южнее известны аналогичные малые месторождения: Осиновское и Северское.

Область развития карста на Крылатовском профиле была обнаружена ранее в результате проведения аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ). Характер разрезов эффективной продольной проводимости указывал на присутствие двух хорошо проводящих объектов внутри массива известняков. Работы по детализации одного из объектов были проведены на отдельном участке профиля с помощью ВЭЗ и МСЗ. В начале детализационного профиля располагается терригенно-карбонатная толща, состоящая из мраморизованных известняков с глинистой корой выветривания (ПК0–ПК20). В интервале ПК20–ПК30 залегает полоса известняково-серпентинитового меланжа с выходящими на поверхность останцами серпентинитов и высыпками карбонатов. Далее следуют риолиты (ПК30–ПК50)

и базальты (ПК50–ПК70) субвулканического комплекса дегтярской свиты. Все геологические структуры можно различить на полученном геоэлектрическом разрезе ВЭЗ (рис. 3, а).

Особенно хорошо выделяется контакт риолитов и базальтов (ПК50) по резкой смене количества слоев и величин электрических сопротивлений. Карст, заполненный низкоомными отложениями, находится в начале профиля, однако из-за сильной раздробленности и водонасыщенности пород в зоне меланжа нельзя точно проследить его границы на геоэлектрическом разрезе. С этой задачей успешно справляются микросейсмические зондирования: на разрезе спектрального усиления хорошо выделяется контур карстовой воронки (ПК0–ПК18) повышенными величинами $J_n = 3–8$ (рис. 3, б). С востока карст ограничен тектоническим нарушением (ПК18), характеризующимся максимальными значениями $J_n \geq 10$. Еще одна аномальная зона высоких значений микросейсмического фона в верхней части разреза располагается на окончании профиля (ПК55–ПК69). Здесь залегают базальты, а наблюдаемая аномалия может быть связана с резонансными свойствами перекрывающих их рыхлых грунтов.

Выводы

Вертикальные электрические зондирования позволяют выделять карст по высокой контрастности сопротивлений вмещающих коренных пород (известняков) и терригенного материала-заполнителя (глины, суглинки). Микросейсмические зондирования дают возможность оконтурить карстовые зоны по высоким значениям спектрального усиления слабо консолидированных карстовых отложений относительно низкого уровня микросейсм в коренных породах. Таким образом, на основании комплексных электрических и микросейсмических зондирований можно уверенно идентифицировать области развития карстовых процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик А. М. Электроразведка при железнодорожных изысканиях в карстовых районах. М.: ЦНИИ, 1949. 21 с.
2. Воронков О. К., Акатов Ю. Е. Сейсморазведочные исследования на карст // Геология и геофизика. 1967. № 6. С. 98–105.
3. Cueto M., Olona J., Fernández-Viejo G., Pando L., López-Fernández C. Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia) // Near Surface Geophysics. 2018. Vol. 16. Issue 3. P. 270–281. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2018003>
4. Bačić M., Librić L., Kačunić D. J., Kovačević M. S. The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples // Geosciences. 2020. Vol. 10. No. 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
5. Shokati R., Maleki A., Shirzaditabar F. Evaluation of Electrical Resistivity Tomography and Electromagnetic with Very Low Frequency Method in Identifying Buried Karst in Shaho Rifts (The Case of Quri Qaleh Cave) // Physical Geography Quarterly. 2021. Vol. 14. Issue 53. P. 97–117. <https://doi.org/10.1001/1.20085656.1400.14.53.5.6>
6. Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany // Geophysics. 2011. Vol. 76. P. B71–B77. <https://doi.org/10.1190/1.3560245>
7. Liang D., Gan F., Zhang W., Jia L. The application of HVSR method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China // Environmental earth sciences. 2018. Vol. 77. No. 6. P. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7439-x>
8. Шакуро С. В. Пассивная сейсмика при карстологических исследованиях в исторической части г. Казани // Инженерная и рудная геофизика 2021: материалы 17-й науч.-практ. конф. (Геленджик, 26–30 апр. 2021 г.). М.: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. С. 19–27. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152026>
9. Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute. 1989. Vol. 30. No. 1. P. 25–33.
10. Bath M. Spectral analysis in geophysics. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 1974. 579 p.
11. Горбатилов А. В., Степанова М. Ю., Камшилин А. Н. Специфика применения метода микросейсмического зондирования в инженерных задачах // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 25–30.
12. Калинина А. В., Аммосов С. М., Волков В. А. Сейсмический шум: опыт применения в инженерно-геофизических исследованиях // Разведка и охрана недр. 2008. № 1. С. 32–34.
13. Давыдов В. А. Спектральный анализ данных микросейсмических зондирований // Геофизика. 2015. № 1. С. 72–77.
14. Давыдов В. А. Малоглубинное сейсмическое зондирование на основе изучения эллиптичности микросейсм // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 1. С. 78–85. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
15. Heisey J. S., Stokoe K. H., Hudson W. R., Meyer A. H. Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves / Research Report 256-2, Center for Transportation Research. Austin: The University of Texas at Austin, 1982. 277 p.
16. Louie J. N. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays // Bulletin of the Seismological Society of America. 2001. Vol. 91. No. 2. P. 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
17. Park C. B., Miller R. D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64. No. 3. P. 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
18. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984. 352 с.

Статья поступила в редакцию 05 ноября 2022 года

Karst detection by geophysical methods using microseismic sounding

Vadim Anatol'evich DAVYDOV*

Bulashevich Institute of Geophysics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Research aim is to test a technique for detecting buried karst using microseismic sounding based on spectral amplification of horizontal displacements. The main research tasks include the construction and analysis of geoelectric and microseismic sections.

Methodology. The microseismic background was recorded using the OMAR-2s autonomous seismic station (Institute of Geophysics Ural Branch RAS, Ekaterinburg) in the frequency band 1–1000 Hz. Low-frequency horizontal seismic receivers from OYO Geospace Corporation were used as sensors. Vertical electrical sounding (VES) was carried out by a set of ERA-MAX equipment (SPC “ERA”, St. Petersburg) using a symmetrical Schlumberger installation at a frequency of 4.88 Hz, at currents of 5–50 mA. VES processing consisted in quantitative one-dimensional inversion according to the IPI2Win program (Moscow State University, Moscow).

Results. Experimental and methodological work on the study of microseisms, accompanied by VES, was carried out on two karst sites of the Sverdlovsk region. Based on the results of processing, geoelectric and microseismic sections were constructed to determine the conditions of occurrence of bedrock and loose sediments covering them, as well as to identify local anomalies associated with karst manifestations. The results of electrical exploration and seismometry are in good agreement with each other and are confirmed by geological data.

Conclusions. Vertical electrical sounding makes it possible to distinguish karst by the high contrast of the resistances of the host bedrock (limestone) and terrigenous filler material (clay, loam). Microseismic sounding makes it possible to delineate karst zones by high values of spectral amplification of weakly consolidated karst deposits, relatively low levels of microseisms in bedrock. Thus, on the basis of complex electrical and microseismic soundings, it is possible to confidently identify the areas of development of karst processes.

Keywords: microseismic background, spectral amplification, karst, tectonics, complex geophysical studies, sections of physical parameters.

REFERENCES

- Gorelik A. M. 1949, Electrical prospecting during railway surveys in karst areas. Moscow, 21 p. (*In Russ.*)
- Voronkov O. K., Akatov Yu. E. 1967, Seismic surveys on karst. *Geologiya i geofizika* [Geology and geophysics], no. 6, pp. 98–105. (*In Russ.*)
- Cueto M., Olona J., Fernández-Viejo G., Pando L., López-Fernández C. 2018, Karst-induced sinkhole detection using an integrated geophysical survey: a case study along the Riyadh Metro Line 3 (Saudi Arabia). *Near Surface Geophysics*, vol. 16, issue 3, pp. 270–281. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2018003>
- Bačić M., Librić L., Kačunić D. J., Kovačević M. S. 2020, The usefulness of seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples. *Geosciences*, vol. 10, no. 10, pp. 1–17. <https://doi.org/10.3390/geosciences10100406>
- Shokati R., Maleki A., Shirzaditabar F. 2021, Evaluation of Electrical Resistivity Tomography and Electromagnetic with Very Low Frequency Method in Identifying Buried Karst in Shaho Rifts (The Case of Quri Qaleh Cave). *Physical Geography Quarterly*, vol. 14, issue 53, pp. 97–117. <https://doi.org/10.1001.1.20085656.1400.14.53.5.6>
- Kaufmann G., Romanov D., Nielbock R. 2011, Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany. *Geophysics*, vol. 76, pp. B71–B77. <https://doi.org/10.1190/1.3560245>
- Liang D., Gan F., Zhang W., Jia L. 2018, The application of HVSr method in detecting sediment thickness in karst collapse area of Pearl River Delta, China. *Environmental earth sciences*, vol. 77, no. 6, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7439-x>
- Shakuro S. V. 2021, Passive seismic during karstological studies in the historical part of Kazan. Engineering and ore geophysics 2021: materials of the 17th scientific and practical conference. Moscow, pp. 19–27. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152026>
- Nakamura Y. 1989, A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, vol. 30, no. 1, pp. 25–33.
- Bath M. 1974, Spectral analysis in geophysics. Amsterdam, 579 p.
- Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., Kamshilin A. N. 2008, The specifics of the application of the microseismic sounding method in engineering problems. *Voprosy inzhenernoy seismologii* [Issues of engineering seismology], vol. 35, no. 2, pp. 25–30. (*In Russ.*)
- Kalinina A. V., Ammosov S. M., Volkov V. A. 2008, Seismic noise: application experience in geophysical surveys. *Razvedka i okhrana nedr* [Exploration and protection of subsoil], no. 1, pp. 32–34. (*In Russ.*)
- Davydov V. A. 2015, Spectral analysis of microseismic sounding data. *Geofizika* [Geophysics], no. 1, pp. 72–77. (*In Russ.*)
- Davydov V. A. 2019, Shallow seismic sounding based on ellipticity analysis of microtremor. *Georesursy* [Georesources], vol. 21, no. 1, pp. 78–85. (*In Russ.*) <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.78-85>
- Heisey J. S., Stokoe K. H., Hudson W. R., Meyer A. H. 1982, Determination of in situ shear wave velocities from Spectral Analysis of Surface Waves. Research Report 256-2, Center for Transportation Research. Austin, 277 p.
- Louie J. N. 2001, Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 91, no. 2, pp. 347–364. <https://doi.org/10.1785/0120000098>
- Park C. B., Miller R. D., Xia J. 1999, Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, vol. 64, no. 3, pp. 800–808. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>
- Instructions for electrical exploration. Leningrad, 1984, 352 p.

The article was received on November 05, 2022

✉ davyde@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2483-2154>