

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 550.8.028

### Результаты комплексного исследования карстового провала в деревне Саркаево

О.Н. Ковин<sup>а</sup>, С.М. Блинов<sup>а</sup>, П.А. Белкин<sup>а</sup>, С.С. Ваганов<sup>а</sup>, Бавик Лодхиа<sup>б</sup>, Рут Эми<sup>б</sup>, Ган Юцянь<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15. E-mail: [onk2004@netscape.net](mailto:onk2004@netscape.net)

<sup>б</sup>University of Oxford, Wellington Square, Oxford, OX1 2JD, United Kingdom  
(Статья поступила в редакцию 10 декабря 2013 г.)

Проведены комплексные геолого-геофизические исследования карстового провала на территории деревни Саркаево. Полученные гидрогеологические данные свидетельствуют о локальной концентрации потока подземных вод на изучаемом участке и повышенном содержании сульфат-иона в пробах воды, что подтверждает заключение о карстовом происхождении провала. Геофизические исследования позволили определить основные параметры геологического строения участка, проследить положение зоны нарушенности пород вблизи провала на различных глубинах и выделить участки с различной степенью компактности грунта. По результатам исследования даны рекомендации для детального изучения участка с целью предотвращения возникновения опасных ситуаций при дальнейшем развитии карста.

Ключевые слова: *карст, провал, сульфатные породы, подземные воды, гидрогеологические исследования, геофизические методы.*

#### Введение

Наличие растворимых в воде пород приводит к широкому распространению как подземных, так и поверхностных карстовых явлений, которые становятся характерным элементом рельефа. В области развития сульфатных пород карстовые процессы развиваются значительно интенсивнее, нежели в карбонатных массивах.

Наиболее распространенной формой карстопроявления на территории Пермского края являются карстовые воронки. Они сильно развиты среди гипсов, значи-

тельно – в карбонатных отложениях. По форме в профиле в гипсах встречаются блюдцеобразные, конусообразные и колдцеобразные воронки. Наиболее распространены последние два вида. В некоторых местах образуются поля карстовых воронок, занимающие большую площадь или вытянутые в определенном направлении. Иногда встречаются цепи воронок, имеющие четкую ориентировку. Поля и цепи воронок чаще всего вытянуты в направлении выходов гипсовых пачек, заключенных среди карбонатных прослоев. Направление цепей совпадает с направлением крупных логов, пещер и исчезающих

речек, что указывает на их связь с крупными трещинами или трещинными зонами [1].

Объектом исследования является карстовый провал, образовавшийся 30 июля 2013 г. в д. Саркаево, в 50 м к югу от дома № 42, во время сильного проливного

дождя. Ситуационный план местности представлен на рис. 1.

Согласно схеме распространения карстующихся пород на территории Пермского края [5], исследуемая территория относится к Нижнесылвенскому (Нс) району распространения сульфатного карста.



Рис. 1. Ситуационный план местности

Геологическое строение территории приводится по результатам изучения архивных материалов [1]. По данным скв. 1712, 1712, 1714, 1717 верхняя часть геологического разреза изучаемой местности (д. Саркаево) представлена аллювиальными отложениями четвертичного возраста, преимущественно суглинками, несогласно залегающими на размывтой поверхности сульфатных пород иренского возраста (рис. 2).

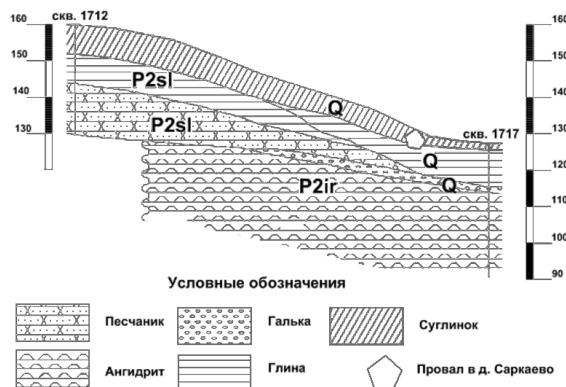


Рис. 2. Схематический геологический разрез по скв. 1712-1717

Кровля иренского горизонта в пределах исследуемой территории междуречья Бабки и Сылвы расположена на абсолютных отметках 105-115 м. На большей части Пермского края, к западу от района исследований, зона активного водообмена ограничивается подошвой соликамских отложений, тогда как иренская толща является регионально выраженным водопором. При выходе иренского горизонта на поверхность он перестает быть водопором и содержит спорадически распространенные карстовые воды. Характерной особенностью карбонатно-сульфатной иренской толщи является ее сильная закарстованность в местах выхода на поверхность и в местах залегания под небольшой толщиной соликамских отложений.

В гидрогеологическом отношении на исследуемой территории распространены два водоносных комплекса: аллювиальный четвертичный водоносный комплекс (alQ) и подземные воды спорадического распространения в породах иренского горизонта (P<sub>1</sub>ir).

**Инженерно-геологические и гидрогеологические исследования**

Описание карстового провала приводится по Г.А. Максимовичу [4]. Провал представляет собой изометричную, округлую в плане воронку цилиндрической формы диаметром 7,7 м (рис. 3). Уклон стенок воронки приближается к 90 градусам. Абсолютная отметка уровня поверхности земли в месте провала составляет 127 м. Воронка неглубокая – 3,25 м. Она заполнена водой. Установившийся уровень составляет 1,55 м. Верхняя необводненная часть карстовой воронки представлена суглинками. Температура воды в воронке на момент обследования составляла +18°C.



Рис. 3. Карстовая воронка в дер. Саркаево

В ходе полевых работ были отобраны пробы воды из провала, старицы р. Бабки,

а также из частных водозаборных скважин на прилегающих к провалу участках (рис. 1). Результаты химических анализов воды представлены в табл. 1, 2.

Химический состав воды характеризуется гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевой и сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевой фацией (по Г.А. Максимовичу). Общность химического состава, а также сопоставление уровней воды (рис. 4), позволяют говорить о принадлежности подземных вод к единому водоносному горизонту, который, судя по повышенным значениям содержания сульфат-иона, активно взаимодействует с сульфатными породами. В результате анализа картографического материала, дешифрирования космодатаснимков, рекогносцировочного обследования местности были выявлены основные особенности территории образования провала.

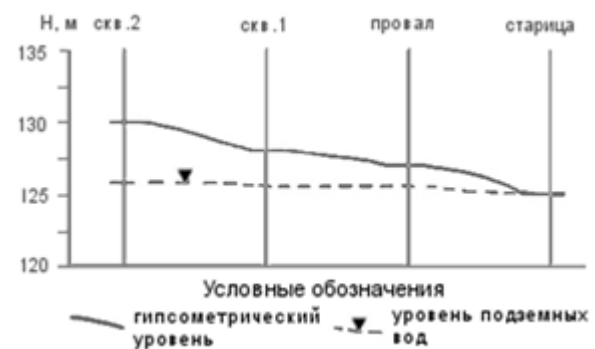


Рис. 4. Профиль уровня подземных вод на участке исследований

Таблица 1. Результаты химического анализа воды, мг/дм<sup>3</sup>

Привязка	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Sr	Fe общ
Карстовый провал	7,43	390,40	<b>313,84</b>	18,50	211,60	31,84	10,54	1,90	0,00	0,00	3,41	0,00
д. Саркаево, д.42, скв. 1	6,65	422,43	<b>340,10</b>	42,45	227,88	27,86	26,80	8,59	0,00	0,00	8,59	0,98
д. Саркаево, скв. 2	6,57	382,78	<b>384,00</b>	31,11	223,81	33,20	16,68	1,14	1,83	0,00	4,62	7,91
Старица р. Бабки	6,71	192,15	<b>302,24</b>	29,99	142,43	29,73	9,8	0,93	0,00	0,00	6,99	0,40

Таблица 2. Результаты определения гидрохимических параметров

Привязка	Минерализация	Сухой остаток	НФП	Мутность	Перманганатная окисляемость	Жесткость	Фация по Максимовичу
	мг/дм <sup>3</sup>				мгО/дм <sup>3</sup>	мг-экв/л	
Карстовый провал	<b>978,62</b>	783,42	<0,04	4,47	10,54	13,18	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup>
д. Саркаево, д.42, скв. 1	<b>1103,25</b>	892,04	<0,04	8,50	9,76	13,66	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - Ca <sup>2+</sup>
д. Саркаево, скв. 2	<b>1082,46</b>	891,07	<0,04	56,14	3,51	13,90	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup>
Старица р. Бабки	<b>707,67</b>	611,60	<0,04	2,80	13,27	9,55	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - Ca <sup>2+</sup>

На рис. 5 представлен фрагмент космоснимка изучаемого района, на котором можно различить следы деятельности поверхностных вод. Белыми линиями на рисунке отмечены границы лога по топогоризонталям. Как видно на рисунке, провал образовался в зоне развития обширного лога, вблизи его осевой части. Особенности рельефа изучаемой местности дают основания предположить направление движения (концентрация, сосредоточение) подземных и поверхностных вод в пределах этой территории – по простиранию лога. Данные предположения подтверждаются результатами дешифрирования космофотоснимков, сделанных в различные периоды года, а также результатами рекогносцировочного обследования. Кроме того, по словам местных жителей, в период снеготаяния, а также при выпадении обильных ливневых дождей, по простиранию лога концентрируется временный поверхностный сток. О соответствующем направлении движения подземных вод также свидетельствует рассредоточенная разгрузка подземных вод в прирусловой (нижняя пойма) зоне р. Бабка.



**Рис. 5.** Фрагмент космофотоснимка территории исследований: А – снимок территории д. Саркаево ; Б – увеличенный фрагмент участка работ

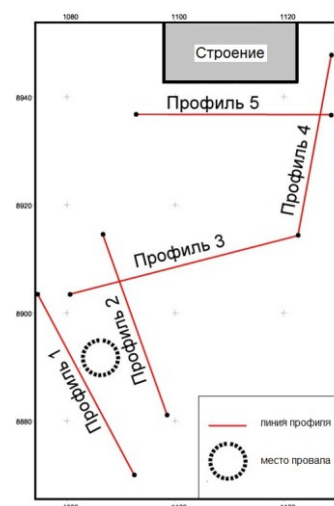
Таким образом, основной причиной образования провала можно считать растворение карстующихся сульфатных по-

род под действием интенсивного стока подземных и поверхностных вод.

### Инженерно-геофизические исследования

С целью определения геомеханических свойств грунтов и локации возможных подземных пустот на участке работ были выполнены комплексные инженерно-геофизические исследования методами георадиолокации (георадар) и сейсморазведки. Проведение работ имело рекогносцировочный характер т. к. участок находится в пределах частного землевладения с ограниченной возможностью доступа. Профили и отдельные точки наблюдения расположены по нерегулярной сети в связи с наличием хозяйственных построек и обрабатываемых участков земли. Интерпретация геофизических данных также затруднена в связи с отсутствием полной геологической информации об участке проведения работ.

С целью обнаружения возможных карстовых пустот производились работы методом георадар на 5 профилях, схема расположения которых приведена на рис. 6.



**Рис. 6.** Расположение профилей георадиолокации

Использовался георадарный комплекс «ЗОНД-12е» с антенной 300 МГц [2]. Регистрация расстояния по профилю производилась с помощью мерной ленты с по-



следующей компьютерной коррекцией. Для обработки, визуализации и интерпретации полученных данных использовалась программа «Призм», поставляемая совместно с прибором. При обработке радарограмм применялись процедуры коррекции расстояния и амплитуд отражений. Для подавления когерентного шума использовалась процедура двухмерной фильтрации.

Анализ полученных георадарных данных показал, что глубина исследования в данных условиях составляет 1–1.5 м. Низкое значение глубины проникновения сигнала обусловлено повышенной глинистостью разреза. При интерпретации радарограмм на профилях 1-4 не отмечено признаков наличия подземных полостей. На профиле 5 выделена структурная аномалия, связанная с резким погружением отражающих границ и предположительно образованная в результате заполнения старой карстовой воронки или локального размыва приповерхностных пород (рис. 7).

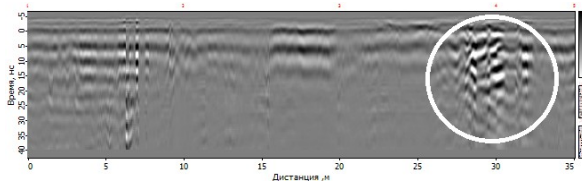


Рис. 7. Радарограмма профиля 5 (аномальная зона выделена окружностью)

Сейсмические исследования проведены методами преломленных волн и многоканального анализа поверхностных волн (MASW) с использованием 16 канального телеметрического модуля IS48.03. Колебания регистрировались с помощью сейсмоприемников GS-20DX в частотном диапазоне 10-250 Гц. Длина записи составляла от 0.8 до 1.6 мс. Интервал оцифровки записи – 0.2 мс.

Для возбуждения колебаний использовалась кувалда с деревянной подкладкой. Шаг расстановки сейсмоприемников – 2 м. В связи со спецификой регистрации телеметрическим модулем начала записи точка возбуждения располагалась вблизи

первого сейсмоприемника. Для подавления естественных шумов запись каждой сейсмограммы производилась с 5 кратным накоплением. Каждая полевая сейсмограмма использовалась для обработки и интерпретации обоими методами.

Наблюдения производились по нерегулярной сети. Точки наблюдения располагались там, где была возможность установки измерительной линии (рис. 8).

Метод многоканального анализа поверхностных волн позволяет изучать распределение скоростей поперечных волн с глубиной путем построения вертикальных профилей в центральной точке измерительной линии [7]. Значения скоростей поперечных волн непосредственно связаны с физико-механическими параметрами грунтов и используются для определения их прочностных свойств. Вертикальные профили скоростей, полученные в результате обработки данных приведены на рис. 9.

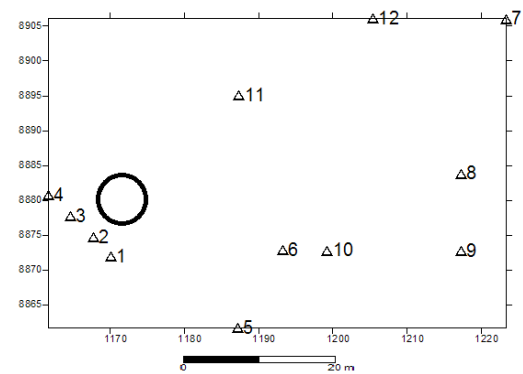


Рис. 8. Расположение сейсмических точек наблюдения (место провала отмечено окружностью)

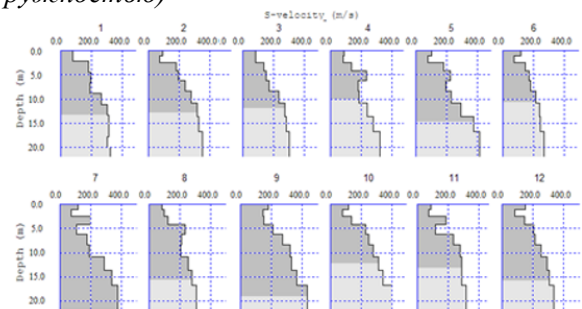
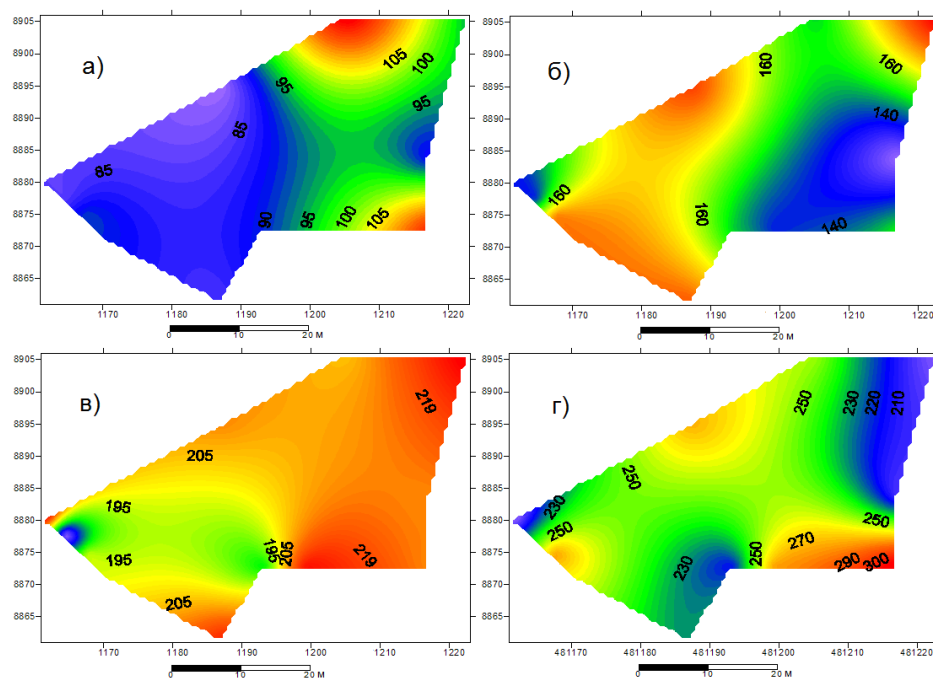


Рис. 9. Вертикальные профили скоростей поперечных волн (номера профилей соответствуют номерам точек наблюдения)

Средняя глубина исследования составляет 10-15 м. На представленных графиках видно, что на данном участке наблюдаются вариации скоростей как по площади, так и по глубине. Общее увеличение скорости с глубиной связано с уплотнением материала. Незначительные пространственные вариации скоростей обусловлены изменениями соотношения глинистой и песчаной фракций грунта, характерных для пойменных отложений. Водонасыщенность не влияет на скоростные параметры поперечных волн. Диапазон изменения скоростей в пределах глубины исследования соответствует песчано-глинистым грунтам.

По сейсмическим данным построены карты распределения скоростей попереч-

ных волн на глубинах 1, 2,5, 5 и 10 м. На представленных материалах (рис. 10) зона провала выделяется пониженными значениями скоростей, что, скорее всего, связано с участком разуплотнения пород. По глубине отмечается незначительное смещение аномалии скоростей, связанной с зоной провала, в северо-западном направлении. Изменение скорости в приповерхностном слое может быть связано с изменением свойств грунта в процессе сельскохозяйственной обработки почвы. В восточной части участка на глубинах от 2.5 до 10 м наблюдается зона пониженных скоростей, которую можно отнести к потенциально опасным по риску образования новых провалов.



**Рис. 10.** Карты распределения скоростей поперечных волн на глубинах: а) – 1 м, б) – 2,5 м, в) – 5 м, г) – 10 м

Для картирования преломляющих границ разреза и скоростей продольных волн была проведена обработка сейсмограмм по упрощенной методике  $t_0$ . Карта глубин преломляющей границы представлена на рис. 11.

Средняя глубина преломляющей границы по данным метода преломленных волн составляет 2,5 м с вариациями от 2,0

до 3,0 м. Наименьшие отметки границы наблюдаются в центральной части участка. Преломляющая граница скорее всего связана с верхней границей водоносного горизонта.

На рис. 12 представлены карты скоростей продольных волн в породах, расположенных выше (слой 1) и ниже преломляющей границы (слой 2).

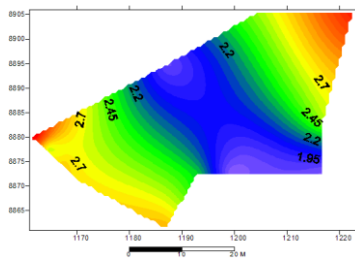


Рис. 11. Глубина преломляющей границы по данным метода преломленных волн

Наиболее низкие значения скоростей наблюдаются в центральной части участка, что может быть связано с повышением глинистости грунта. Локальное понижение скорости в слое 1 в районе провала связано предположительно с дренированием грунта после образования воронки.

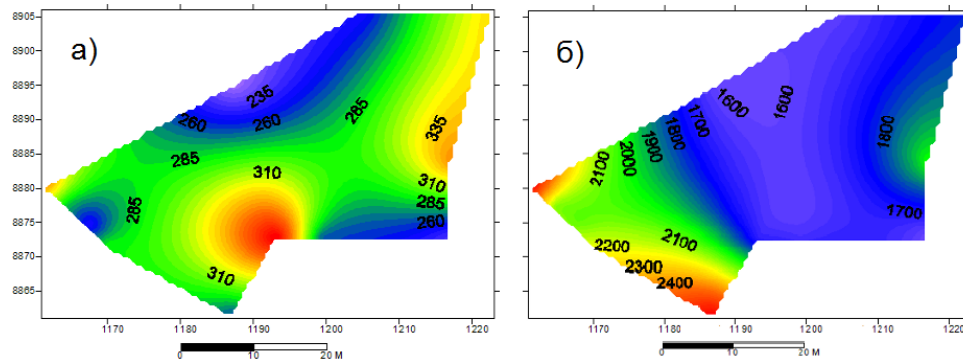


Рис. 12. Распределение скоростей продольных волн выше (а) и ниже (б) преломляющей границы

Анализ коэффициента Пуассона, рассчитанного по соотношению скоростей продольных и поперечных волн для слоев 1 и 2 (рис. 13), показал, что в первом слое среднее значение составляет около 0.40, что соответствует влажным рыхлым грунтам [6]. Во втором слое значение коэффициента Пуассона практически не изменяется в пределах участка и составляет 0.49, что соответствует водонасыщенным отложениям. Это подтверждается результатами наблюдений за уровнем грунтовых вод в провале.

Следует отметить, что влажные грунты обладают способностью к резкой потере прочности и повышению подвижности при динамическом воздействии землетрясений и взрывов [3]. Это явление особенно характерно для территорий с повышенной мощностью неконсолидированных четвертичных отложений. Проведение массовых взрывов на соседнем Саркаевском карьере могло способствовать активизации просадок грунта на близрасположенных пойменных участках долины р. Бабка, хотя и не является первопричиной их образования.

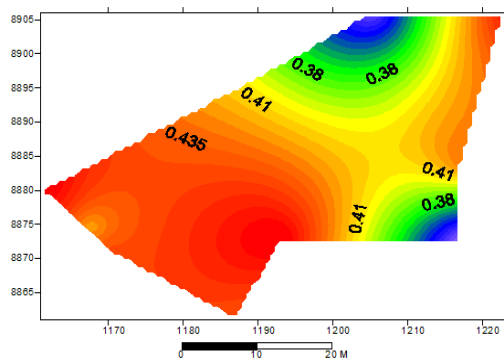


Рис. 13. Значения коэффициента Пуассона в материале слоя, покрывающего преломляющую границу

### Заключение

В результате анализа полученных данных установлено, что формирование провала, скорее всего, связано с просадкой грунта, вызванной растворением подстилающих карстующихся пород. Точно установить причину провала не представляется возможным, т. к. существующий объем геологических данных об участке работ недостаточен для проведения детальной интерпретации.

По результатам проведенных работ подземных пустот в пределах участка не обнаружено. Отмечается существенная изменчивость скоростных параметров как по площади, так и по глубине, что свидетельствует о неоднородности состава грунтов. Зона провала надежно локализуется по значениям механических параметров грунтов и скорости сейсмических волн. В восточной части участка установлена зона пониженных значений скоростей поперечных волн, что может быть связано с изменением состава или компактности грунта.

#### Библиографический список

1. Бобров Е.А., Оскотский А.М., Трапезникова Л.И., Шумилин А.И. Объяснительная записка к гидрогеологической карте Урала масштаба 1:200 000 листа О-40-XXI (Кунгур) (Отчет Пермской гидрогеологической партии по результатам работ за период 1964-1965 гг). Пермь, 1966
2. Георадар «ЗОНД-12е». Инструкция по эксплуатации / НПФ «Радарные системы». Рига, 2012.
3. Иванов П.Л. Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях / ЛПИ. Л., 1978. 52 с.
4. Максимович Г.А. Основы карстоведения / Пермский государственный университет. Пермь, 1963. Т. 1.
5. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края: энциклопедия / под общ. ред. А.И. Кудряшова; Горный институт УрО РАН. Пермь, 2006. 463 с.
6. Brown L. T., Boore D. M., Stokoe II K. H. Comparison of Shear-Wave Slowness Profiles at 10 Strong-Motion Sites from Non-invasive SASW Measurements and Measurements Made in Boreholes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. Vol. 92, № 8. P. 3116-3133.
7. Park, C., Miller, R., and Xia, J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. 1999. Vol. 64, № 3. P. 800–808.

## Results of Integrated Investigation of Collapse Sinkhole in Sarkayevo Village

O. N. Kovin<sup>a</sup>, S. M. Blinov<sup>a</sup>, P. A. Belkin<sup>a</sup>, S. S. Vaganov<sup>a</sup>, Bhavik Lodhia<sup>b</sup>, Ruth Amey<sup>b</sup>, Gan Yuqian<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Perm State National Research University, 614990, Perm, Bukireva st., 15. E-mail: onk2004@netscape.net

<sup>b</sup>University of Oxford, Wellington Square, Oxford, OX1 2JD, United Kingdom

The integrated investigations of karstic collapse sinkhole were conducted at the area of Sarkayevo village. The obtained hydrogeologic data show the local concentration of underground water flow at the investigated site, and high sulfate ion content in the water samples that suggests that a sinkhole is karstic in nature. Geophysical investigations allowed determining basic parameters of the site geological structure, to reveal the depth distribution of the disturbed ground in vicinity of the sinkhole, and delineate zones of different soil compaction. The recommendations for detail site study, aimed to the mitigation of further karst development hazards, are presented.



Keywords: *karst, sinkhole, sulfate rock, underground water, hydrogeological investigations, geophysical methods.*

## References

1. *Bobrov E. A., Oskotskiy A. M., Trapeznikova L. I., and Shumilin A. I.* Obyasnitelnaya zapiska k gidrogeologicheskoy karte Urala masshtaba 1:200 000 lista O-40-XXI (Kungur) (Otchet Permskoy gidrogeologicheskoy partii po rezultatam rabot za period 1964-1965 gg) [Explanation notes for hydrogeological map of 1:200 000 of sheet O-40-XXI (Kungur). Report of Perm hydrogeological department on the results of 1964-1965 work.]. Perm, 1966.
2. Georadar Zond-12e. Manual. NPF «Radar systems». Riga, 2012.
3. *Ivanov P. L.* Razzhizhenie i uplotneniye nesviaznykh gruntov pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [Liquefaction of unconsolidated soil under dynamic load]. L, LPI. 1978. 52 p.
4. *Maksimovich G. A.* Osnovy karstovedeniya [Introduction to Karstology]. Vol 1. Perm, PSU, 1963.
5. Mineralno-syryevyye resursy Permskogo kraya: Entsiklopediya [Mineral resources of the Perm kray: Encyclopedia]. Ed. By Kudriashov A. I., Mining Institute UB RAS, Perm, 2006.
6. *Brown L. T., Boore D. M., Stokoe II K. H.* Comparison of Shear-Wave Slowness Profiles at 10 Strong-Motion Sites from Non-invasive SASW Measurements and Measurements Made in Boreholes. Bulletin of the Seismological Society of America. 2002. Vol. 92. n. 8. P. 3116-3133.
7. *Park, C., Miller, R., and Xia, J.* Multichannel analysis of surface waves. Geophysics. 1999. Vol. 64. n. 3. P. 800–808.

Рецензент - доктор геолого-минералогических наук В. В. Середин