

УДК 551.435.8

Оценка устойчивости территории вблизи карстовых провалов в населенном пункте Березники (Нижегородская область)

Т.Г. Ковалёва, З.В. Кивилева, Д.А. Балахнин, А.Р. Юркина

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Генкеля, д. 4. E-mail: kovalevatg@mail.ru; zoya.kivileva@mail.ru;
dbalaxnin@mail.ru; yurkina2016@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 7 июля 2021 г.)

В статье приведена комплексная оценка устойчивости территории вблизи карстовых провалов с. Березники Гагинского района. Проинтерпретированы материалы полевых геофизических исследований, полученные методом вертикального электрического зондирования, с учетом данных карстологического бурения. Оконтурированы ослабленные участки по глубинным срезам кажущихся сопротивлений. Выполнено зондирование территории по удаленности от ближайшего карстопроявления. Посчитаны интенсивность провалообразования и средний диаметр карстового провала.

Ключевые слова: *карстовый провал, карстоопасность, вертикальное электрическое зондирование.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 20.3.229

Введение

Юго-западная часть территории Нижегородской области подвержена карстово-суффозионному процессу (Карта развития карстовых процессов... Леоненко М.В., Леоненко С.В., 2011). Карст проявляется в виде трещин, полостей и разуплотненных зон в толще растворимых пород, в виде провалов и оседаний на поверхности земли, представляющих огромную опасность для зданий и сооружений, а следовательно, жизни и здоровью людей. При освоении таких территорий необходим комплекс изысканий с применением специальных методик, оборудования и приборов. На застроенных территориях, с целью предотвращения или сведения до минимума возникновения катастрофических разрушений и обеспечения сохранности хозяйственных объектов и жизней людей необходимо выполнение противокарстовых мероприятий.

На территории села Березники Гагинского района Нижегородской области в период с 23 марта по 6 апреля 2020 г. недалеко друг от друга произошло 2 карстовых провала. Для оценки устойчивости территории вблизи данных провалов выполнен комплекс исследований, включающих дешифрирование

космоснимков близлежащих территорий, рекогносцировочное карстологическое обследование, геофизические исследования методом вертикального электрического зондирования, бурение карстологической скважины, лабораторные исследования проб воды и грунта.

Краткая характеристика природных условий территории исследования

Карстовые провалы расположены на открытой местности между ул. Молодежная и ул. Въездная в 60 м от здания фельдшерского пункта села Березники, Гагинского района Нижегородской области. Объектом исследования является территория между ул. Молодежная и ул. Въездная.

Участок исследования приурочен к пойме и I надпойменной террасе левого берега р. Пьяна, которая протекает в 770 м восточнее. Ориентировочная отметка уровня воды в р. Пьяна составляет 104 м.

В геоморфологическом отношении территория исследования относится к эрозионно-карстовому плато левобережья южной ветви р. Пьяны и правобережья р. Вадка, сложенному эрозионно-карстовыми формами рельефа. В современном рельефе нашли

отражение карстовые процессы, происходящие в гипсах ассельского и сакмарского ярусов, и частично, в известняках нижеказанского подъяруса. На поверхности они выражены провалами и озерами. Формирование карстового рельефа происходит при значительном участии процессов эрозии и денудации. Провалы быстро принимают форму воронок, с постепенно выполаживающимися стенками, снижаются или совершенно уничтожаются перемычки между отдельными воронками, образуются обширные понижения, при заполнении водой – озера.

В тектоническом отношении исследуемая территория находится в западной части Волго-Камской антеклизы, в пределах Арзамасской депрессии. Абсолютная отметка кровли фундамента по данным геофизических исследований составляет – 1200 м.

По региональным данным в строении осадочного чехла принимают участие образования каменноугольной (С), пермской (Р) и четвертичной (Q) систем.

Каменноугольная система (С) представлена касимовским (С₃ks), гжельским (С₃g) и уральским (С₃ur) ярусами верхнего отдела. В геологическом разрезе каменноугольной системы преобладают органогенные, органогенно-обломочные, доломитизированные известняки, вторичные доломиты с включениями гипса и кремней. Мощность составляет 192–229 м.

Пермская система представлена сакмарским и артинским (Р₁s-a) ярусами приуральского отдела, казанским (Р₂kz) и уржумским (Р₂ur) ярусами биармийского отдела, северодвинским (Р₃sd) и вятским (Р₃v) ярусами татарского отдела.

Сакмарский и артинский ярусы в нижней части разреза представлены доломитами с прослоями и кавернами гипса, выше по разрезу сменяются гипсами и ангидритами, содержащими тонкие прослой доломита. Кровля сакмарско-артинских отложений глубоко размыта и закарстована вследствие перерыва в осадконакоплении. Мощность достигает 73–112 м.

Отложения казанского яруса представлены карбонатными породами. Доломиты органогенные трещиноватые, огипсованные, прослоями крепкие, реже встречаются доломитизированные крепкие известняки. Мощ-

ность казанских отложений сильно изменяется по площади в виду сильного размыва значительной части этих отложений и образования коры выветривания в конце казанского века. Уржумский ярус представлен пестроцветными породами: песчаниками, глинами, алевролитами, аргиллитами, мергелями, доломитами. Мощность данных отложений достигает 90 м.

В разрезе северодвинского яруса представлены пачки полимиктовых песчаников и алевролитов, аргиллиты, глины, мергели, известняки, местами доломитизированные. Вятский ярус сложен преимущественно песками и песчаниками с линзами галечников, с прослоями глин, алевролитов и редкими прослоями мергелей. Мощность отложений татарского отдела колеблется от 28 до 92 м.

Коренные отложения повсеместно покрыты слоем четвертичных образований аллювиального, элювиально-делювиального генезиса. Аллювиальные (аQ) образования представлены песчаными и глинистыми отложениями третьей, второй и первой надпойменных террас, с включениями гальки и гравия. В верхней части разреза аллювия суглинки коричневато-бурые песчанистые, пористые с гальками и гравием, с прослоями песков. В нижней части разреза пески разнозернистые, преимущественно мелкозернистые, с прослоями и линзами суглинков и супеси. Элювиально-делювиальные (edQ) отложения представлены суглинками, в различной степени известковистыми и песчанистыми, в основании часто наблюдаются включения щебня подстилающих пород (геологическая карта СССР).

По результатам бурения карстологической скважины, пройденной на глубину 80 м, вскрываются отложения сакмарско-артинского (Р₁s-a) ярусов приуральского отдела, казанского (Р₂kz) и уржумского (Р₂ur) ярусов биармийского отдела пермской системы, перекрытые аллювиальными (аQ) и элювиально-делювиальными (edQ) отложениями четвертичной системы (рис. 3).

По результатам бурения в карстологической скважине вскрыты грунтовые и трещинно-карстовые воды. Грунтовые воды приурочены к аллювиальным пескам, вскрыты на глубине 9 м, установились на 10 м. По химическому составу сульфатно-хлоридно-

гидрокарбонатные натриево-калиево-магниево-кальциевые с минерализацией $0,795 \text{ г/дм}^3$.

Трещинно-карстовые воды приурочены к доломитам сильнотрещиноватым, выветрелым до щебня и дресвы, вскрыты на глубине 23,6 м, установились на 11,2 м (высота напора составляет 13,6 м). По химическому составу сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциево-натриево-калиевые с минерализацией $0,742 \text{ г/дм}^3$.

По степени агрессивности к карстующимся породам грунтовые и трещинно-карстовые воды являются агрессивными к доломитам, ангидритам, гипсам, неагрессивными к известнякам.

Методика выполнения исследования

Комплексный подход к оценке устойчивости территории относительно провалообразования включает в себя анализ материалов дешифрирования, карстологического бурения, данных вертикального электрического зондирования, результатов лабораторных исследований. Анализ и оформление карт выполнялось с применением программного комплекса ESRI ArcGIS, ArcScene 10.7.

На первом этапе, по результатам карстологического бурения и геофизических исследований, выполнено сопоставление значений кажущихся и удельных сопротивле-

ний с геологическим разрезом. На геоэлектрических срезах для глубин 10 м, 20 м, 30 м, 40 м, 50 м, 60 м были оконтурены участки с повышенными и пониженными значениями кажущихся сопротивлений (рис. 1).

На втором этапе выполнялось послойное наложение геоэлектрических срезов и выделенных на них ослабленных участков. В результате получен контур геофизических аномалий, в пределах которого возможно формирование на поверхности карстовых провалов (рис. 2).

Геофизические исследования

Карстологическое бурение является точечным методом оценки подземной закарстованности, отражающим действительность только в конкретной точке. Для площадного изучения развития карста применяются геофизические методы исследования (Леоненко, 1996 г.). Геофизические методы в карстовых районах решают следующие основные задачи: литологическое расчленение пород; поиски и оконтуривание карстовых полостей или зон их развития (поверхностных и погребённых), определение рельефа карстующихся пород; изучение степени трещиноватости пород и преобладающего ее направления; исследование гидрогеологических особенностей карста; мониторинг процессов карстообразования (Лисицын В.В., 1971).

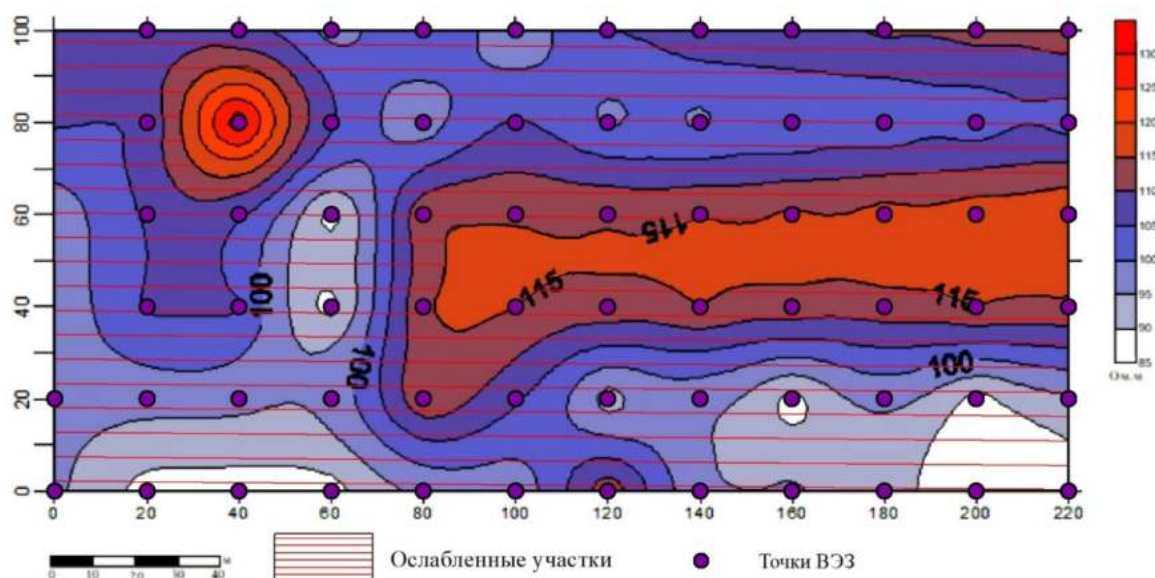


Рис. 1. Геоэлектрический срез на глубине 50 м с оконтуренными ослабленными участками

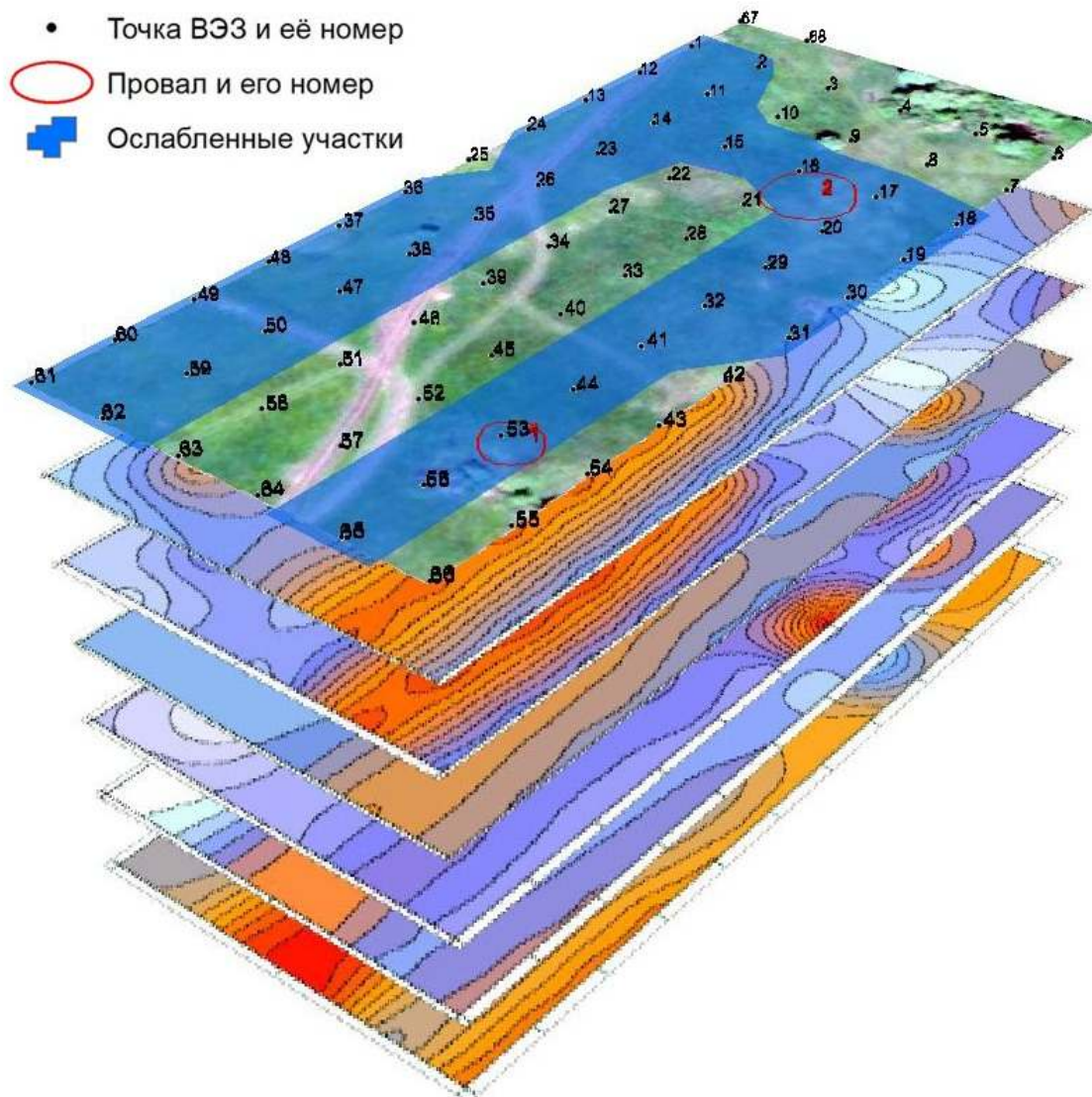


Рис. 2. Послойное наложение геоэлектрических срезов и оконтуривание ослабленных участков

Наиболее эффективным и экономически целесообразным является электроразведка методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

Для выявления ослабленных участков вблизи карстового провала были выполнены геофизические исследования методом вертикального электрического зондирования сеткой с шагом 20,0 м x 20,0 м. По результатам были построены 5 геоэлектрических разрезов по значениям удельных электрических сопротивлений (УЭС) и 6 геоэлектрических глубинных срезов по значениям кажущихся электрических сопротивлений (КЭС).

По продольным профилям удельных электрических сопротивлений пород выделяются границы 6-ти геоэлектрических слоев. Первый слой с широкими пределами значений УЭС (от 35–56 до 76–112 Ом.м) пред-

ставлен почвенно-растительным слоем. Вторым слоем имеют значения УЭС 18–47 Ом.м., такими сопротивлениями обладают песчаноглинистые отложения (суглинки). Кровля слоя отбивается на глубинах 0,5–4,0 м. Третий слой отбивается на глубинах 9–12 м с удельными сопротивлениями равными 82–122 – 105–238 Ом.м., представлен песчаноглинистыми отложениями (песками). Четвертый слой представлен породами с УЭС, равными 9–20 Ом.м., такие сопротивления указывают на глинистые отложения (глины). Кровля данного слоя прослеживается на глубине 13–20 м. Кровля пятого слоя отбивается на глубинах 18–24 м с УЭС 225–664 Ом.м., такие значения характерны для трещиноватых скальных пород (доломиты, известняки, алевролиты). Шестым геоэлектрическим слоем прослеживается на глубинах 39,5–41,0 м и

обладает значениями УЭС в пределах 664–1288 Ом.м., такими сопротивления, в данных геологических условиях, обладают гипсы (Пылаев А.М., 1968 г., Хмелевской В.К.,

1999). На рис. 3 приведен геоэлектрический разрез по удельным сопротивлениям, сопоставленный с геологическим разрезом по данным карстологического бурения.

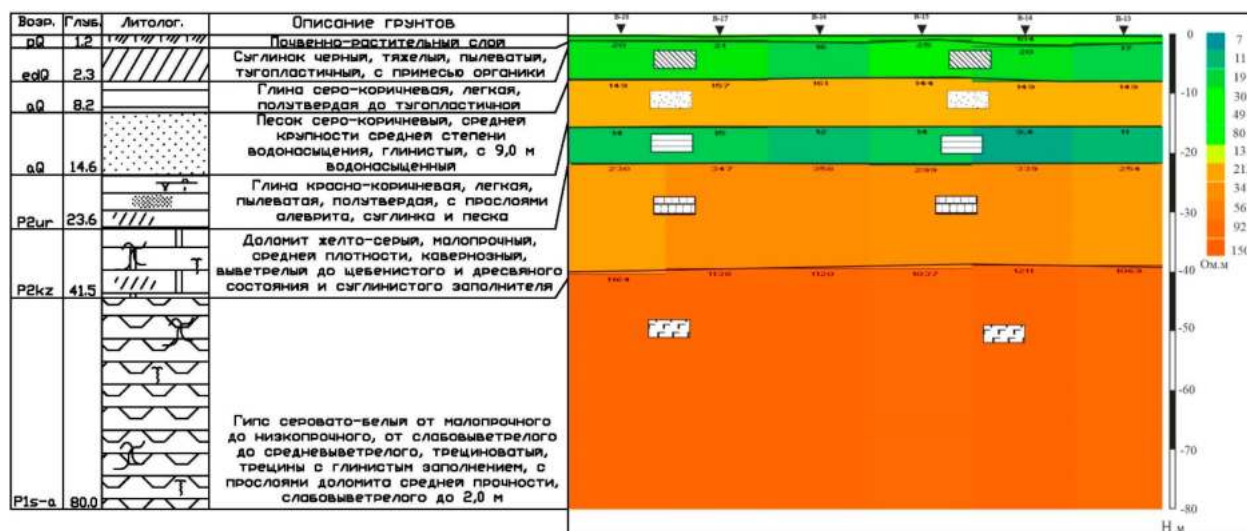


Рис. 3. Сопоставление геоэлектрического профиля с геолого-литологической колонкой карстологической скважины

Для изучения состояния горных пород вблизи карстового провала результаты ВЭЗ также были представлены в виде геоэлектрических срезов кажущихся сопротивлений на глубинах 10, 20, 30, 40, 50, 60 м.

Участки с повышенными значениями кажущихся сопротивлений дисперсных грунтов (перекрывающей толщи) характеризуются потенциально наиболее высокими значениями физико-механических свойств горных пород. Такие породы способны дольше удерживать свод над полостью, тем самым способствуя ее увеличению до критических размеров. Следовательно, в случае обрушения свода над полостью, на поверхности земли произойдет провал, соизмеримый с размерами полости. Участки с низкими значениями кажущихся сопротивлений характеризуются потенциально меньшими значениями физико-механических свойств грунтов. Такие породы меньше по времени могут сохранять целостность свода, и, как правило, в пределах таких участков процесс обрушения происходит не явным образом, а в результате оползания грунтов в полость.

Пониженные значения кажущихся сопротивлений в толще скальных грунтов (карстующегося массива) могут быть связаны с их разуплотненным состоянием (трещинова-

тые, выветрелые, малопрочные породы). Данные разуплотненные участки представляют собой зоны дробления – участки карстового массива, в пределах которого материнские карстующиеся образования находятся в сильно разрушенном состоянии. Что свидетельствует о возможном образовании в геологическом разрезе карстовых полостей. С этими зонами связано образование поверхностных деформаций на поверхности земли, проявляющихся в виде воронок и понижений.

Закарстованность территории исследования

Территория характеризуется развитием сульфатного (гипсы и ангидриты) и карбонатного (доломиты и известняки) типа карста. По степени обнаженности карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи развит закрытый тип карста (Максимович Г.А., 1960).

Поверхностная закарстованность. По результатам дешифрирования космоснимков в радиусе 5-ти км, анализа топографических карт масштаба 1:25000, фондовых материалов, статических космоснимков земли Google, Yandex, Bing Maps и Bird's Eye, а

также космоснимков портала Kosmosnimki.net масштаба 1:5000–1:20000, полученных в реальном времени, а также за разные года, что снижает вероятность ошибки при дешифрировании, с учетом результатов первичного полевого карстологического рекогносцировочного обследования в радиусе 2-

х км от исследуемого участка, было зафиксировано 869 шт. поверхностных карстопоявлений (рис. 4). Из выделенных карстовых форм 603 классифицированы как воронки, 125 – понижения, 131 – карстовые озера, 5 – провалы, 5 – карстовые лога.

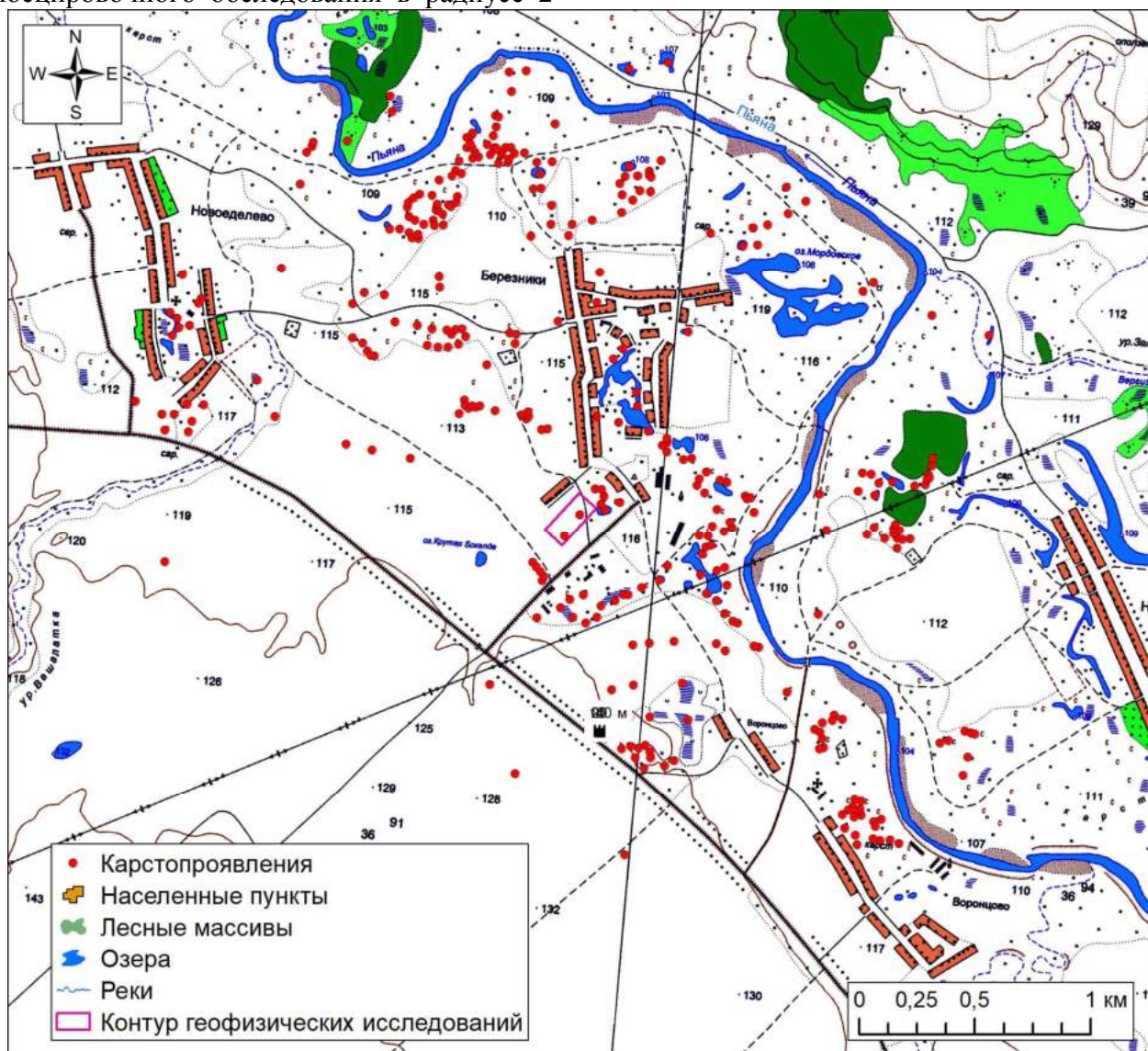


Рис. 4. Карстопоявления вблизи с. Берзhenики

Возраст большинства выделенных по результатам дешифрирования воронок (601 шт.) условно определен, как древний, 2 воронки являются молодыми. Диаметры воронок изменяются от 1,0 до 90,0 м, в среднем составляют 20,6 м; глубина – от 0,2 до 12,0 м (среднее значение – 1,5 м). В морфологическом отношении в большинстве своем воронки эллипсоидные в плане (485 шт.), в профиле воронки чашеобразные (592 шт.) и конусообразные (11 шт.).

Понижения предположительно древние (357 шт.). Морфометрические показатели понижений следующие: диаметр от 2,0 до 202,0 м (среднее значение 34,0 м), глубина от 0,2 до 8,8 м (среднее значение 2,3 м). В плане понижения преимущественно эллипсоидные (112 шт.), 13 понижений в профиле – чашеобразные.

Возраст карстовых озер условно определен, как древний. Диаметр карстовых озер варьируется от 6,0 до 414,0 м (среднее зна-

чение 59,8), условная глубина изменяется от 2,8 до 10 м (среднее значение 4,2 м). В морфологическом отношении большинство карстовых озер эллипсоидные в плане (129 шт.), в профиле – чашеобразные.

Карстовые лога предположительно древние. Диаметр изменяется от 20,0 до 86,0 м (среднее значение 51,7 м), условная глубина изменяется от 1,5 до 3,6 м (среднее значение 2,6 м). В плане карстовые лога эллипсоидные, в профиле чашеобразные.

Вблизи фельдшерского пункта на ул. Въездной зафиксировано 7 карстопроявлений (рис. 5). Карстовый провал 1 образовался между ул. Въездной и ул. Молодежной 6 апреля 2020 года. Диаметр провала составил 12,0 м, глубина – 5,0 м. В 60 м к северу от здания фельдшерского пункта на ул. Въездной 23 марта 2020 года образовался карстовый провал с диаметрами 22,0 м x 19,5 м и глубиной до воды 10,0 м. Карстопроявления 3–7 произошли ранее, точного времени образования не известно. Карстово-суффозионное понижение 3 с диаметром 5,0 м и глубиной 1,5 м. Карстовая воронка 4 характеризуется диаметрами 8,0 м x 10,0 м и глубиной 4,0 м располагается в пределах придомовой территории. Конусовидная карстовая воронка 5 с диаметром 15,0 м и глубиной 7,0 м. Старая карстовая воронка 6 на берегу озера характеризуется диаметрами 6,0 м x 8,0 м и глубиной 3,0 м. Карстовая воронка 7 эллипсоидной формы с диаметрами 7,0 м на 16,0 м и глубиной 5,0 м, задернована, заросшая лиственными деревьями.

Подземная закарстованность. В ходе бурения карстологической скважины провалов и ускоренной проходки бурового инструмента не отмечено. В отдельных интервалах карстующейся толщи породы находятся в разуплотненном состоянии (выветрелые до состояния щебня и доломитовой муки, малопрочные). Данные разуплотненные участки представляют собой зоны дробления – участки карстового массива, в пределах которого материнские карстующиеся образования находятся в сильно разрушенном состоянии. Что свидетельствует о возможном присутствии в геологическом разрезе незаполненных и заполненных карстовых полостей. Зоны дробления представлены доломитами силь-

новыветрелыми до состояния щебня и муки, до состояния суглинка, гипсами от малой до низкой и пониженной прочности трещиноватыми. Всего выявлено 4 зоны дробления, из которых 3 приурочены к гипсам, 1 к доломитам. Зоны дробления вскрываются с глубины 23,6 м, 41,5 м, 62,1 м и 66,7 м, мощностью от 3,0 м до 18,8 м.

Возможные причины активизации провалообразования

Причиной активизации провалообразования в рассматриваемых условиях могло послужить резкое потепление и спровоцированное им обильное снеготаяние, повлекшее за собой кратковременное повышение уровня грунтовых вод. Кроме того, наличие песчаной фракции в суглинистой покровной толще, а также песка в перекрывающей глинистой толще могло способствовать в момент насыщения пород водой ослаблению связей между частицами над полостью и началу необратимой деформации татарских и четвертичных отложений, и, как следствие, их вынос с дальнейшим обрушением в карстовую полость.

Следует отметить, что, по результатам осмотра, было установлено, что в южной части провала на глубине около 1,8–2,5 м находится водопровод с характерными углублениями (до 0,3 м) под трубами. Сформировавшаяся утечка образовала вокруг себя область с повышенной влажностью и повышенной температурой, таким образом создав ослабленную зону, по которой происходила гидрогеологическая связь между верхним агрессивным четвертичным водоносным горизонтом и нижним трещинно-карстовым водоносным горизонтом перми (Ковалева Т.Г., Санникова А.А., 2020).

Механизмом образования провалов является совместный карстово-суффозионный процесс, приводящий к обрушению перекрывающих отложений в момент предельного насыщения грунта водой и достижения карстовой полости критического размера. Гидрогеологическая связь может приводить к фильтрации агрессивных атмосферных и техногенных вод к растворимым породам, приводя к активизации карстовых процессов.

Зонирование территории

Согласно СП 11-105-97, ч. II (п. 5.2.11) и «Руководству по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» (1995), зоны вокруг существующих карстопроявлений следует выделять и обособлять в ходе зонирования по степени удаленности. Зоны выделены согласно рекомендациям «Руководства по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» (1995):

Зона I – условно благоприятная для строительства (удаленность от карстопроявлений более 50 м);

Зона II – неблагоприятная для строительства (удаленность от воронок от 20 до 50 м);

Зона III – опасная для строительства (удаленность от воронок менее 20 м), характеризуется разнородностью слагающих отложений и возможностью повышенной инфильтрации поверхностных вод, агрессивных к карстующимся отложениям.

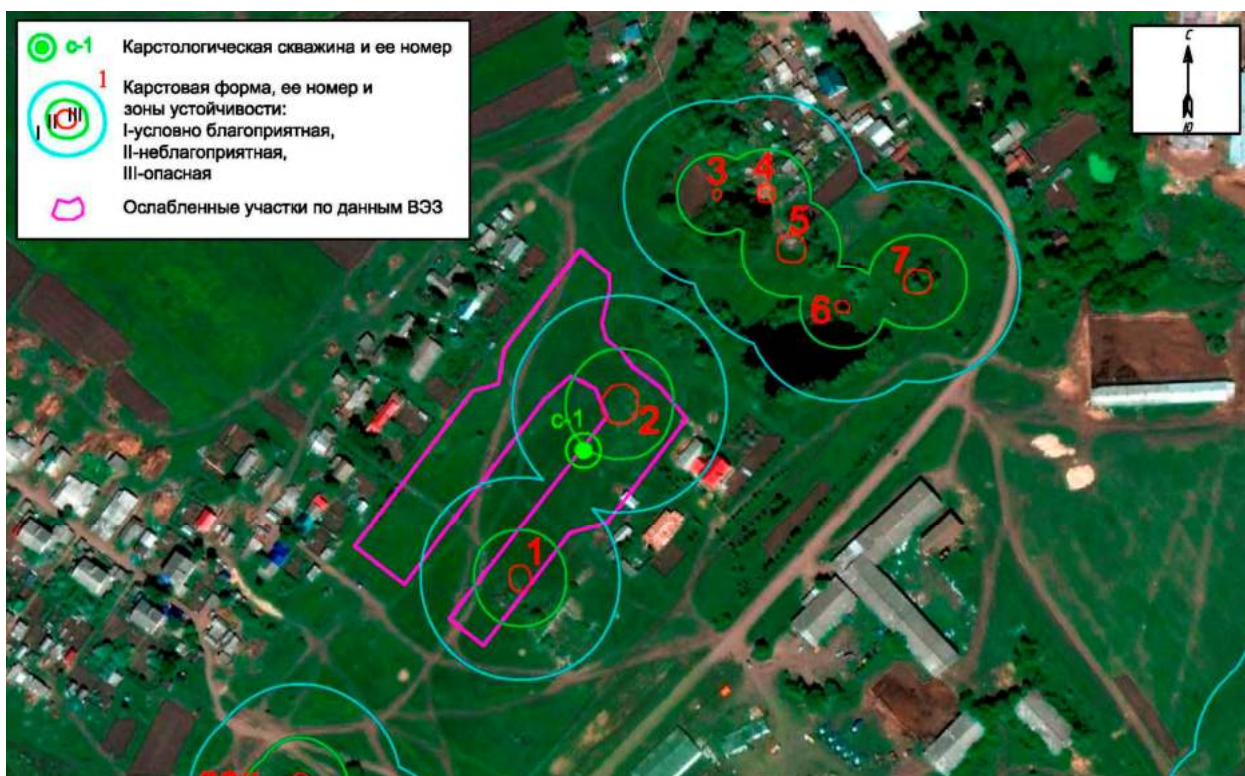


Рис. 5. Ослабленные участки по степени удаленности и по данным ВЭЗ

Расчетный диаметр карстового провала

При оценке карстовой опасности необходимым условием является оценка устойчивости территории по средним диаметрам карстовых провалов (СП 11-105-97 ч. II). Для расчета диаметра карстового провала в пределах исследуемого участка была применена методика, разработанная А.В. Аникеевым (2017). Данный метод основывается на анализе инженерно-геологического разреза, при котором для каждого грунтового слоя определяется наиболее вероятный механизм (провальный, карстово-суффозионный) деформирования над полостью. Расчеты производятся снизу-вверх по разрезу от полости,

заложенной на стыке перекрывающих грунтов и карстующихся пород. В расчетах морфометрических размеров карстовых деформаций используются физико-механические свойства грунтов перекрывающих отложений. Расчетный диаметр карстового провала составил 16,0 м, что близко к среднему значению зафиксированных провалов (Ковалёва Т.Г., Кивилева З.В., Юркина А.Р., 2021).

Таким образом, с учетом расчетного диаметра и интенсивности провалообразования, а также данных о подземной закарстованности, исследуемая территория характеризуется категориями устойчивости согласно СП 11-105-97, ч. II II-Б с интенсивностью прова-

лообразования $0,111 \text{ пров./км}^2 \times \text{год}$ и средним диаметром карстового провала 16,0 м.

Выводы

1. Исследуемая территория характеризуется развитием сульфатно-карбонатного карста. Карстовый процесс развивается в гипсах нижней перми и проявляется на поверхности в виде многочисленных провалов.

2. Устойчивость территории оценена по данным дешифрирования космоснимков, вертикального электрического зондирования, карстологического бурения, программного комплекса ESRI ArcGIS, ArcScene 10.7.

3. Непосредственно в контурах исследуемого участка зафиксировано 2 карстовых провала с диаметрами до 22,0 м. По результатам дешифрирования и рекогносцировочного обследования, территория исследования характеризуется интенсивностью провалообразования $0,111 \text{ пров./км}^2 \times \text{год}$. Диаметр карстовых провалов, рассчитанный по методике А.В. Аникеева, соответствует среднему диаметру зафиксированных карстовых провалов и равен 16,0 м.

4. Согласно рекомендациям «Руководства по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста» (1995), выделены зоны устойчивости по удаленности от карстопроявлений.

5. Результаты вертикального электрического зондирования сопоставлены с данными карстологического бурения. Согласно значениям удельных электрических сопротивлений, по вертикали выделено 6 литологических слоев. По данным глубинных геоэлектрических срезом, оконтурены ослабленные участки, в пределах которых возможно образование на поверхности земли карстовых провалов. На рис. 5 видно, что ослабленные зоны, выделенные по результатам ВЭЗ, пересекаются с зонами устойчивости по удаленности от карстопроявлений.

Следовательно, контуры ослабленных участков, выделенные по данным ВЭЗ, верны.

Библиографический список

Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска // Москва: РУДН, 2017.

Геологическая карта СССР. Объяснительная записка. Серия Средневожская. Лист N-38-3 (1:200000).

Ковалева Т.Г., Кивилева З.В., Юркина А.Р. Применение методики послыного аналитико-графического моделирования определения расчетного диаметра карстового провала / Геология и полезные ископаемые Западного Урала, 2021. 5 с.

Ковалева Т.Г., Санников А.А. Анализ возможных причин активизации провалообразования в Гагинском районе Нижегородской области / Печеркинские чтения, 2020.

Лисицын В.В. Рекомендации по геофизическому исследованию закарстованности территорий, предназначенных для строительства. М.: 1971.

Леоненко М.В. Методика оценки карстоопасности территории по результатам геофизических исследований (на примере Нижегородской области). / ПНИИИС. М., 1996.

Максимович Г.А. Карст / Знание. М., 1960. 47 с.

Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований / Недра. М., 1968.

Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / ПНИИИС. М., 1995. 167 с.

СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / ПНИИИС. М., 2001. 101 с.

Хмелевской В.К. Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Учебное пособие. Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. 184 с.

Assessment of Stability of the Area Near Sinkholes in the Village of Berezniki, Gaginskiy District

T.G. Kovaleva, Z.V. Kivileva, D.A. Balakhnin, A.R. Yurkina

Perm State University

4 Genkelya Str., Perm 614990, Russia

E-mail: kovalevatg@mail.ru; zoya.kivileva@mail.ru; dbalaxnin@mail.ru; yurkina2016@mail.ru

The article provides with the results of a comprehensive assessment of the stability of the area near the karst sinkholes at Berezniki, Gaginsky district. The materials of geophysical surveys obtained by the method of vertical electric sounding were interpreted taking into account the karstological drilling data. Weakened zones are outlined along the apparent resistivity sections. Dependence of sounding results on the distance from the nearest sinkhole was analyzed. The intensity of sinkhole formation and the average diameter of the karst sinkhole were calculated.

Key words: *karst sinkhole; karst hazard; vertical electrical sounding.*

References

- Anikeev A.V.* 2017. Provaly i voronki osedaniya v karstovyykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska [Collapse features and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. RUDN, Moskva. (in Russian)
- Geologicheskaya karta SSSR. Obyasnitelnaya zapiska. Seriya Srednevolzhskaya. List N-38-3 (1:200000).* [Geological map of the USSR. Explanatory letter. Middle Volga series. Sheet N-38-3 (1:200000)]. (in Russian)
- Kovaleva T.G., Kivileva Z.V., Yurkina A.R.* 2021. Primenenie metodiki posloynogo analitiko-graficheskogo modelirovaniya opredeleniya raschetnogo diametra karstovogo provala [Application of the method of layer-by-layer analytical-graphic modeling for calculating the diameter of a karst hole]. *In: Geologiya i poleznye iskopayemye Zapadnogo Urala.* Perm. (in Russian)
- Kovaleva T.G., Sannikov A.A.* 2020. Analiz veroyatnosti aktivizatsii provaloobrazovaniya v Gaginskom rayone Nizhegorodskoy oblasti [Analysis of the likelihood of activation of failure-formation in the Gaginsky district of the Nizhegorodskaya region]. *In: Pecherkinskiye chteniya,* Perm. (in Russian)
- Lisitsyn V.V.* 1971. Rekomendatsii po geofizicheskomu issledovaniyu zakarstovannosti territoriy, prednaznachennykh dlya stroitelstva [Recommendations for the geophysical study of karst territories intended for construction]. Moskva. (in Russian)
- Leonenko M.V.* 1996. Metodika otsenki karstovoy opasnosti territorii po rezul'tatam geofizicheskikh issledovaniy (na primere Nizhegorodskoy oblasti) [Methodology for assessing the karst hazard of a territory based on the results of geophysical research (on the example of the Nizhniy Novgorod region)]. PNIIS. Moskva. (in Russian)
- Maksimovich G.A.* 1960. Karst [Karst]. *Znanie.* Moskva. p. 43. (in Russian)
- Pylayev A.M.* 1968. Rukovodstvo po interpretatsii vertikalnykh elektricheskikh zondirovaniy [Manual for the Interpretation of Vertical Electrical Soundings]. Nedra. Moskva. (in Russian)
- Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v rayonakh razvitiya karsta* [Guidelines for engineering and geological surveys in areas of karst development]. PNIIS, Moskva, 1995, p. 167. (in Russian)
- SP 11-105-97.* Inzhenerno-geologicheskiye izyskaniya dlya stroitelstva. CH. II. Pravila proizvodstva rabot v rayonakh razvitiya opasnykh geologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh protsessov [SP 11-105-97. Engineering and geological surveys for construction. Part II. Regulations for conducting the work in areas of development of the hazardous geological and engineering-geological processes]. PNIIS, 2001, Moskva, p. 101. (in Russian)
- Khmelevskoy V.K.* 1999. Geofizicheskiye metody issledovaniya zemnoy kory. Kn. 2: Regionalnaya, razvedochnaya, inzhenernaya i ekologicheskaya geofizika [Geophysical methods for studying the earth's crust. Book. 2: Regional, exploration, engineering and environmental geophysics]. Dubna: Mezhdunarodnyy universitet prirody, obshchestva i cheloveka "Dub-na", p. 184. (in Russian)