

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.435.832

АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ КАРСТОВЫХ ФОРМ В ОБСТАНОВКАХ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНО-СУЛЬФАТНОГО КАРСТА

© 2022 г. Е. В. Дробинина^{1,*}, Д. Р. Золотарев^{2,**}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, геологический факультет,
лаборатория прогнозного моделирования в геосистемах,
ул. Букирева, д. 15, Пермь, 614068 Россия

² ООО “Противокарстовая и Береговая Защита” (ООО “ПКБЗ”),
ул. Суцевский вал, д. 5, стр. 3, Москва, 127018 Россия

*E-mail: alenadrobina@yandex.ru

**E-mail: zolotarevdr@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2021 г.

После доработки 01.02.2022 г.

Принята к публикации 08.02.2022 г.

Статья посвящена изучению инженерно-геологических условий территории развития карбонатно-сульфатного типа карста, характеризующейся широким распространением поверхностных карстовых форм. Детально рассмотрены инженерно-геологические условия района исследований (Добрянский район Пермского края). Выполнена оценка площадной изменчивости состояния грунтов в пределах карстовых полей на основе анализа двумерных облаков точек, характеризующих зависимость исследуемого свойства от плотности карстовых форм. Пристальное внимание уделено участкам, не затронутым напрямую провалообразованием. Разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт на изучаемой территории контролируется карстовыми воронками, причем, чем больше их количество на единицу площади (плотность), тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постседиментационных изменений свойств грунтов, связанных с фильтрацией грунтовых вод по направлению к областям разгрузки. Отмечено, что с увеличением плотности карстовых форм непосредственно за их пределами изменчивость свойств первого от поверхности грунтового слоя характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива.

Ключевые слова: *перекрывающая толща, изменчивость состояния грунтов, физические свойства, гранулометрический состав, карстовые воронки, карбонатно-сульфатный карст*

DOI: 10.31857/S0869780922020023

ВВЕДЕНИЕ

Территории, в геологическом разрезе которых широко развиты растворимые породы, характеризуются наличием как поверхностных, так и подземных карстовых форм: воронок, карстовых полостей, поноров и т.п. В пределах Российской Федерации крупные провальные формы, в районах развития сульфатного (гипсового [5]), карбонатно-сульфатного (карбонатно-гипсового [5]) типов карста, встречаются на территории Центрально-Европейской части и в Приуралье. Одна из особенностей сульфатного карста — относительно высокая скорость растворения трещиноватых гипсов и ангидритов, в результате чего под

мощной толщей нерастворимых водоупорных отложений при условии доступа агрессивных вод могут сформироваться значительные по размерам карстовые полости.

Вероятность появления карстового и/или карстово-суффозионного провала на земной поверхности как результата растворения карстующихся пород и обрушения пород сводовой части полости (при достижении критического размера) определяется геолого-гидрогеологическими условиями, структурой и напряженным состоянием массива горных пород.

Периоды интенсивного развития карстового процесса совпадают с сезонами высокой гидро-

геологической активности, в то время как сухие сезоны характеризуются низким уровнем грунтовых вод, медленной скоростью их циркуляции в карстовых системах (от двух до пяти раз меньшей, чем в течение сезона высокой гидрологической активности) [25]. Большое значение имеет скорость изменения уровня воды: чем выше ее значение, тем интенсивнее может быть деформация поверхности земли, связанная с карстово-суффозионными процессами [26]. А.И. Печеркиным и В.Е. Закоптеловым [19] при рассмотрении вопроса типизации закарстованных берегов водохранилищ (в том числе Камского) отмечена активизация процесса суффозии вследствие колебания уровней подземных и поверхностных вод в результате сработки и наполнения водохранилища.

Отметим, что максимальное развитие форм подземного карста в массиве приурочено, согласно принципиальной схеме гидродинамической зональности Г.А. Максимовича [16], к зоне периодического колебания уровня карстовых вод (переходной). Эта особенность формирования полостей в растворимых породах массива подтверждена результатами наблюдений за режимом подземных вод, проведенных ВерхнекамТИСИЗом в 1971–1972 гг. (годовой цикл) на территории г. Кунгур Пермского края [6].

Еще одним фактором, влияющим на протекание карстового процесса, является литология растворимых пород. В обстановках карбонатно-сульфатного карста крупные полости, инициирующие провалообразование, часто формируются на контакте сульфатных и перекрывающих их карбонатных отложений вследствие восстановления агрессивности воды по отношению к сульфатам из-за снижения в ней концентрации сульфата кальция при растворении карбонатных пород по мере нисходящего движения воды по массиву. Большинство воронок в карстовых районах Пермского края сформировано под влиянием данного фактора [13, 18].

Вышесказанное доказывает актуальность изучения инженерно-геологических условий карстовых массивов. Невозможность наблюдения за процессом подготовки провалообразования также является одним из главных затруднений при изучении карстовых массивов, поэтому выявление закономерностей в изменении инженерно-геологических условий и состояния дисперсных перекрывающих отложений вблизи поверхностных карстовых форм может быть весьма информативным.

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧАЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Геоморфология и орогидрография. В административном отношении изучаемая территория

относится к Добрянскому району Пермского края. Участок расположен в 5 км севернее Мыса Стрелка — слияния рек Чусовая и Кама. Местность представлена слабовосхолмленной равниной, nasledующей структуру Верхнекамской впадины, в придолинных частях р. Кама, сильно расчлененной ее притоками. Расчлененность рельефа благоприятно сказывается на инфильтрационной способности карстового массива [24]. Основным рельефообразующим элементом является р. Кама. Долина реки консеквентная, широкая, с террасированными склонами (до 4-х надпойменных террас).

Тектоническое строение. Изучаемая территория расположена в пределах северо-восточной части Краснокамско-Полазненского вала (рис. 1). В центральной части он прослеживается по выходам кунгурских отложений, которые выделяются среди сплошного поля развития уфимских пород. Вал протягивается в северо-восточном направлении на 100 км при ширине 10–15 км. Ось вала проходит по линии населенных пунктов: пгт. Полазна — г. Краснокамск — г. Нытва (Пермский край).

Дифференцированные неотектонические движения сводово-блокового и блокового характера приурочены к плиоцен-четвертичному этапу, характеризующемуся интенсификацией тектонических движений и, как следствие, формированием новой, глубоко врезанной и разветвленной речной сети современных очертаний.

Четвертичный период характеризуется общим подъемом всего Среднего Прикамья, причем на участке Краснокамско-Полазненского вала движения были более интенсивные [15]. Активность локальных поднятий в областях положительных структур подтверждается развитостью овражной сети, приподнятостью горизонтов с наличием карстовых пустот и пещер над урезом воды [20].

В районе Краснокамско-Полазненского вала скорость поднятия локальных структурных форм уменьшается с северо-востока на юго-запад. Наибольшей активностью характеризуются группа Гайвинских, Полазненского и восточная вершина Северокамского (д. Стряпунята и окрестности) поднятий, наименьшей — Краснокамское. Западная вершина Северокамского поднятия по степени активности занимает промежуточное положение.

Геологическое строение. В пределах района работ в геологическом строении приповерхностной части принимают участие породы пермской и четвертичной систем. Сводный геологический разрез по данным архивных скважин сверху вниз следующий.

Четвертичные отложения (Q) различного литологического состава развиты повсеместно. На высоких склонах и в долинах рек встречаются элювиально-делювиальные и аллювиальные от-



Рис. 1. Фрагмент схемы тектонического районирования масштаба 1: 5 000 000. Лист О-40 [22] с указанием местоположения Краснокамско-Полазненского вала [17].

ложения; водораздельные пространства с поверхности сложены бурыми и серо-коричневыми макропористыми известковистыми суглинками, супесями, супесями, реже глинами, с редкими включениями гальки. Аллювий надпойменных

террас представлен полимиктовыми алевритовыми песками (иногда с галькой и гравием), супесями, реже глинами. В основании преобладают залегающие с размывом на пермских породах разнотеррасные полевошпат-кварцевые пески с

редким гравием. Мощность отложений на левом берегу Камы изменяется от 14.8 м на севере участка (д. Бобки) до 31 м и более на юге (п. Пальники). На правом берегу мощность четвертичных отложений составляет от 3.3 м (д. Скобелевка) до 15.0–20.0 м (д. Заозерье).

Соликамский горизонт (P_{1sl}) *уфимского яруса нижней перми* вскрыт скважинами на обоих берегах (по архивным данным). В состав отложений соликамского горизонта входят плитчатые мергели, известняки, доломиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Карбонатные породы с подчиненными прослоями терригенных встречаются преимущественно в основании горизонта, верхняя его часть представлена незакономерным чередованием песчаников, аргиллитов и алевролитов с прослоями известняков. Встречаются включения и линзы гипса и ангидрита. В кровле горизонта встречается выдержанный по простиранию пласт кристаллического гипса мощностью до 2.5 м, в восточной части с высоким содержанием примесей глины.

На левом берегу горизонт представлен глинами и мергелями мощностью 35.7 м, на правом — известняком, доломитом, мергелями мощностью от 5 до 19 м и более (д. Заозерье), и преимущественно аргиллитоподобными глинами с прослоями известняков мощностью от 9.0 м в устье р. Хохловка до 21.2–57.0 м на водораздельных частях (д. Скобелевка).

Иренский горизонт (P_{1ir}) *кунгурского яруса нижней перми* распространен повсеместно, его подстилают уфимские отложения. На левом берегу, на крутом абразионном склоне долины Камы (Чусовская Стрелка, Чусовской Мыс) встречаются обнажения пород горизонта. Иренский горизонт представлен чередованием гипсово-ангидритовых и карбонатных литологических пачек, в составе последних выделяются преимущественно доломиты с прослоями мергелей, аргиллитов и известняков. В устье Хохловки и в 0.6 км юго-западнее д. Гари вскрытый скважинами иренский горизонт представлен мощной толщей глин с редкими прослоями карбонатных и сульфатных пород. На левом берегу отложения горизонта вскрываются на глубине от 50.5 м, на правом — от 31.0 м (д. Заозерье) и от 30.2–62.0 м (д. Скобелевка); в устье р. Хохловка — на глубине от 14.6 м. Вскрытая мощность на левом берегу 49.6 м, на правом — 17.0–51.0 м.

Гидрогеологические условия. Подземные воды в элювиально-делювиальных отложениях безнапорные (грунтовые воды), распространены спорадически, на склонах логов, оврагов, реке на водоразделах. Питание горизонта осуществляется за счет атмосферных осадков, разгрузка — в тальвеговую часть логов и оврагов, карстовые воронки. Коэффициент фильтрации отложений изме-

няется от сотых и до десятых долей м/сут. Водообильность отложений низкая.

Трещинно-карстовый горизонт приурочен к соликамским и иренским отложениям. Отложения обводнены неравномерно: горизонт развит на крыльях Краснокамско-Полазненского вала, породы сводовой части вала обводнены локально. Водообильность горизонта непостоянная, фильтрационные свойства пород не выдержаны по площади; возможно формирование до 2–3 подгоризонтов вследствие широкого развития водопорных прослоев. Воды развиты в трещиноватых и закарстованных сульфатах и карбонатах. Карбонатные пачки, расположенные близко к уровню местного базиса эрозии, зачастую являются водовмещающими, а подстилающие их сульфатные пачки — водопорными.

Оценка закарстованности. Карстующимися породами на участке являются известняки, доломиты, гипсы и ангидриты пермской системы. Согласно СП 11-105-97, ч. II (п. 5.1.5)¹, известняки и доломиты относятся к труднорастворимым породам, гипсы и ангидриты — к среднерастворимым. По степени обнаженности карстующихся пород и характеру перекрывающей толщи в районе работ развит покрытый тип карста.

В соответствии с прил. Б.5 СП 115.13330.2016² изучаемый участок попадает в зону распространения сульфатного, карбонатно-сульфатного карста. Согласно Карты карстовой опасности на территории России масштаба 1:10000000³, территория в долинах Камы и Гайвы и на их междуречьях в отношении карста является весьма опасной (учитывая мелкий масштаб карты и возможное смещение границ категорий до 5 км).

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАРСТОВАННОСТИ

Левый берег — участок Чусовского мыса, находится в пределах западной части Полазненского (Полазнинско-Шалашинского) карстового района, характеризующегося развитием карбонатно-сульфатного и сульфатного карста в гипсах и наличием перекрывающих сульфаты плитчатых трещиноватых известняков и доломитов кунгурского яруса общей мощностью до 50 м.

¹ СП 11-105-97. Свод правил “Инженерно-геологические изыскания для строительства”. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200007405>

² СП 115.13330.2016. Свод правил “Геофизика опасных природных воздействий”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054202>

³ Карта карстовой опасности на территории России в масштабе 1:10 000 000 (Институт геоэкологии РАН, 1993 / Гл. ред. В.И. Осипов, отв. ред. В.М. Кутепов).

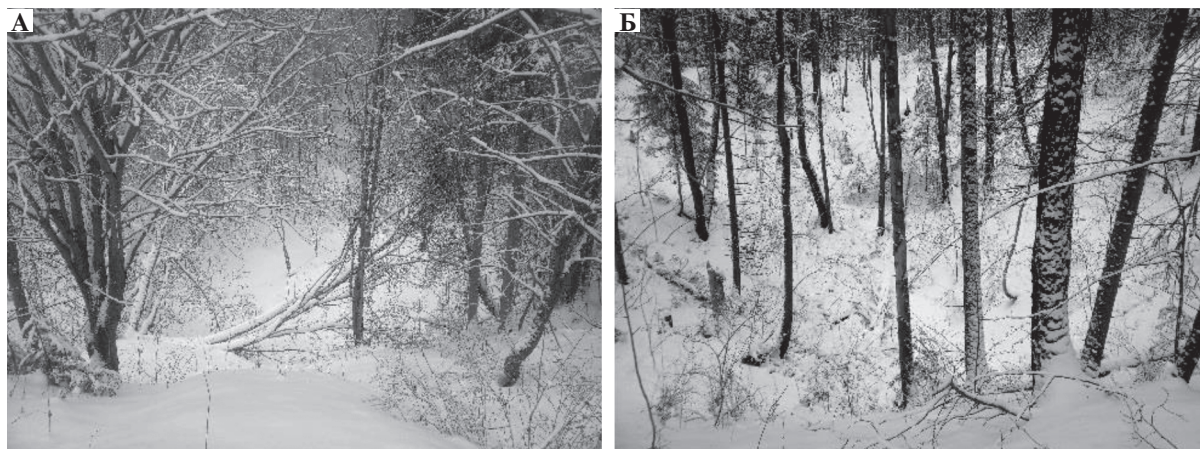


Рис. 2. Фотографии карстовых воронок: **А** — эрозионно-карстовая воронка № 1 (см. табл. 1), **Б** — эрозионно-карстовая воронка № 4 (см. табл. 1). Фото предоставлено С.В. Щербаковым.

Морфология и плотность карстовых форм на участке Чусовского мыса определяются степенью трещиноватости пород, составом и мощностью покровных образований, рельефом. Наибольшая плотность карстовых форм отмечается на склонах (Чусовской) и присклоновых участках водоразделов, логов, где мощность покровных отложений уменьшается. Поверхностные карстопроявления в большинстве случаев относятся к древним, их диаметры изменяются от 9 до 20 м при глубине до 6 м. При слиянии нескольких воронок образуются котловины диаметром 100 м и более, вытянутые параллельно логом [3, 5]. К склонам приурочена большая часть крупных конусообразных и чашеобразных воронок. У бровок склонов расположены наиболее глубокие, иногда сложные, воронки и котловины. Вниз по склону количество воронок и их размеры уменьшаются. Это явление объясняется тем, что в коренных склонах долин и оврагов увеличивается трещиноватость, главным образом, за счет развития трещин бортового отпора. Кроме того, в верхних частях склонов отме-

чается небольшая мощность и более грубый состав покровных отложений, что при наличии трещин бортового отпора усиливает фильтрацию воды. На ровной поверхности водораздела, где мощность покровных отложений увеличивается, меняются очертания карстовых форм, и снижается их плотность. В условиях равнинного рельефа вынос глинистого материала происходит в замкнутые карстовые понижения, поэтому здесь 85.6% карстовых форм представлены карстовыми блюдцами, озерами и болотами [3].

В пределах изучаемой территории участка Чусовского мыса все воронки являются древними. На космоснимках хорошо дешифрируются воронкообразные формы диаметром 35–50 м в 500–1000 м южнее изучаемого участка (д. Кулигино), часть из них заполнена водой. На рис. 2 представлено фото типовых карстовых воронок, а в табл. 1 характеристика их форм. Упоминания об образовании провальных форм вблизи изучаемого участка относятся к 1948 г. (в 3.5 км южнее участ-

Таблица 1. Типовая характеристика карстовых форм, представленных на рис. 2

Номер карстопроявления	Форма		Морфометрические параметры							Условный возраст
	в плане	в профиле	диаметр по наибольшей оси, м	диаметр по наименьшей оси, м	средний диаметр, м	глубина, м	глубинность, д.е.	площадь, м ²	объем, м ³	
			d_{max}	d_{min}	d	h	h/d	S	V	
1	круг	конус	36.4		36.4	15.0	0.41	1040.1	6240.6	древняя
Эрозионно-карстовая, задернованная, произрастает древесная растительность										
4	эллипс	конус	43.0	38.0	40.5	11.5	0.28	1282.7	5900.4	древняя
Эрозионно-карстовая, задернованная, произрастает древесная растительность										

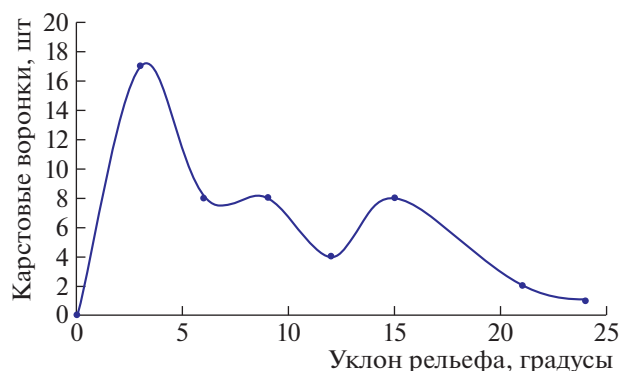


Рис. 3. Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от уклона местности.

ка, восточнее д. Городище [4]), а также к апрелю 1991 г. в том же населенном пункте [7, 21].

Правый берег — территория *Полазненского участка* [3]. Мощность гипсово-ангидритовой толщи на участке достигает 100 м и более, покровные отложения либо отсутствуют, либо имеют незначительную мощность (1–20 м), увеличивающуюся с востока на запад.

Карст типично сульфатный, его развитию способствуют значительная приподнятость территории над местным базисом эрозии и трещиноватость пород. Отличительная черта Полазненского участка — высокая закарстованность обоих берегов Камы; средняя плотность — 60 карстовых форм на км². На некоторых площадках на левом берегу она может достигать 1000 шт./км². Большая часть карстовых форм — воронки, встречаются карры, карстовые рвы, котловины, овраги, сухие речки и озера. Все воронки на правом берегу в пределах изучаемой территории Полазненского участка также являются древними. Как правило их диаметры имеют значения 2–14 м, на западе встречены единичные формы диаметром 30–67 м, развитые на территории с относительно большей мощностью водоупора.

В результате проведенного морфометрического анализа сделан вывод, что в пределах изучаемой территории карстовые формы преимущественно тяготеют к поверхностям рельефа с незначительным уклоном (рис. 3). Это объясняется тем, что в подобных условиях инфильтрация превалирует над поверхностным стоком. Большая часть карстовых форм приурочена к склонам северо-западной экспозиции (рис. 4).

ХАРАКТЕРИСТИКА ПОДЗЕМНОЙ ЗАКАРСТОВАННОСТИ

По данным опубликованных материалов о подземной закарстованности участка Чусовского мыса [4, 5, 7], можно сделать вывод, что карстующе-

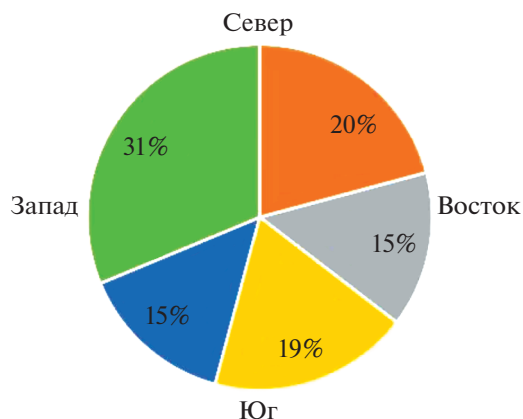


Рис. 4. Распределение поверхностных карстовых форм в зависимости от экспозиции склонов.

щиеся породы, развитые на левом берегу Камы, характеризуются интенсивной трещиноватостью и наличием большого количества каверн диаметром 2–3 мм. В целом трещиноватость и кавернозность пород способствуют формированию единой гидравлической сети, обеспечивающей движение воды в карстовом массиве [7].

К.А. Горбуновой при описании карстового участка Чусовского мыса отмечено, что в 1949 г. под руслом р. Чусовая (около 10 км южнее участка) скважинами были вскрыты карстовые полости высотой до 8 м [5]. Кроме того, характерная полость была вскрыта при образовании Городищенского провала [4]. Формирование крупных карстовых полостей под руслами Камы и Чусовой в районе *Чусовского мыса* объясняется тем, что зона активного движения карстовых вод находится ниже отметок русел этих рек. Об этом свидетельствует значительная закарстованность первых террас, где воронки образуются в результате просадок и провалов рыхлых аллювиальных отложений в карстовые полости в гипсах, залегающих ниже русел рек. Под аллювиальными и делювиально-элювиальными отложениями I террасы р. Чусовая вблизи ее устья при бурении скважин обнаружены погребенные карстовые воронки и карстовые полости в гипсах иренского горизонта [4].

Интенсивная подземная закарстованность также была отмечена при проходке карстологических скважин на изучаемой территории обоих берегов Камы. Местоположение скважин, вскрывших карстовые полости, представлено на рис. 5. Высота полостей от 0.1 до 2.9 м, при среднем ее значении 0.3 м, но единичные полости имели высоту и до 5.0 м. Например, при проходке одной скважины в непосредственной близости (около 5 м) от бровки крупной карстовой воронки произошел провал инструмента, а последующий видеокартаж подтвердил существование в сульфатных по-

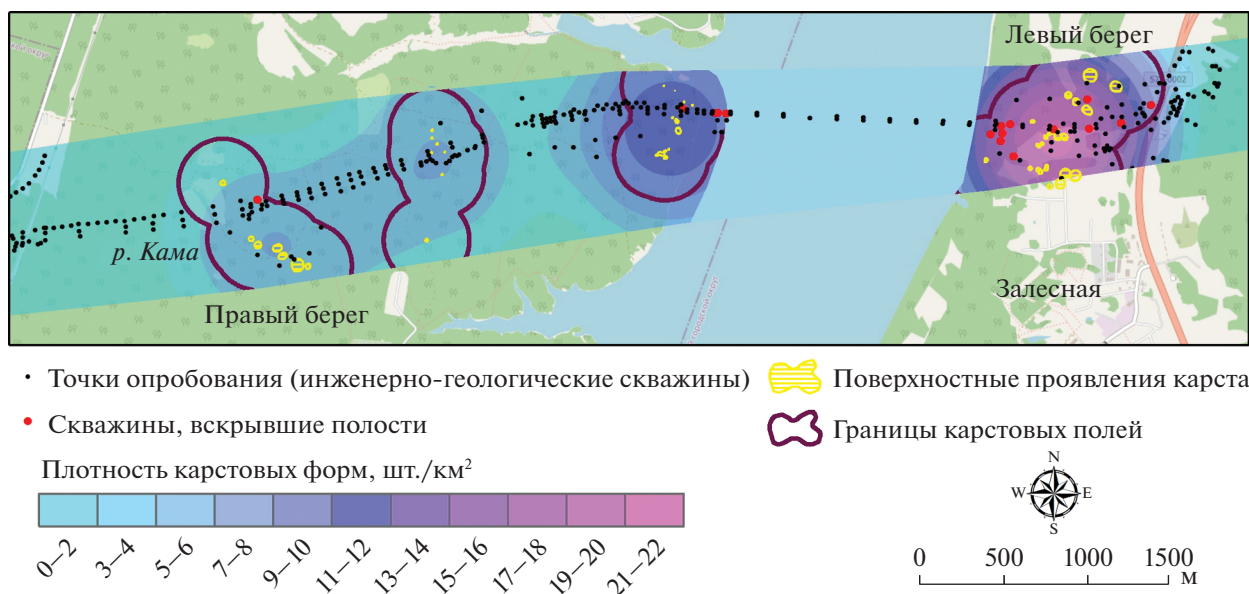


Рис. 5. Плотность поверхностных карстовых форм.

родах на глубине 18.5 м карстовой полости значительной ширины и высотой около 5 м. В той же скважине в интервале глубин 50–64 м было зафиксировано еще 6 провалов бурового инструмента.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТОЯНИЯ ПОКРОВНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В качестве объекта исследования выбраны глинистые отложения среднего звена неоплейстоцена, слагающие с поверхности высокие (третью и четвертую) террасы Камы. Отложения развиты повсеместно на изучаемой территории, что обеспечивает достоверность статистического анализа достаточным для его проведения количеством наблюдений. Исследовались следующие свойства покровных отложений: плотность, естественная влажность, коэффициент пористости и суммарное содержание пылеватой и глинистой фракций.

Физические свойства и гранулометрический состав (в частности, содержание пылеватой и глинистой фракций) определялись посредством лабораторных испытаний монолитов грунтов, отобранных из инженерно-геологических скважин, местоположение которых представлено на рис. 5. Глубина отбора монолитов на правом берегу — от 0.2 до 15.0 м, реже до 20.0 м, на левом — 0.5–11.5 м. Шесть опробованных скважин пройдены на расстоянии 5–10 м от бровки карстовых воронок, остальные — на расстоянии от 15 м.

Цель данного анализа — оценка площадной изменчивости состояния грунтов в пределах кар-

стовых полей на участках, напрямую не затронутых провалообразованием. Под карстовыми полями авторами понимаются участки весьма интенсивного развития поверхностных карстовых форм. Карстовые поля здесь ограничивались буферными зонами от бортов карстовых воронок на удалении в 250 м, что немного больше максимального расстояния между карстовыми формами и скважинами, вскрывшими карстовые полости.

Плотность карстовых воронок в пределах карстовых полей рассчитывалась инструментально в программе ArcGIS с применением метода Kernel Density для получения непрерывной растровой поверхности, характеризующей изменение данного параметра в пределах карстового поля (см. рис. 5). Инструмент Kernel Density вычисляет плотность точек (количество на единицу площади — шт./км²) вокруг каждой ячейки выходного растра в пределах заданного радиуса поиска, принятый в данной работе равным 250 м.

Участки высокой плотности карстовых форм представляют собой зоны интенсивной инфильтрации поверхностных вод и разгрузки грунтовых вод в трещинно-карстовый горизонт. К одной из характерных региональных гидрогеологических особенностей изучаемого участка следует отнести отсутствие напора трещинно-карстовых вод или его ограниченное наличие на локальных участках. Специфические черты (сухие русла рек, отсутствие следов заболаченности и переувлажнения на дне воронок), присущие карстовым проявлениям в пределах изучаемых районов, давно отмечены рядом пермских исследователей [5].

Таблица 2. Диапазон изменения реальных значений физических свойств суглинков и плотности карстовых форм

Исследуемый параметр	Минимальное значение ($x_{\min}$)	Максимальное значение ($x_{\max}$)
Левый берег		
<i>Суглинки твердые</i>		
Естественная влажность, %	10.6	29.5
Коэффициент пористости, д.е.	0.330	0.820
Плотность грунта, г/см ³	1.98	2.25
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	25.6	85.8
Плотность карстовых форм, шт./км ²	0.7	20.4
<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>		
Естественная влажность, %	18.0	33.6
Коэффициент пористости, д.е.	0.510	0.940
Плотность грунта, г/см ³	1.85	2.12
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	29.1	82.5
Плотность карстовых форм, шт./км ²	0.7	20.4
Правый берег		
<i>Суглинки твердые</i>		
Естественная влажность, %	10.4	28.9
Коэффициент пористости, д.е.	0.350	0.950
Плотность грунта, г/см ³	1.66	2.26
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	31.8	93.3
Плотность карстовых форм, шт./км ²	0.0	10.9
<i>Суглинки полутвердые до тугопластичных</i>		
Естественная влажность, %	15.5	36.6
Коэффициент пористости, д.е.	0.400	1.040
Плотность грунта, г/см ³	1.80	2.20
Содержание пылеватой и глинистой фракций, %	17.1	91.0
Плотность карстовых форм, шт./км ²	0.0	11.3

Опробование отложений в непосредственно в бортах самих воронок и их днищах не проводилось, поэтому в рамках данного исследования оценка их свойств не выполнялась.

Изменчивость значений изучаемых инженерно-геологических свойств отложений за пределами воронок оценивалась на основе построения и анализа двухмерных облаков точек. Каждая пара значений, характеризующих положение точки на графике, описывалась координатами: ординатой (Y) — значением изучаемого свойства суглинистых отложений в точке опробования; и абсциссой (X) — значением плотности карстовых воронок, извлеченным с растровой поверхности в этой же точке.

Все используемые числовые значения переменных приведены (табл. 2) к одинаковой обла-

сти их изменения посредством нормализации по формуле:

$$x_{ind} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где x_{ind} — нормированное значение параметра, диапазон изменения которого 0–1 (индексная оценка); x_i — реальное значение параметра, $x_{\min}$ — минимальное значение параметра в выборке, $x_{\max}$ — максимальное значение параметра в выборке.

Цель нормализации — приведение исследуемых параметров разных единиц измерения к единой шкале для совместного аналитического и графического анализа.

На рис. 6 приведены типовые графики, описывающие характер изменения значений исследуе-

мых свойств, выраженных в индексной форме, в зависимости от плотности воронок, также выраженной в индексной форме. Результаты проведенного анализа сведены в табличную форму (табл. 3), где изменчивость состояния исследуемых грунтов в зависимости от плотности карстовых воронок описывается разницей индексных оценок изучаемых свойств на участках с максимальным и минимальным значением плотности воронок ($x_{ind}(P_{max}) - x_{ind}(P_{min})$).

Результаты статистического анализа свидетельствуют о том, что в пределах карстовых полей на участках, не затронутым напрямую провалообразованием, состояние первого от поверхности грунтового слоя, представленного суглинками, с увеличением плотности карстовых форм характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции.

По мнению авторов, такой характер изменения свойств суглинков может быть связан с тем, что интенсивность инфильтрации на участках с повышенной плотностью карстовых форм выше, следовательно, именно к ним направлено движение фильтрационного потока, содержащего и твердую компоненту. В результате тонкодисперсный материал выносится в зоны разгрузки — карстовые воронки, а мелкий оседает в поровом пространстве покровных отложений. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива, а также за счет отсутствия напоров вод трещинно-карстового горизонта, способного препятствовать нисходящей фильтрации.

Принимая во внимание древний возраст поверхностных карстовых форм и геологическое строение изучаемого участка, можно сделать вывод, что подобный характер изменчивости значений физических свойств дисперсных грунтов обусловлен длительностью процессов фильтрации грунтовых вод в направлении к областям разгрузки — участкам с высокой плотностью карстовых воронок.

Изучению изменчивости физических и физико-механических свойств грунтов, перекрывающих закарстованные породы, посвящены работы многих исследователей. Если говорить о поведении связных и несвязных грунтов перекрывающей толщи над карстовыми полостями или иными ослабленными зонами в растворимых породах, то следует упомянуть детерминированные модели, разработанные А.В. Аникеевым. При физическом моделировании процессов провалообразования было подтверждено, что основную роль в подготовке деформаций обрушения игра-

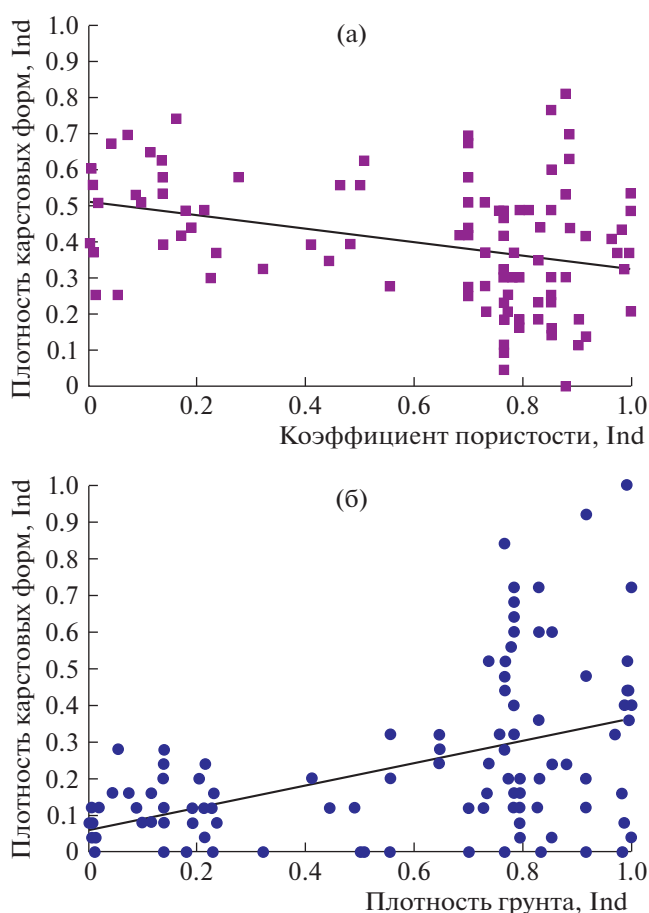


Рис. 6. Зависимость значений коэффициента пористости (а) и плотности грунта (б) от плотности карстовых форм на левом берегу р. Кама.

ют растягивающие напряжения. Очевидно, что уменьшение напряжений в грунтах над сформированной карстовой полостью в массиве приводит к разуплотнению грунтов [1].

Ослабленные зоны в грунтах покровной толщи, формирование которых сопряжено с разрядкой нормальных напряжений в перекрывающих грунтах над карстовой полостью, фиксируются в разрезе при проведении статического или динамического зондирования по падению сопротивления грунтов внедрению конуса зонда. Такие зоны соответствуют участкам развития вторичных парагенетически связанных с карстом суффозионных полостей и полостей обрушения [11]. Эффективность такого подхода доказана В.С. Крашенинниковым и В.П. Хоменко на промплощадке в г. Дзержинск Нижегородской области, где зондирование проводилось в четвертичных аллювиальных грунтах, перекрывающих карбонатно-сульфатную карстующуюся толщу. В ходе зондирования была выявлена ослабленная зона, наличие которой впоследствии было подтверждено результатами бурения.

Таблица 3. Итоговая таблица, отражающая изменчивость состояния исследуемых грунтов в зависимости от плотности поверхностных карстовых форм

	Количество значений	Плотность поверхностных карстовых форм P_{ind}					Разница индексных оценок ($x_{ind}(P_{\max}) - x_{ind}(P_{\min})$), %*
		< 0.2	0.2–0.4	0.4–0.6	0.6–0.8	0.8–1.0	
Свойства грунтов, X_{ind}		Левый берег					
		Суглинки твердые					
		**					
Естественная влажность	163	0.10	0.11	0.28	0.28	0.33	23.05
Плотность грунта	163	0.63	0.64	0.59	0.52	0.55	–8.09
Коэффициент пористости	82	0.84	0.81	0.78	0.74	0.70	–14.15
Свойства грунтов, X_{ind}		Суглинки полутвердые до тугопластичных					
Естественная влажность	110	0.45	0.39	0.36	0.35	0.34	–11.21
Плотность грунта	110	0.50	0.49	0.46	0.50	0.62	12.55
Коэффициент пористости	110	0.50	0.47	0.46	0.39	0.38	–11.62
Содержание пылеватой и глинистой фракций	72	0.82	0.77	0.72	0.52	0.48	–34.73
Свойства грунтов, X_{ind}		Правый берег					
		Суглинки твердые					
Естественная влажность	110	0.53	0.49	0.42	0.51	0.31	–21.89
Плотность грунта	110	0.61	0.62	0.68	0.67	0.87	25.89
Коэффициент пористости	110	0.42	0.44	0.37	0.36	0.20	–22.19
Содержание пылеватой и глинистой фракций	45	0.61	0.60	0.49	0.20	0.20	–40.87
Свойства грунтов, X_{ind}		Суглинки полутвердые до тугопластичных					
Естественная влажность	236	0.49	0.44	0.36	0.37	0.34	–15.58
Плотность грунта	236	0.41	0.45	0.55	0.56	0.56	14.47
Коэффициент пористости	236	0.50	0.50	0.35	0.38	0.33	–17.49
		—**					

*Знак “—” свидетельствует об обратном характере изменчивости состояния грунтов в зависимости от плотности карстовых форм.

**Характер изменчивости не установлен.

Цветовая гамма отражает изменения индексных оценок в зависимости от плотности поверхностных карстовых форм: насыщенность цвета прямо пропорциональна увеличению значений.

По мнению В.П. Хоменко, под разуплотненными (ослабленными) зонами в покровной толще понимаются участки, подвергшиеся частичному фильтрационному разрушению в начальной стадии развития карстово-суффозионных процессов. В.П. Хоменко экспериментально обосновал, что признаком начала формирования карстового провала может служить наличие разуплотненных зон в геологическом разрезе, где перекрывающая толща пород с бутовой текстурой подстилается трещиноватыми карстующимися породами. Поиск зон разуплотнения можно ве-

сти посредством обработки данных о гранулометрическом составе грунтов [11]. Так, В.С. Крашенинниковым и В.П. Хоменко в модельных условиях детально исследовался гранулометрический состав грунтов в разных точках перекрывающей толщи над карстовой полостью или трещиной в водоупоре. В результате ими выделено три зоны, гранулометрический состав которых различен: в зоне непосредственно над полостью заполнитель практически отсутствует и грунт отличается высокой степенью однородности [12].

При проведении инженерно-геологических изысканий на территории Москвы, где типовой разрез перекрывающей толщи представлен песчаными грунтами с подстилающим их юрским водоупором, на участках нарушения сплошности последнего происходит постепенное снизу вверх разуплотнение песчаных грунтов. Причиной тому служит вынос частиц в закарстованный массив после разрушения грунтов под действием вертикальной фильтрации через нарушение в водоупоре, обусловленной напором трещинно-карстового горизонта [8, 9, 14].

Кроме того, А.Д. Кочевым исследован характер изменчивости юрских глин и сделаны выводы, что по направлению к воронкам увеличиваются пористость, естественная влажность, в массиве и уменьшаются значения плотности грунта, что связано с вероятным формированием разуплотненной зоны в покровной толще в связи с развитием карстово-суффозионного провала. Так же автором отмечается, что такие изменения свойств наблюдаются на незначительных расстояниях от карстово-суффозионных форм: зачастую много меньших, чем расстояния между скважинами [10].

Следует обратить внимание еще на одну работу, в которой обсуждается изменчивость свойств отложений на участках развития карста. А.В. Аникеевым и др. по результатам исследования двух карстовых воронок: древней и молодой, отмечается, что плотность и влажность грунтов, отобранных в бортах древней воронки, выше, чем в ее центральной части. В центральной части отмечается более низкое, чем в бортах, содержание дисперсных частиц (пылеватых и глинистых — степень агрегированности выше). В молодой воронке авторами отмечается инверсия изучаемых свойств на крыльях карстовой формы и в центральной части, которая объясняется тем, что молодая воронка отличается интенсивной инфильтрацией поверхностных вод, которая сопровождается уплотнением пород под действием силы тяжести и вследствие заполнения их порового пространства вымытыми мелкими и тонкими частицами [2].

Принимая во внимание вышесказанное и тот факт, что практически все зафиксированные карстовые полости расположены на расстоянии 30–215 м (кроме одной, зафиксированной в скважине, пробуренной у борта карстовой воронки), можно сделать вывод о верности выдвинутой гипотезы, описывающей изменчивость состояния грунтов в пределах карстовых полей в зависимости от плотности карстовых форм.

Так, участки над карстовыми полостями испытывают разгрузку напряжений, способную привести к их разуплотнению. Дисперсный материал потоком грунтовых вод переносится из областей питания к участкам интенсивного дренирования — карстовым воронкам, и чем выше

плотность последних, тем большее влияние данная область разгрузки оказывает на дренирование территории. Древний возраст форм, развитых в районе исследования, объясняет относительное повышение значений плотности (при низкой пористости) отложений и относительное понижение содержания тонкодисперсной компоненты именно их длительными постседиментационными изменениями на участках провалообразования, связанными с движением грунтовых вод в направлении к областям разгрузки.

Изменения влажности объясняются региональной особенностью территории и тем, что непосредственно район исследования хорошо дренируется логом со значительным количеством отвершков. В бортах лога широко развиты трещины бортового отпора. Подобный характер изменения влажности покровных отложений (правда, при залегании карбонатов на незначительных глубинах) отмечается в работе Чен Х. и др. (Chen X. et al. [23]): над целиковыми зонами грунты характеризуются большим увлажнением за счет слабой инфильтрации. Над выветрелыми зонами в карстующихся породах за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемости массива, влага в верхних горизонтах не задерживается и просачивается вглубь массива.

Также следует обратить внимание на консолидацию изучаемых отложений. Для твердых глинистых грунтов процесс изменения напряженно-деформированного состояния, связанный с формированием карстовых форм, будет выражаться в появлении трещин, способствующих повышению интенсивности инфильтрации и инфлюации.

Здесь уместно упомянуть исследования зарубежных коллег, касающиеся морфологии трещин в карбонатных породах и физических свойств заполнителя этих трещины. Так материал заполнителя отличается от грунтов перекрывающей толщи повышенной плотностью, приобретенной вследствие транзита дисперсного материала. Значения пористости и фильтрационных свойств грунтов перекрывающей толщи также выше, чем заполнителя трещины. Содержание песчаной фракции выше в грунтах перекрывающей толщи. Это может быть связано с тем, что тонкодисперсный материал выносится в трещины, тем самым увеличивается поровое пространство и содержание относительно крупной фракции [27].

Из-за отсутствия данных о физических свойствах отложений в пределах самих воронок (борта, дно), утверждать о характере их изменчивости в непосредственной близости к карстовым формам (до 15 м) на основании выполненных исследований невозможно. Но, согласно представлениям о состоянии грунтов на участках развития карстовых воронок и вблизи них, в них должны наблюдаться пониженные значения плотности,

повышенные значения пористости и содержания тонкодисперсных частиц. Вероятно, на расстоянии первые метры до 15 м от карстовых воронок, находится граница их влияния, за пределами которой характер изменчивости свойств меняется на противоположный.

Таким образом, характер изменчивости состояния первого от поверхности слоя дисперсных отложений объясняется наличием на изучаемой территории пермского глинистого водоупора, перекрывающего интенсивно закарстованный карстовый массив. В таких условиях разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт контролируется карстовыми воронками, причем, чем выше их плотность, тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постгенетических изменений, связанных с длительным процессом фильтрации в области движения грунтовых вод к зонам разгрузки.

ВЫВОДЫ

1. Поиск и выявление закономерностей в изменении инженерно-геологических условий и состояния дисперсных перекрывающих отложений вблизи поверхностных карстовых форм могут являться весьма информативными в условиях невозможности прямого наблюдения за процессом подготовки провалообразования.

2. Анализ инженерно-геологических условий вблизи поверхностных карстовых форм в обстановках развития карбонатно-сульфатного карста на побережье р. Кама свидетельствует, что формирование провалов здесь связано со структурно-тектоническим положением территории, обеспечивающим относительно близкое залегание карстующихся пород к поверхности. Хорошая расчлененность рельефа долины Камы ее притоками весьма благоприятствует карстовому процессу, обеспечивая хорошую инфильтрацию и инфильтрацию вод, особенно по трещинам бортового отпора, развитым на эрозионных логах левого берега.

3. Поверхностные проявления карстового процесса на изучаемой территории развиты достаточно хорошо. Размеры воронок на левом берегу Камы больше, чем на правом. Это связано с относительно глубоким залеганием закарстованных сульфатных пород в геологическом разрезе левого берега и с их обнаженностью в цоколе террас (мыс Стрелка), способствующей доступу пресных вод внутрь массива. Относительно мощная толща покровных отложений позволяет сформироваться значительным полостям, разрушение которых по достижении критического размера приводит к образованию крупных провалов на поверхности.

4. Разгрузка подземных вод в трещинно-карстовый горизонт контролируется карстовыми во-

ронками, причем, чем выше их плотность, тем выше интенсивность инфильтрации и, следовательно, постседиментационных изменений, связанных с длительным процессом фильтрации в области движения грунтовых вод к зонам разгрузки.

5. За пределами воронок изменчивость свойств первого от поверхности грунтового слоя с увеличением плотности карстовых форм характеризуется увеличением плотности грунта и снижением коэффициента пористости, естественной влажности и содержания тонкодисперсной фракции. Влажность грунтов по мере увеличения плотности воронок снижается, что обусловлено хорошей инфильтрацией и инфильтрацией за счет развития трещин и, как следствие, хорошей проницаемостью массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. Аникеев А.В., Сулимова А.Ю., Чумаченко С.А. Инверсия свойств грунтов, слагающих молодые карстово-суффозионные воронки // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008. С. 6–11.
3. Бутырина К.Г. Гипсовый карст центральной части Пермской области: дисс. канд. географ. наук. Пермь: Перм. ун-т, 1968. 380 с.
4. Горбунова К.А. Карст некоторых районов Молотовской области: дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Молотов (ныне Пермь), 1956. 356 с.
5. Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г. Карст и пещеры Пермской области. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1992. 200 с.
6. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура. Пермь: Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН, 2010. 236 с.
7. Килин Ю.А., Минькевич И.И. Карст Чусовского Мыса Камского водохранилища // Инновационный потенциал естественных наук. Т. II. Экология и рациональное природопользование. Управление инновационной деятельностью. Пермь: Перм. ун-т, 2006. С. 91–94.
8. Кожеевникова В.Н. О роли динамики и режима подземных вод в формировании карстово-суффозионных процессов (на примере некоторых районов г. Москвы) // Инженерные изыскания при строительстве. Вып. 5 (33). Сер. 2. М.: Стройиздат, 1974. С. 22–27.
9. Кочев А.Д. Проблема оценки карстово-суффозионной опасности на территории г. Москвы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг: матер. первой Общерос. научно-практ. конф. М.: Геомаркетинг, 2017. С. 31–43.
10. Кочев А.Д. Факторы и условия развития карстово-суффозионных процессов на территории г. Москвы // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII. № 5–6.

- С. 8–20.
<https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-5-6-8-20>
11. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изучение покрывающей толщи, как один из важнейших компонентов инженерных изысканий в районах покрытого карста // Вестник МГСУ. 2011. № 5. С. 113–119.
 12. Крашенинников В.С., Хоменко В.П. Изменение granulometric composition of non-cohesive soils, preceding karst-suffusion collapse // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 52–62.
 13. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / Под. ред. В. Н. Дублянского. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 376 с.
 14. Кутепов В.М., Березкина Г.М., Зыкова Н.В., Кожевникова В.Н., Краснушкин А.В., Чертков Л.Г. Карстовые процессы и инженерно-геологические свойства глинистых пород // Инженерная геология. 1984. № 4. С. 91–103.
 15. Лунев Б.С. Особенности строения аллювия Камы и Чусовой на участках развития карста // Уч. зап. ПГУ. 1961. Т. XVIII. Вып. 2. С. 13–16.
 16. Максимович Г.А. Основы карстоведения. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Пермское книжное издательство, 1963. 447 с.
 17. Назаров Н.Н. Карст Прикамья. Физико-географические (геоморфологические) аспекты. Пермь: ПГНИУ, 1996. 95 с.
 18. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. 172 с.
 19. Печеркин А.И., Закоптелов В.Е. Карст и суффозия на берегах водохранилищ. Пермь: Перм. гос. ун-т, 1982. 88 с.
 20. Печеркин И.А. Геодинамика побережий Камских водохранилищ. Ч. I. Инженерно-геологические условия. Пермь: Перм. гос. ун-т им. А.М. Горького, 1966. 198 с.
 21. Пономарев А.Б., Попов С.Г., Заворохин А.Ф. Карстовый провал в д. Городище // Изучение Уральских пещер: доклады 2-й и 3-й конференций спелеологов Урала. Пермь: [б. и.], 1992. С. 53–54.
 22. Схема тектонического районирования масштаба 1:5000000. Лист О–40 (ФГУП “ВСЕГЕИ”, ООО “Комп”, ОАО “УГЭС”, 2014). URL: <http://geo.mfvsegei.ru/200k/o-40/o-40-10/24/index.html>
 23. Chen X., Zhang Z., Chen X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China // Environ Earth Sci. 2009. № 59. P. 811–820. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>
 24. Fu Z.Y., Chen H.S., Zhang W., Xu Q.X., Wang S., Wang K.L. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: a field rainfall simulation study // Geomorphology. 2015. V. 250. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.012>
 25. Milanović P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
 26. Xiao X., Xu M., Ding Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes // Environ. Earth Sci. 2018. 77 (3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7102-y>
 27. Youjin Y., Quanhou D., Li J., Xiangdong W. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China // Catena. 2019. V. 174. P. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.042>

ANALYSIS OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS AND VARIABILITY OF FINE-GRAINED DEPOSITS NEAR SINKHOLES IN THE CARBONATE-SULFATE KARST AREAS

E. V. Drobinina^{a,#} and D. R. Zolotarev^{b,##}

^a Perm State University, ul. Bukireva, 15, Perm, 614068 Russia

^b Karst-Control and Bank Protection LLC, ul. Sushchevskii val, 5, str. 3, Moscow, 3127018 Russia

[#]e-mail: alenadrobinina@yandex.ru

^{##}e-mail: zolotarevdr@mail.ru

The paper deals with the analysis of engineering geological conditions in the carbonate and sulfate karst region with widespread surface karst landforms. Engineering geological conditions in the study area (Dobryanskii region, Perm krai) are scrutinized in detail. The areal variability of soil state within the karst fields is assessed on the basis of the analysis of two-dimensional point clouds describing the relationship between the considered property and the density of karst landforms. Special attention is paid to the sites not subjected directly to collapses. Groundwater discharge to fractured karstic horizon is controlled by karst sinkholes in the study area. The higher the amount of sinkholes per square unit (density) is, the more intensely infiltration goes, and also the post-sedimentation alteration of soil properties related to groundwater percolation to discharge areas. It is shown that with rising density of karst landforms immediately beyond the limits of these areas, variability of properties of the uppermost soil layer manifests the increasing soil density and decreasing the porosity coefficient, the natural moisture and the fine-grained fraction content. The ground moisture de-

creases with the rising density of sinkholes, which is due to high infiltration by fractures and high ground mass permeability.

Keywords: *overlying soil massif, variability of properties, physical properties, grain-size distribution, sinkholes, carbonate and sulfate karst*

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh raionakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Sinkholes and subsidence of the earth's surface in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
2. Anikeev, A.V., Sulimova, A.Yu., Chumachenko, S.A. *Inversiya svoystv gruntov, slagayushchikh molodye karstovo-suffuzionnye voronki* [Inversion of soil properties within young karst-suffusion sinkholes]. Sergeev Readings. International year of planet Earth: problems in environmental geoscience, engineering geology and hydrogeology. Moscow, GEOS Publ., 2008, issue 10, pp. 6–11. (in Russian)
3. Butyrina, K.G. *Gipsovyi karst tsentral'noi chasti Permskoi oblasti* [Gypsum karst in the central part of the Perm region]. Cand. Sci. (Geogr.) dissertation. Perm, PSU Publ., 1968, 380 p. (in Russian)
4. Gorbunova, K.A. *Karst nekotorykh raionov Molotovskoi oblasti* [Karst of some districts of the Molotov region]. Cand. Sci. (Geogr.) dissertation. Molotov (now Perm), 1956, 356 p. (in Russian)
5. Gorbunova, K.A., Andreichuk, V.N., Kostarev, V.P., Maksimovich, N.G. *Karst i peshchery Permskoi oblasti* [Karst and caves of the Perm region]. Perm, PSU Publ., 1992, 200 p. (in Russian)
6. Kataev, V.N., Kadebskaya, O.I. *Geologiya i karst goroda Kungura* [Geology and karst of Kungur city]. Perm, PSU, GI UrO RAN, 2010, 236 p. (in Russian)
7. Kilin, Yu.A., Min'kevich, I.I. *Karst Chusovskogo Mysa Kamskogo vodokhranilishcha* [Karst of Chusovsky Cape of Kamsky reservoir]. *Innovatsionnyi potentsial estestvennykh nauk* [The innovative potential of natural sciences]. Perm, 2006, vol. 2, pp. 91–94. (in Russian)
8. Kozhevnikova V.N. *O roli dinamiki i rezhima podzemnykh vod v formirovanii karstovo-suffuzionnykh protsessov (na primere nekotorykh raionov g. Moskvy)* [The role of dynamics and regime of groundwater in the formation of karst-suffusion processes (on the example of some districts of Moscow)]. *Inzhenernye izyskaniya pri stroitel'stve* [Engineering survey during construction], vol. 5(33), series 2, Moscow, 1974, pp. 22–27. (in Russian)
9. Kochev, A.D. *Problema otsenki karstovo-suffuzionnoi opasnosti na territorii g. Moskvy* [The problem of assessing the karst-suffusion hazard in the territory of Moscow]. *Izucheniye opasnykh prirodnnykh protsessov i geotekhnicheskii monitoring* [Hazardous natural processes research and geotechnical monitoring]. Proc. the first All-Russian scientific-practical conference. Moscow, Geomarketing Publ., pp. 31–43. (in Russian)
10. Kochev, A.D. *Faktory i usloviya razvitiya karstovo-suffuzionnykh protsessov na territorii g. Moskvy* [Factors and conditions for the development of the karst-suffusion processes in Moscow]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2019, vol. XIII, no. 5–6, pp. 8–20. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-5-6-8-20> (in Russian)
11. Krasheninnikov, V.S., Khomenko, V.P. *Izucheniye pokryvayushchei tolshchi kak odin iz vazhneishikh komponentov inzhenernykh izyskaniy v raionakh pokrytogo karsta* [The study of overlying massif as one of important components in site investigations in covered karst areas]. *Vestnik MGSU*, no. 5, 2011. pp. 113–119. (in Russian)
12. Krasheninnikov, V.S., Khomenko, V.P. *Izmeneniye granulometricheskogo sostava nesvyaznykh gruntov, predshestvuyushchee karstovo-suffuzionnomu provalooobrazovaniyu* [Changing particle-size distribution in noncohesive soils that precedes karst-suffusion sink-hole formation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2017, no. 2, pp. 52–62. (in Russian)
13. *Kungurskaya ledyanaya peshchera: opyt rezhimnykh nablyudenii* [Kungur ice cave: an experience of regime observations]. V.N. Dublyanskii, Ed., Yekaterinburg, 2005, 376 p. (in Russian)
14. Kutevov, V.M., Berezkina, G.M., Zyкова, N.V., Kozhevnikova, V.N., Krasnushkin, A.V., Chertkov, L.G. *Karstovye protsessy i inzhenerno-geologicheskie svoystva glinistykh porod* [Karst processes and engineering geological properties of clays]. *Inzhenernaya geologiya*, 1984, vol. 4, pp. 91–103. (in Russian)
15. Lunev, B.S. *Osobennosti stroeniya allyuviya Kamy i Chusovoi na uchastkakh razvitiya karsta* [Features of the alluvium structure of Kama and Chusovaya rivers in the areas of karst development]. *Uchenye zapiski PGU*, 1961, vol. XVIII, no. 2, pp. 13–16. (in Russian)
16. Maksimovich, G.A. *Osnovy karstovedeniya. T. 1: Voprosy morfologii karsta, speleologii i gidrogeologii karsta* [Fundamentals of karst studies. Vol. 1: Issues of karst morphology, speleology and karst hydrogeology]. Perm, 1963, 447 p. (in Russian)
17. Nazarov, N.N. *Karst Prikam'ya. Fiziko-geograficheskie (geomorfologicheskie) aspekty* [Karst of the Kama region. Physico-geographical (geomorphological) aspects]. Perm, 1996, 95 p. (in Russian)
18. Pecherkin, A.I. *Geodinamika sul'fatnogo karsta* [Geodynamics of sulfate karst]. Irkutsk, 1986. 172 p. (in Russian)
19. Pecherkin, A.I., Zakoptelov, V.E. *Karst i suffoziya na beregakh vodokhranilishch* [Karst and suffusion on the banks of reservoirs]. Perm, PSU Publ., 1982, 88 p. (in Russian)
20. Pecherkin, I.A. *Geodinamika poberezhii Kamskikh vodokhranilishch*. [Geodynamics of the Kama reservoirs coasts]. Part I. Perm, 1966, 198 p. (in Russian)
21. Ponomarev, A.B., Popov, S.G., Zavorokhin, A.F. *Karstovyi proval v d. Gorodishche* [Karst sinkhole in the village of Gorodishche]. *Izucheniye Ural'skikh peshcher*:

- doklady 2i i 3i konf. speleologov Urala* [Exploring the Ural Caves. Reports at the 2nd and 3rd conferences of the Urals speleologists]. Perm, 1992, pp. 53–54. (in Russian)
22. *Skhema tektonicheskogo raionirovaniya masshtaba 1:5 000 000. List O-40*. [Scheme of tectonic zoning scale of 1:5000000. Sheet O-40] Moscow, VSEGEI, LLC Comp, JSC UGSE, 2014. (in Russian)
 23. Chen, X., Zhang, Z., Chen, X. et al. The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China. *Environ. Earth Sci.* 2009, no. 59, pp. 811–820. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0077-6>.
 24. Fu, Z.Y., Chen, H.S., Zhang, W., Xu, Q.X., Wang, S., Wang, K.L., 2015. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: a field rainfall simulation study. *Geomorphology*. 2015, vol. 250, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.012>.
 25. Milanović, P. Water resources engineering in karst. Boca Raton, Florida, USA, 2005. 328 p.
 26. Xiao, X., Xu, M., Ding, Q. et al. Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a karst cave caused by groundwater level changes. *Environ. Earth Sci.*, 2018, no. 77 (3). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7102-y>.
 27. Youjin, Y., Quanhou, D., Li, J., Xiangdong, W. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China. *Catena*, 2019, no. 174, pp. 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.042>.