

УДК 551.435.8

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ МОСКВЫ ПО СТЕПЕНИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

© 2025 г. Е. Р. Романова^{1,2,*}, Ф. К. Буфееv^{1,3,**}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе 26, Москва, 129337 Россия

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
Миклухо-Маклая 23, Москва, 117997

*E-mail: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

**E-mail: fbufeev@mail.ru

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята в печать 25.12.2024 г.

Изучение карстово-суффозионной опасности в процессе инженерно-геологических изысканий и разработка противокарстовых мероприятий на объектах, расположенных на территории Москвы, крайне актуальная тема. Согласно “Карте опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов”, участок площадью 4.9 км² на северо-западе г. Москва, в пределах которого в XX в. зафиксированы все известные на территории города карстово-суффозионные проявления, относится к опасной категории. В статье детально анализируются инженерно-геологические условия этого участка по результатам изучения буровых журналов и колонок более 440 скважин. Составлена карта мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, в масштабе 1 : 5 000. Предложен новый подход к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности, в результате чего в пределах Москвы площадь участка, относящегося к территории опасной в карстово-суффозионном отношении, уменьшается до 2.50 км².

Ключевые слова: карст, воронка, карстово-суффозионный провал, поверхностные проявления, карстово-суффозионная опасность, районирование

DOI: 10.31857/S0869780925020019 EDN: EPFZEG

ВВЕДЕНИЕ

Один из наиболее актуальных вопросов при производстве инженерно-геологических изысканий на территории Москвы — оценка опасности территории в отношении развития “карстовых деформаций”. При этом в соответствии с требованиями нормативов к карстовым деформациям относят и проявления карста, и проявления, образованные в результате совместного протекания карстового и суффозионного процессов (которое исследователи называют “карстово-суффозионным” процессом [1]), а иногда и только суффозионного. В соответствии с СП 22.13330.2016 “Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*”: “к закарстованным относятся территории, в пределах которых распространены водорастворимые породы”. Территория Москвы

полностью относится к области распространения карбонатных отложений, которые хотя и очень медленно, но растворяются. Однако скорость их растворения такова, что в масштабах срока службы сооружения увеличение размера карстовой полости не играет значительной роли в подготовке и протекании процесса провалаобразования и выходе провала на земную поверхность [1, 21]. Гораздо существеннее то, что карбонатные породы каменноугольного возраста длительное время испытывали денудационное воздействие, находясь на поверхности земли (или в непосредственной близости от нее) с конца палеозоя и до середины мезозоя, а также большую часть кайнозоя. В это время карстовый процесс развивался очень активно, в результате чего в настоящее время имеется достаточно большое количество проявлений кар-

ста в каменноугольных породах, погребенных под относительно мощной толщей преимущественно дисперсных мезо-кайнозойских отложений, в которых развито несколько водоносных горизонтов (в том числе напорных).

Новые проявления карстово-суффозионного процесса на территории Москвы не фиксируются уже более 25 лет. Несмотря на это, при изменении инженерно-геологических условий, возможна активизация процесса [20]. Важно отметить, что отнесение территории к той или иной категории опасности в карстово-суффозионном отношении влечет за собой как изменение объемов инженерно-геологических изысканий, так и затрат на проектирование и реализацию противокарстовых мероприятий. Очевидно, что это в значительной степени влияет на стоимость проекта в целом.

ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕ НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ

На территории Москвы подземные проявления карста были установлены еще в первой четверти прошлого века в процессе бурения скважин. В начале 1930-х годов многочисленные подземные проявления карста также встречались при прокладке первых линий метрополитена и иных сооружений. При освоении подземного пространства города инженер-геологами и строителями были обнаружены разрушенные зоны в карбонатных массивах, многочисленные трещины, мелкие карстовые полости, каналы, воронки и котловины на поверхности каменноугольных отложений [16]. Однако все зафиксированные проявления карста были лишь подземными.

Карст на территории города связан с наличием в разрезе мощной толщи карбонатных отложений каменноугольного возраста, которые повсеместно перекрыты породами мезозойской и кайнозойской эры. История геологического развития, а именно длительность континентальных перерывов в осадконакоплении в пермское, триасовое и раннеюрское время, а также в палеогене и неогене привели к тому, что практически вся толща каменноугольных карбонатных отложений неравномерно закарстована.

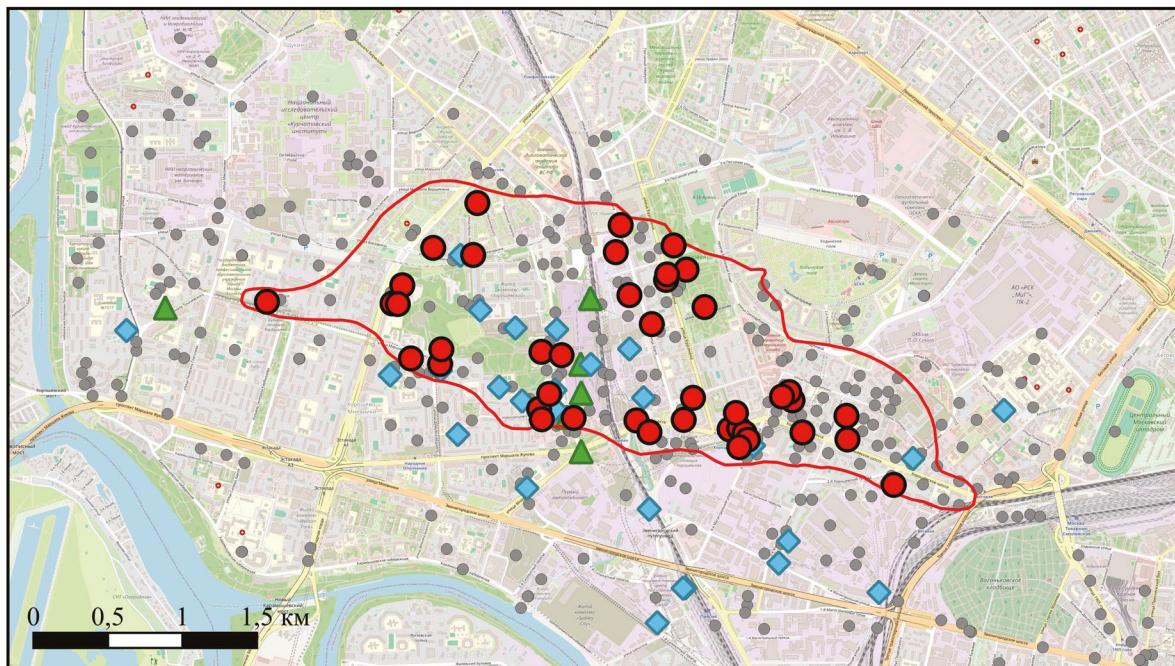
До середины прошлого века при изучении экзогенных геологических процессов карстово-суффозионному процессу не придавалось большого значения. В 1930-е годы были задокументированы первые поверхностные проявления карста, а в 1960-х на северо-западе города начали регулярно возникать провалы и локальные оседания земной поверхности. Высокая интенсивность провалообразования стала диктовать новые условия для безопасного освоения территории и, следовательно, привела к необходимости изучения причин, условий и факторов развития этих явлений.

Принято считать, что к концу прошлого века на территории города зафиксировано 42 поверхностных проявления карстово-суффозионного процесса [1, 2, 11, 12]. Однако в их число входит также 3 понижения земной поверхности неустановленного генезиса [10] (рис. 1). Из 42 проявлений комплексом инженерно-геологических (включая бурение) и геофизических методов изучено 14, на участках их формирования были построены геолого-гидрогеологические разрезы [11]. Провалы зафиксированы вдоль Хорошевского шоссе, около улиц 3-й Хорошевской, Куусинена, Зорге, Берзарина, Маршала Тухачевского и Народного ополчения. Образование некоторых провалов на территории жилой застройки привело к аварийным ситуациям и необходимости проведения мероприятий по ликвидации последствий. Например, в октябре 1969 г. в центре и под южной стеной жилого 5-этажного здания, расположенного по адресу Хорошевское шоссе, д. 35, к. 2, образовались два провала диаметрами 4.5 и 4 м и глубиной 3.5 и 3 м соответственно, что привело к выселению жителей дома, необходимости обеспечения их жильем, сносу дома и рекультивации площадки [3].

В результате всестороннего анализа в 1984 г. главными причинами, способствующими активизации карстово-суффозионных процессов, были названы [8]:

- усиленные откачки подземных вод из закарстованных известняков в промышленных целях, в результате которых на территории Москвы создалась большая депрессионная воронка, изменившая гидрогеологический режим;
- отсутствие или недостаточная мощность водоупорного слоя юрских глин, отделяющего водонасыщенные четвертичные отложения от закарстованных известняков, вследствие чего возникает вертикальная фильтрация подземных вод в закарстованные горизонты известняков;
- значительные скорости фильтрации подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов и др.;
- вскрытые полости в отложениях каменноугольной системы.

В начале прошлого века пьезометрическая поверхность трещинно-карстовых вод вблизи Москвы-реки почти совпадала с уровнем грунтовых вод, а к концу 1950-х годов откачки привели к снижению напора на 20–30 м в районе Магистральных улиц, Звенигородского шоссе и на 30–40 м в районе Хорошевского и Ленинградского шоссе. К середине 1960-х режим стабилизировался [2], однако провалообразование прекратилось только к концу века. Согласно исследованиям, проведенным при изучении условий образования карстово-суффозионных явлений в районе Хорошевского шоссе



Условные обозначения

- ▲ скважины, в которых выявлены заполненные карстовые полости
- ◆ скважины, в которых выявлены пустоты
- скважины без проявлений
- граница территории «опасной» по проявлению современных карстово-супфозионных процессов
- карстово-супфозионные воронки, провалы и мульды оседания

Рис. 1. Схема расположения скважин с подземными проявлениями карста.

инженерно-геологической оползневой партией гидрорежимной экспедиции в составе С.И. Парфенова, В.В. Данилова, И.В. Батуриновской и др., на 1975 г. суммарный водоотбор из нижнекаменноугольного водоносного горизонта составил 10 800 м³/сут (водозабор “Октябрьское поле”), из среднекаменноугольного водоносного горизонта — 28 000 м³/сут, а из верхнекаменноугольного водоносного горизонта — 1000 м³/сут, причем большинство водозaborных скважин работали в весенне-летнее время.

С момента возникновения потенциальной опасности для инфраструктуры, жизни и здоровья населения появились работы по изучению механизма провалообразования, причин и условий появления провалов, районированию территории по степени карстовой опасности [2, 3, 11–13, 15], вносились изменения в существующую нормативную базу. В 1984 г. территорию города по степени опасности поделили на опасную, потенциально опасную и неопасную по таким признакам, как наличие подземных и поверхностных проявлений, степень

закарствованности и трещиноватости, мощность водоупора, градиент вертикальной фильтрации, наличие древних погребенных и доледниковых долин, наличие в разрезе переотложенных более молодых отложений, состояние и свойства песчано-глинистых четвертичных отложений [8]. Однако карта районирования территории Москвы, основанная на вышеперечисленных признаках, не была составлена.

Последняя крупная работа по районированию (она же первая и единственная на сегодняшний день карта районирования), используемая всеми без исключения московскими инженерами-геологами — Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-супфозионных процессов (М. 1 : 10 000), составлена была в 2012 г. Институтом геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН совместно с ГБУ Мосгорготрест [9]. На ней территория города поделена на опасную, потенциально опасную и неопасную по “опасности древних карстовых и современных карстово-супфозионных форм”. Критериями для выделения категории опас-

ности современных карстово-суффозионных процессов послужили: наличие/отсутствие на земной поверхности проявлений в виде воронок и мульд оседания; приуроченность к доледниковым и современным речным долинам; отсутствие, прерывистость и мощность слабопроницаемого слоя глинистых пород, разделяющего грунтовые и трещинно-карстовый водоносные горизонты. Согласно этой карте, практически вся территория города относится к неопасной или потенциально опасной категориям, к опасной отнесен лишь небольшой участок площадью 4.9 км², в пределах которого и образовались все поверхностные проявления. С 2012 г. новых масштабных работ по составлению карт районирования не проводилось, а имеющаяся карта не актуализировалась, несмотря на увеличение количества скважин в базах данных организаций, участвовавших в ее создании.

Все теоретические предложения по районированию территории города по степени карстово-суффозионной опасности включают критерии, большинство из которых практически невозможно определить при стандартном наборе инженерно-геологических исследований. Авторы карты считают, при *“районировании территории по опасности современных карстово-суффозионных процессов на опасных и потенциально опасных участках при формировании градиента вертикальной фильтрации 3 и более возможна активизация карстово-суффозионных процессов”* [9], однако сам градиент в районировании не был учтен.

Для построения карты районирования всего города необходимо использовать критерии, которые можно получить из архивных материалов без проведения дополнительных исследований. Среди предложенных критериев районирования наиболее легко оцениваемым без дополнительных изысканий является, бесспорно, мощность глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт. При этом граничные значения мощности для каждой категории опасности — вопрос до сих пор дискуссионный.

Первый и наиболее известный подход к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности с учетом мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, описан в *“Инструкции по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов”* [8]. Согласно этой методике, к опасным следует относить территории с мощностью перекрывающих глинистых отложений менее 3 м, к потенциально опасным — территории с мощностью 3–10 м, к неопасным — с мощностью более 10 м. До изменений №4 от 27.12.2021 в СП 22.13330.2016 использовалась аналогичная градация.

Второй подход к районированию, учитывающий мощность глинистых перекрывающих отложений, предложен А.Д. Кочевым, Л.Г. Чертковым и И.Л. Зайонцем в статье *“Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблемы оценки их опасности”* [13]. Авторы указанной работы после детального анализа условий образования поверхностных проявлений карста и упомянутых выше методик районирования предложили к опасным относить территории с мощностью перекрывающих глинистых отложений менее 5 м, к потенциально опасным — с мощностью 5–12 м, к неопасным — с мощностью более 12 м.

Целями данного исследования являются разработка нового подхода к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности и уточнение карты районирования участка на северо-западе Москвы, ранее отнесенного к опасному по степени карстово-суффозионной опасности.

Природные условия территории

При выполнении настоящей работы авторы использовали данные об инженерно-геологических условиях участка, который при масштабе исследований 1 : 10 000 по степени опасности современных карстово-суффозионных процессов, полностью относится к опасной категории [9].

Исследуемая территория находится на западе города и имеет площадь 4.9 км². В геоморфологическом отношении территории располагается преимущественно в пределах III (ходынской) надпойменной террасы Москвы-реки. Кроме того, в пределах этого участка выделяется крупная погребенная дочетвертичная долина, в которой мезозойские отложения локально размыты.

В геологическом строении принимают участие отложения четвертичной, юрской и каменноугольной систем. Четвертичные отложения распространены повсеместно и представлены техногенными грунтами, аллювиальными отложениями II (мневниковской) и III надпойменных террас и высокой поймы, ледниками отложениями московского горизонта. Отложения четвертичной системы представлены связными и несвязными грунтами суммарной мощностью от 20 до 50 м. Отложения юрской системы распространены на большей части территории и представлены глинистыми грунтами. Каменноугольная система представлена отложениями верхнего и среднего отделов. Верхний отдел представлен не выдержаным по площади и мощности чередованием карбонатных пород (известняками и изредка доломитами) и глин, а средний отдел — карбонатными отложениями.

На территории развиты надморенный и надъюрский водоносные комплексы, а также водоносные горизонты в отложениях каменноугольной

системы. Надморенный водоносный комплекс распространен локально, абсолютные отметки уровня составляют 137–142 м, горизонт безнапорный. Надьюрский водоносный комплекс распространен практически повсеместно, абсолютные отметки уровня изменяются от 128 до 140 м, горизонт напорно-безнапорный, в местах отсутствия водоупора, отделяющего его от вод каменноугольных отложений, происходит объединение этих водоносных горизонтов. Водоносные горизонты каменноугольной системы приурочены к первухоровским, ратмировским и подольско-мячковским отложениям.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В базе данных инженерно-геологических скважин ИГЭ РАН в границах зоны, определенной как опасная с позиций оценки опасности современных карстово-суффозионных процессов [9], содержится информация о 589 скважинах, среди них 229 вскрыли кровлю отложений каменноугольной системы. Данные большинства этих скважин использовались при построении карты [9]. В базе данных ГБУ “Мосгоргеотрест” под данным на 2024 г. в границах исследуемого участка имеется 395 скважин, вскрывших закарстованный горизонт. При этом 176 скважин дублируются в двух базах, 53 скважины есть только в базе данных ИГЭ РАН, 219 скважины есть только в базе данных ГБУ “Мосгоргеотрест”. Таким образом, в анализе используются данные по 448 скважинам, вскрывшим первый от поверхности закарстованный горизонт. При площади участка 4.9 км² плотность данных составляет 91 выработку на 1 км².

Так как, согласно СП 446.1325800.2019 “Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ” (таблица 6.1), такая плотность горных выработок при III категории сложности инженерно-геологических условий (именно III категория сложности присвоена исследуемому участку из-за наличия поверхностных проявлений карстово-суффозионного процесса) дальнейшие картографические построения проводились в масштабе инженерно-геологической съемки 1 : 5 000.

Для анализа были использованы буровые журналы и колонки 448 скважин, расположенных в границах исследуемой зоны, и 215 скважин, вскрывших первый от поверхности закарстованный горизонт в пределах зоны 250 м за ее границами. Скважины за пределами исследуемого участка использовались для более точной интерполяции у границ исследуемой территории.

Исследователи сходятся во мнении, что на территории Москвы образовалось минимум 39 карстово-суффозионных поверхностных прояв-

лений. Авторами настоящей статьи были проанализированные отчеты о региональном изучении карстовых проявлений на территории Москвы, составленные С.И. Парфеновым, Н.Н. Лебковым, Н.Т. Калмыковым и др., содержащие информацию о местоположении проявлений, в соответствии с ней проявления были нанесены на карту. Из архивных отчетов была получена информация о дате образования (дате первого упоминания в архивных источниках), длине, ширине и глубине каждого проявления. На основании этих данных было выяснено, что три понижения неустановленного генезиса (см. рис. 1) имеют диаметры 250, 150 и 80–30 м (понижение овальной формы), при этом самые большие диаметры проявлений карстово-суффозионного генезиса составляют 53, 40 и 38 м. Два из трех понижений неустановленного происхождения закартированы Е.Г. Качугиным в 1932 г., информация о третьем получена благодаря архивному топографическому плану масштаба 1 : 2 000, построенному по данным 1947 г. Другой задокументированной информации об этих формах рельефа нет. Учитывая их большой размер в плане, не свойственный данной инженерно-геологической обстановке, авторы склоняются к тому, что их происхождение вряд ли связано с карстово-суффозионным процессом.

Буровой журнал или колонка каждой скважины изучались, необходимая информация заносилась в базу атрибутивных данных, которая в процессе исследования пополнялась новыми показателями строения и состояния геологической среды.

В начале авторы попытались определить приуроченность поверхностных проявлений к какому-то определенному диапазону характеристик строения закарстованного горизонта и перекрывающей его толщи. В качестве характеристик для анализа были выбраны данные о состоянии первого от поверхности слоя карбонатных отложений, мощности экранирующего глинистого слабопроницаемого слоя, а также количество водоупоров в перекрывающей толще.

Одно из условий развития карстово-суффозионного процесса — наличие полостей, в которые бы мог быть вынесен дисперсный материал. Такими полостями в условиях Москвы могут служить трещины и пустоты в известняках и доломитах каменноугольного возраста. На рис. 1 показаны скважины, в которых при бурении были вскрыты незаполненные полости.

В границах исследуемой зоны зафиксировано 39 полостей: 5 — в отложениях среднего отдела каменноугольной системы с высотой от 0.2 до 1.2 м (в среднем 0.66 м); 34 обнаружены в отложениях среднего отдела каменноугольной системы, их высота изменяется от 0.1 до 1.2 м (в среднем 0.51 м). На рис. 2 приведена гистограмма высот пустот.

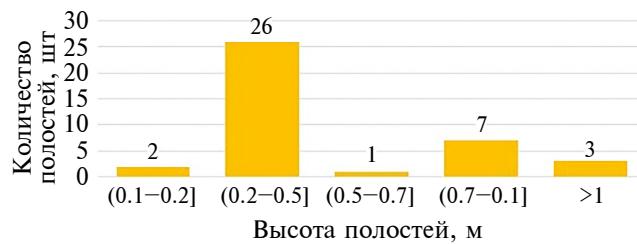


Рис. 2. Гистограмма высот пустот.

Полости вскрыты в 38 скважинах (в одной из скважин вскрыты полости в отложениях обоих отделов каменноугольной системы).

Для установления приуроченности поверхностных проявлений к типу строения толщи грунтов, покрывающих закарстованный горизонт, а именно количеству водоупоров, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений, авторами выполнено районирование территории по типу разреза. Для районирования использовали данные 448 скважин, расположенных в границах исследуемого участка. Идея о проведении подобного районирования пришла авторам исследования после изучения публикации А.В. Аникеева, А.Л. Рагозина и В.Н. Селезенева [4].

В настоящем исследовании районирование было выполнено по двум показателям:

- наличию в толще экранирующего глинистого горизонта, залегающего над первым от поверхности слоем карбонатных (закарстованных) отложений;
- наличию глинистого слоя в перекрывающей песчаной толще.

В результате было выделено 4 района, характеризующихся следующими особенностями строения (рис. 3), когда на карбонатных отложениях залегают:

- несвязные (песчаные) отложения (тип 1);
- несвязные (песчаные) отложения, однако в их толще присутствуют связные (глинистые) отложения (тип 2);
- связные (глинистые) отложения, а все отложения выше по разрезу представлены несвязными породами (тип 3);
- связные (глинистые), однако в толще несвязных (песчаных) вышележащих отложений встречается еще один слой слабопроницаемых пород (тип 4).

Граница участков с 1 и 2 типом разрезов является примерной границей литологических окон в водоупоре, отделяющем каменноугольный водоносный горизонт от надъюрского водоносного комплекса.

Результатом стала карта районирования территории по типу строения перекрывающей толщи (рис. 4). Территории с первым типом разреза занимают 8.3%, с вторым — 3.6%, с третьим — 34.6%, с четвертым — 53.5% от площади исследуемого участка.

На участках с 1 и 2 типом разреза не зафиксировано ни одного карстово-суффозионного проявления, на участках с 3 типом — 22 проявления ($12.88 \text{ шт}/\text{км}^2$), с 4 типом — 17 проявлений ($6.42 \text{ шт}/\text{км}^2$). Отсутствие проявлений на участках с 1 и 2 типами разрезов можно объяснить кольматацией трещин в карбонатных отложениях песчаным и глинистым материалом [14]. Наивысшая плотность провалов на участках

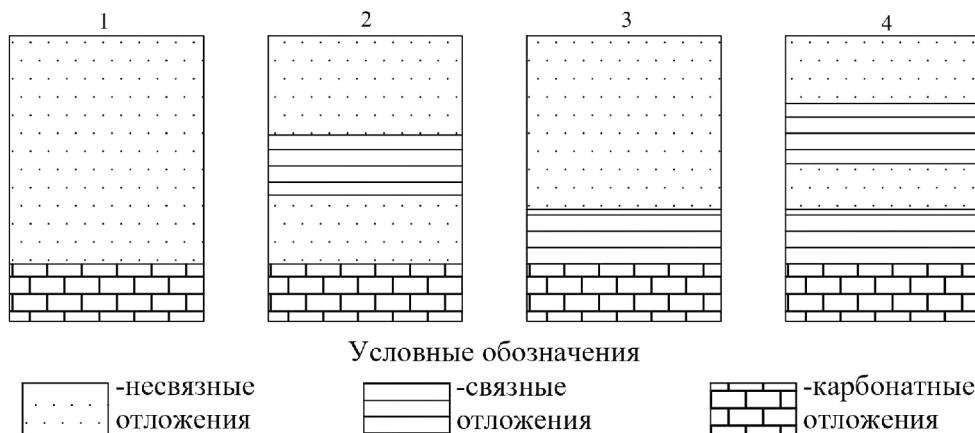


Рис. 3. Типы строения толщи грунтов, залегающей над первым от поверхности слоем карбонатных отложений.

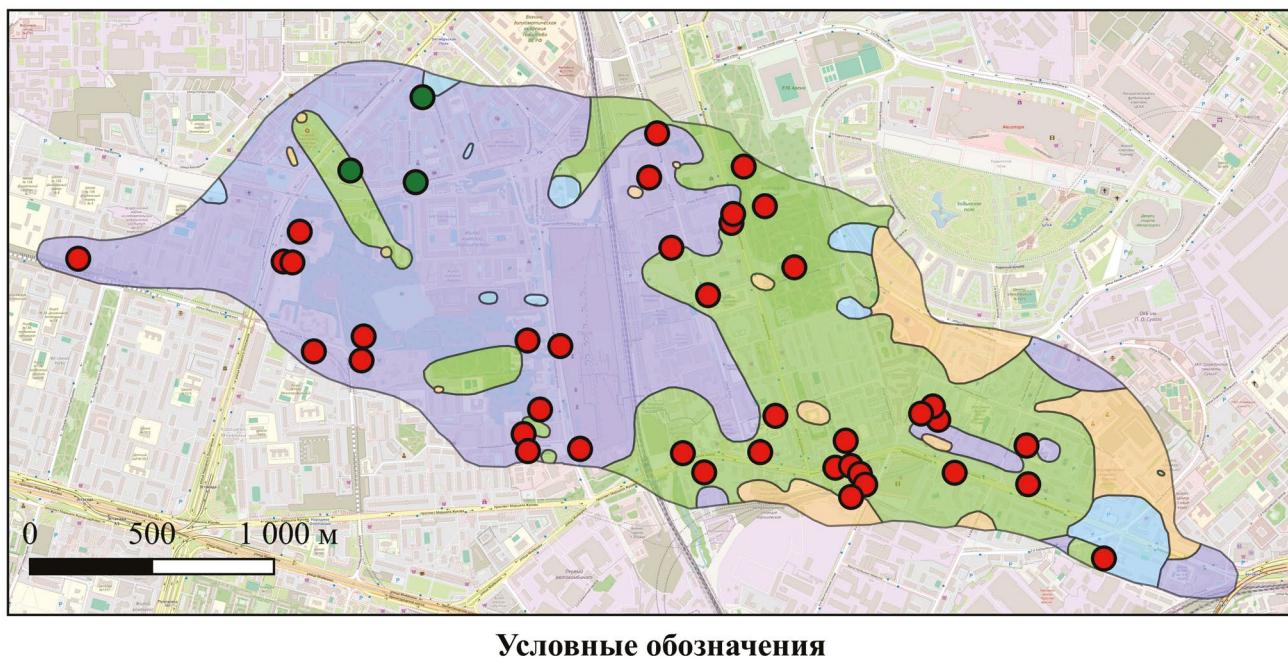


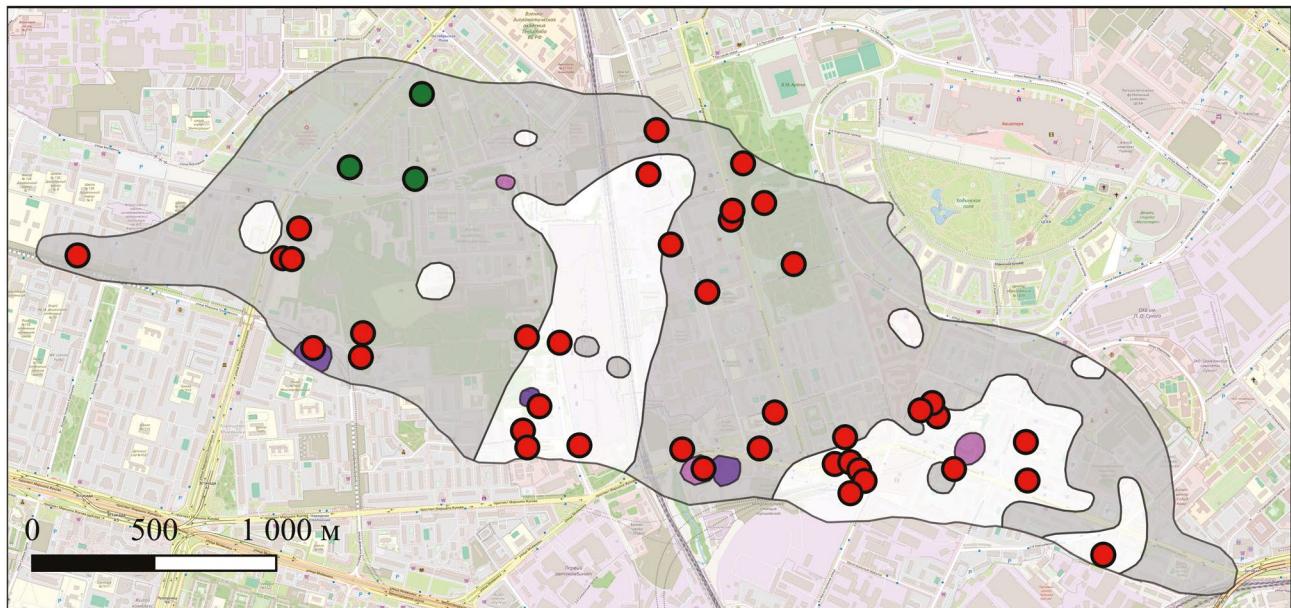
Рис. 4. Карта районирования территории по типу строения перекрывающей толщи.

с 3 типом строения перекрывающей толщи — она почти в 2 раза выше плотности на участках с 4 типом строения. Это свидетельствует, что наличие в перекрывающей толще связных отложений второго водоупорного слоя может являться фактором, уменьшающим вероятность образования на земной поверхности замкнутого локального понижения карстово-суффозионного происхождения.

Авторами была составлена карта районирования территории по преобладающей степени трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений (рис. 5). Для этого в каждой скважине, вскрывшей подошву первого от поверхности слоя карбонатных отложений (любого возраста), было определено соотношение мощностей прослоев различной степени трещиноватости (монолитных, слаботрещиноватых, среднетрещиноватых, сильнотрещиноватых и разрушенных до муки и щебня) к мощности всего первого от поверхности слоя карбонатных отложений. Трещиноватость прослоев определена по данным буровых журналов и колонок скважин. Полученные точечные данные классифицировались в зависимости от преобладающей степени трещиноватости в анализируемом

слое карбонатных отложений. Для построения карты использованы данные буровых журналов 119 скважин, расположенных в границах исследуемого участка.

Территории с монолитным и слаботрещиноватым первым от поверхности слоем известняка занимают по 0.6%, территории с трещиноватым — 25.2%, с сильнотрещиноватым — 73.6% от площади всей исследуемой территории. На первых двух типах участков располагается по одному карстово-суффозионному поверхности проявлению. На участке, где в разрезе первого от поверхности слоя карбонатных отложений преобладают трещиноватые грунты, расположены 17 проявлений ($13.68 \text{ шт}/\text{км}^2$), где сильно трещиноватые и разрушенные — 20 проявлений ($5.44 \text{ шт}/\text{км}^2$). Из этого можно заключить, что степень трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений также влияет на вероятность поверхностного проявления: чем слой более трещиноватый, тем вероятность больше, однако она значительно меньше, если первый от поверхности слой закартированных отложений представлен преимущественно сильно трещиноватыми отложениями.



Условные обозначения

Преобладающая степень трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений:

- | | | | | | |
|--|--|--|-------------------|--|--------------|
| | монолитный | | слаботрещиноватый | | трещиноватый |
| | | | | | |
| | сильно трещиноватый/ разрушенный до щебня, глыб и карбонатной муки | | | | |

Понижения земной поверхности:

- карстово-суффозионные воронки, провалы и мульды оседания
- неопределенного генезиса

Рис. 5. Карта районирования территории по преобладающей степени трещиноватости первого от поверхности слоя карбонатных отложений.

Районирование территории по степени карстово-суффозионной опасности

Принимая во внимание инженерно-геологические условия исследуемого участка и минимальные скорости растворения карбонатных отложений, при районировании территории по степени опасности необходимо учитывать опасность именно карстово-суффозионного процесса, т.е. *опасность деформирования и разрушения перекрывающей толщи и образование поверхностных проявлений* (воронок, провалов и мульд оседания).

Перед тем, как переходить к районированию территории по степени карстово-суффозионной опасности, следует обосновать возможность/невозможность использования некоторых критериев, предлагаемых в работе [8], а именно: величины градиента вертикальной фильтрации, данных о физических и физико-механических

свойствах грунтов и приуроченность к доледниковым долинам.

Для определения градиента фильтрации необходимы данные об уровнях карстовых и надкарстовых подземных вод и мощности разделяющего их водоупора. Так как гидрогеологические условия антропогенно-освоенных территорий меняются очень быстро, использование архивных данных весьма проблематично. В пределах исследуемой территории на 2024 г. размещены 5 действующих наблюдательных гидрогеологических скважин (ГПБУ “Мосэкомониторинг”), 3 из них расположены кустом и позволяют наблюдать уровни донского-московского (водовмещающие породы — несвязные отложения $f, lgIds^3 - II ms^4$), подольско-мячковского (водовмещающие породы — карбонатные отложения $C_2pd - mc$) и каширского (водовмещающие поро-

ды — карбонатные отложения C_{2k3}) водоносных горизонтов. Две другие скважины оборудованы для мониторинга донско-московского и алексинско-протвинского (водовмещающие карбонатные отложения C_{1al-pr}) водоносных горизонтов. К сожалению, по данным существующих в настоящий момент наблюдательных скважин районирование территории по величине градиента вертикальной фильтрации не представляется возможным.

Согласно п. 6.1.7. СП 47.13330.2016, срок давности данных о физических и физико-механических свойствах грунтов на застроенных территориях составляет 2 года, что также делает невозможным их использование при районировании.

Приуроченность к доледниковым долинам на участке исследования следует определять не по положению их тальвега, а по расположению долин в плане, однако такие долины опасны меньшими (или нулевыми) значениями мощности юрских отложений, что учитывается при построении карты мощности связных отложений, залегающих над первым от поверхности закарстованным горизонтом.

Таким образом, основным (достоверным) параметром при районировании территории Москвы по степени карстово-суффозионной опасности, как уже говорилось выше, является мощность глинистых отложений, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений. Это связано, в первую очередь, с их экранирующей функцией: они затрудняют доступ поверхностных вод (часто агрессивных к карбонату кальция) к известнякам каменноугольной системы и препятствуют развитию суффозии [7]. По этим причинам повышенная мощность экранирующих отложений может служить препятствием для образования провала, воронки или мульды оседания. Несомненным преимуществом является доступность получения этой информации при бурении. Поэтому, вслед за ведущими работами, в качестве основного параметра для районирования территории авторы использовали мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка.

Авторами настоящего исследования была построена карта мощности экранирующих глинистых отложений (рис. 6). При ее построении вслед за авторами Карты [9], учитывалась общая мощность связных грунтов, залегающих над первым от поверхности слоем карбонатных отложений. Мощность экранирующих глинистых отложений определялась путем суммирования мощностей разновозрастных связных отложений. Суммирование проводилось от кровли карбонатных отложений до подошвы первого встреченного в разрезе слоя несвязных грунтов. При построении карты

использовались данные 448 скважин, расположенных в границах изучаемой территории.

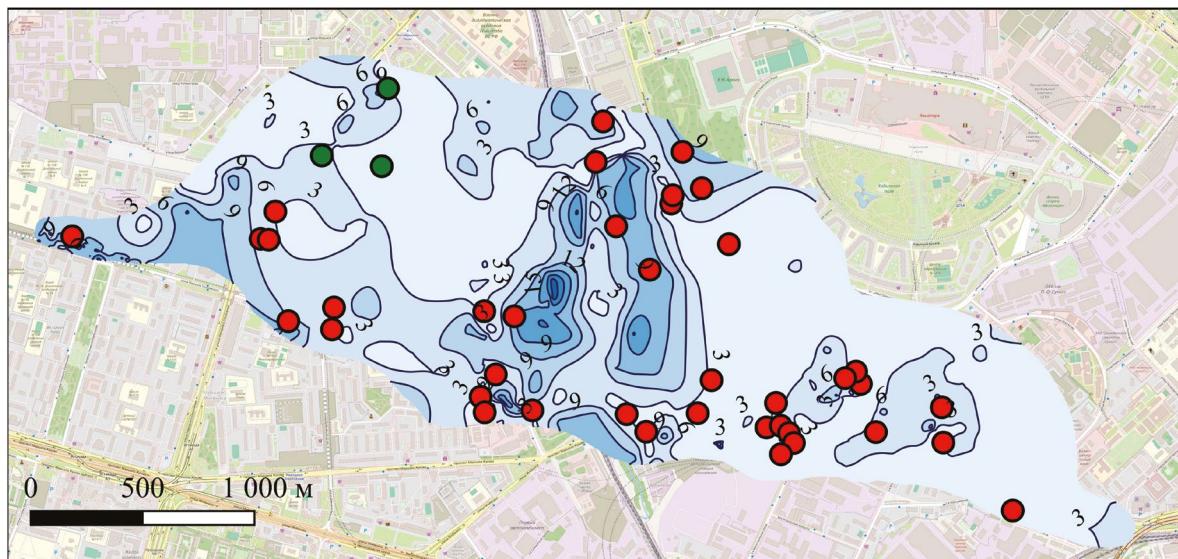
В пределах исследуемого участка [9] общая мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка), изменяется от 0 до 19 м. Экранирующие глинистые отложения отсутствуют на 0.59 км² территории, что составляет 11.9% его площади.

На основе представленной карты (см. рис. 6) было проведено районирование территории по мощности экранирующих глинистых отложений с использованием двух наборов граничных значений (рис. 7). При смещении границы, отделяющей участки опасной категории от участков потенциально опасной категории, с изопахиты 3 до 5 м площадь участка, который можно определить как опасный, увеличивается на 1.19 км² (24.1%), а площадь неопасного участка при смещении изопахиты районирования, отделяющей неопасную категорию от потенциально опасной, с 10 до 12 м уменьшается на 0.21 км² (4.3%) (табл. 1).

С помощью геоинформационной системы было автоматически извлечено значение мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт (см. рис. 6), в местах известных провалов. Из 42 провалов два образовались на участках с мощностью экранирующих глинистых отложений $10 < h < 12$ м. Поэтому в дальнейшем при районировании границей между потенциально опасной и безопасной категориями была выбрана изопахита экранирующих глинистых отложений 12 м. В качестве значения мощности экранирующих глинистых отложений, являющегося границей между опасной и потенциально опасной категориями, авторы данного исследования использовали мощность 3 м, придерживаясь работы [8].

Таким образом, первым параметром районирования территории по степени карстово-суффозионной опасности авторы настоящей статьи использовали мощность глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт. К опасной территории предлагается относить участки с мощностью экранирующих глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, менее 3 м, к потенциально опасным — 3–12 м, к неопасным — территории с мощностью экранирующих глинистых отложений более 12 м (рис. 8а).

Учитывая, что за последние 25 лет на данной территории не зарегистрировано ни одного понижения земной поверхности природного генезиса, так как откачки подземных вод стали более умеренными и не привели к понижениям их уровней до отметок второй половины XX в., авторы сделали вывод о весьма низкой вероятности образования новых поверхностных проявлений карстово-



Условные обозначения

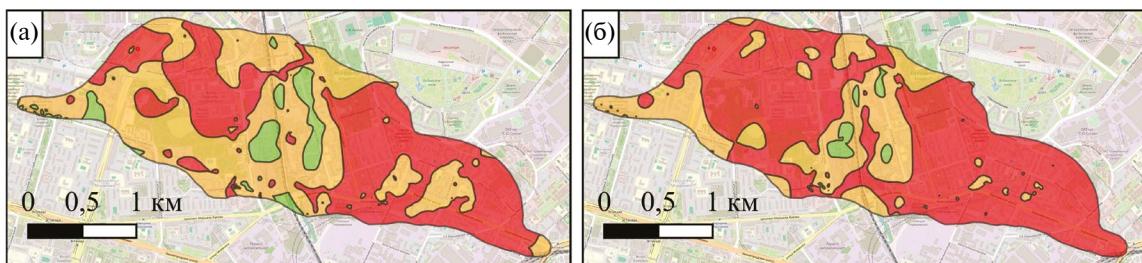
Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка, м:

от 0 до 3	от 6 до 9	от 12 до 15	от 18 до 21
от 3 до 6	от 9 до 12	от 15 до 18	более 18

Понижения земной поверхности:

- Красный круг: карстово-суффозионные воронки, провалы и мульды оседания.
- Зеленый круг: неопределенного генезиса.
- Черная линия: изопахиты.

Рис. 6. Карта мощности экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка).



Условные обозначения

— изопахиты

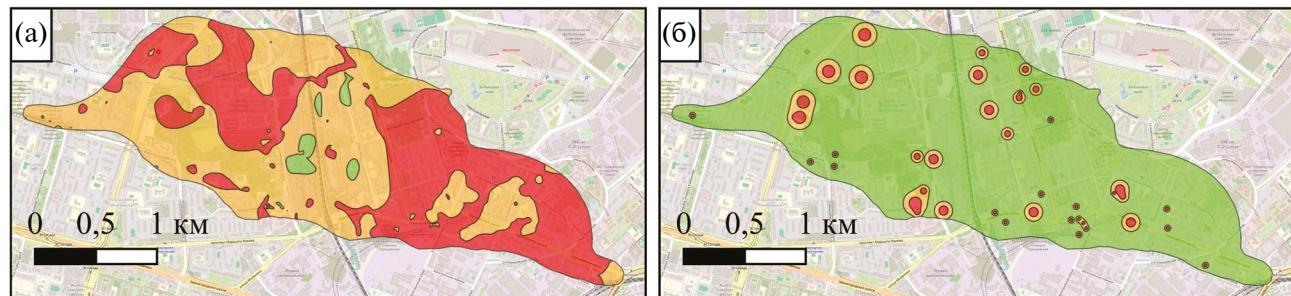
Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой известняка, м:

менее 3	менее 5
от 3 до 10	от 5 до 12
10 и более	12 и более

Рис. 7. Карты районирования территории по мощности глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности слой карбонатных отложений (известняка), по изопахитам: а – 3 и 10 м, б – 5 и 12 м.

Таблица 1. Площадь участков при районировании территории по мощности глинистых отложений по изопахитам 3 и 10 м и 5 и 12 м

Мощность экранирующих глинистых отложений, м	Площадь, км ²	Мощность экранирующих глинистых отложений, м	Площадь, км ²
<3	2.28	<5	3.47
от 3 до 10	2.35	от 5 до 12	1.37
>10	0.30	12 и более	0.09



Условные обозначения

Мощность экранирующих глинистых отложений, перекрывающих первый от поверхности закарстованный горизонт, м:



Удаленность от ближайшей карстово-суффозионной воронки, провала или мульды оседания:



Рис. 8. Карта районирования территории: а – по изопахитам глинистых отложений 3 и 12 м, б – по удаленности от ближайшего поверхностного проявления карстово-суффозионного процесса.

суффозионного процесса в условиях сохранения уровней подземных вод на современных отметках.

Однако возможность повторной активизации проявлений во второй половине XX в. и образования на небольшом удалении от них новых проявлений при незначительном изменении гидрогеологического режима исключать не стоит. Полое пространство растворимых пород в процессе провалообразования заполняется частицами вышележащих грунтов, но предположить полную кольматацию всех трещин карбонатных отложений можно только в случае прекращения провалообразования по естественным причинам.

В Москве же провалообразование активизировалось по причине сильного антропогенного понижения уровня подземных вод и остановилось после прекращения бесконтрольных откачек. Поэтому быть уверенными, что пустоты в карбонатных отложениях в зоне выноса материала заполнились

полностью в прошлом веке и остались заполненными до сегодняшнего дня, нельзя. Нельзя однозначно утверждать, что увеличение градиента вертикальной фильтрации не приведет к продолжению выноса несвязанных грунтов в трещины и полости карбонатных отложений на участках уже известных проявлений. Так как осуществляющие строительство компании не передают информацию об объемах откачек ни в одну государственную организацию, осуществляющую гидрогеологический мониторинг на территории города, отслеживать изменение величины градиента вертикальной фильтрации не представляется возможным. Исходя из этого, использование градиента вертикальной фильтрации для своевременного определения опасных и потенциально опасных участков авторы считают неприемлемым.

Комплексом инженерно-геологических методов изучено всего 14 проявлений. И все прове-

денные на сегодняшний день многочисленные исследования по определению причин активизации провалообразования не смогли ответить на основные вопросы: «Почему провалы образовались именно на этих местах? Почему при идентичных условиях на двух участках, провал образовался только на одном из них?». Поэтому утверждать, что карстово-суффозионный процесс на территории города полностью изучен и понятен, тоже нельзя.

Из всего вышесказанного напрашивается вывод: есть какой-то фактор провалообразования, который на существующем этапе исследования установить не удалось. Так как геологическая среда неоднородна и в плане, и в разрезе, и, допуская, что места образования всех известных проявлений являются областями с наличием какого-то определенного, достоверно неустановленного набора характеристик этой среды, авторы выдвигают предположение, что при изменении существующей гидрогеологической обстановки участки известных проявлений и наиболее приближенные к ним территории с наибольшей вероятностью могут подвергнуться процессу провалообразования.

Этот довод, в совокупности с невозможностью оценки величины градиента вертикальной фильтрации и использования физических и механических свойств четвертичных и юрских отложений при районировании территории по степени карстово-суффозионной опасности, наводит на мысль о **допустимости использования метода районирования по удаленности от ближайшего известного поверхностного проявления**.

Основоположник метода районирования территории по удаленности от поверхностных проявлений карста — И.А. Саваренский [18]. Суть метода заключается в построении карт изолиний равной удаленности от известных поверхностных проявлений. И.А. Саваренский в работе [17] отмечал, что поверхностные карстовые формы локализуются в пределах некоторых областей (карстовых полей) и число их проявлений на единицу площади уменьшается по мере увеличения удаленности от известных форм, следовательно, уменьшается и степень опасности. Опираясь на его труды, ряд авторов выполнил прогнозирование устойчивости закарстованных территорий по удаленности от карстовых проявлений [19]. Метод зонирования территории по мере удаленности от карстовых форм был включен во вторую часть СП 11-105-97. Метод удаленности от ближайшего карстового проявления позволяет установить степень подверженности района образованию поверхностных проявлений, и он активно используется вместе с другими методами и методиками оценки опасности [5, 6].

В зависимости от масштаба карты и поставленных задач отсчет расстояния можно вести как

от центра проявления, так и от его края. Если воронка в масштабе карты отображена площадным знаком (размер воронки отображается в масштабе карты), то И.А. Саваренский предлагает строить изолинии удаленности от краев проявлений. Масштаб картирования в данном исследовании составляет 1 : 5 000, диаметры проявлений карстово-суффозионного генезиса изменяются от 1.5 до 53 м (на карте 0.3–10.6 мм), их средний диаметр составляет 12 м (на карте 3.0 мм), поэтому районирование территории по удаленности проведено авторами от центра проявлений. Круглую форму в плане имеют 27 из 39 проявлений карстово-суффозионного происхождения. Диаметр изометрических понижений изменяется от 1.5 до 53 м (в среднем 10.47 м). Отношения длины к ширине у овальных проявлений изменяется от 1.25 до 3.0, самое большое овальное понижение имеет размеры 40 × 25 м, самое маленькое — 4.5 × 3.0 м, для определения граничных значений районирования по удаленности для овальных понижений был взят средний диаметр (среднее арифметическое между длиной и шириной проявления).

Для определения внешней границы опасной категории, отделяющей ее от потенциально опасной, авторы приняли расстояние от центра провала равное $2.5R$ (где R — радиус провала); для отделения территории потенциально опасной от неопасной — $5R$. При наложении кругов одной и той же категории опасности вокруг разных проявлений они объединялись в единый контур. В противном случае территория районируется отдельными окружностями.

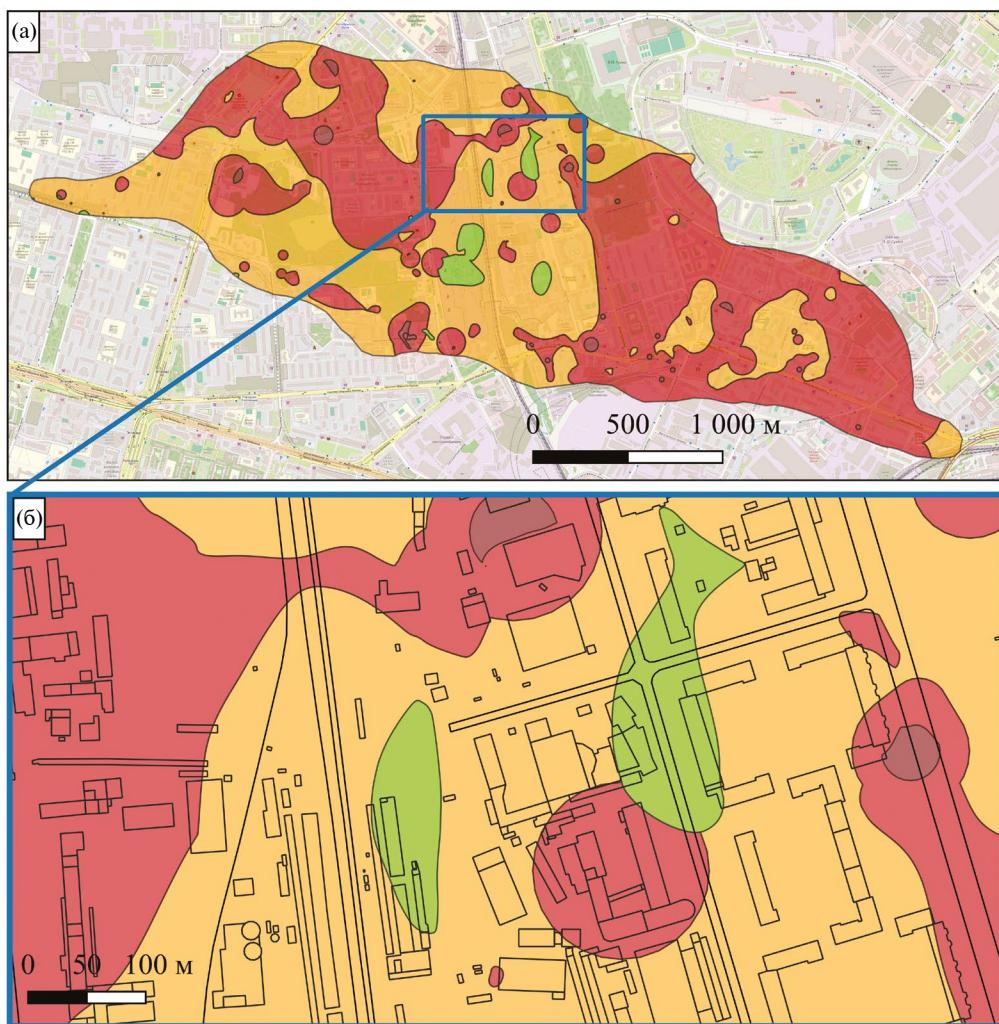
Для технического упрощения проведения районирования проявления в зависимости от диаметра были поделены на 4 группы. Для каждой группы определены расстояния от центров провалов до границ категорий районирования территории по удаленности от ближайшего проявления (табл. 2). Несмотря на то, что генезис 3 понижений не определен, авторы все равно учитывали их при последующем районировании.

Результатом стала карта районирования территории по удаленности от известных поверхностных карстово-суффозионных проявлений (рис. 8б).

На основе карт районирования по мощности экранирующих глинистых отложений и удаленности от ближайшего карстово-суффозионного проявления путем наложения одной карты на другую была построена **результатирующая карта районирования территории по степени карстово-суффозионной опасности** (рис. 9). Каждый участок такой синтетической карты имеет две характеристики: мощность глинистых перекрывающих отложений и удаленность от ближайшего поверхностного карстово-суффозионного проявления. В зависимости от их сочетания участку присваивалась категория опасности в соответствии с табл. 3.

Таблица 2. Границы районирования территории по удаленности от известных поверхностных карстово-суффозионных проявлений

Диаметр провалов, м	Расстояние от центра проявления, определяющее границу:	
	опасного участка, м	потенциально опасного участка, м
<10	12.5	от 12.5 до 25
10–20	25	от 25 до 50
20–30	37.5	от 37.5 до 75
>30	50	от 50 до 100



Условные обозначения

Граница территории, показанной на рис. 9б

Категория по степени карстово-суффозионной опасности:

весьма опасная

потенциально опасная

опасная

неопасная

Рис. 9. Карта районирования участка, ранее полностью отнесенного к опасной категории по степени карстово-суффозионной опасности [9]: а — обзорная, б — фрагмент карты в масштабе 1 : 5 000.

Таблица 3. Районирование территории по степени карстово-суффозионной опасности

Мощность перекрывающих глинистых отложений, м	Расстояние от ближайшего проявления		
	<2.5R	2.5R–5.0R	>5R
<3	весьма опасная	опасная	опасная
от 3 до 12	опасная	опасная	потенциально опасная
>12	опасная	неопасная	неопасная

Выделено 4 категории опасности, и кроме трех общеиспользуемых введена категория “весьма опасная” для участков, наиболее приближенных к местам известных провалов с мощностью экранирующих глинистых отложений <3 м. При этом участками неопасной категории предлагается считать удаленные от провалов на расстояние более $2.5R$ и с мощностью глинистых отложений >12 м.

Авторами построена карта районирования в масштабе 1 : 5 000 по степени карстово-суффозионной опасности участка площадью 4.9 км² на территории Москвы, ранее полностью отнесененного к опасной категории по проявлению современных карстово-суффозионных процессов [9] (см. рис. 9б).

На основе новых данных о геологическом строении территории построена более детальная карта мощности глинистых отложений, перекрывающих закарстованный горизонт, на этом участке. Это позволило точнее провести границу между участками различной категории опасности. В результате введения второго критерия — удаленности от известного карстово-суффозионного поверхностного проявления, авторам удалось учесть при районировании участка и этот параметр, ранее не использовавшийся на территории г. Москва.

ВЫВОДЫ

В пределах области, полностью определяемой в настоящее время как опасная [9], согласно предложенному подходу к районированию, а именно использование двух параметров: мощности глинистых перекрывающих отложений и удаленности от ближайшего поверхностного карстово-суффозионного проявления, были выделены неопасные участки площадью 0.09 км² (1.83%), потенциально опасные — 2.31 км² (46.86%), опасные — 2.50 км² (50.70%) и весьма опасные — 0.03 км² (0.61%). Это позволит снизить объемы проводимых в данном районе инженерно-геологических изысканий за счет понижения категории сложности инженерно-геологических условий территории.

Для более качественного анализа реальной карстово-суффозионной опасности необходимо организовать постоянно действующую сеть

гидрогеологических скважин для регулярных наблюдений за режимом подземных вод (карстовых и надкарстовых водоносных горизонтов). Это позволит установить величину градиента вертикальной фильтрации и использовать данный критерий при районировании. Количество пунктов наблюдения должно обеспечивать возможность построения карт в масштабе хотя бы 1 : 10 000 (согласно таблице 6.1 СП.446.1325800.2019 для III категории сложности инженерно-геологических условий плотность данных для масштаба съемки 1 : 10 000 должна составлять 16 выработок на 1 км²). Таким образом, на исследуемом участке площадью 4.9 км² должно находиться минимум 79 точек наблюдения за уровнями подземных вод. Кроме того, необходимо расширить сеть геодезического мониторинга за осадками зданий и сооружений.

Корреляция данных позволяет сделать верифицированную оценку карстово-суффозионной опасности исследуемой территории.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме № FMWM-2022-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. О роли карстового процесса в образовании карстово-суффозионных воронок // Сергеевские чтения. Развитие научных идей Е.М. Сергеева на современном этапе: юб. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. Е.М. Сергеева. Вып. 16. М.: РУДН, 2014. С. 224–229.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска: монография. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А. О поверхностных проявлениях карста в Москве // Инженерная геология. 2018. № 4–5. С. 74–88.
4. Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н. Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2007. № 6. С. 547–560.
5. Дубянская Г.Н., Ковалева Т.Г., Лихая О.М. и др. Оценка карстоопасности и устойчивости закарстованных урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Сергеевские чтения. Вып. 10. М.: ГЕОС, 2008. С. 129–133.

6. Жильцова В.Ю., Ковалева Т.Г. Значение метода удаленности от ближайшего карстопроявления при карстологической оценке // Карст и пещеры. 2024: сб. матер. Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. Н.Г. Максимовича и др. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 35–40.
7. Иксанова Е.А. Вклад докайнозойского карбонатного карста в развитие современных просадочных процессов в г. Москве [Электронный ресурс]: дис. ... канд. геогр. наук. М: МГУ, 2005. 156 с.
8. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-супфазионных процессов. М.: Картолитография, 1984. 15 с.
9. Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-супфазионных процессов. Масштаб 1 : 10 000. 2-я ред. [Авторы: Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Грибов Е.М., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. и др.]. М.: ГУП "Мосгоргеотрест", ИГЭ РАН, 2012.
10. Кочев А.Д. Зоны доломитизированных известняков и линеаменты как индикаторы повышенной закарствованности карбонатных пород // Инженерная геология. 2022. № 2. С. 28–41.
11. Кочев А.Д. Изучение механизма образования карстово-супфазионных воронок в г. Москве // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: матер. XVI Общерос. научно-практ. конф. М.: ООО "Геомаркетинг", 2021. С. 105–120.
12. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зойонц И.Л. К вопросу инженерно-геологического районирования территории северо-запада г. Москвы по степени опасности развития карстово-супфазионных процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения: матер. докладов научно-практ. конф. М.: ООО "Геомаркетинг", 2017. С. 24–40.
13. Кочев А.Д., Чертков, Л.Г., Зойонц И.Л. Карстово-супфазионные процессы на территории г. Москвы и проблемы оценки их опасности // Инженерная геология. 2018. № 6. С. 24–32.
14. Кочев А.Д., Шумкин Е.А., Скворцов А.Г., Царев А.М., Мамбетов В.С. Опыт комплексного изучения опасного в карстово-супфазионном отношении участка на северо-западе г. Москвы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях: матер. XVI Общерос. научно-практ. конф. М.: ООО "Геомаркетинг", 2023. С. 51–71.
15. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарствованных территорий. М.: Наука, 1989. 152 с.
16. Москва: геология и город / Гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. М.: АО "Московские учебники и картолитография", 1997. 400 с.
17. Саваренский И.А. Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве: сб. науч. тр. М.: Наука, 1990. С. 108–118.
18. Саваренский А.И., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М: ПНИИС, 1995, 167 с.
19. Щербаков С.В., Золотарев Д.Р. Прогнозирование устойчивости закарствованных территорий (на примере г. Кунгур) // Конференция студентов, аспирантов и молодых ученых геологического факультета Пермского государственного университета: матер. конф. Пермь. 2008. С. 164–168.
20. Camila Schuch, Paulo Galvão, Marília Carvalho de Melo, Simone Pereira. Overexploitation Assessment in an Urban Karst Aquifer: the case of Sete Lagoas (MG), Brazil // Environmental Research. 2023. 236(4):116820.
21. Chunmeng Mo, Shenglin Xin, Fen Huang, et al. Characteristics of Dissolution Changes in Carbonate Rocks and their Influencing Factors in the Maocun Basin, Guilin, China // Water. 2023. 15: 3285.

ZONING THE TERRITORY IN THE NORTHWEST OF MOSCOW ACCORDING TO THE DEGREE OF KARST AND SUFFOSION HAZARD

E. R. Romanova^{a,b,✉}, F. K. Bufeev^{a,c,✉✉}

^aSergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia

^bNational Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse 26, Moscow, 129337 Russia

^cS. Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, ul. Miklukho-Maklaya 23, Moscow, 117997 Russia

[#]E-mail: romanova.elizaveta.r@yandex.ru

^{✉✉}E-mail: fbufeev@mail.ru

The study of karst hazard associated with the suffusion is a very relevant topic for construction sites in Moscow upon performing engineering geological survey and developing means of protecting the territory. According to archival data, a site with an area of 4.9 km² in the north-west of the city belongs to "hazardous" category. Within this area, 42 karst sinkholes were recorded in the 20th century. In the article, the authors analyze the geological conditions of the site based on the study of more than 400 wells. The work attempts to find a connection between the parameters of the geological environment structure and the appearance of sinkholes. A map of the thickness of clay deposits overlying the karst horizon has been compiled. A new approach to zoning the territory according to the degree of karst hazard has been proposed, as a result of which the area of the territory classified as "hazard" is reduced to 2.50 km².

Keywords: karst, karst cavities, sinkhole, karst hazard, zoning according to the degree of karst hazard

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. [On the role of karst process in the formation of karst-suffusion sinkholes] in: [Proc. 16th Sergeev's readings. Development of scientific ideas of E.M. Sergeev at the present stage: anniversary conf. dedicated to the 100th birthday of academician E.M. Sergeev]. Moscow, RUDN Publ., 2014, pp. 224–220. (in Russian)
2. Anikeev, A.V. [Collapses and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2014, 328 p. (in Russian)
3. Anikeev, A.V., Kozlyakova, I.V., Kozhevnikova, I.A. [About the surface manifestations of karst in Moscow]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, no. 4–5, pp. 74–88. (in Russian)
4. Anikeev, A.V., Rogozin, A.L., Seleznev, V.N. [Geological risk assessment at an urban construction site]. *Geoekologiya*, 2007, no. 6, pp. 547–560 (in Russian)
5. Dublyanskaya, G.N., Kovaleva, T.G., Likhaya, O.M. et al. [Assessment of karst hazard and sustainability of karst-prone urbanized territories (by the example of Kungur town)]. *Sergeev readings*, issue 10, Moscow, GEOS Publ., 2008, pp. 129–133. (in Russian)
6. Zhil'tsova, V.Yu., Kovaleva, T.G. [The significance of the method of remoteness from the nearest karst phenomenon in karstological assessment]. In: [Karst and caves — 2024. Proc. All-Russian Sci. and Pract. conference with the International participation]. N.G. Maksimovich et al., Eds. Perm, PGNIU, 2024, pp. 35–40. (in Russian)
7. Iksanova, E.A. [Contribution of the pre-Cenozoic carbonate karst to the development of modern subsidence processes in Moscow]. Cand. Sci. (Geograph.) Diss. Moscow, Moscow State University, 2005, 156 p. (in Russian)
8. [Instructions for the design of buildings and engineering structures in the districts of Moscow with the manifestation of karst-suffusion processes]. Moscow, Kartolitografiya Publ., 1984, 15 p. (in Russian)
9. [Hazard map of ancient karst forms and modern karst-suffusion processes]. Authors: Kutepov, V.M., Anisimova, N.G., Gribov, E.M. et al. Moscow, 2012, 68 p. (in Russian)
10. Kochev, A.D. [Zones of dolomitized limestones and lineaments as indicators of increased karstification of carbonate rocks]. *Inzhenernaya geologiya*, 2022, no. 2, pp. 28–41. (in Russian)
11. Kochev, A.D. [Study of the mechanism of karst-suffusion sinkhole formation in Moscow]. In: [Proc. the XVI All-Russian Sci. and Pract. Conf. "Prospects for the development of engineering survey in construction in the Russian Federation"]. Moscow, 2021, pp. 105–120. (in Russian)
12. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zoyonts, I.L. [On the issue of engineering geological zoning of the territory in the northwest of Moscow according to the degree of karst-suffusion development hazard]. In: [Proc. Sci. Pract. Conf. "Current engineering geological problems and methods for solving them"]. Moscow, Geomarketing Publ., 2017, pp. 24–40. (in Russian)
13. Kochev, A.D., Chertkov, L.G., Zoyonts, I.L. [Karst suffusion processes in the territory of Moscow and the problem of assessing their hazard]. *Inzhenernaya geologiya*, 2018, no. 6, pp. 24–32. (in Russian)
14. Kochev, A.D., Shumkin, E.A., Skvortsov, A.G. et al. [Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering survey]. In: [Proc. the All-Russian Sci. and Pract. Conf. "Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering survey"], Moscow, Geomarketing Publ., 2023, pp. 51–71. (in Russian)
15. Kutepov, V.M., Kozhevnikova, V.N. [Stability of karst areas]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 152 p. (in Russian)
16. [Moscow: geology and the city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moscow, Moskovskie uchebniki i kartolitografiya Publ., 1997, 400 p. (in Russian)
17. Savarenetskii, I.A. [Forecast of the stability of the territory by the method of remoteness from the nearest karst manifestation]. In: [Forecast of changes in engineering geological conditions during construction]. Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 108–118. (in Russian)
18. Savarenetskii, A.I., Mironov, N.A. [Guide to engineering geological survey in areas of karst development]. Moscow, PNIIIS, 1995, 167 p. (in Russian)
19. Shcherbakov, S.V., Zolotarev, D.R. [Prediction of stability of karstified areas (by the example of Kungur town)]. In: [Conf. of students, graduate students and young scientists of the Geological Faculty of Perm State University: materials of the conference]. Perm, 2008. 164–168 p. (in Russian)
20. Camila Schuch, Paulo Galvão, Marília Carvalho de Melo, Simone Pereira. Over exploitation assessment in an urban karst aquifer: the case of SeteLagoas (MG), Brazil. *Environmental Research*, 2023, no. 236(4), paper 116820.
21. Chunmeng Mo, Shenglin Xin, Fen Huang, et al. Characteristics of dissolution changes in carbonate rocks and their influencing factors in the Maocun Basin, Guilin, China. *Water*, 2023, no. 15, paper 3285.