НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 551.435.2
DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.84-94

Количественная оценка суффозионной устойчивости доломитовой муки при карстологическом прогнозе

Михаил Михайлович Уткин[1], Татьяна Александровна Уткина[2]
[1] Гео Палитра; г. Нижний Новгород, Россия;
[2] Горный институт Уральского отделения Российской академии наук — филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В строительстве большое количество объектов возводится в условиях, когда в основании залегают разрушенные до состояния муки карбонатные породы. На конкретном объекте, возводимом в г. Казани, для доломитовой муки детально изложено планирование, подготовка и проведение лабораторного экспериментального испытания, заключающегося в количественной оценке суффозионной устойчивости муки.
Материалы и методы. Изучение суффозионной устойчивости доломитовой муки проводилось на специальном фильтрационно-суффозионном приборе. При планировании и подготовке эксперимента учитывались все основные факторы, влияющие на механическую и химическую суффозию. Для механической — физические и фильтрационные характеристики породы, ее напряженно-деформированное состояние, а также объем зоны-приемника для вынесенных фильтрационным потоком продуктов суффозии (мелких частиц); для химической — химический состав и состояние породы, химический состав и скорость движения воды.
Результаты. Доломитовая мука не подвержена процессу растворения, поэтому она отнесена к элювиальному грунту, а не к карстующейся породе. В части механической суффозионной устойчивости выполнено сравнение результатов аналитических решений и экспериментального испытания, согласно которым в первом случае мука является суффозионной, а во втором — практически несуффозионной (суффозия — неопасной).
Выводы. Площадка строительства отнесена к неопасной категории в карстовом и карстово-суффозионном отношении. При этом не исключена механическая суффозия, не связанная с карстом. Применительно к доломитовой муке рекомендовано вместо скорости растворения породы, регламентируемой действующими нормативными документами, использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость роста суффозионной осадки. В дальнейшем эту величину рекомендовано использовать при прогнозировании размеров суффозионных деформаций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карст, карбонатный карст, доломитовая мука, скорость растворения карстующихся пород, механическая суффозия, химическая суффозия, оценка суффозионной устойчивости грунтов, скорость роста суффозионной осадки

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500052-9) «Процессы рудообразования и гипергенной трансформации эвапоритов Пермского Предуралья».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Уткин М.М., Уткина Т.А.* Количественная оценка суффозионной устойчивости доломитовой муки при карстологическом прогнозе // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 1. С. 84–94. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.84-94

Автор, ответственный за переписку: Михаил Михайлович Уткин, geokarst@mail.ru.

Quantitative assessment of dolomite powder suffusion resistance in karstological prognosis

Mikhail M. Utkin[1], Tatyana A. Utkina[2]
[1] Geo Palitra; Nizhny Novgorod, Russian Federation;
[2] Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In construction, a large number of objects are erected in conditions where the foundation consists of carbonate rocks that are destroyed to the state of powder. The paper provides materials on the planning, preparation and conduct

© М.М. Уткин, Т.А. Уткина, 2025
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

of a laboratory experimental test for dolomite powder lying at the base of a building in the Kazan. The experiment is presented to quantify the suffusion resistance of powder.
Materials and methods. The study of the suffusion resistance of dolomite powder was carried out using a special filtration-suffusion device. When planning and preparing the experiment, all the main factors were simultaneously taken into account. For mechanical suffusion, these are the physical and filtration characteristics of the rock, its stress-strain state (SSS) and also the volume of the receiving zone for the suffusion products carried out by the filtration flow. For chemical suffusion these are the chemical composition and condition of the rock, the chemical composition and speed of water movement.
Results. It was established that dolomite powder is not subject to the dissolution process, therefore it is classified as eluvial soil and not as karst rock. In terms of mechanical suffusion stability, a comparison was made of the results of analytical solutions and experimental tests, according to which in the first case the dolomite powder is suffusion, and in the second — practically non-suffusion.
Conclusions. The construction site is classified as non-hazardous in terms of karst and karst-suffusion. At the same time, mechanical suffusion not related to karst cannot be excluded. When assessing the suffusion resistance of dolomite powder, it is recommended to use the rate of mechanical or complex (chemical-mechanical) suffusion instead of the rate of rock dissolution. In the future it is recommended to use the obtained value when predicting the size of suffusion deformations.

KEYWORDS: karst, carbonate karst, dolomite powder, dissolution rate of karst rocks, mechanical suffusion, chemical suffusion, assessment of soil's suffusion stability, growth rate of suffusion subsidence

Acknowledgments. The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (reg. number R&D 124020500052-9) "Processes of ore formation and hypergene transformation of evaporites of the Perm Cis-Urals".

FOR CITATION: Utkin M.M., Utkina T.A. Quantitative assessment of dolomite powder suffusion resistance in karstological prognosis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(1):84-94. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.1.84-94 (rus.).

Corresponding author: Mikhail M. Utkin, geokarst@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемое сегодня увеличение объемов строительства все чаще приводит к освоению территорий с высокими инженерно-геологическими рисками, к которым относятся и участки с развитием карстово-суффозионных процессов в карбонатных породах. Под воздействием физического, химического или смешанного выветривания происходит снижение прочности карбонатного массива, увеличение сжимаемости отложений, а также дезинтеграция исходных пород до обломков песчано-алеврито-глинистой размерности с образованием известняковой и доломитовой муки. При ее наличии в основании капитальных сооружений рекомендуется производить качественную и количественную оценку суффозионной устойчивости, результаты которой напрямую влияют на выбор наиболее оптимальных проектных решений.

В инженерно-геологическом отношении доломиты (в том числе доломитовая мука), согласно действующим нормативным документам, могут быть отнесены как к карстующимся породам, подверженным процессу растворения[1], так и элювиальным грунтам, в которых основная роль принадлежит механической суффозии[2]. Причем в первом случае не исключается проявление процессов суффозионного выноса под воздействием напорной фильтрации, а во втором — растворения. Таким образом, объективное отнесение доломитовой муки к карстующейся породе или элювиальному грунту может быть выполнено только после количественной оценки химической и механической суффозионной устойчивости.

Изучению карстово-суффозионных процессов в доломитовых массивах посвящено немало работ. Среди имеющихся публикаций отмечаются два основных направления: изучение закономерностей выветривания под воздействием различных факторов [1–4], учет влияния карстово-суффозионных процессов при проектировании и строительстве [5]. Исследований по количественной оценке карстовой опасности и суффозионной устойчивости существенно меньше [6, 7], однако разнообразие предлагаемых авторами методов говорит об отсутствии единого методологического подхода. Касаемо прогнозирования механической суффозии в РФ наибольшее распространение получили методики, изложенные в Рекомендациях ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева[3, 4, 5] и основанные на учете физических и фильтрацион-

[1] СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М. : Госстрой России, 2003. 88 с.
[2] СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. М. : Госстрой России, 2004. 71 с.
[3] П 12–83 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Л., 1983. 70 с.
[4] П 49–90 (ВНИИГ). Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. Л., 1991. 70 с.
[5] П 56–90 (ВНИИГ). Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений / ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева. СПб., 1992. 108 с.

ных характеристик дисперсных несвязных и слабосвязных пород. Кроме того, для оценки суффозионной опасности предлагается использование моделирования на базе различных программных обеспечений и с помощью построения тематических карт [8–10]. В части карстовой опасности наиболее распространенной является методика И.А. Саваренского, приведенная в Рекомендациях ПНИИИС [11] и послужившая базой нормативного документа[6]. Методика основана на учете плотности поверхностных карстопроявлений и пораженности территории провалами при прогнозировании интенсивности провалообразования.

Ключевые положения по оценке карстовой опасности и мероприятия по противокарстовой защите достаточно подробно изложены в нормативных документах по инженерно-геологическим изысканиям[1] и проектированию[7], тогда как нормативной базы для оценки суффозионной опасности, не связанной с растворением, в настоящее время нет [12]. Однако общие черты рассматриваемых процессов позволяют, по нашему мнению, использовать при оценке механической суффозии некоторые положения нормативов по карсту[1, 7]. Так, прогнозирование размеров ожидаемых карстовых деформаций в карбонатных массивах в основании сооружения или на дневной поверхности осуществляется исходя из вероятных размеров карстовой полости на момент окончания расчетного срока службы сооружения, для оценки которых применяется скорость раство-

[6] СП 11-105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. 2003.

[7] СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83* (с Изменениями № 1–4). М. : ФГБУ «РСТ», 2022. 370 с.; СП 499.1325800.2021. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от карстово-суффозионных процессов. Правила проектирования. М. : Стандартинформ, 2021. 72 с.

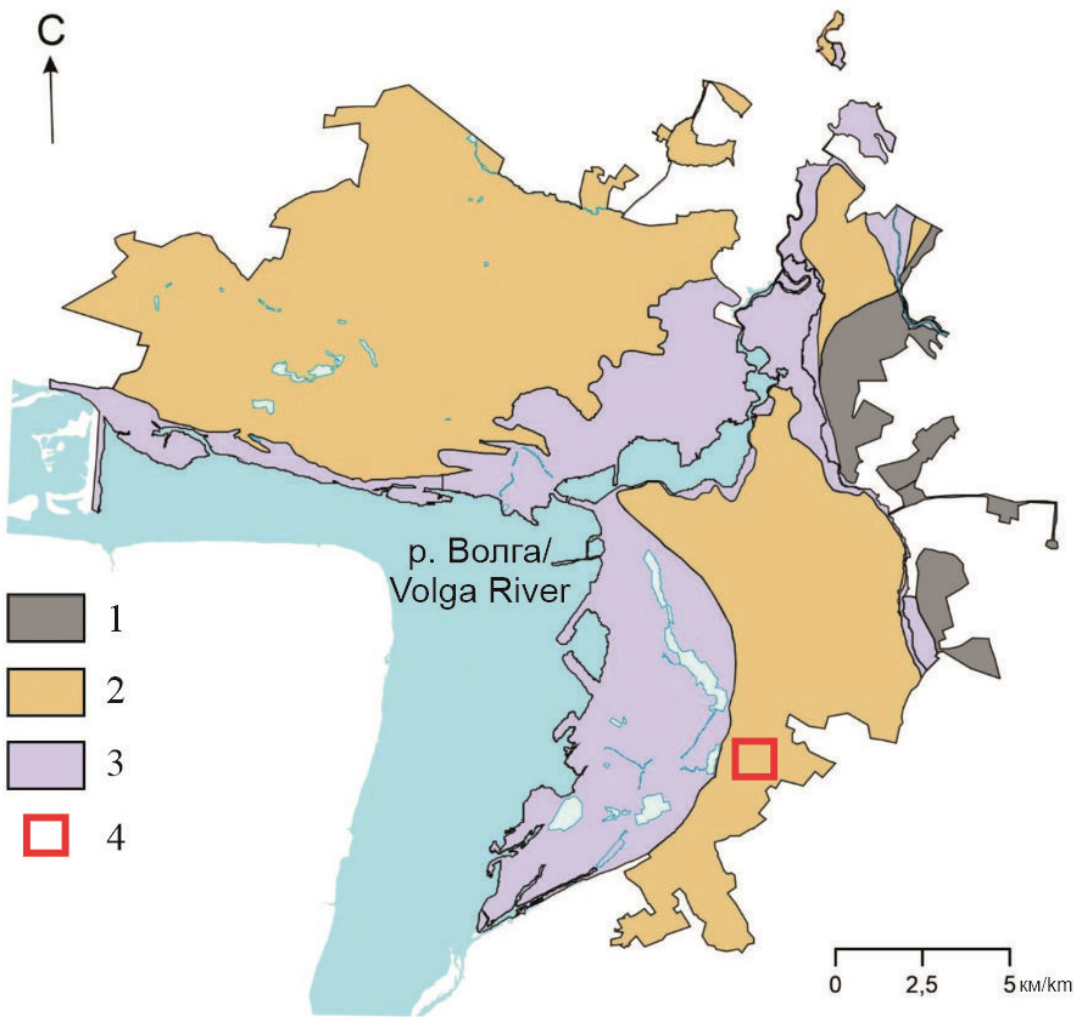

Рис. 1. Карта инженерно-геологических формаций г. Казани (по работе [14], с дополнениями): 1 — коренной берег; 2 — высокие террасы; 3 — низкие террасы; 4 — площадка исследования

Fig. 1. Map of engineering-and-geological formations of Kazan (by [14] with additions): 1 — main bank; 2 — high terraces; 3 — low terraces; 4 — research site

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 1, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 1, 2025

рения карстующихся пород[7]. Для доломитовой муки, которая может выноситься и по суффозионному механизму, предлагается вместо скорости растворения использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость возрастания суффозионной осадки. Ранее этот подход применялся нами при оценке карстовой опасности участка в условиях мелового карста [13].

Для исследования комплексной (химико-механической) суффозионной устойчивости доломитовой муки авторами были отобраны пробы карбонатов, залегающих в основании строящегося 17-этажного жилого дома в центральной части Приволжского района г. Казани.

В геоморфологическом отношении площадка относится к группе высоких террас — одинцовско-московской, лихвинско-днепровской (рис. 1), для которых характерно господство денудации, линейной эрозии, склоновых процессов [14], появление суффозионных просадочных западин[8], а также образование в настоящее время карбонатного элювия [15].

В строении площадки (до глубины проявления возможных карстово-суффозионных процессов) принимают участие отложения сакмарского яруса нижней перми (P_1s), представленные переслаивающимися загипсованными доломитами и гипсами с редкими прослоями песчаников и алевролитов (общая мощность до 80,0–115,0 м). Перекрывающие их казанские (P_2kz) карбонатные породы (мергели, известковистые доломиты и доломитизированные известняки общей мощностью до 60,0 м) характеризуются повышенной трещиноватостью, часто разрушены до дисперсного состояния и нередко представляют собой крайне неоднородные доломитовые суглинки с различной долей гравия и щебня, а также высокой долей (57–99 %) доломитового материала в тонких фракциях [16]. Выше залегают уржумские (P_2ur) отложения (20,0–22,0 м), сложенные чередующимися прослоями глины и суглинков, и неоген-четвертичные пески различной крупности (до 44,0 м) с прослоями супесей и суглинков.

В гидрогеологическом отношении в верхней части разреза выделяется единый гидрогеологический комплекс [17], объединяющий водоносные (и локально водоносные) горизонты четвертичных, плиоценовых, уржумских и казанских отложений: воды безнапорные, преимущественно гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией 0,48–0,58 г/дм^3.

[8] Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Средневолжская серия. Лист N-39-II (Казань). Карта четвертичных образований / сост. ФГУГП «Волгагеология»; авт. М.А. Соловьева и др., ред. В.П. Кириков. М. : ФГУП «ВСЕГЕИ», 2003.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования скорости растворения карстующихся пород, обладающих жесткими структурными связями, существует ряд «классических» методов: обтекание растворителем прямых четырехугольных призм пород [18], прохождение растворителя через отверстие в породах [19, 20][9] и др. Однако для экспериментов с доломитовой мукой они не подходят: отсутствие жестких структурных связей у муки приведет к тому, что под действием растворителя испытуемый образец потеряет свою форму, а пылеватые частицы будут беспрепятственно выноситься потоком растворителя, что в конечном счете приведет к сильно завышенной оценке опасности.

С целью получения достоверных результатов комплексной устойчивости доломитовой муки в процессе эксперимента должны соблюдаться все основные факторы, влияющие на скорость протекания внутренней механической и химической суффозии. Для первой (механической)[3, 4, 5] — это физические и фильтрационные характеристики породы (гранулометрический состав пород и их пористость, скорость движения воды в порах пород), ее напряженно-деформированное состояние (НДС), а также объем зоны-приемника для вынесенных фильтрационным потоком продуктов суффозии (мелких частиц). Для второй (химической) [18–20] — химический состав и состояние пород, химический состав и скорость движения вод.

Исследования физических характеристик карбонатных пород (определение гранулометрического состава и пористости) и химического состава подземных вод проводились в аккредитованной испытательной лаборатории АО «Гео Палитра». Минеральный и химический состав доломитовой муки изучался в Горном институте УрО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20 (оператор Е.П. Чиркова). Сканирование образца происходило на площади 5 × 5 мм.

При лабораторном физическом моделировании гидрогеологических условий среды в качестве растворителя использовалась вода, отобранная из казанского терригенно-карбонатного комплекса в процессе проходки глубокой инженерно-геологической скважины. Кроме того, учитывались два основных параметра, влияющие на фильтрацию: расчетный поперечник поровых каналов d_0 (принят равным диаметру максимального фильтрационного хода d_0^{max}) и скорость движения воды. Первый параметр обычно определяется двумя расчетными способами, а именно, в первом способе учитываются главным образом гранулометрический состав и пористость породы, во втором — ее

[9] Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов / ПНИИИС Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1984. 48 с.

ламинарный коэффициент фильтрации и пористость, а также форма и шероховатость фракций[3, 5]. Для моделирования в эксперименте полученной величины d_0^{max} на испытуемый образец снизу и сверху предложено приложить тканные сетки с необходимым размером ячейки, что позволит предотвратить беспрепятственный вынос суффозионных частиц из образца.

Для моделирования скорости движения воды в порах предусмотрена подача в прибор растворителя (воды) под давлением, которое соответствует напору вод в природном массиве (в нашем случае — в толще казанских терригенно-карбонатных пород). Предполагается, что такой подход является более корректным, нежели использование коэффициента фильтрации, определенного для всей карбонатной толщи.

Моделирование природного НДС испытуемого образца предложено осуществить посредством его нагружения статической сжимающей нагрузкой (в соответствии с положениями ГОСТ 12248.4–2020[10]) до давления, получаемого от собственного веса вышележащей толщи пород (бытовое давление).

Таким образом, при подготовке эксперимента были учтены все основные факторы, влияющие как на механическую, так и химическую суффозию доломитовой муки.

Подготовка эксперимента

Минералого-петрографическое изучение образцов доломитовой муки показало, что они представляют собой агрегат футляровидных ромбоэдров доломита размером 10–15 мкм, интерстиции между которыми заполнены пелитоморфным глинисто-карбонатным материалом (рис. 2, табл. 1). Пересчет на нормативный состав последнего показал, что на долю глинистых минералов приходится в среднем 49,11 %, доломита — 30,70 %, кальцита — 19,99 %, гипса (безводный состав) — 0,20 %.

Исследование гранулометрического состава доломитовой муки показало ее повышенную неоднородность (степень неоднородности, коэффициент неоднородности или разнозернистости $C_u = \eta_x = k_{60,10} =$ = 9,7): на долю фракции 1–0,5 мм приходится 6,30 % частиц; 0,5–0,25 мм — 4,20 %; 0,25–0,10 мм — 3,10 %; 0,10–0,05 мм — 6,90 %; 0,05–0,01 мм — 58,40 %; 0,01–0,002 мм — 14,30 %; менее 0,002 мм — 6,80 %. Согласно ГОСТ 25100[11] доломитовая мука может быть классифицирована как суглинок. Коэффициент пористости составил 0,672.

Полученные физические характеристики доломитовой муки позволили вычислить по нескольким методикам[3, 5] диаметр максимального фильтрационного хода d_0^{max}, наибольшее значение которого составило 0,022 мм. Стоит отметить, что полученный показатель d_0^{max} дает возможность классифицировать изучаемую муку как суффозионную с коэффициентами суффозионности 3,6 и 4,4. Для учета при моделировании значения диаметра d_0^{max} было принято решение использовать в эксперименте тканную сетку с размером ячейки 0,03 мм (выбор данной сетки обу-

[10] ГОСТ 12248.4–2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. М. : Стандартинформ, 2020. 19 с.

[11] ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. М. : Стандартинформ, 2020. 41 с.

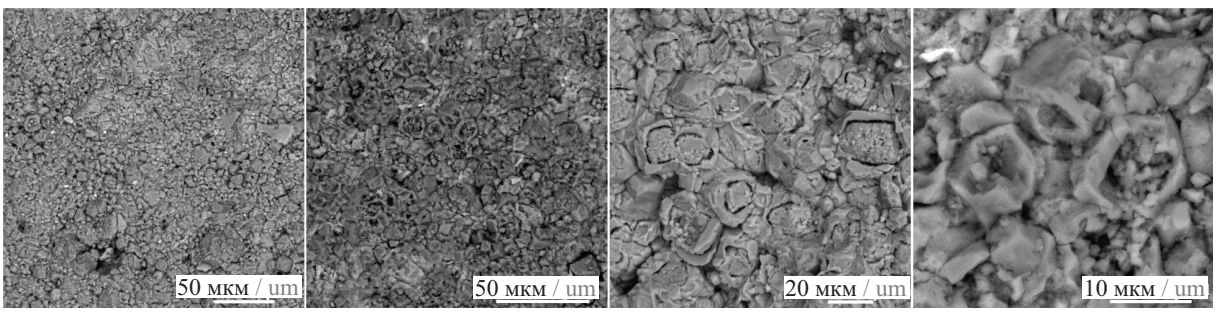

Рис. 2. Доломитовая мука, сложенная футляровидными ромбоэдрами доломита с глинисто-карбонатным заполнителем в интерстициях

Fig. 2. Dolomite powder, composed of dolomite case-shaped rhombohedrons with clay-and-carbonate aggregate in interstices

Табл. 1. Химический состав глинисто-карбонатного заполнителя (n = 65), мас. %

Table 1. Chemical composition of clay-and-carbonate aggregate (n = 65), wt. %

Значение / Value	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	SO_3
Минимум Minimum	0	0	0,73	5,75	0	0	0	0,39	0
Максимум Maximum	1,29	37,99	16,68	98,87	3,40	74,98	0,97	40,82	1,18
Среднее Average	0,46	14,03	9,11	35,27	1,61	30,33	0,23	8,97	0,12

Рис. 3. Испытуемый образец доломитовой муки в режущем кольце

Fig. 3. Test specimen of dolomite powder in the cutting ring

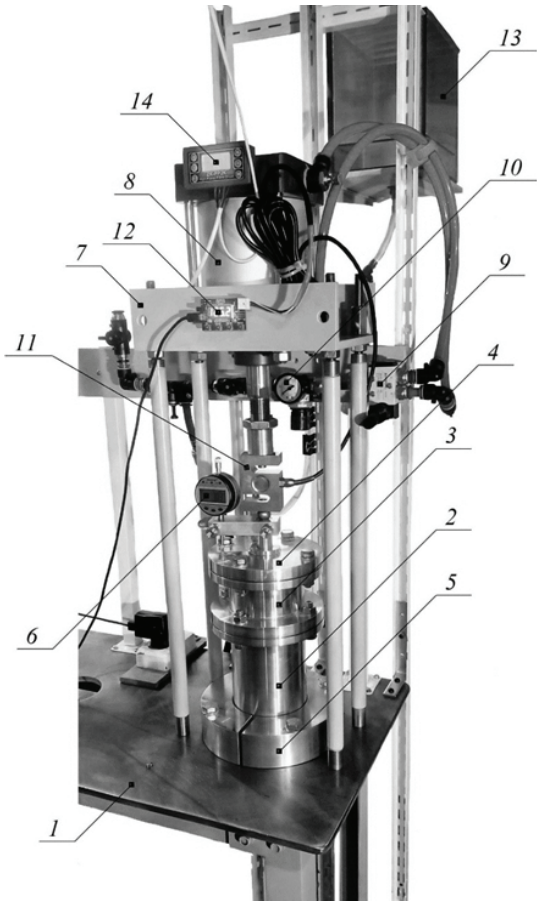

Рис. 4. Общий вид фильтрационно-суффозионного прибора: *1* — основание; *2* — рабочее кольцо, в которое устанавливается режущее кольцо с испытуемым образцом; *3* — дополнительное кольцо; *4* — центрирующее кольцо; *5* — прижимные полукольца; *6* — индикатор часового типа; *7* — упорная рама с ребрами жесткости; *8* — пневматический цилиндр; *9* — переключатель подачи/стравливания давления; *10* — регулятор давления; *11* — датчик силы; *12* — плата вычисления и вывода значения силы; *13* — емкость с растворителем; *14* — регулятор давления растворителя, которое создается специальным насосом и контролируется манометром (расположены с задней стороны прибора)

Fig. 4. General view of the filtration-and-suffusion device: *1* — base; *2* — working ring into which the cutting ring with the test specimen is installed; *3* — additional ring; *4* — centering ring; *5* — clamping half-rings; *6* — dial indicator; *7* — thrust frame with stiffening ribs; *8* — pneumatic cylinder; *9* — pressure supply/bleed switch; *10* — pressure regulator; *11* — force sensor; *12* — board for calculating and outputting the force value; *13* — container with solvent; *14* — solvent pressure regulator, which is created by a special pump and controlled by a pressure gauge (located on the back of the device)

словлен и тем, что материалы с меньшим параметром ячейки в широкой продаже отсутствуют).

На стадии пробоподготовки в монолит доломитовой муки равномерно вдавливалось режущее кольцо (внутренний диаметр и высота — 8 см) (рис. 3). После этого кольцо с отобранным материалом высушивалось для определения (согласно указаниям ГОСТ 5180[12]) первоначальной массы образца в сухом состоянии. Затем на испытуемый образец с обеих сторон прикладывалась тканная сетка, которая снизу фиксировалась перфорированной опорной пластиной, а сверху — перфорированным штампом со штоком. Собранная конструкция помещалась в рабочее кольцо специального фильтрационно-суффозионного прибора, общий вид которого показан на рис. 4. Проектирование и изготовление прибора выполнено М. М. и М.В. Уткиными.

Далее осуществлялось увлажнение испытуемого образца до природной влажности ($W = 20{,}1$ %), полученной в ходе инженерно-геологических изысканий: для этого в рабочее кольцо прибора было вылито 165,5 г растворителя. Чтобы избежать проявления пневмокольматажа (закупорки пор породы воздухом, который может выделяться из протекающей через образец воды) в образце при увлажнении и последующем испытании использовался растворитель комнатной температуры, отстоявшийся в напорном баке намного дольше рекомендуемых одних-двух суток[3, 4].

Через 26 ч после увлажнения образца на рабочее кольцо прибора устанавливалось дополнительное кольцо вместе с центрирующим, а на вертикальный шток — балка для крепления индикатора часового

[12] ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М. : Стандартинформ, 2016. 23 с.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 1, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 1, 2025

типа. После осевого центрирования рабочего кольца оно прижималось к поверхности основания соответствующими полукольцами.

Ступенчатое нагружение испытуемого образца статической сжимающей нагрузкой выполнялось до давления, соответствующего бытовому (1,33 МПа = = 13,5 кг/см^2). Все ступени нагрузки прикладывались равномерно, без ударов. Количество ступеней и значения давления на них, а также время условной стабилизации деформации образца принимались в соответствии с ГОСТ 12248[10]. В течение двух дней нагружения из образца вытекло 38,1 г растворителя. В конце последней ступени нагружения вертикальная деформация (осадка) образца составила 3,76 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Непосредственное проведение эксперимента отсчитывалось с момента подачи растворителя в рабочую камеру прибора. Растворитель подавался под давлением, которое создавалось насосом и измерялось манометром. Однако практически сразу выяснилось, что фактическое давление значительно меньше проектного (3 кг/см^2), в связи с чем было принято решение включить в работу второй насос, расположенный после испытуемого образца. Тем самым внизу образца создавался вакуум, который измерялся вакуумметром.

В целом вышеизложенный подход не привел к искажению общей картины фильтрационно-суффозионных закономерностей и позволил достичь на 8-й день суммарного давления 2,4 кг/см^2. Примечательно, что избыточное давление практически полностью стабилизировалось на 5-й день эксперимента, а вакуум — только на 11-й день (рис. 5). За критерий условной стабилизации принято отсутствие динамики роста давления.

На всем протяжении экспериментального испытания, длившегося 76 дней, измерялась осадка образца (рис. 6), которая к концу опыта составила 4,08 мм.

В начале, середине и конце эксперимента на стандартный химический анализ (результаты приведены

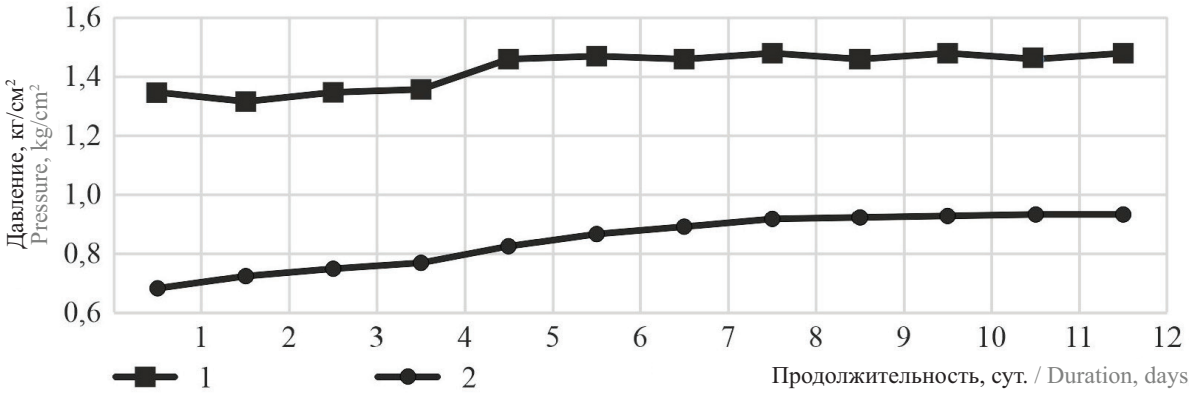

Рис. 5. Изменение избыточного давления (1) и вакуума (2) в фильтрационно-суффозионном приборе

Fig. 5. Changes in excess pressure (1) and vacuum (2) in the filtration-and-suffusion device

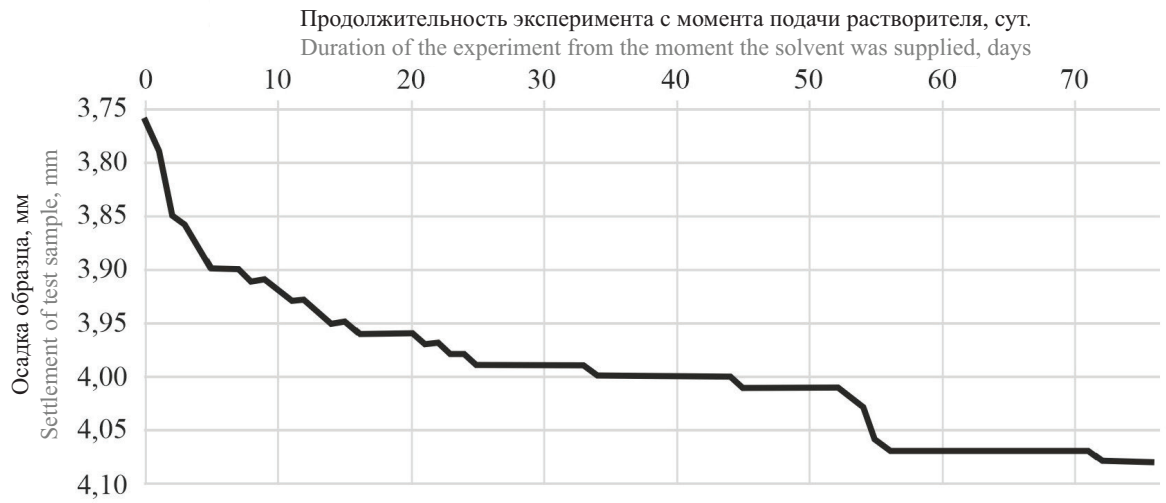

Рис. 6. Изменение осадки испытуемого образца во времени

Fig. 6. Change in the settlement of the test specimen over time

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 1, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 1, 2025

Табл. 2. Результаты стандартных химических анализов растворителя

Table 2. Standard chemical analyzes results of solvent

Номер анализа Analysis number	Условие отбора растворителя Solvent selection condition	Анионы, мг/дм³ Anions, mg/dm³			Катионы, мг/дм³ Cations, mg/dm³			pH	*M*, г/дм³ *M*, g/dm³
		HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$		
В начале-середине эксперимента *At the beginning and middle of the experiment*									
1	До прохождения образца Before passing the specimen	317,0	55,83	60,20	91,78	33,29	18,86	7,9	0,480
2	После прохождения образца After passing the specimen	161,7	64,70	73,02	62,12	18,47	31,74	8,1	0,324
В середине-конце эксперимента *At the middle to the end of the experiment*									
3	До прохождения образца Before passing the specimen	260,9	54,10	38,20	80,16	32,81	0,23	7,7	0,478
4	После прохождения образца After passing the specimen	204,4	58,50	34,80	68,14	27,94	0,46	7,9	0,412

в табл. 2) отбирались пробы растворителя объемом 1,5 л до и после его прохождения через испытуемый образец. За все время опыта через образец в общей сложности протекло 5,66 л растворителя.

После завершения эксперимента, регистрируемого с момента отключения насосов, испытуемый образец сначала оперативно взвешивался в водонасыщенном состоянии, а после дальнейшего высушивания — в сухом.

В ходе проведения эксперимента расход растворителя, протекающего через испытуемый образец, не являлся постоянным. Так, в начале опыта его значение достигало 0,147 л/сут, а в конце — 0,045 л/сут (среднесуточный расход для всего периода составил 0,074 л/сут). На основании этого, а также учитывая площадь поперечного сечения образца (50,27 см²), средняя скорость движения растворителя, равная коэффициенту фильтрации, составила 0,015 м/сут. Данное значение на несколько порядков меньше полученного в результате полевых опытно-фильтрационных работ (ОФР) — 2,2 м/сут, что, вероятно, связано с особенностями строения карбонатной толщи: на отдельных глубинах отмечались маломощные (до 2,5 м) прослои трещиноватых карбонатов, к которым и приурочены подземные воды.

Произведенный ранее аналитический расчет диаметра максимального фильтрационного хода d_0^{max} позволил классифицировать изучаемую муку как суффозионную с коэффициентами суффозионности 3,6 и 4,4. Дополнительно была посчитана критическая скорость фильтрации (υ_{cr})[5], при которой наступает механическая суффозия испытуемого образца. При плотности частиц муки ρ_s = 2,71 г/см³ и коэффициенте ее фильтрации $k_г$ = 2,2 м/сут величина υ_{cr} составила 1,1 м/сут, что в несколько раз меньше $k_г$, полученного при полевых ОФР. Это соотношение сохраняется и при использовании в расчетах $k_г$ = 0,015 м/сут, полученного экспериментально. Следовательно, мука является суффозионно-неустойчивой.

Согласно гидрохимическим расчетам по методике В.П. Зверева [11], растворитель (воды казанской карбонатной толщи) характеризуется агрессивностью к доломитам (произведение активности ($aCa^{2+} \cdot aMg^{2+} \cdot aCO_3^{2-}$) равно $4{,}76 \cdot 10^{-18}$ и $2{,}05 \cdot 10^{-17}$, а произведение растворимости — $2{,}0 \cdot 10^{-15}$)). Однако результаты взвешивания испытуемого образца в сухом состоянии показали увеличение массы испытуемого образца после эксперимента на 0,57 г, что позволяет говорить, что в процессе фильтрации доломитовая мука сорбирует часть растворенных элементов из растворителя. Данное предположение подтверждается также уменьшением минерализации растворителя после прохождения образца (в начале-середине эксперимента снижалась на 0,156 мг/дм³, а в середине-конце — на 0,066 мг/дм³; среднее уменьшение минерализации составило 0,111 мг/дм³). Анализ химического состава вод показал, что после прохождения доломитовой муки в растворителе увеличилось содержание таких компонентов, как $Na^+ + K^+$ (на 68,29 % в начале-середине эксперимента и 100 % в середине-конце), Cl^- (15,89 и 8,13 % соответственно) и SO_4^{2-} (на 21,30 % увеличилось в первом случае и на 8,91 % уменьшилось во втором), и уменьшилось — Ca^{2+} (32,32 и 15,00 %), Mg^{2+} (44,52 и 14,84 %) и HCO_3^- (48,99 и 21,66 %). Полученные данные свидетельствуют, что при фильтрации выносятся только акцессорные элементы ($Na^+ + K^+$, Cl^-, SO_4^{2-}), связанные преимущественно с глинистым материалом, тогда как основные породообразующие Ca^{2+}, Mg^{2+} и HCO_3^- сорбируются мукой. Полученные выводы подтверждаются и особенностями строения доломитовой муки: тонкодисперсное состояние делает ее реакционноспособной к фильтрующимся подземным водам, за счет чего происходит сорбция растворенных Ca^{2+}, Mg^{2+} и HCO_3^- и регенерация карбонатных частиц с образованием футляровидных кристаллов доломита.

Таким образом, полученные экспериментальные данные позволяют отнести изученную нами доломи-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 20. Выпуск 1, 2025
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 20. Issue 1, 2025

товую муку к элювиальным грунтам с отсутствием карстовой и карстово-суффозионной опасности[1, 7] и включить в состав покровной толщи. Пылевато-глинистое строение и низкий коэффициент фильтрации свидетельствуют о флюидоупорных свойствах муки. Вероятно, полученное различие теоретических и экспериментальных результатов по оценке суффозионной устойчивости может быть связано с многогранностью процесса суффозии, что вызывает сложность при учете всех факторов в рамках аналитических методик.

За время проведения экспериментального испытания приращение осадки испытуемого образца составило 0,32 мм из-за его уплотнения в верхней части за счет переноса в нижнюю часть мелких частиц, что, в свою очередь, говорит о зависимости осадки от суффозии. Данное положение позволяет при выполнении оценки суффозионной опасности изучаемой площадки рекомендовать вместо скорости растворения использовать скорость комплексного суффозионного процесса (в данном случае — механической суффозии), под которой понимается скорость роста суффозионной осадки. Согласно результатам эксперимента, ее значение не превысит 0,15 см/год. Впоследствии данную величину рекомендуется учитывать при прогнозировании размеров суффозионных деформаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенного экспериментального испытания представляется возможным сделать следующие практические выводы.

В рассмотренном случае исследуемая доломитовая мука отнесена к элювиальному грунту, нежели к карстующейся породе, так как мука не подвержена процессу растворения. Следовательно, площадка строительства является неопасной в карстовом и карстово-суффозионном отношении.

В части механической суффозионной устойчивости исследуемая доломитовая мука оказалась практически несуффозионной (хотя по аналитическим расчетам она получалась, наоборот, суффозионной), а суффозия неопасной. Сделанный вывод справедлив лишь при неизменности гидрогеологических условий как на площадке строительства, так и на прилегающей к ней территории, в связи с чем при строительстве и эксплуатации проектируемого здания данному обстоятельству должно уделяться повышенное внимание.

При выполнении оценки опасности площадок (участков) применительно к доломитовой муке рекомендуется вместо скорости растворения породы, регламентируемой СП 22.13330.2016, СП 499.1325800.2021, использовать скорость протекания механической или в исключительных случаях комплексной (химико-механической) суффозии, под которой понимается скорость роста суффозионной осадки.

Проведение экспериментальных испытаний доломитовой муки в фильтрационно-суффозионных приборах позволяет более объективно выполнить оценку суффозионной устойчивости муки и, следовательно, оценку суффозионной и карстово-суффозионной опасности территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Bischoff J.L., Julia R., Shanks W.C., Rosenbauer R.J.* Karstification without carbonic acid: Bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization // Geology. 1994. Vol. 22. Issue 11. P. 995. DOI: 10.1130/0091-7613(1994)022<0995:kwcabd>2.3.co;2

2. *Drever J.I., Stillings L.L.* The role of organic acids in mineral weathering // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 1997. Vol. 120. Pp. 167–181. DOI: 10.1016/s0927-7757(96)03720-x

3. *Gabet E.J., Edelman R., Langner H.* Hydrological controls on chemical weathering rates at the soil-bedrock interface // Geology. 2006. Vol. 34. Issue 12. P. 1065. DOI: 10.1130/G23085A.1

4. *Dong X., Cohen M., Martin J.B., McLaughlin D.L., Murray A.B., Ward N.D. et al.* Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape // Chemical Geology. 2019. Vol. 527. P. 118774. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.05.021

5. *Gao J., Chen G., Wang Z., Li L., Mitani Y., Li C. et al.* Numerical modeling of the failure process of the heterogeneous karst rock mass using the DDA–SPH method // Underground Space. 2023. Vol. 13. Pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.015

6. *Jin W., Qiu Z., Zhang D.* Experimental study on the influence evaluation of deep alluvium foundation suffusion on soil skeleton deformation in Luding Hydropower Station foundation // Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2023. Pp. 2–11.

7. *Zhang X., Benamar A., Oueidat M., Luo Y.* Experimental study on suffusion and contact erosion in double-layered alluvial foundation with a cut-off wall // Acta Geotechnica. 2023. Vol. 18. Issue 11. Pp. 6077–6095. DOI: 10.1007/s11440-023-02033-w

8. *Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A.* Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042058. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042058

9. *Строкова Л.А., Леонова А.В.* Оценка суффозионной опасности на территории г. Томска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 5. С. 49–59. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3185. EDN CVPEGR.

10. *Латыпов А.И., Гараева А.Н., Лунева О.В.* Характеристика суффозионной опасности территории Бугульминского плато Бугульминско-Белебеев-

ской возвышенности // Грунтоведение. 2022. № 1 (18). С. 31–42. DOI: 10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42. EDN PTKQCD.

11. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М. : ПНИИИС, 1995. 167 с.

12. *Хоменко В.П.* Противокарстовая и противосуффозионная защита в России: история и современность // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 482–489. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.482-489. EDN XOUHHF.

13. *Уткин М.М., Уткин М.В.* Оценка суффозионной устойчивости меловых пород при их водонасыщении атмосферными осадками // Гидрогеология и карстоведение : межвузов. сб. науч. тр. 2023. С. 119–128. EDN AIDIIZ.

14. *Жаркова Н.И.* Закономерности формирования инженерно-геологических условий г. Казани : дис. … канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2006. 197 с.

15. *Болиховская Н.С.* Эволюция лессово-почвенной формации Северной Евразии. М. : Изд-во Московского университета, 1995. 270 с.

16. *Муравьев Ф.А., Жаркова Н.И., Латыпов А.И.* Карбонатный элювий на территории г. Казани // Инженерная геология. 2013. № 4. С. 34–42. EDN RMUAUZ.

17. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия города Казани / науч. ред. Шевелев А.А. Казань : Изд-во Казанского университета, 2012. 236 с.

18. *Родионов Н.В.* Инженерно-геологические исследования в карстовых районах при устройстве малых водоемов, гражданском и промышленном строительстве : методические указания. М. : Госгеолтехиздат, 1958. 183 с.

19. *Науменко В.Г.* Лабораторные исследования выщелачиваемости гипса // Научные труды Ленинградского инженерно-строительного института. Вып. 18. Вопросы механики грунтов. 1954. С. 143–158.

20. *Уткин М.М., Уткин М.В.* Практический опыт определения скорости растворения карстующихся пород в лабораторных условиях на одном из этапов скоростной автомобильной дороги «Казань – Екатеринбург» // Спелеология и спелестология. 2023. № 2. С. 83–88. EDN UOTOKI.

Поступила в редакцию 28 мая 2024 г.
Принята в доработанном виде 28 ноября 2024 г.
Одобрена для публикации 28 ноября 2024 г.

Об авторах: **Михаил Михайлович Уткин** — кандидат технических наук, главный специалист карстологических исследований; **Гео Палитра**; 603000, г. Нижний Новгород, ул. Костина, д. 3, пом. П 53; РИНЦ ID: 857594; ResearcherID: KM-4828-2024; ORCID: 0009-0004-2833-8983; geokarst@mail.ru;

Татьяна Александровна Уткина — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых; **Горный институт Уральского отделения Российской академии наук — филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»)**; 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, д. 78А; РИНЦ ID: 40720; Scopus: 36641978900; ResearcherID: JBB-2684-2023; ORCID: 0009-0007-1700-850X; tatyanaak89@mail.ru.

Вклад авторов:
Уткин М.М. — концепция исследования, проведение эксперимента, обработка материалов, написание статьи.
Уткина Т.А. — научное редактирование текста, обработка материалов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Bischoff J.L., Julia R., Shanks W.C., Rosenbauer R.J. Karstification without carbonic acid: Bedrock dissolution by gypsum-driven dedolomitization. *Geology.* 1994; 22(11):995. DOI: 10.1130/0091-7613(1994)022<0995:kwcabd>2.3.co;2

2. Drever J.I., Stillings L.L. The role of organic acids in mineral weathering. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 1997; 120:167-181. DOI: 10.1016/s0927-7757(96)03720-x

3. Gabet E.J., Edelman R., Langner H. Hydrological controls on chemical weathering rates at the soil-bedrock interface. *Geology.* 2006; 34(12):1065. DOI: 10.1130/G23085A.1

4. Dong X., Cohen M., Martin J.B., McLaughlin D.L., Murray A.B., Ward N.D. et al. Ecohydrologic processes and soil thickness feedbacks control limestone-weathering rates in a karst Landscape. *Chemical Geology.* 2019; 527:118774. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2018.05.021

5. Gao J., Chen G., Wang Z., Li L., Mitani Y., Li C. et al. Numerical modeling of the failure process of the heterogeneous karst rock mass using the DDA–SPH method. *Underground Space.* 2023; 13:1-22. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.02.015

6. Jin W., Qiu Z., Zhang D. Experimental study on the influence evaluation of deep alluvium foundation suffusion on soil skeleton deformation in Luding Hydropower Station foundation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering.* 2023; 2-11.

7. Zhang X., Benamar A., Oueidat M., Luo Y. Experimental study on suffusion and contact erosion in double-layered alluvial foundation with a cut-off wall. *Acta Geotechnica.* 2023; 18(11):6077-6095. DOI: 10.1007/s11440-023-02033-w

8. Latypov A., Zharkova N., Ter-Martirosyan A. Calculation of the stress-strain state of soil massifs with karst-suffusion cavities. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering.* 2018; 365:042058. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042058

9. Strokova L.A., Leonova A.V. Assessment of suffosion hazard on the territory of Tomsk. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. *Geo Assets Engineering.* 2021; 332(5):49-59. DOI: 10.18799/24131830/2021/05/3185. EDN CVPEGR. (rus.).

10. Latypov A.I., Garaeva A.N., Luneva O.V. Characteristics of the suffosion hazard of the territory of the Bugulma plateau of the Bugulma-Belebey upland. *Gruntovedenie.* 2022; 1(18):3-42. DOI: 10.53278/2306-9139-2022-1-18-31-42. EDN PTKQCD. (rus.).

11. Savarensky I.A., Mironov N.A. *Guide to engineering-geological surveys in areas of karst development.* Moscow, PNIIIS, 1995; 167. (rus.).

12. Khomenko V.P. Antikarst and antisuffosion protection in Russia: history and present situation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(4):482-489. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.482-489. EDN XOUHHF. (rus.).

13. Utkin M.M., Utkin M.V. Assessment of suffosion stability of chalky rocks when their water saturation with atmospheric precipitation. *Hydrogeology and Karstology : interuniversity collection of scientific papers.* 2023; 119-128. EDN AIDIIZ. (rus.).

14. Zharkova N.I. *Patterns of formation of engineering-geological conditions of the city of Kazan : PhD thesis.* Ekaterinburg, 2006; 197. (rus.).

15. Bolikhovskaya N.S. *Evolution of the loess-soil formation of Northern Eurasia.* Moscow, Moscow University Publishing House, 1995; 270. (rus.).

16. Muravyov F.A., Zharkova N.I., Latypov A.I. Carbonate eluvium on the territory of Kazan. *Engineering Geology.* 2013; 4:34-42. EDN RMUAUZ. (rus.).

17. *Hydrogeological and engineering-geological conditions of the city of Kazan* / scientific. ed. Shevelev A.A. Kazan, Kazan University Publishing House, 2012; 236. (rus.).

18. Rodionov N.V. *Engineering-geological research in karst areas during the construction of small reservoirs, civil and industrial construction : methodological instructions.* Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1958; 183. (rus.).

19. Naumenko V.G. Laboratory studies of gypsum leachability. *Scientific works of the Leningrad Engineering and Construction Institute. Vol. 18. Issues of soil mechanics.* 1954; 143-158. (rus.).

20. Utkin M.M., Utkin M.V. Practical experience of determining the dissolution rate of karst rocks in laboratory conditions at one of the sections of "Kazan – Ekaterinburg" high-speed highway. *Speleology and Spelestology.* 2023; 2:83-88. EDN UOTOKI. (rus.).

Received May 28, 2024.
Adopted in revised form on November 28, 2024.
Approved for publication on November 28, 2024.

Bionotes: **Mikhail M. Utkin** — Candidate of Technical Science; chief specialist of karstological research; **Geo Palitra**; P 53 room, 3 Kostina st., Nizhny Novgorod, 603000, Russian Federation; ID RSCI: 857594; ResearcherID: KM-4828-2024; ORCID: 0009-0004-2833-8983; geokarst@mail.ru;

Tatyana A. Utkina — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher at the Laboratory of Geology of Mineral Deposits; **Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is a branch of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences**; 78A Sibirskaya st., Perm, 614007, Russian Federation; ID RSCI: 40720; Scopus: 36641978900; ResearcherID: JBB-2684-2023; ORCID: 0009-0007-1700-850X; tatyanaak89@mail.ru.

Contribution of the authors:
Mikhail M. Utkin — concept of research, article writing, research, illustrations.
Tatyana A. Utkina — scientific text editing, research, illustrations.
The authors declare no conflict of interest.