ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 699.8:551.3 DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.482-489

ПРОТИВОКАРСТОВАЯ И ПРОТИВОСУФФОЗИОННАЯ ЗАЩИТА В РОССИИ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ[1]

В.П. Хоменко

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Предмет исследования: карст и суффозия относятся к экзогенным геологическим процессам, развитие которых обусловлено разрушением горных пород подземными водами. Это опасные для строительства процессы, главная проблема в исследовании которых заключается в их недоступности для прямого визуального наблюдения.
Цели: достижение взаимопонимания между изыскателями и проектировщиками при решении задач, возникающих при строительном освоении территорий, где происходит или ожидается негативное воздействие карста и (или) суффозии на здания и сооружения.
Материалы и методы: метод исторического анализа эффективности технических решений.
Результаты: Россия имеет длительный и богатый опыт применения противокарстовых и противосуффозионных защитных мероприятий, который анализируется в предлагаемой статье с исторических позиций. По мнению автора, успешная реализация этих мероприятий возможна только при тесном сотрудничестве изыскателей-геологов и геотехников-проектировщиков. Систематизированное представление о развитии во времени методов и технических средств, обеспечивающих безаварийную эксплуатацию объектов различных видов строительства при наличии карстовой и (или) суффозионной опасности.
Выводы: в настоящее время наша страна располагает богатым и проверенным временем арсеналом средств защиты зданий и сооружений от карста и суффозии, включающим конструктивные, геотехнические и иные решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карст, суффозия, Россия, инженерная защита, строительство, подземные воды, полости, провалы, инженерная геология, геотехника

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хоменко В.П. Противокарстовая и противосуффозионная защита в России: история и современность // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 4 (115). С. 482–489.

ANTIKARST AND ANTISUFFOSION PROTECTION IN RUSSIA: HISTORY AND PRESENT SITUATION

V.P. Khomenko

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Subject: karst and suffosion are related to exogenous geological processes, the development of which is caused by destruction of rocks by groundwater. These are the processes dangerous for construction, and the main problem in studying these processes lies in their inaccessibility for direct visual observation.
Research objectives: achievement of mutual understanding between prospectors and designers when solving the problems arising from construction-related development of territories where a negative impact of karst and (or) suffosion on buildings and structures is expected.
Materials and methods: the method of historical analysis of efficiency of engineering solutions.
Results: Russia has a long and rich experience in the application of antikarst and antisuffosion protective measures, which is analyzed in the present article from historical positions. In the author's opinion, successful implementation of these measures is possible only with the close cooperation of prospectors-geologists and geotechnical designers. Systematized representation of the evolution of methods and techniques that ensure accident-free operation of objects of various types of construction in the presence of karst and (or) suffosion hazard is given.
Conclusions: currently, our country has a rich and well-proven arsenal of means of protecting buildings and structures from karst and suffosion, including constructive, geotechnical and other measures.

KEY WORDS: carst, suffosion, Russia, engineering protective measures, construction, groundwater, cavities, collapse, engineering geology, geotechnics

FOR CITATION: Khomenko V.P. Protivokarstovaya i protivosuffozionnaya zaschita v Rossii: istoriya i sovremennost' [Antikarst and antisuffosion protection in Russia: history and development]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 4 (115), pp. 482–489.

[1] Статья представляет собой русскоязычную версию заказного доклада, сделанного автором на Международной конференции «Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety» (Engeopro-2011), прошедшей в г. Москве с 6 по 8 сентября 2011 г.

© В.П. Хоменко

ВВЕДЕНИЕ

Карст и суффозия[2] представляют собой опасные для строительства экзогенные геологические процессы, широко распространенные на территории нашей страны. В последнем десятилетии прошлого века негативные последствия развития карста отмечались в 301, а суффозии — в 958 российских городах [1]. Зачастую эти последствия принимают вид деформаций (рис. 1) и даже катастрофических разрушений (рис. 2) отдельных зданий и сооружений. Иногда в районах развития карста и суффозии возникают серьезные экономические, социальные и экологические проблемы. Согласно некоторым экспертным оценкам [2], эти процессы способны привести к массовым разрушениям на ограниченных площадях, жертвам в количестве до 25 человек и ущербу до 500 млн долл. США.

Для обоих рассматриваемых процессов характерны две общие черты: во-первых, они вызваны разрушающей деятельностью подземных вод, а во-вторых, на начальных стадиях их развитие, как правило, протекает на глубине и скрыто от прямого наблюдения. Именно эти обстоятельства во многом определяют характер противокарстовой и противосуффозионной защиты и специфику используемых при этом технических приемов, многие из которых издавна известны в России.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Несмотря на то, что старые карстовые воронки, возраст которых оценивается в 100 лет и более, встречаются на территории нашей страны достаточно часто, нет достоверных данных, свидетельствующих о вызванных карстом катастрофических разрушениях зданий и сооружений в Российской империи и в предшествовавших ей государственных образованиях. По-видимому, это свидетельствует о продуманном выборе для заселения и хозяйственного освоения территорий и участков, безопасных в отношении возможности проявления карста на земной поверхности.

[2] Применительно к описанию мероприятий противокарстовой и противосуффозионной защиты целесообразно придерживаться определений этих понятий, данных в «СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».



Рис. 1. Вызванные суффозией деформации жилого дома в г. Щелково Московской области (фото В.П. Хоменко, 2002 г.)



Рис. 2. Разрушение карстовым провалом заводского корпуса в г. Дзержинске Нижегородской области (фото В.П. Хоменко, 1992 г.)

В наши дни такой подход к защите от опасных геологических процессов именуется планировочными решениями, для принятия которых требуются специальные карты, построенные на основе инженерно-геологической съемки и прогнозирования. На чем основывался этот подход при отсутствии столь мощного современного инструментария и даже до появления геологии как самостоятельной ветви естествознания — неизвестно. На рис. 3 можно видеть, как старая деревня Пивоварово пересекает «цепочку» карстовых форм в месте ее разрыва, а свежие провалы возникают на значительном удалении не только от старых, но и от современных границ застройки.

Однако даже при стопроцентной обоснованности планировочных решений как метода противокарстовой защиты они требуют для своей реализации резерва свободных земель. К концу XIX в. в связи с заметной активизацией хозяйственной деятельности этот резерв начал сокращаться даже в России. Например, в Казани связанные с карстом деформации здания Александровского пассажа, строившегося с 1874 по 1883 г., проявились уже в 1890 г., а полное обрушение части здания произошло в 1977 г. [3].

Любопытно отметить, что в течение последних 20 лет существования Российской империи возможность противокарстовой защиты намного пессимистичнее оценивалась в области железнодорожного, чем в области гражданского строительства. Если в конце XIX в. комиссия, созданная при Министерстве путей сообщения специально для решения этой проблемы, пришла к выводу о невозможности противодействия карстовым разрушениям и их прогнозирования [4], то уже в начале XX в. началось использование конструктивной противокарстовой защиты отдельных зданий. Так, уже в 1905 г. в Новочеркасске был построен знаменитый Вознесенский войсковой кафедральный собор, защищенный от карстовых провалов фундаментом в виде сплошной плиты с переменной высотой, достигающей 5,4 м [5] (рис. 4).

Что касается суффозии, то до конца 1910-х гг. этот экзогенный геологический процесс воспринимался как опасный только в области горного дела и гидротехнического строительства. Традиционно используемые здесь способы гидроизоляции одновременно выполняли функции противосуффозионной защиты.

В 1920-х гг. в СССР ситуация радикально изменилась как в области противокарстовой, так и в области противосуффозионной защиты. В связи с начавшимся в стране индустриальным подъемом для этих целей стали использовать новые методы

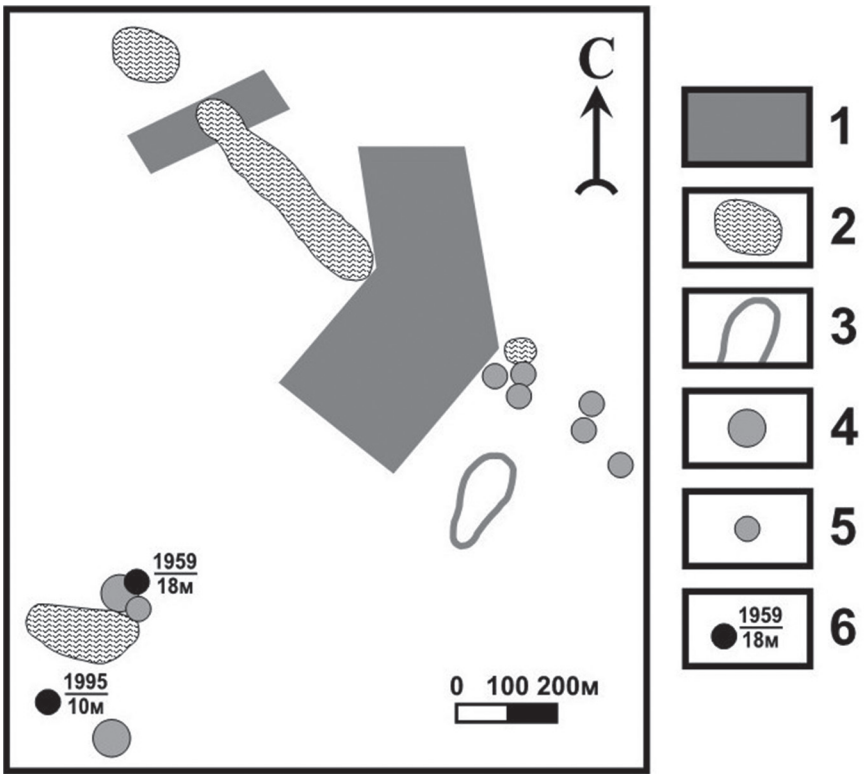


Рис. 3. Расположение деревни Пивоварово Вязниковского района Владимирской области относительно поверхностных карстовых проявлений: *1* — застроенные участки по состоянию на 1966 г.; *2* — карстовые озера; *3* — карстовая котловина; *4* — старые карстовые воронки диаметром от 25 до 100 м; *5* — то же диаметром от 5 до 25 м; *6* — свежие карстовые провалы с указанием года образования и диаметра (знаки с *4* по *6* имеют внемасштабный характер)

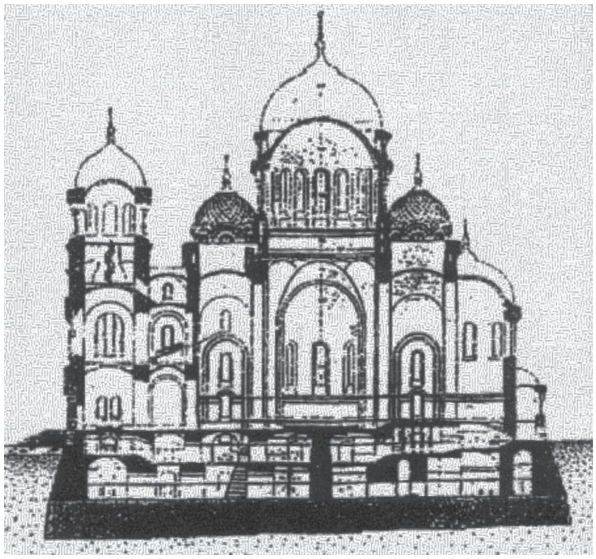


Рис. 4. Конструкция здания Вознесенского кафедрального собора в г. Новочеркасске Ростовской области с противокарстовой фундаментной частью

и технические средства, а традиционные подходы начали применять с большей эффективностью. В частности, впервые в истории нашей страны при завершившемся в 1926 г. строительстве Волховской ГЭС была осуществлена цементация закарстованных известняков в основании и боковых примыканиях бетонной плотины [6]. В этот период в районах развития карста и суффозии происходило значительное расширение существующих урбанизированных территорий и появлялись новые индустриальные города. Показательна в этом отношении история города Дзержинска, который был основан в 1930 г. вблизи Нижнего Новгорода, в районе интенсивного карстового провалообразования [7]. В ранее существовавших здесь населенных пунктах связанные с карстом деформации зданий и сооружений отмечались, начиная с 1925 г., а уже в 1928 г. для дальнейшего строительства были рекомендованы специальные защитные конструкции зданий и закрепление грунтов.

В течение последующих десятилетий XX в. многие индустриальные объекты (главным образом объекты гидротехнического строительства) были защищены от карста и суффозии, но проектирование этих мероприятий не имело типового характера. Ситуация начала меняться только в 1967 г., когда был выпущен первый методический документ[3], регламентирующий строительство зданий и сооружений в карстоопасных районах. В 1980-х гг. дело продвинулось еще дальше и целая серия методических документов, касающаяся различных аспектов противокарстовой и противосуффозионной защиты, была разработана сотрудниками организаций, подведомственных Госстрою СССР.

В начале XXI в. в России появились строительные нормы федерального уровня, содержащие необходимые требования к осуществлению инженерной защиты различных хозяйственных объектов от опасных для строительства экзогенных геологических процессов[4], в том числе к противокарстовой защите. Наряду с этим в Нижегородской области, Республике Башкортостан и Пермском крае были созданы региональные нормативные документы, касающиеся применения в этих субъектах Российской Федерации противокарстовых защитных мероприятий. При этом следует отметить, что инструктивный документ аналогичного содержания[5] действует в Москве еще с 1984 г.

СУЩЕСТВУЮЩЕЕ ПОЛОЖЕНИЕ

В наши дни в России используется богатый арсенал методов и технических средств инженерной защиты от карста и суффозии. При сравнении существующих классификаций противокарстовых [8] и противосуффозионных [9] мероприятий нетрудно заметить, что они во многом совпадают. Это неудивительно, поскольку оба процесса чаще всего бывают вызваны одними и теми же причинами, а в результате их развития формируются сходные поверхностные и подземные проявления (оседания, провалы, полости и др.).

Прежде всего, в этом ряду следует упомянуть планировочные мероприятия, в основу которых положен принцип «бегства» от опасных для строительства геологических процессов, в том числе от карста и суффозии, точнее от их определенных проявлений. Реализуется этот принцип путем оптимального размещения проектируемых зданий и сооружений на местности, рационального выбора их формы в плане и регулирования плотности застройки. В отличие от прошлых времен сейчас основой планировочных мероприятий всегда служит инженерно-геологическая (чаще всего прогнозная) карта.

Весьма надежны, но в то же время и дороги конструктивные защитные мероприятия. Их смысл заключается в применении особых конструкций зданий и сооружений (главным образом, их фундаментной части), которые обеспечивают их надежную эксплуатацию даже в случае образования под ними карстовых и суффозионных проявлений, например провалов. Для этой цели используют и свайные фундаменты, но по-настоящему надежны они бывают только при полной проходке зон активного

[3] Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР.

[4] СНиП 22-02–2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов.

[5] Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов.

развития карста и суффозии с опиранием концов свай на нижележащие устойчивые породы. В случае применения висячих свай им стараются придать возможность свободного выпадения из ростверка.

Очень эффективной защитной мерой может служить контроль развития карста и суффозии. Он включает в себя организацию стационарных наблюдений: 1) за состоянием грунтов в основании зданий и сооружений; 2) за режимом подземных вод; 3) за изменениями отметок земной поверхности, в том числе на склонах; 4) за напряжениями и деформациями в конструктивных элементах зданий и сооружений. В последнее время для этих целей успешно применяются геофизические методы. В некоторых случаях при эксплуатации железных дорог и особо ответственных объектов других видов строительства целесообразно включать в состав контролирующих противокарстовых и противосуффозионных мероприятий аварийные сигнальные системы.

Планировочные, конструктивные и контролирующие мероприятия имеют пассивный характер, однако наряду с ними в Российской Федерации в наше время широко применяются и активные способы противокарстовой и противосуффозионной защиты. К ним относятся такие превентивные меры, используемые в предпостроечный период, как промывка засоленных грунтов, экскавация суффозионно-неустойчивых пород, а также гидроизоляция искусственных водотоков и водоемов, подземных резервуаров и водонесущих коммуникаций. В оперативном порядке обычно осуществляется такие активные защитные мероприятия, которые позволяют управлять развитием карстовых и суффозионных процессов, что обычно достигается подачей воды в карстующиеся или суффозионно неустойчивые породы или ее отбором из этих пород, в том числе с помощью дренажа.

Особое место среди активных мероприятий по защите от карста и суффозии занимают приемы (в состав которых входят и геотехнические решения), реализующие принцип создания препятствий на пути развития данных процессов. Для этого необходимо сделать, по крайней мере, одно из трех: 1) предохранить карстующиеся и суффозионно неустойчивые породы от проникновения в них воды; 2) ликвидировать возможность суффозионного выноса грунтов в трещины, полости или на земную поверхность; 3) повысить сопротивление горных пород по отношению к карсту, суффозии и вызванным ими подвижкам грунтов. Первая задача решается отводом поверхностного стока, ликвидацией водопоглощающих отверстий, устройством водонепроницаемых покрытий и противофильтрационных завес. Для решения второй задачи применяют тампонаж трещин и полостей, гидроизоляцию подземных горных выработок и крупных естественных полостей, каптаж источников подземных вод или их рассредоточение при разгрузке с помощью фильтрующих покрытий, а также планировку рельефа земной поверхности. Решение третьей задачи достигается путем искусственного улучшения свойств горных пород различными способами, применяемыми в российской строительной практике.

Рассматривая историю противокарстовой и противосуффозионной защиты в России на протяжении XX и XXI вв., следует обратить внимание на характер эволюционного развития методов и технических средств, используемых для этих целей. В последние десятилетия здесь наиболее отчетливо прослеживаются три тенденции. Во-первых, однотипные защитные мероприятия все чаще уступают место комплексным. Например, в г. Уфе накоплен большой опыт одновременного использования водозащитных, конструктивных, геотехнических и эксплуатационных противокарстовых мероприятий при строительстве отдельных зданий [10], а для защиты оснований зданий от суффозии специалистами из г. Читы было предложено сочетать водонепроницаемые барьеры с дренажом [11]. Во-вторых, с каждым годом все больше совершенствуются способы оперативной противокарстовой и противосуффозионной защиты уже построенных зданий и сооружений. В этом отношении характерны такие оперативные противокарстовые и противосуффозионные меры, как успешно применяемое в Липецкой области усиление оснований аварийных зданий с помощью шпального распределителя [12] и доуплотнение цементационной завесы на действующей Камской ГЭС [13]. В-третьих, заметно возрастает роль активных способов защиты от карста и суффозии, позволяющих не только защищаться от этих процессов, но и воздействовать на них. Ярким примером в этом отношении может служить комплексная система мер по противокарстовой защите газопроводов, функционирующих на территории Пермского края [14], включающая тампонаж полостей и создание водонепроницаемых преград.

Первые две тенденции однозначно связаны с бурным развитием геотехники и ее успешным внедрением в строительную практику, что весьма позитивно затронуло и нашу страну. Последняя тенденция отражает тот факт, что за последние 30–40 лет удалось значительно продвинуться в понимании механизма развития карста и суффозии, а также сопровождающих их геологических процессов. В области осуществляемых для этой цели теоретических и экспериментальных научных исследований российские специалисты не отстают от зарубежных, что в частности можно видеть на примере изучения карстового провалообразования [15, 16] и механической суффозии [17, 18].

ВЫВОДЫ

В целом же, вся история применения в нашей стране (как впрочем, и во всем мире) мероприятий

по защите от карста и суффозии недвусмысленно свидетельствует о чрезвычайной важности гидрогеологического и инженерно-геологического обоснования этих мероприятий, базирующегося на результатах инженерных изысканий. Относительно противокарстовой защиты эта позиция очень четко сформулирована как отечественными [19], так и зарубежными (европейскими и североамериканскими) [20] исследователями. Ошибки, вызванные отсутствием взаимопонимания между проектировщиками и изыскателями, обходятся в этой области инженерной деятельности очень дорого [21].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Рагозин А.Л.* Концепция допустимого риска и строительное освоение территорий развития опасных природных и техноприродных процессов // Проект. 1993. № 5–6. С. 250–253.

2. *Воробьев Ю.Л., Локтионов Н.И., Фалеев М.И. и др.* Катастрофы и человек. Кн. 1: Российский опыт противодействия чрезвычайным ситуациям / под ред. Ю.Л. Воробьева. М. : АСТ-ЛТД, 1997. 256 с.

3. *Мирсаяпов И.Т., Королева И.В.* Влияние карстовых процессов в основании фундаментов на техническое состояние памятника архитектуры здания «Александровский пассаж» в г. Казани // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях : мат. Российской конференции с международным участием (22–23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа, 2012. С. 83–89.

4. *Иванов Д.Л.* Воронки на Уфимском участке Самаро-Златоустовской железной дороги // Известия общества горных инженеров. 1897. Т. 6. № 1. С. 1–18.

5. *Кухарев Н.М.* Инженерно-геологические изыскания в областях развития карста в целях строительства. М. : Стройиздат, 1975. 168 с.

6. Инженерная геология СССР. Кн. 2: Платформенные регионы европейской части СССР. М. : Недра, 1991. 357 с.

7. *Ильин А.Н., Капустин А.П., Коган И.А. и др.* Карстовые явления в районе города Дзержинска Горьковской области. М. : Изд-во АН СССР, 1960. 123 с.

8. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М. : Стройиздат, 1986. 176 с.

9. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М. : ГЕОС, 2003. 216 с.

10. *Плакс А.А., Рыжков А.И.* Строительство торгового центра со встроенным транспортным тоннелем на территориях II и III категорий устойчивости по карсту // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях : мат. Российской конф. с междунар. участием (22–23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа, 2012. С. 106–109.

11. Пат. РФ № 2351712, МПК E02D 31/02 (2006.01). Способ защиты грунтовых оснований зданий от суффозионных процессов / В.А. Бабелло, В.Л. Попов, О.Т. Иванкив, М.В. Романова. Патентообл. ООО Промышленно-торговая компания «НЭКСТ»; заявл. 28.08.2007; опубл. 10.04.2009; бюл. № 10.

12. *Саурин А.Н., Скоробогатый В.А., Корпач А.И.* О возможности применения шпального распределителя для усиления системы «основание-фундамент» сооружений на закарстованных территориях // Геотехнические проблемы проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях : мат. Российской конф. с междунар. участием (22–23 мая 2012 г., г. Уфа). Уфа, 2012. С. 113–117.

13. *Максимович Н.Г.* Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС). Пермь : ООО ПС «Гармония», 2006. 212 с.

14. *Маковецкий О.А., Килин И.Ю.* Методы противокарстовой защиты на объектах нефтегазового комплекса // Экологическая безопасность строительства в карстовых районах: мат. Междунар. симпозиума / под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой. Пермь : ПГНУ, 2015. С. 248–252.

15. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М. : РУДН, 2017. 328 с.

16. *Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G.* Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Chichester : Springer / Praxis Publishing, 2005. 382 p.

17. *Тер-Мартиросян З.Г., Анисимов В.В., Тер-Мартиросян А.З.* Механическая суффозия: экспериментальные и теоретические основы // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 28–38.

18. *Hunter R.P., Bowman E.T.* Visualization of internal erosion of la granular material via a new transparent soil permeameter // Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proceedings of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015. Vol. 4: Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015. Pp. 1965–1970.

19. *Костарев В.П.* Это нужно знать, приступая к инженерно-геологическим изысканиям на закарстованных территориях // Экологическая безопасность строительства в карстовых районах: мат. Междунар. симпозиума / под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Пермь : ПГНУ, 2015. С. 38–41.

20. *Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S.* Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporate karst areas // Environmental Geology. 2008. Vol. 53. No. 5. Pp. 1008–1022.

21. *Сорочан Е.А., Толмачев В.В.* Анализ аварий сооружений на закарстованных территориях // Российская геотехника — шаг в XXI век : тр. юбилейной конференции, посвященной 50-летию РОМГГиФ. Т. 1. М., 2007. С. 154–162.

Поступила в редакцию 29 сентября 2017 г.
Принята в доработанном виде 1 ноября 2017 г.
Одобрена для публикации 25 января 2018 г.

Об авторе: **Хоменко Виктор Петрович** — доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, khomenko_geol@mail.ru, ORCID 0000-0001-9198-4401.

REFERENCES

1. Ragozin A.L. Kontseptsiya dopustimogo riska i stroitel'noe osvoenie territoriy razvitiya opasnykh prirodnykh i tekhnoprirodnykh protsessov [Conception of acceptable risk and civil engineering on territories under natural and man-made geological hazard]. *Proekt* [Project]. 1993, no. 5–6, pp. 250–253. (In Russian)

2. Vorob'ev Yu.L., Loktionov N.I., Faleev M.I. et al. *Katastrofy i chelovek. Kn. 1: Rossiyskiy opyt protivodeystviya chrezvychaynym situatsiyam* [Disasters and man. Book 1: Russian experience of dealing with emergencies]. Moscow, AST-LTD Publ., 1997. 256 p. (In Russian)

3. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Vliyanie karstovykh protsessov v osnovanii fundamentov na tekhnicheskoe sostoyanie pamyatnika arkhitektury zdaniya «Aleksandrovskiy passazh» v g. Kazani [Influence of karst under foundation of Alexander Passage building in Kazan on technical condition of this architectural heritage]. *Geotekhnicheskie problemy proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh: mat. Rossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (22–23 maya 2012 g., g. Ufa)* [Geotechnical problems of designing buildings and structures in karst-prone areas: Proceedings of the Russian conference with international participation (22–23 May 2012, Ufa)]. Ufa, 2012, pp. 83–89. (In Russian)

4. Ivanov D.L. Voronki na Ufimskom uchastke Samaro-Zlatoustovskoy zheleznoy dorogi [Sinkholes on Ufa section of Samara-Zlatoust railway line]. *Izvestiya obshchestva gornykh inzhenerov* [Proceedings of the Society of Mining Engineers]. 1897, vol. 6, no. 1, pp. 1–18. (In Russian)

5. Kukharev N.M. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya v oblastyakh razvitiya karsta v tselyakh stroitel'stva* [Geological cite investigations for civil engineering in the areas with karst development]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 168 p. (In Russian)

6. *Inzhenernaya geologiya SSSR. Kn. 2: Platformennye regiony evropeyskoy chasti SSSR* [Engineering geology of USSR. Book 2: Platform regions in European part of USSR]. Moscow, Nedra, 1991. 357 p. (In Russian)

7. Il'in A.N., Kapustin A.P., Kogan I.A. et al. *Karstovye yavleniya v rayone goroda Dzerzhinska Gor'kovskoy oblasti* [Karst phenomena in the district of Dzerzhinsk city, Gorky oblast]. Moscow, Academy of Sciences of the USSR, 1960. 123 p. (In Russian)

8. Tolmachev V.V., Troitskiy G.M., Khomenko V.P. *Inzhenerno-stroitel'noe osvoenie zakarstovannykh territoriy* [Engineering and construction in karst terrains]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 176 p. (In Russian)

9. Khomenko V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffozionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffusion]. Moscow, GEOS, 2003. 216 p. (In Russian)

10. Plaks A.A., Ryzhkov A.I. Stroitel'stvo torgovogo tsentra so vstroennym transportnym tonnelem na territoriyakh II i III kategoriy ustoychivosti po karstu [Construction of a shopping center with a built-in transport tunnel in areas of II and III karst stability categories]. *Geotekhnicheskie problemy proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh: mat. Rossiyskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22–23 maya 2012 g., g. Ufa)* [Geotechnical problems of designing buildings and structures in karst-prone areas: Proceedings of the Russian conference with international participation (22–23 May 2012, Ufa)]. Ufa, 2012, pp. 106–109. (In Russian)

11. Babello V.A., Popov V.L., Ivankiv O.T., Romanova M.V. Pat. RU no 2351712 IPC E02D 31/02 (2006.01). *Sposob zashchity gruntovykh osnovaniy zdaniy ot suffozionnykh protsessov* [Method for protection of building earth foundations against suffusion processes]; Patentholder OOO «Promyshlenno-torgovaya

kompaniya “NEKST”»; claim 28.08.2007; published 10.04.2009; bul, no. 10. (In Russian)

12. Saurin A.N., Skorobogatyy V.A., Korpach A.I. O vozmozhnosti primeneniya shpal’nogo raspredelitelya dlya usileniya sistemy «osnovanie—fundament» sooruzheniy na zakarstovannykh territoriyakh [On the possibility of applying tie dispenser for strengthening of system “Base-Foundation” structures in karst areas]. *Geotekhnicheskie problemy proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy na karstoopasnykh territoriyakh: mat. Rossiyskoy konf. s mezhdunar. uchastiem (22–23 maya 2012 g., g. Ufa*) [Geotechnical problems of designing buildings and structures in karst-prone areas: Proceedings of the Russian conference with international participation (22–23 May 2012, Ufa)]. Ufa, 2012, pp. 113–117. (In Russian)

13. Maksimovich N.G. *Bezopasnost’ plotin na rastvorimykh porodakh (na primere Kamskoy GES)* [Safety of dams on soluble rock (Kama hydroelectric power station as an example)]. Perm, OOO PS «Garmoniya», 2006. 212 p. (In Russian)

14. Makovetskiy O.A., Kilin I.Yu. Metody protivokarstovoy zashchity na ob”ektakh neftegazovogo kompleksa [Methods of antikarst protection on objects of an oil and gas complex]. *Ekologicheskaya bezopasnost’ stroitel’stva v karstovykh rayonakh : mat. Mezhdunar. Simpoziuma* [Environmental safety and construction in karst areas : Proceedings of the International symposium]. Perm, Perm State Research University, 2015, pp. 248–252. (In Russian)

15. Anikeev A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse sinks and subsidences in karst areas: mechanisms, prediction, and risk estimation]. Moscow, Russian People’s Friendship University, 2017. 328 p. (In Russian)

16. Waltham T., Bell F.G., Culshaw M.G. *Sinkholes and subsidence: Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Chichester, Springer / Praxis Publishing, 2005. 382 p.

17. Ter-Martirosyan Z.G., Anisimov V.V., Ter-Martirosyan A.Z. Mekhanicheskaya suffoziya: eksperimental’nye i teoreticheskie osnovy [Mechanical suffusion: experimental and theoretical principles]. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology]. 2009, no. 4, pp. 28–38. (In Russian)

18. Hunter R.P., Bowman E.T. Visualization of internal erosion of la granular material via a new transparent soil permeameter. *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: Proceedings of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015*. Vol. 4: Slopes and Geohazards. ICE Publishing, 2015. Pp. 1965–1970. (In Russian)

19. Kostarev V.P. Eto nuzhno znat’, pristupaya k inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam na zakarstovannykh territoriyakh [What is necessary to know when starting engineering and geological surveys in the karst areas]. *Ekologicheskaya bezopasnost’ stroitel’stva v karstovykh rayonakh: mat. Mezhdunar. simpoziuma* [Geotechnical problems of designing buildings and structures in karst-prone areas: Proceedings of the Russian conference with international participation (22–23 May 2012, Ufa)]. Perm, Perm State Research University, 2015, pp. 38–41. (In Russian)

20. Gutiérrez F., Cooper A.H., Johnson K.S. Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporate karst areas. *Environmental Geology*. 2008, vol. 53, no. 5, pp. 1008–1022.

21. Sorochan E.A., Tolmachev V.V. Analiz avariy sooruzheniy na zakarstovannykh territoriyakh [Analysis of failures of structures in karst areas]. *Rossiyskaya geotekhnika — shag v XXI vek: tr. Yubileynoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu ROMGGiF* [Russian geotechnics — a step in the XXI century: Proceedings of Jubilee conference dedicated to the 50th anniversary of RSSMGFE]. Vol. 1. Moscow, 2007, pp. 154–162. (In Russian)

Received September 29, 2017.
Adopted in final form on November 1, 2017.
Approved for publication on January 25, 2018.

About the author: **Khomenko Victor Petrovich** — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Professor, Department of Engineering Surveys and Geoecology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, khomenko_geol@mail.ru; ORCID 0000-0001-9198-4401.