

# О ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ КАРСТА В МОСКВЕ

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-74-88>

УДК 624.131:551.435.8:



Воронки провала (слева: г. Москва, 1973 г., ул. Куусинена, д. 19) и оседания (справа: г. Москва, 1977 г., Новохорошевский проезд, д. 3). Фото В.Н. Кожевниковой

## АНИКЕЕВ А.В.\*

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, anikeev\_alex@mail.ru*

*Адрес: Уланский пер., д. 13, стр. 2, а/я 145, г. Москва, 101000, Россия*

## КОЗЛЯКОВА И.В.

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, kozlyakova@rambler.ru*

## КОЖЕВНИКОВА И.А.

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия, artarkov@mail.ru*

## Аннотация

Статья обобщает существующие сведения о современных поверхностных проявлениях покрытого карбонатного карста на территории Москвы. Выполнен анализ инженерно-геологических условий района провалов на северо-западе города. Отмечена приуроченность воронок к местам наложения разновозрастных эрозионных врезов и участкам древних карстовых нарушений. Рассмотрены техногенные причины активизации провалов в середине XX века, и показано, что главным ее фактором служит изменение гидродинамического режима. Исследованы наиболее значимые аварийные ситуации на северо-западе Москвы и охарактеризованы меры по ликвидации последствий, стоимость которых наряду со стоимостью разрушенных объектов определяет величину прямого экономического ущерба. На примере конкретной воронки прослежена динамика развития аварийной ситуации. Дана оценка проектных решений, используемых для сохранения устойчивости зданий и сооружений в местах возможного образования провалов. Сделан вывод о том, что одна из наиболее важных задач изучения территорий развития покрытого карбонатного карста — выявление участков, где имеются погребенные древние и засыпанные старые воронки, и отнесение этих участков к опасной категории. Сейчас в Москве известен только один такой район на северо-западе площадью около 11 км<sup>2</sup>, несмотря на то, что провалы возникают регулярно на всей территории города. Собрана достаточно полная информация о воронках провала и оседания за период с начала XX века до наших дней, и предпринята попытка выявить поверхностные проявления карста в других частях города, схожих по геологическим условиям с северо-западным районом. Выполнен ретроспективный анализ инженерно-геологических условий участков современных провалов, и установлен карстово-суффозионный генезис нескольких воронок в центральной части Москвы, что дает основание выделить здесь еще один опасный район.

## Ключевые слова:

карст; суффозия; карстово-суффозионные воронки; опасность; риск; техногенное воздействие; урбанизированные территории

## Ссылка для цитирования:

Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А., 2018. О поверхностных проявлениях карста в Москве. Инженерная геология, Том XIII, № 4–5, с. 74–88, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-74-88>

# ON THE SURFACE MANIFESTATIONS OF KARST IN MOSCOW

**ALEKSANDR V. ANIKEEV\***

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia, anikeev\_alex@mail.ru*

*Address: Bld. 13, Pde 2. P.O. box 145, Ulansky Ln., 101000, Moscow, Russia*

**IRINA V. KOZLIAKOVA**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia, kozlyakova@rambler.ru*

**IRINA A. KOZHEVNIKOVA**

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia, apmarkov@mail.ru*

## Abstract

The article summarizes existing information about the current surface manifestations of the covered carbonate karst in Moscow city territory. The analysis of engineering-geological conditions of sinkholes area in the north-west of the city is performed. The confinement of the sinkholes to places of overlapping of different ages entrenched streams and sites of ancient karst disturbances is noted. The technogenic reasons for the activation of sinks in the middle of the 20th century are considered and it is shown that the main factor is the change in the hydrodynamic regime. The most significant emergency situations in the north-west of Moscow were investigated and measures for liquidating the consequences, whose cost along with the value of destroyed objects determines the magnitude of direct economic damage, are characterized. On the example of a concrete sinkhole, the dynamics of emergency situation development are traced. The estimation of design decisions used for preservation of buildings and constructions stability in the places of possible sinkholes formation is given. It is concluded that one of the most important tasks of studying the development territories of a covered carbonate karst is to identify areas where ancient and buried old sinkholes are present and to classify these areas as hazardous. Now in Moscow there is only one such district in the north-west with an area of about 11 km<sup>2</sup>, despite the fact that sinks arise regularly throughout the city area. A rather complete information has been collected on the collapses and subsidence for the period from the beginning of the 20th century to the present day and an attempt has been made to reveal the superficial manifestations of karst in other parts of the city similar in geological conditions to the north-western region. A retrospective analysis of the engineering-geological conditions of the sites of modern sinks development is made and the karst-suffusion genesis of several collapses in the central part of Moscow has been determined, which gives grounds to single out another hazardous region here.

## Key words:

karst; suffusion; karst-suffusion sinkholes; hazard; risk; technogenic impact; urbanized areas

## For citation:

Anikeev A.V., Kozliakova I.V., Kozhevnikova I.A., 2018. On the surface manifestations of karst in Moscow. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 4–5, pp. 74–88, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-74-88>

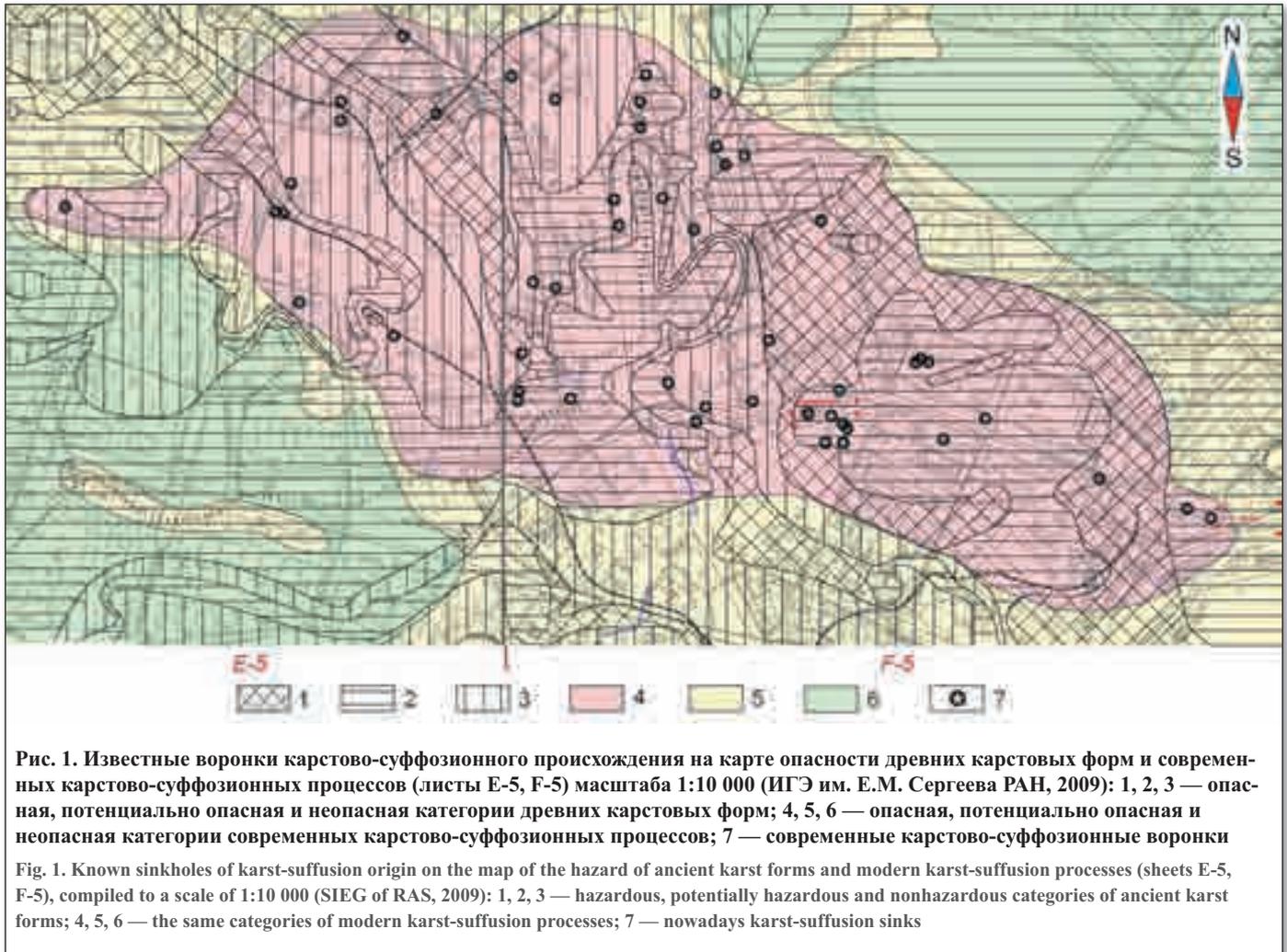
## Введение

В последнее время на территории Москвы в год в среднем образуется более 10 провалов и локальных оседаний земной поверхности. Они наносят ощутимый ущерб городскому хозяйству и могут представлять опасность для жизни и здоровья людей. Изучение архивных материалов, данных средств массовой информации и собственные наблюдения авторов позволили собрать сведения о 193 провалах и оседаниях, произошедших в Москве, начиная с 1930 года. В плане размеры подавляющего большинства воронок на земной поверхности изменяются от 1–2 до 15 м. Глубина достигает 3–5 м и более. Воронки часто появляются на проезжей части улиц, под которыми проходят подземные коллекторы, а также вблизи строительных котлованов и канализационных колодцев. И все же многие из этих деформаций земной поверхности не имеют явной приуроченности к каким-либо подземным сооружениям [1, 7].

Провалы и оседания на территории Москвы — это проявления суффозии, которая обусловлена распростра-

нением в верхней части геологического разреза водонасыщенных и неоднородных по механическому составу песчаных отложений. Суффозионный вынос песчаного материала может осуществляться в полое пространство на контакте грунтового массива и подземных сооружений или в сами сооружения при нарушении сплошности их обделки (техногенная суффозия) или в карстовые полости в подстилающих известняках (карстово-суффозионный процесс). Происходит подготовка провала — формирование в песчаной толще локальной зоны разуплотнения и промежуточных полостей, которые могут существовать в массиве длительное время. Но рано или поздно под действием внешних факторов или вследствие продолжающейся суффозии они теряют устойчивость, и процесс выходит на земную поверхность.

В отличие от техногенной суффозии, которая нарушает строение, состояние и свойства массива чаще всего на небольшой глубине вблизи подземного сооружения, карстово-суффозионный процесс захватывает всю песчано-глинистую толщу над карстовой полостью или закарсто-



**Рис. 1.** Известные воронки карстово-суффозионного происхождения на карте опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов (листы E-5, F-5) масштаба 1:10 000 (ИГЭ им. Е.М. Сергеева РАН, 2009): 1, 2, 3 — опасная, потенциально опасная и неопасная категории древних карстовых форм; 4, 5, 6 — опасная, потенциально опасная и неопасная категории современных карстово-суффозионных процессов; 7 — современные карстово-суффозионные воронки

**Fig. 1.** Known sinkholes of karst-suffusion origin on the map of the hazard of ancient karst forms and modern karst-suffusion processes (sheets E-5, F-5), compiled to a scale of 1:10 000 (SIEG of RAS, 2009): 1, 2, 3 — hazardous, potentially hazardous and nonhazardous categories of ancient karst forms; 4, 5, 6 — the same categories of modern karst-suffusion processes; 7 — nowadays karst-suffusion sinks

ванной зоной в известняках. Доказать, что провал связан с погребенным карстом, сложно. В то же время задача выявления зон активизации именно карстово-суффозионного процесса в городе крайне важна как для оценки риска, так и для разработки специальных требований к использованию территории.

### Инженерно-геологические условия и карстово-суффозионная опасность

Территория Москвы относится к районам покрытого карбонатного карста. Она расположена в пределах долины р. Москвы и ее притоков (1), Теплостанской возвышенности (2), Москворецко-Яузского (3) и Яузско-Пехорского (4) междуречий. Абсолютные отметки земной поверхности в этих четырех ландшафтно-геоморфологических районах составляют [14, 15]: 1) 120–160 м, 2) 175–250 м, 3) 175–185 м, 4) 155–165 м.

На большей части территории слаборастворимые среднекаменноугольные известняки и доломиты, а также переслаивающиеся карбонатные и глинистые породы верхнего карбона перекрыты мощной (> 20 м) толщиной нерастворимых глинистых и песчаных грунтов юрского, мелового и четвертичного возраста. Вероятно, поэтому, а также потому, что в массивах закарстованных пород крупные полости и пещеры не обнаружены — вплоть до конца 1960-х–начала 1970-х годов считалось [8], что территория Москвы не опасна в карстово-суффозионном отношении.

Гидрогеологические условия до глубины 70–140 м на юго-западе и 90–100 м на северо-востоке города характе-

ризуются наличием комплекса грунтовых вод, или надюрского напорно-безнапорного водоносного комплекса, и трех напорных водоносных горизонтов — гжельского, карсимовского и мячковско-подольского. Первые два приурочены к верхнекаменноугольным карбонатным породам, последний — к среднекаменноугольным. В глинисто-песчаных отложениях доюрской долины р. Москвы выделяется также келловей-батский напорный горизонт, однако он, как правило, непосредственно связан с трещинно-карстовыми водами.

В настоящее время отметки уровней грунтовых вод изменяются от 110–130 м в долине р. Москвы до 180–230 м и более на Теплостанской возвышенности, а трещинно-карстовых вод верхнего и среднего карбона — от 90 м до 130 м и от 60 м до 110 м соответственно. Причем гидроизопьезы с отметками 60–80 м на севере Москвы в районе Дмитровского шоссе и проспекта Мира свидетельствуют о существовании здесь обширной депрессионной воронки. Пьезометрический уровень мячковско-подольского горизонта в ее границах снижен относительно кровли горизонта на 10–30 м [15].

На рубеже XIX–XX веков пьезометрическая поверхность каменноугольных водоносных горизонтов вблизи р. Москвы и ее притоков практически совпадала с уровнем грунтовых вод [3, 5]. К концу 1950-х–началу 1960-х годов откачки трещинно-карстовых вод, начавшиеся в конце XIX века и выполнявшиеся для разных целей разными организациями, в том числе и Метростроем, привели к снижению напоров на 20–60 м и более. С конца

Таблица 1  
Table 1

**Аварийные ситуации на северо-западе Москвы как следствие карстово-суффозионных провалов и локальных оседаний земной поверхности (по фондовым материалам и данным работ [6, 8, 12, 15–17])**  
**Emergencies in the north-west of Moscow as a result of karst-suffusion collapses and local subsidence of the earth's surface (on archive materials and the work data [6, 8, 12, 15–17])**

№ п/п	Время образования, местоположение и морфометрические характеристики (длина — $l_1$ , ширина — $l_2$ , глубина — $h$ ) карстово-суффозионной воронки (м)					Меры по ликвидации последствий, определяющие величину экономического ущерба	Примечания
	месяц, год	место	$l_1$	$l_2$	$h$		
1	1958	Хорошевское шоссе, напротив д. 35, корп. 1	6		3	Восстановление дорожного полотна. В 1970 г. — укрепление грунтов основания	Воронка вскрыта котлованом восточного вестибюля станции метро «Полежаевская» в 1970 г., что привело к ее оживлению
2	1959	Осевая часть Хорошевского шоссе, напротив д. 41	5		–	Восстановление дорожного полотна	–
3	1964	3-я Хорошевская ул., д. 14, территория ТЭЦ-16, западнее градирен	12		2	Укрепление грунтов основания	Повторное оседание на месте воронки с размерами $l_1 \approx l_2 \approx 1,5$ м, $h \approx 0,5$ м, которая образовалась здесь в 1960 г. и была сразу же засыпана
4	октябрь 1969	Хорошевское шоссе, д. 35, корп. 2, в центре здания	4,5		3,5	Выселение жителей 5-ти этажного дома, обеспечение их жильем, снос дома, рекультивация площадки	Провалы приурочены к зоне древнего карста
5	октябрь 1969	Хорошевское шоссе, д. 35, корп. 2, под южной стеной	4		3		
6	август 1973	ул. Куусинена, д. 19	4,5		3,5	Ремонт подземных коммуникаций, засыпка воронки, восстановление газона и дорожного полотна	Провал на месте старой воронки с размерами $l_1 \approx l_2 \approx 6$ м, $h \leq 8$ м. Бурение рядом скважины вызвало оседание асфальта вокруг провала в полосе шириной 3,2–3,5 м. Согласно наблюдениям (28.12.73–17.01.74 гг.), средняя скорость оседания равнялась 15 см/сут
7	апрель 1977, июль 1977	Новохорошевский пр., д. 3, д. 4	2 42	1,5 40	0,2 2,1	Выселение жителей двух 5-ти этажных домов, обеспечение их новым жильем, снос этих домов, капитальный ремонт д. 5, рекультивация территории	В столбцах 4–6 указаны начальные и конечные размеры. Динамика оседания и развития аварийной ситуации приведена в табл. 2
8	май 1987, 4 июня 1987	ул. Маршала Тухачевского д. 17, корп. 1	– 12	– 8	– 1,5	Засыпка воронки, асфальтирование проезда между домами 17/1 и 15/1, косметический ремонт д. 17/1	Само здание, построенное в начале 1980-х гг., не пострадало (рис. 2, а, б), так как опирается на фундаментную плиту. Эта мера защиты, принятая после событий 1960-х–1970-х гг., оказалась весьма эффективной (рис. 2, с)
9	май 1996	пр. Маршала Жукова, напротив д. 12, корп. 1	3	2	~1	Засыпка воронки и восстановление дорожного полотна	Специальные исследования воронки не проводились

1980-х годов в связи с уменьшением водоотбора напоры восстанавливаются, однако до сих пор, как отмечалось выше, их отметки заметно ниже тех, что были до эксплуатации каменноугольных вод.

Уровни надбюрского комплекса, в том числе и напорные, в XX веке также снижались. В основном это было связано с перетеканием воды в нижележащие водоносные горизонты. Однако понижение зеркала грунтовых вод на 1–7 м в речных долинах компенсировалось его повышением в результате гидротехнического строительства, ко-

торое началось на Москве-реке еще в 1870-х годах, но наиболее масштабным было в период возведения канала имени Москвы (1932–1937 гг.). В итоге уровень р. Москвы в центре города поднят с отметки 115 м до 120 м. Примерно таким же, 2–6 м, было повышение поверхности грунтовых вод на водораздельных участках вследствие утечек из водонесущих коммуникаций и подпора воды подземными сооружениями. Достаточно сложная картина изменения режима уровней в XX веке объясняется также повсеместной планировкой рельефа на все увеличиваю-

**Динамика формирования воронки оседания и развитие аварийной ситуации на Новохорошевском проезде, д. 3, д. 4 в 150 м от ТЭЦ-16 (по фондовым материалам и данным работ [11, 12, 15])**  
**The dynamics of the formation of the subsidence funnel and the development of an emergency situation at Novokhoroshevsky Drive, 3, 4, 150 meters from CHPP-16 (on stock materials and work data [11, 12, 15])**

Дата (день, месяц, год), время	Формирование воронки	Деформирование жилых зданий
до 1977 г.	–	Проседание отмостки у юго-западной части д. 3 и образование волосяных вертикальных трещин на южной стене д. 4. Никаких мер не только по предотвращению, но и изучению причин этих деформаций принято не было, хотя специалисты расценивали их как предвестники будущей аварии
27.04.77, 19.00	Сотрясение почвы между первым и вторым подъездами д. 3	Сотрясение ощущалось жителями и внутри д. 3
28.04.77, 8.00	Оседание земной поверхности визуально не заметно, но после дождя между домами 3, 4 появилась большая глубокая лужа	Отмостка между первым и вторым подъездами д. 3 отошла от фасада и опустилась на 5–7 см
28.04.77, 8.00–9.00	Исчезновение лужи и формирование воронки шириной примерно 1,5 м и глубиной 0,2 м. Растрескивание асфальта вокруг воронки	–
28.04.77, 10.00–15.00	Увеличение ширины и глубины воронки до 30 м и 0,5 м. Дно воронки плоское размером 10×5 м вытянуто в меридиональном направлении. Борта шириной 9–13 м пологие с прерывистыми концентрическими трещинами. В нижней части юго-западного склона воронки — два бугра выпирания высотой 0,3 м, шириной 0,6 м. Замедление роста воронки	Деформации южной части д. 4: оседание и отсоединение отмостки от стены, вертикальные трещины в стенах, отрыв входа в третий подъезд от основного здания. Расстояние от центра воронки до подъезда – 27 м
29.04.77	Воронка в плане имеет форму неправильного «треугольного» овала с обращенной на юг вершиной и основанием 22,5 м на севере. Глубина воронки 0,7 м	Обрушение первых межэтажных перекрытий д. 3
28.04.77 – 5.05.77	–	В расположенном поблизости доме 5/2 на всех пяти этажах третьего подъезда расширились старые и появились новые трещины. На первом этаже лопнуло оконное стекло. Над входом в подъезд образовались трещины шириной в верхней части до 3 мм. Стояк водяного отопления в квартире четвертого этажа у восточной стены прогнулся на 3–5 см
6.05.77	–	Растрескивание оконных стекол на северной стене в д. 3. По замыкающимся у крыши трещинам отчетливо виден свод обрушения с основанием ~24 м
7.05.77	–	Стабилизация деформаций д. 4
10.05.77	Размеры воронки увеличились до 38,0×32,5 м, глубина — до 1,8 м. Размеры вытянутого в меридиональном направлении плоского дна составляли 7,5×2,5 м	–
середина мая 1977	–	Снесен д. 3. Представляется, что именно это сыграло главную роль в последующей активизации процесса
после 15.05.77	–	Возобновление деформаций д. 4: крен южной части, разрушение межэтажных перекрытий, выпадение кирпичей, вертикальные трещины в центральной части на расстоянии 45 м от центра воронки
19.05.77	Размеры стабилизировавшейся воронки: 39×36×1,7 м	–
25.05.77	В результате сильных дождей глубина воронки увеличилась до 2 м, ширина плоского дна — до 5 м, ширина самой воронки, ставшей округлой, — до 38 м	–
30.05.77, 0.00–4.00	–	Полное обрушение южной части д. 4
7.06.77	Воронка вновь стала асимметричной «треугольной» с максимальной шириной 38 м и длиной 40 м. Глубина — 2,1 м	–
2-я половина мая–июнь 1977	–	Осыпание штукатурки и оживление трещин в стенах д. 5/2
июль 1977	Размеры стабилизировавшейся воронки: 42×40×2,1 м	Снесен д. 4
август 1977	–	После ремонта д. 5/2 деформации не наблюдались



**Рис. 2.** Центральная провальная (потому что обрушилось асфальтовое покрытие) часть воронки оседания (а) (8, табл. 1) и неравномерное деформирование отмостки (b) у фасада дома 17/1 по ул. Маршала Тухачевского (4 июня 1987 г.); фасад дома и центральная часть бывшей воронки спустя 22 года (с): заметны незначительные деформации газона у фасада дома вследствие уплотнения грунтов (28 апреля 2009 г.)

**Fig. 2.** Central collapsed part (because the asphalt covering crumbled) of the subsidence sinkhole (a) (8, Table 1) and the uneven deformation of the blind area (b) near the facade of the house 17/1 at Marshal Tukhachevsky St. (June 4, 1987); the facade of the house and the central part of the former sinkhole 22 years later (c): slight deformations of the lawn due to soil compaction are visible near the facade of the house (April 28, 2009)

щейся площади города и техногенным изменением условий разгрузки грунтовых вод после того, как многие ручьи и малые реки забраны в подземные коллекторы и перестали выполнять свои естественные функции.

До середины XX века экзогенные геологические процессы на территории Москвы сводились к овражной и речной эрозии, заболачиванию и оползням [3, 4]. За исключением оползней, все они в настоящее время потеряли значение для геодинамического развития столичного региона главным образом из-за техногенного изменения ландшафта [8, 14]. Провалообразование, напротив, считается теперь одним из наиболее опасных процессов [1, 7, 9–15].

Активизация провалообразования зафиксирована на северо-западе Москвы в конце 1950-х годов [5, 6, 12, 16, 17]. Иногда воронки возникали на фоне общего оседания земной поверхности, которое может развиваться и самостоятельно. В качестве примера приведем тенденцию устойчивого опускания участка длиной 3,5 км и шириной 1,5 км, расположенного вдоль 1-й Магистральной улицы и Звенигородского шоссе [15]. Скорость опускания, впервые отмеченного здесь в 1948 г., составляла 14–15 мм/год. К началу 1970-х годов она уменьшилась до 2,5–4 мм/год, оставаясь заметно выше средней (1,5–2 мм/год) по Москве.

По результатам крупномасштабного инженерно-геологического картографирования Москвы все современные относительно свежие (образовавшиеся с середины XX века), хотя и засыпанные сейчас карстово-суффозионные воронки находятся в северо-западном и отчасти северном административных округах. Это район опасный в отношении проявлений карстово-суффозионного процесса на поверхности. Его площадь 10,8 км<sup>2</sup>, что составляет примерно 1% от площади всего города (рис. 1). В потенциально опасных районах общей площадью 173,0 км<sup>2</sup> (16%) таких воронок нет, а скорее всего они просто не зарегистрированы, однако их формирование возможно [13].

На остальной площади 897,2 км<sup>2</sup> (83%) образование карстово-суффозионных воронок практически исключается. Слово «практически» здесь необходимо, так как оно

указывает на то, что несмотря на отсутствие всех условий и факторов развития этого процесса, как минимум два основных условия и один фактор — наличие в верхней части земной коры закарстованных пород (1) и подземных вод (2) с разным положением уровней (3) — имеются. Поэтому вероятность провалообразования в неопасных районах б на рис. 1 пусть и очень малая, но есть [1]. И это обстоятельство нельзя игнорировать, особенно если речь идет об оценке риска и используемых при этом стохастических моделях.

### Аварийные ситуации

Из всех воронок, карстово-суффозионный генезис которых установлен (см. рис. 1), из базы данных Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (далее ИГЭ РАН) отобраны только наиболее изученные и значимые с практической точки зрения случаи (табл. 1). Авторы посчитали полезным представить и табл. 2, в которой на конкретном примере показана динамика локального оседания и развития аварийной ситуации.

Важным признаком отбора воронок был прямой экономический ущерб, величина которого определяется стоимостью разрушенных объектов и затратами на их ликвидацию или восстановление. В табл. 1 наряду с характеристиками воронок указаны и меры по ликвидации последствий провалообразования, что позволяет помимо физических инженерных потерь оценить прямой экономический ущерб за время образования воронок.

Прежде чем перейти к рассмотрению таблиц, хотелось бы коснуться проблемы социального карстово-суффозионного риска. Социальный риск, хотя и предполагает возможность моральной травмы населения, оказавшегося в зоне развития опасного процесса, обычно понимается как риск потери здоровья, гибели или ранения людей [18]. Катастрофическим считается, как правило, лишь то событие, в результате которого погибли люди.

Согласно методическому документу «Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы» именно риск гибели людей (социальных потерь) следует вычислять в Москве для так называемых одномоментных

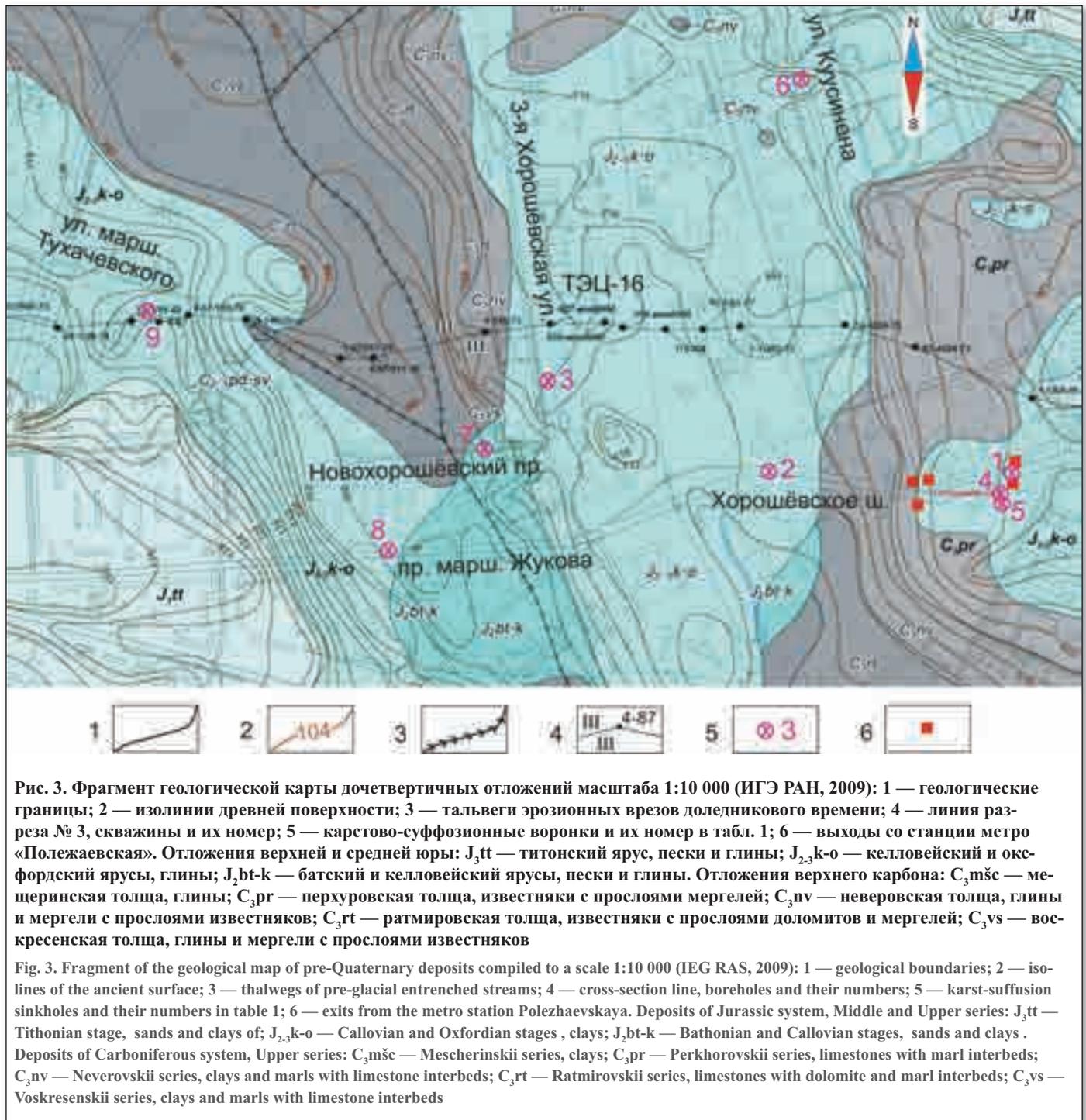


Рис. 3. Фрагмент геологической карты дочетвертичных отложений масштаба 1:10 000 (ИГЭ РАН, 2009): 1 — геологические границы; 2 — изолинии древней поверхности; 3 — тальвеги эрозионных врезов доледникового времени; 4 — линия разреза № 3, скважины и их номер; 5 — карстово-суффозионные воронки и их номер в табл. 1; 6 — выходы со станции метро «Полежаевская». Отложения верхней и средней юры:  $J_{2,3}^{tt}$  — титонский ярус, пески и глины;  $J_{2,3}^{k-o}$  — келловейский и оксфордский ярусы, глины;  $J_{2,3}^{bt-k}$  — батский и келловейский ярусы, пески и глины. Отложения верхнего карбона:  $C_{3mšc}$  — мешеринская толща, глины;  $C_{3pr}$  — перхуровская толща, известняки с прослоями мергелей;  $C_{3nv}$  — неверовская толща, глины и мергели с прослоями известняков;  $C_{3rt}$  — ратмировская толща, известняки с прослоями доломитов и мергелей;  $C_{3vs}$  — воскресенская толща, глины и мергели с прослоями известняков

Fig. 3. Fragment of the geological map of pre-Quaternary deposits compiled to a scale 1:10 000 (IEG RAS, 2009): 1 — geological boundaries; 2 — isolines of the ancient surface; 3 — thalwegs of pre-glacial entrenched streams; 4 — cross-section line, boreholes and their numbers; 5 — karst-suffusion sinkholes and their numbers in table 1; 6 — exits from the metro station Polezhaevskaya. Deposits of Jurassic system, Middle and Upper series:  $J_{2,3}^{tt}$  — Tithonian stage, sands and clays;  $J_{2,3}^{k-o}$  — Callovian and Oxfordian stages, clays;  $J_{2,3}^{bt-k}$  — Bathonian and Callovian stages, sands and clays. Deposits of Carboniferous system, Upper series:  $C_{3mšc}$  — Mescherinskii series, clays;  $C_{3pr}$  — Perkhovorvskii series, limestones with marl interbeds;  $C_{3nv}$  — Neverovskii series, clays and marls with limestone interbeds;  $C_{3rt}$  — Ratmirovskii series, limestones with dolomite and marl interbeds;  $C_{3vs}$  — Voskresenskii series, clays and marls with limestone interbeds

опасностей, к которым принадлежат и провалы. Однако за все время многолетних наблюдений в России известна гибель лишь одного человека в результате карстово-суффозионного Акташского провала (Республика Татарстан, 1939 г.). Поэтому с практической точки зрения оценка социального ущерба в таком виде на территории РФ лишена смысла: вероятность события настолько мала, что его можно считать недостоверным [1]. Но учитывая, что социальные потери от провалообразования трудно поддаются учету [18], их оценка в теоретическом плане, а для некоторых стран и в практическом отношении, несомненно, представляет интерес. Если же возможность любого увечья — физического или морального — отнести к социальному риску, то ущерб от возникновения воронок 4, 5 и 7 (см. табл. 1) будет не только физическим или экономическим, но и социальным.

Данные табл. 1 свидетельствуют, что провалообразование на северо-западе Москвы началось задолго до аварии 1969 г., которая привлекла внимание специалистов к этому феномену. В базе данных ИГЭ РАН собраны сведения о воронках, появившихся в конце 1940-х–начале 1950-х годов, обнаруженных, впрочем, позднее, когда после аварий в районе Хорошовского шоссе к изучению провалов и оседаний были привлечены многие научно-исследовательские и производственные организации — Центральная инженерно-геологическая и гидрогеологическая экспедиция (ЦИГЭ) Министерства геологии РСФСР, ПНИИИС Госстроя СССР, Институт литосферы АН СССР (ИЛСАН), ПГО «Гидроспецгеология» и др. [5, 6, 9, 11, 12, 16, 17].-

Серьезные, продуманные и глубокие исследования карстово-суффозионных явлений на северо-западе Москвы, выполненные в 1970-х–1980-х гг. и позже, ока-

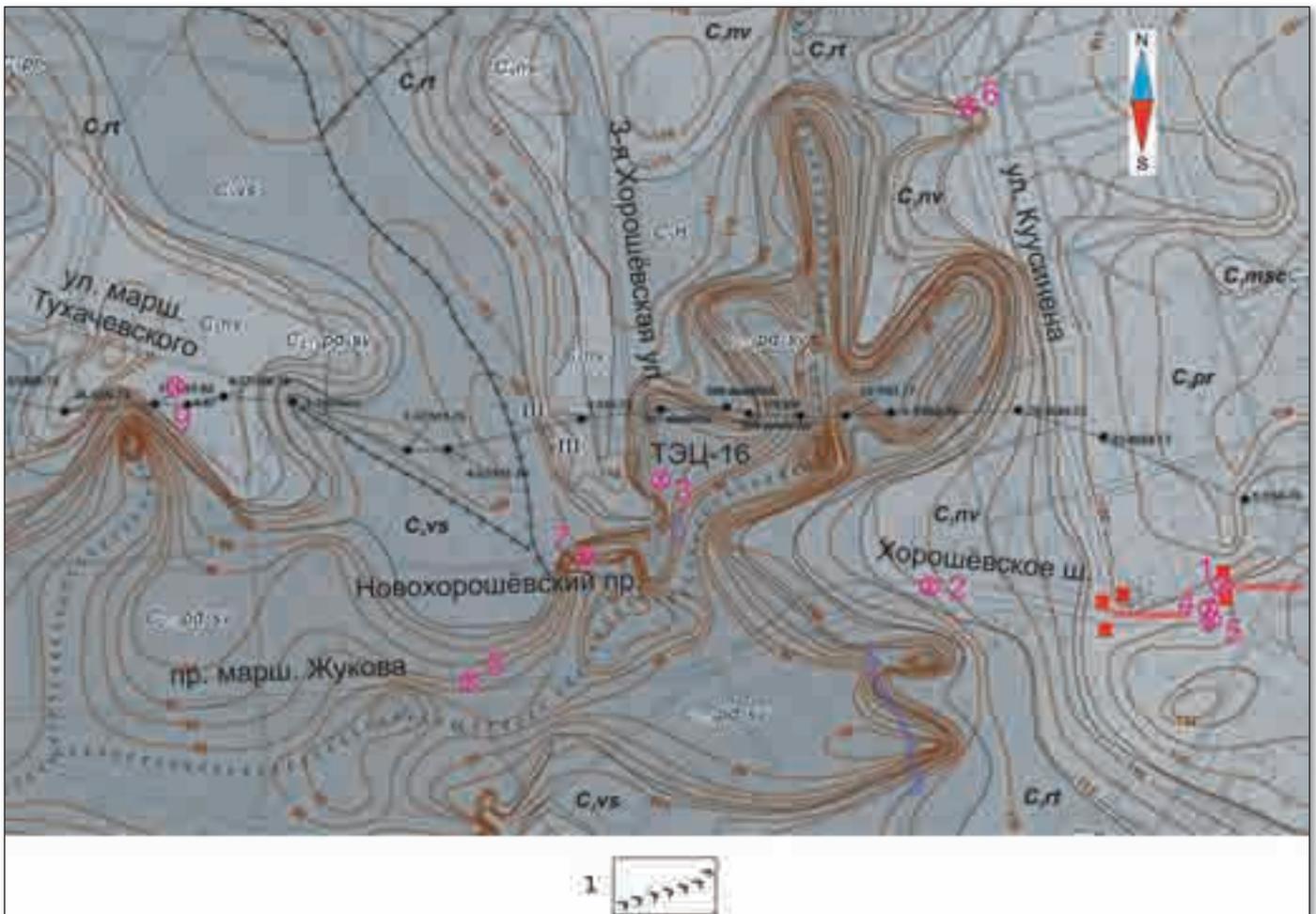


Рис. 4. Фрагмент геологической карты каменноугольных отложений масштаба 1:10 000 (ИГЭ РАН, 2009): 1 — тальвеги эрозионных врезов доюрского времени. Отложения среднего и верхнего карбона:  $C_{2-3}pd-sv$  — подольский, мячковский горизонты и суворовская толща, известняки и доломиты с прослоями мергелей и глин. *Остальные обозначения: см. рис. 3*

Fig. 4. Fragment of the geological map of Carboniferous deposits compiled to a scale 1:10 000 (IEG RAS, 2009): 1 — thalwegs of pre-Jurassic entrenched streams. Deposits of Carboniferous system, Middle and Upper series undivided:  $C_{2-3}pd-sv$  — Podolskii and Myachkovskii horizons and Suvorovskii series, limestones and dolomites with marl and clay interbeds. *Other designations are the same: see fig. 3*

зались весьма плодотворными, и затраты на их выполнение, по-видимому, давно окупались. Многие важные научные и методические аспекты оценки карстово-суффозионной опасности и риска нашли отражение в нормативных технических документах («Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов», СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003») и «Рекомендациях по оценке геологического риска на территории г. Москвы», не говоря уже о многочисленных научных публикациях.

С начала 1980-х гг. жилые здания на северо-западе Москвы возводятся на сплошных фундаментах — монолитных железобетонных плитах со специальными окнами для мониторинга устойчивости фундамента и грунтового основания. Это позволило избежать многих серьезных аварий и в целом значительно снизить экономический ущерб от развития провалов и локальных оседаний земной поверхности. Так, 17-ти этажный дом № 17/1 по улице Тухачевского (см. рис. 2, а, b и табл. 1) практически не пострадал от произошедшего рядом про-

вала, и для него ущерб ограничился стоимостью косметического ремонта фасада здания. То же самое можно сказать и о соседнем доме № 19. Уплотнение грунтов и вторичное оседание тела воронки, как видно на рис. 2, с, не сказывается на состоянии таких домов.

Из данных табл. 1 следует также, что почти все наиболее значимые с точки зрения последствий воронки образовались на месте старых или древних карстово-суффозионных и карстовых нарушений. А табл. 2 интересна не только потому, что в ней отражена динамика развития воронки оседания и аварийной ситуации. Она показывает, что не меньший, если не больший по сравнению с провалом ущерб может причинить локальное оседание земной поверхности. Особенно если воронка оседания растет. Однако даже если исходно мелкие и небольшие в плане воронки не развиваются, но появляются часто, то общий ущерб от них может намного превосходить ущерб от крупных, но редких провалов. Поэтому от общепринятых классификаций карстовых районов по значениям диаметра воронок и интенсивности их образования, согласно СП 116.13330.2012, целесообразно перейти к использованию шкалы физического риска, специально разработанной для учета совместного влияния этих показателей опасности на устойчивость хозяйственных объектов [1].

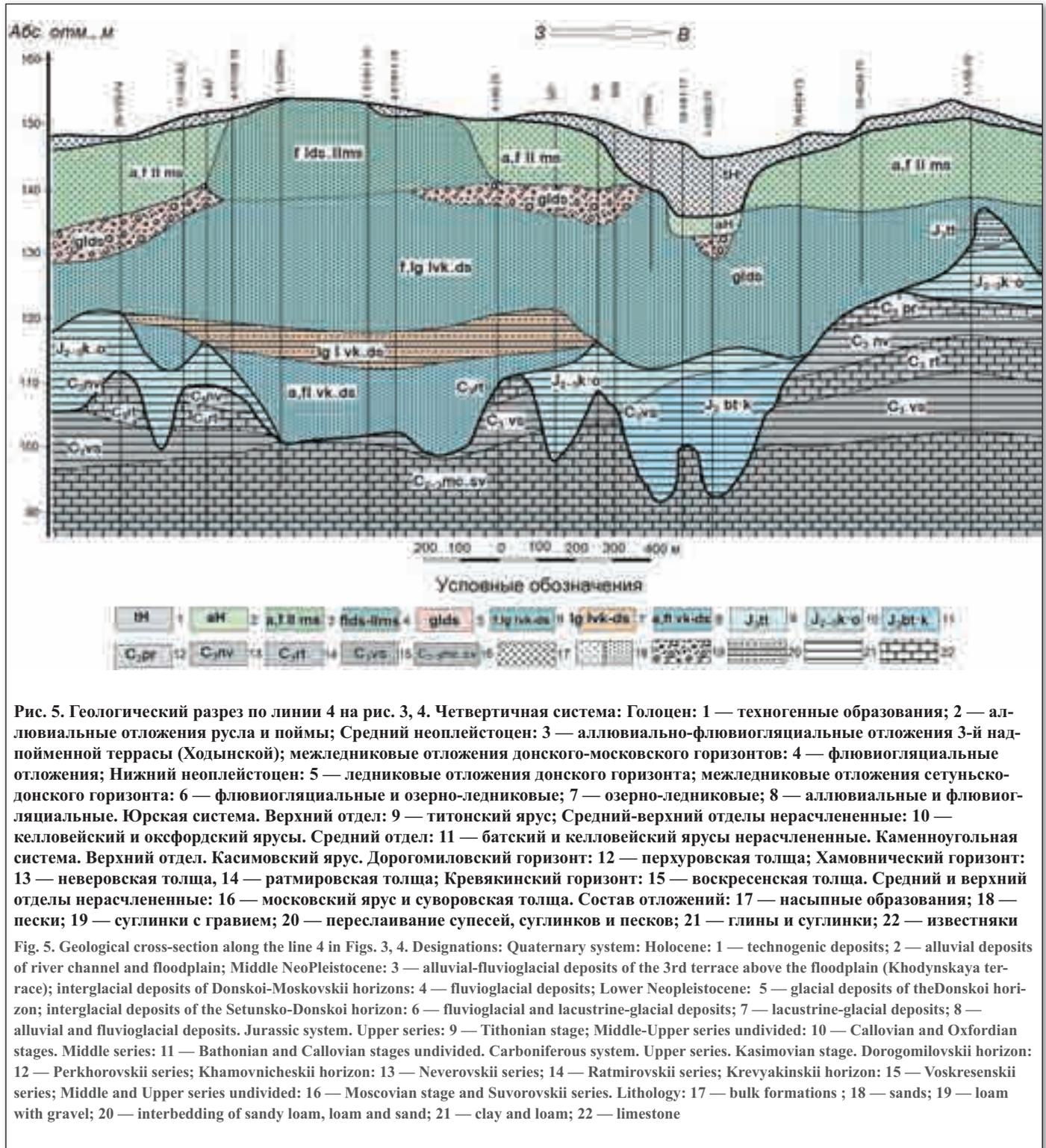


Рис. 5. Геологический разрез по линии 4 на рис. 3, 4. Четвертичная система: Голоцен: 1 — техногенные образования; 2 — аллювиальные отложения русла и поймы; Средний неоплейстоцен: 3 — аллювиально-флювиогляциальные отложения 3-й надпойменной террасы (Ходынской); межледниковые отложения донского-московского горизонтов: 4 — флювиогляциальные отложения; Нижний неоплейстоцен: 5 — ледниковые отложения донского горизонта; межледниковые отложения сетунско-донского горизонта: 6 — флювиогляциальные и озерно-ледниковые; 7 — озерно-ледниковые; 8 — аллювиальные и флювиогляциальные. Юрская система. Верхний отдел: 9 — титонский ярус; Средний-верхний отделы нерасчлененные: 10 — келловейский и оксфордский ярусы. Средний отдел: 11 — батский и келловейский ярусы нерасчлененные. Каменноугольная система. Верхний отдел. Касимовский ярус. Дорогомиловский горизонт: 12 — перхуровская толща; Хамовнический горизонт: 13 — неверовская толща, 14 — ратмировская толща; Кривякинский горизонт: 15 — воскресенская толща. Средний и верхний отделы нерасчлененные: 16 — московский ярус и суворовская толща. Состав отложений: 17 — насыпные образования; 18 — пески; 19 — суглинки с гравием; 20 — переслаивание супесей, суглинков и песков; 21 — глины и суглинки; 22 — известняки

Fig. 5. Geological cross-section along the line 4 in Figs. 3, 4. Designations: Quaternary system: Holocene: 1 — technogenic deposits; 2 — alluvial deposits of river channel and floodplain; Middle Neopleistocene: 3 — alluvial-fluvioglacial deposits of the 3rd terrace above the floodplain (Khodynskaya terrace); interglacial deposits of Donskoi-Moskovskii horizons: 4 — fluvioglacial deposits; Lower Neopleistocene: 5 — glacial deposits of the Donskoi horizon; interglacial deposits of the Setunsko-Donskoi horizon: 6 — fluvioglacial and lacustrine-glacial deposits; 7 — lacustrine-glacial deposits; 8 — alluvial and fluvioglacial deposits. Jurassic system. Upper series: 9 — Tithonian stage; Middle-Upper series undivided: 10 — Callovian and Oxfordian stages. Middle series: 11 — Bathonian and Callovian stages undivided. Carboniferous system. Upper series. Kasimovian stage. Dorogomilovskii horizon: 12 — Perkhovskii series; Khamovnicheskii horizon: 13 — Neverovskii series; 14 — Ratmirovskii series; Krevyakiniskii horizon: 15 — Voskresenskii series; Middle and Upper series undivided: 16 — Moscovian stage and Suvorovskii series. Lithology: 17 — bulk formations; 18 — sands; 19 — loam with gravel; 20 — interbedding of sandy loam, loam and sand; 21 — clay and loam; 22 — limestone

### Геологические и гидрогеологические причины активизации провалов

Возникает вопрос, почему в середине XX века провальный процесс активизировался именно на северо-западе Москвы? На рис. 3–5 видно, что существенным геологическим признаком развития процесса является приуроченность поверхностных проявлений карста к погребенной долине Москвы-реки доледникового времени. В ее тальвеге и в центральной части, где размыты экранящие глинистые слои верхней юры, а песчаные грунты залегают на сильно закарстованных каменноугольных карбонатных породах, наблюдается оседание земной поверхности. Иногда процесс локализуется, и воз-

никают воронки оседания, поперечные размеры которых много больше глубины [1, 6, 9, 11–17].

Так называемые провалы, то есть воронки с обрывистыми краями глубиной ненамного меньше, а иногда и заметно больше диаметра, как правило, образуются в склонах палеодолины (см. рис. 3, 5). Здесь существуют оптимальные условия для их формирования — небольшая мощность юрских экранирующих глин, повышенные трещиноватость и закарстованность растворимых пород, залегающих под ними, и большие градиенты вертикальной фильтрации [1, 5, 12, 16].

Особенно опасна ситуация в местах наложения разновозрастных долин Москвы-реки — доюрской, доледнико-

вой и современной [6, 7, 9, 11, 13]. Действительно, все аварии, показанные в табл. 1, приурочены к участку пересечения погребенных врезов в границах третьей надпойменной (Ходынской) террасы р. Москвы (см. рис. 4, 5). Результаты карстования (открытые и запечатанные полости, зоны дробления и повышенной трещиноватости) на всех этапах геологической истории здесь «суммируются».

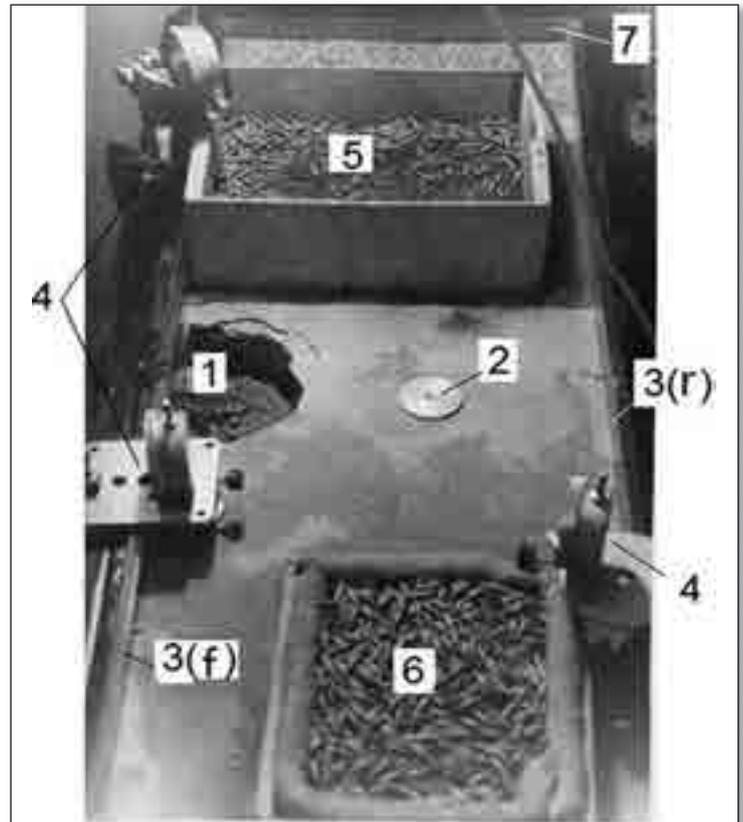
Многие геологи давно обратили внимание на то, что карстово-суффозионные воронки на северо-западе Москвы не появляются там, где каменноугольные карбонатные породы непосредственно контактируют с четвертичными песками [5, 11, 12, 16]. Для их образования нужен, как ни странно, разделяющий глинистый пласт, желательна небольшой мощности. И объясняется этот феномен тем, что связные грунты над закарстованным массивом консервируют «результаты» длительного континентального перерыва. Несвязные грунты, заполняя трещинно-поровое пространство растворимых пород, напротив, нивелируют эти «результаты». Поэтому существование открытой карстовой полости, способной принимать обломочный материал, наиболее вероятно под глинистым слоем, в известняках же, перекрытых песками, нужно еще освободить полость от заполнителя, что не всегда возможно. Требуется динамическое и, в первую очередь, гидродинамическое воздействие [1].

Если же говорить о статической техногенной нагрузке, то по данным Ф.В. Котлова [8] массовая застройка приводит к увеличению деформационно-прочностных показателей грунтового основания. А это в свою очередь ведет к тому, что провал образуется не под зданием, а рядом с ним (рис. 6). Канал деформирования-разрушения может отклоняться от вертикали в ту или другую сторону, туда, где сопротивление грунтов ниже. При этом возникает неопределенность, сродни той, что появляется при оценке устойчивости колонны (стержня) под действием чрезмерно большой вертикальной силы. И даже такая неопределенность заставляет нас идти по пути анализа риска, не исключая, однако, применения детерминированных моделей.

Наиболее опасным видом техногенного воздействия, как убедительно показано Н.М. Герсевановым [2], являются не приложенные с поверхности статические или динамические нагрузки, а откачки подземных вод. Так, снижение напора трещинно-карстовых вод на 10 м создает дополнительное давление на все отложения покровной толщи, равное 0,1 МПа. И эта действующая изнутри массива нагрузка не рассеивается с глубиной. В итоге водопонижение при наличии участков и зон ослабления растворимых пород и приводит к провалам и просадкам земной поверхности.

Наиболее четко и ясно эта мысль выражена, пожалуй, в работе Джозефа Поланда [20]. По сути дела, он, возможно и не впервые, выделил два типа территорий, по-разному опускающихся вследствие водоотбора: 1) те, что сложены относительно сплошными горными породами и 2) те, где массивы пород нельзя рассматривать как сплошные тела даже в самом первом приближении. Поланд четко обозначил [20], что районами 1-го типа в США занимается он, а 2-го — Джон Ньютон [19].

Территориями 2-го типа служат не только карстовые районы (а), но и районы подземной добычи полезных ископаемых (б), а также урбанизированные территории, где подземное пространство интенсивно осваивается (в). Все они опасны в провальном отношении, и совпадение в



**Рис. 6. Вид масштабной физической модели «ул. Тухачевского, 17/1» после образования воронки (результаты моделирования методом водонасыщенных эквивалентных материалов [1]): 1 — центральная (провальная) часть воронки (см. рис. 2, а), 2 — жесткое основание мессуры (не показана) для измерения вертикальных перемещений на ранних стадиях процесса, 3 — стенки лотка (f — лицевая, r — задняя), 4 — дополнительные приборы и оборудование для измерения давления воды и деформаций модели, 5 — «дом 17/1», 6 — «дом 19», 7 — левая боковая водоприемная камера**

Fig. 6. View of the scale physical model «St. Tukhachevsky, 17/1» after the formation of the sinkhole (the results of modeling by the method of water-saturated equivalent materials [1]): 1 — the central (collapsed) part of the sinkholes (see Fig. 2, a), 2 — the rigid base of dial gage (not shown) for measuring vertical displacements in the early stages of the process, 3 — the walls of laboratory flume (f — front, r — rear), 4 — additional instruments and equipment for measuring water pressure and model deformations, 5 — «house 17/1», 6 — «house 19», 7 — left lateral water intake chamber

пространстве районов (а) и (б), или (а) и (в), не говоря уже о совпадении типа (а) + (б) + (в), образует зоны высокого риска.

Возвращаясь к Москве и главному фактору нарушения устойчивости ее территории в эпоху техногенеза — изменению гидродинамического режима, заметим, что снижение напора как грунтовых, так и трещинно-карстовых вод приводит к увеличению эффективных напряжений в грунтах. При одной и той же величине снижения напора силовое воздействие на массив в том и другом случаях, согласно классической теории [2, 21], одинаково. Но это справедливо лишь для вышеупомянутого 1-го типа территорий, для 2-го — эти два случая неравноценны. Именно снижение напоров трещинно-карстовых вод и, как следствие, случайный гидроразрыв экранирующих глинистых пластов был причиной активизации провалообразования на северо-западе Москвы во второй половине XX века [1].

Приуроченность современных поверхностных форм карста к погребенным речным долинам и к древним кар-



Рис. 7. Сводный геологический разрез участка провала на ул. Балчуг (27 ноября 2014 г.), составлен по архивным скважинам

Fig. 7. Composite geological cross-section of the collapse site in the Balchug St. (November 27, 2014), compiled by the archive data

стовым формам, а также большая, если не определяющая роль техногенного воздействия, заставляют задуматься, а вправе ли мы использовать закон Пуассона для прогноза провалов на закарстованных городских территориях? Ведь он описывает распределение вероятности редких случайных независимых событий во времени. Но в Москве, как и в других городах, расположенных на закарстованных территориях, воронки не случайны: цикличность их появления установлена, например, для г. Дзержинска [1]; не редки: две, а то и три воронки в год — обычное явление; и не независимы: воронки часто появляются попарно или приурочены к древним и старым воронкам (см. табл. 1).

Как бы то ни было, но тот факт (см. табл. 1), что почти все значимые карстово-суффозионные воронки в Москве образовались на месте старых или древних карстовых нарушений и приурочены к погребенным речным долинам, позволяет осуществлять так называемый вневременной прогноз. Он отвечает на вопрос, где следует ожидать проявлений карста на земной поверхности, и базируется на данных инженерно-геологического районирования территории.

Использование стохастических моделей в Москве затрудняется отсутствием достаточно большого ряда наблюдений, сильной зависимостью провалообразования от техногенных факторов и неполнотой общей картины. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что далеко не все поверхностные формы карста известны специалистам. А воронок, которые подверглись изучению прежде,

чем были засыпаны, совсем мало. Так было в 1990-х–2000-х гг. (см. № 9, табл. 1), так остается и сейчас. Рано или поздно такое отношение к исследованию геологических и инженерно-геологических процессов, их мониторингу приведет к серьезным авариям и катастрофам.

### О ранее неизвестных проявлениях карстово-суффозионного процесса

Многие инженер-геологи и проектировщики, сталкиваясь с проблемой оценки опасности провалов, обусловленных наличием погребенного карста в Москве, задаются вопросом: «Почему эти провалы происходили только на северо-западе города, и почему в конце 1980-х гг. они прекратились?». А такой парадокс объясняется, скорее всего, только тем, что воронки просто перестали изучать. Их спешат поскорее засыпать, чтобы восстановить нормальное функционирование города. Связано это главным образом с недостатком средств городского бюджета, ведь бурение глубоких скважин, вскрывающих закарстованный массив, геофизические и другие исследования — дорогостоящие мероприятия. Между тем в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН для территории города сейчас создана электронная база пространственно привязанных буровых скважин с отсканированными буровыми журналами, которая часто позволяет получить информацию о геологическом строении участка провала без специальных исследований. Собрана также достаточно полная информация о провалах за период с начала XX века до наших дней. Это

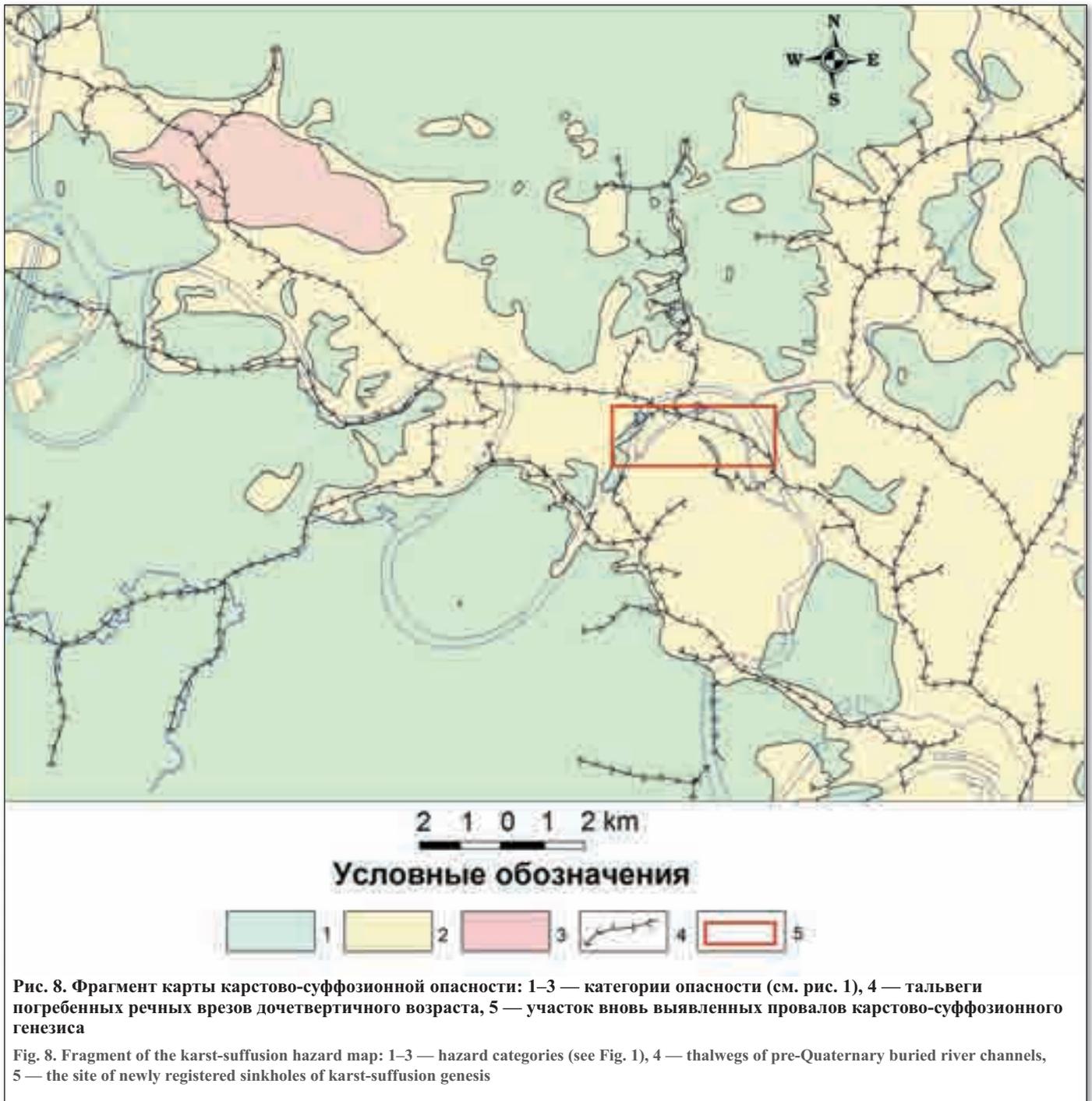


Рис. 8. Фрагмент карты карстово-суффозионной опасности: 1–3 — категории опасности (см. рис. 1), 4 — тальвеги погребенных речных врезов дочетвертичного возраста, 5 — участок вновь выявленных провалов карстово-суффозионного генезиса

Fig. 8. Fragment of the karst-suffusion hazard map: 1–3 — hazard categories (see Fig. 1), 4 — thalwegs of pre-Quaternary buried river channels, 5 — the site of newly registered sinkholes of karst-suffusion genesis

дает возможность провести ретроспективный анализ участков некоторых провалов с целью выявления их генезиса.

Предпринята попытка выявить карстово-суффозионные провалы в районах города, сейчас считающихся потенциально опасными. Технология исследования сводилась к следующему:

- характеристика инженерно-геологических условий в окрестностях провала и признаков его приуроченности к ослабленным участкам растворимых отложений на основе анализа разреза близлежащих буровых скважин разных лет, имеющих в геоинформационной базе данных ИГЭ РАН;
- определение возможного здесь диаметра провала с использованием специальных расчетных моделей;
- сравнение расчетных и реальных размеров провала.

Отобрано 23 провала, образовавшихся в 2011–2015 годах в центральной части Москвы и характеризую-

щихся отсутствием их явной связи с полым техногенным подземным пространством и прорывом или протечками водонесущих коммуникаций. Для девяти из этих провалов удалось получить достаточно достоверную инженерно-геологическую характеристику массива на основе близлежащих архивных скважин. Для этих девяти площадок и были определены расчетные диаметры с использованием моделей поведения несвязных и связных грунтов над ослабленным участком массива пород, разработанных А.В. Аникеевым [1]. Расчетные диаметры пяти провалов практически совпали с их реальными размерами. Допускалось расхождение расчетных и реальных размеров до 30%, так как асфальтовое и другие твердые покрытия препятствуют естественному развитию карстово-суффозионного процесса, и диаметр провала на поверхности, как правило, не совпадает с диаметром канала деформирования грунтов.

Помимо расчетов детально анализировалось описание разрезов буровых скважин для выявления признаков развития карстово-суффозионного процесса. К таким признакам относятся: раздробленность, высокая трещиноватость и кавернозность известняков, провалы в них бурового снаряда, локальное разуплотнение покровной толщи, наличие в ней промежуточных полостей и четвертичного песка в заполнителе трещинно-порового пространства растворимых пород, как, например, на ул. Балчуг (рис. 7), а также повышенная мощность техногенных отложений.

Известняки в кровле карбонатного массива в Москве чаще всего разрушены или сильно трещиноваты (см. рис. 7). В них сформированы обломочные зоны разной мощности (от 1 до 10 м и более), встречаются небольшие открытые полости и широкие трещины. На таких участках, как правило, всегда допускается возможность суффозионного выноса песков и раздробленных глин в полое пространство растворимых отложений. Крупные (> 1,5–2 м) полости в карбонатном массиве, как уже отмечалось, практически отсутствуют.

Выявленные провалы карстово-суффозионного генезиса расположены в пределах поймы и надпойменных террас реки Москвы, на участке развития древней погребенной речной сети дочетвертичного возраста (рис. 8). Естественные гидрогеологические условия здесь изменены под влиянием строительного водопонижения. То есть по инженерно-геологическим условиям этот участок во многом схож с участком на северо-западе города.

Проведенные исследования показали эффективность использования архивной геологической информации, организованной в ГИС, для изучения таких поверхностных проявлений экзогенных геологических процессов, как провалы и оседания земной поверхности. Они позволили выделить на территории города еще один район, опасный в карстово-суффозионном отношении. Специалистам в области оценки опасности развития геологических процессов на территории Москвы этот результат может показаться неожиданным и даже спорным [10]. Тем не менее, он заставляет задуматься и пересмотреть границы категорий опасности на карте, которая сейчас используется при проведении инженерно-геологических изысканий. Если такие исследования продолжить, то провалы карстово-суффозионного генезиса почти наверняка будут выявлены и на других участках города. Увеличение же числа провалов изменит такие вероятностные характеристики, как частота и интенсивность провалообразования, которые лежат в основе оценки геологического риска.

## Заключение

В районах покрытого карста развитие процесса суффозии в покровной толще над закарстованным массивом приводит к изменению строения и свойств песчано-глинистых пород, а часто и к возникновению провалов на земной поверхности. Активизации суффозии способствует техногенное изменение гидродинамической обстановки в результате увеличения интенсивности инфильтрации поверхностных вод и снижения напоров подземных вод.

Наблюдения, выполненные не только в Москве, но и в других районах покрытого карста, показывают, что довольно часто новые воронки образуются на месте старых нарушений карстовой природы. Такие районы совершенно справедливо называют опасными.

Как показал анализ аварий на северо-западе Москвы, произошедших в 1960-х–1970-х годах прошлого века, ущерб от образования карстово-суффозионных воронок на городской территории может изменяться в широких пределах — от стоимости устранения дефектов дорожного полотна и трещин в стенах зданий до затрат на полный снос разрушенных домов и расселение жильцов. Величина ущерба зависит, с одной стороны, от масштаба развития процесса в песчано-глинистой толще, с другой — от проектных решений, используемых при строительстве.

Для территории Москвы разработана и продолжает совершенствоваться методика картографирования провальной опасности, основанная на анализе условий и факторов развития карстово-суффозионного процесса. Активно разрабатываются и совершенствуются расчетные методы определения размеров возможных провалов. Существуют современные технологии проектирования зданий и сооружений в опасных и потенциально опасных районах, учитывающие размеры возможных провалов, полученные расчетными методами. Комплексное использование этих подходов при освоении городской территории позволяет минимизировать карстово-суффозионный риск.

Большое значение для минимизации риска имеет анализ природы образования воронок и выявления участков, опасных в карстово-суффозионном отношении. При инженерно-геологических изысканиях, проектировании и строительстве в таких районах необходимо учитывать возможность возникновения провалов на земной поверхности и в основании зданий и сооружений. 

*Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 16-17-00125 и базового бюджетного финансирования по теме РАН № 0142-2015-0014.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В., 2017. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. РУДН, Москва.
2. Герсеванов Н.М., Польшин Д.Е., 1948. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. Госстройиздат, Москва.
3. Даньшин Б.М., 1947. Геологическое строение и полезные ископаемые Москвы и ее окрестностей. Издательство МОИП, Москва.
4. Дик Н.Е., Соловьев А.И., 1947. Рельеф и геологическое строение. Природа города Москвы и Подмосковья. Издательство АН СССР, Москва-Ленинград.
5. Кожевникова В.Н., 1974. О роли динамики и режима подземных вод в формировании карстово-суффозионных процессов (на примере некоторых районов г. Москвы). Инженерные изыскания при строительстве, Стройиздат, Москва, Вып. 5(33), Сер. 2, с. 22–27.
6. Кожевникова В.Н., 1980. Особенности механизма образования просадок и провалов в результате изменений гидрогеологических условий застраиваемых территорий. Прогноз изменения гидрогеологических условий застраиваемых территорий. Стройиздат, Москва, с. 116–132.

7. Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., 2015. Провалы и оседания земной поверхности на территории г. Москвы. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций, Сергеевские чтения, Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Вып. 17, Москва, 2015, с. 259–265.
8. Котлов Ф.В., 1962. Изменение природных условий территории Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение. Издательство АН СССР, Москва.
9. Кофф Г.Л., Петренко С.И., Лихачева Э.А., Котлов В.Ф., 1997. Очерки по геоэкологии и инженерной геологии Московского столичного региона. Издательство РЭФИА, Москва.
10. Кочев А.Д., Богданов М.И., 2017. Разработка нового свода правил «Инженерные изыскания для строительства на закарстованных территориях. Общие требования». Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации, Материалы докладов XIII Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций. Москва, 2017, с. 600–606.
11. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л., Афанасьев В.Ю., 1989. Методика и результаты комплексного изучения карстово-суффозионных процессов в г. Москве. Инженерная геология, № 6, с. 77–94.
12. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н., 1989. Устойчивость закарстованных территорий. Наука, Москва.
13. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А., 2011. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы. Геоэкология, № 3, с. 215–226.
14. Лихачева Э.А., 2007. Экологические хроники Москвы. Медиа-Пресс, Москва.
15. Осипов В.И., Медведев О.П. (ред.), 1997. Москва: геология и город. АО «Московские учебники и Картолитография», Москва.
16. Осипов Ю.Б., Чертков Л.Г., 1986. Методика инженерно-геологического изучения карстовых и суффозионных явлений в условиях крупного города. Инженерная геология, № 5, с. 72–84.
17. Парфенов С.И., 1981. Карстово-суффозионные явления на Ходынском поднятии в г. Москве. Новые методы изучения инженерно-геологических условий. Наука, Москва, с. 34–38.
18. Рагозин А.Л. (ред.), 2003. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Издательская фирма «Крук», Москва.
19. Newton J.G., 1987. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States. U.S. Geological Survey, Circular 968, Denver.
20. Poland J.F., 1981. Subsidence in United States due to ground-water withdrawal. J. Irrig. and Drain. Div., Vol. 107, No. 2, pp. 115–135.
21. Terzaghi K., Peck R.B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2d ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.

## REFERENCES

1. Anikeev A.V., 2017. Sinkholes and subsidence holes in karst areas: formation mechanisms forecast and risk assessment. RUDN, Moscow. (in Russian)
2. Gersevanov N.M., Polshin D.E., 1948. Theoretical foundations of soil mechanics and their practical applications. Gosstroyizdat, Moscow. (in Russian)
3. Danshin B.M., 1947. Geological structure and mineral deposits of Moscow and its environs. MOIP Publishing House, Moscow. (in Russian)
4. Dik N.E., Soloviev A.I., 1947. Relief and geological structure. In The nature of Moscow city and its suburbs. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, Moscow-Leningrad. (in Russian)
5. Kozhevnikova V.N., 1974. On the role of dynamics and the regime of groundwater in the formation of karst-suffosion processes (on the example of some districts of Moscow). Engineering surveys for construction, Stroyizdat, Moscow, Issue 5(33), Series 2, pp. 22–27. (in Russian)
6. Kozhevnikova V.N., 1980. Some features of mechanism formation of subsidence and sinkholes as a result of changes in the hydrogeological conditions of the built-up areas. Forecast changes in the hydrogeological conditions of built-up areas. Stroyizdat, Moscow, pp. 116–132. (in Russian)
7. Kozliakova I.V., Kozhevnikova I.A., Anisimova N.G., 2015. Collapses and surface subsidence in Moscow. Engineering-geological and geoecological problems of urban agglomerations, Sergeevsky reading, Materials of annual sessions of the RAS Scientific Council on Geoecology, engineering Geology and hydrogeology, Issue 17, Moscow, pp. 259–265. (in Russian)
8. Kotlov F.V., 1962. Changes in the natural conditions of Moscow territory under the influence of human activity and their engineering-geological significance. Publishing house of the USSR Academy of Sciences, Moscow. (in Russian)
9. Koff G.L., Petrenko S.I., Likhacheva E.A., Kotlov V.F., 1997. Essays on geoecology and engineering geology of the Moscow capital region. Refia Publishing House, Moscow. (in Russian)
10. Kochev A.D., Bogdanov M.I., 2017. Development of a new set of rules "Engineering surveys for construction in karst areas. General requirements". Development prospect of engineering surveys in construction in the Russian Federation. Materials of the XIII All-Russian Conference of Survey Organizations, Moscow, 2017, pp. 600–606. (in Russian)

11. Kochev A.D., Chertkov L.G., Zayonts I.L., Afanasyev V.Yu., 1989. Methods and results of a comprehensive study of karst-suffusion processes in Moscow. *Engineering Geology*, No. 6, pp. 77–94. (in Russian)
12. Kutepov V.M., Kozhevnikova V.N., 1989. Stability of the karstified territories. *Nauka, Moscow*. (in Russian)
13. Kutepov V.M., Kozliakova I.V., Anisimova N.G., Eremina O.N., Kozhevnikova I.A., 2011. Assessment of karst and karst-suffusion hazard in the project of large-scale geological mapping of Moscow city. *Environmental Geoscience*, No 3, pp. 215–226. (in Russian)
14. Likhacheva E.A., 2007. *Ecological chronicles of Moscow*. Media Press, Moscow. (in Russian)
15. Osipov V.I., Medvedev O.P. (ed.), 1997 *Moscow: geology and the city*. JSC "Moscow Textbooks and Cartolithography", Moscow. (in Russian)
16. Osipov Yu.B., Chertkov L.G., 1986. Methods of engineering-geological study of karst and suffusion phenomena in a large city. *Engineering Geology*, No. 5. pp. 72–84. (in Russian)
17. Parfenov S.I., 1981. Karst-suffusion phenomena at the Khodynka uplift in Moscow. New methods of studying engineering-geological conditions. *Nauka, Moscow*, pp. 34–38. (in Russian)
18. Ragozin A.L. (ed.), 2003. *Natural hazards in Russia. Assessment and management of natural risks*. Publishing company Crook, Moscow. (in Russian)
19. Newton J.G., 1987. Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States. U.S. Geological Survey, Circular 968, Denver.
20. Poland J.F., 1981. Subsidence in United States due to ground-water withdrawal. *J. Irrig. and Drain. Div.*, Vol. 107, No. 2, pp. 115–135.
21. Terzaghi K., Peck R.B., 1967. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2d ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### АНИКЕЕВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

Главный научный сотрудник лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, д.г.-м.н., г. Москва, Россия

#### КОЗЛЯКОВА ИРИНА ВЛАДИМИРОВНА

Заведующая лабораторией экзогенной геодинамики и анализа геологического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

#### КОЖЕВНИКОВА ИРИНА АНДРЕЕВНА

Старший научный сотрудник лаборатории экзогенной геодинамики и анализа геологического риска Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва, Россия

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

#### ALEKSANDR V. ANIKEEV

Chief researcher of the Laboratory of Geological processes and Risk assessment, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

#### IRINA V. KOZLIAKOVA

Head of the Laboratory of Geological processes and Risk assessment, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

#### IRINA A. KOZHEVNIKOVA

Senior research scientist of the Laboratory of Geological processes and Risk assessment, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS, Moscow, Russia



Воронка провала в Москве на проспекте Маршала Жукова, д. 12/1, образовавшаяся в конце мая 1996 г. и практически ликвидированная к моменту фотосъемки (7 июня 1996 г.). Фото И.В. Козляковой