

ОПАСНОСТЬ И РИСК ОБРАЗОВАНИЯ ВОРОНОК ПРОВАЛА И ОСЕДАНИЯ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ: ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ПОДХОДЫ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ

SINKHOLE HAZARD AND RISK OF ITS FORMATION IN KARST AREAS: MAIN INDICES, APPROACHES AND METHODS OF EVALUATION

АНИКЕЕВ А.В.

Главный научный сотрудник Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, д.г.-м.н., г. Москва, anikeev_alex@mail.ru

ANIKEEV A.V.

Chief researcher of Sergeev Institute of Environmental Geoscience, RAS, DSc (Doctor of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, anikeev_alex@mail.ru

Ключевые слова:

карст; карстово-суффозионные воронки; опасность; риск; уязвимость.

Keywords:

karst; karst-suffosion sinkholes; hazard; risk; vulnerability.

Аннотация

В основу типизации природных и техноприродных рисков, в том числе и карстово-суффозионного, целесообразно положить в основу сначала два существующих способа выражения ущерба, а затем типы объектов-реципиентов. Записаны формулы, позволяющие с единых позиций находить физический и экономический ущерб от поражения территорий и инженерных объектов геологическими процессами. Рассмотрены подходы к определению вероятностных показателей провалообразования и две используемые в настоящее время стохастические модели этого процесса — экспоненциальная и линейная. Показано, что простой интегральной характеристикой и вероятности, и силы воздействия воронок на объекты техносферы служит физический риск потери земельных угодий. На этом утверждении базируется разработанная шкала, которая дает возможность более объективно оценивать степень провальной опасности городских территорий по двум основным ее показателям — интенсивности формирования и диаметру воронок.

Abstract

For the typifying of natural and human-induced risks, including the karst-suffosion, it is advisable first to distinguish the two groups in accordance with the two existing ways of damage expressing, and then — the types of recipient objects. The formulas, that allow taking an unified position when assessing physical and economic damage caused by the destruction of territories and engineering objects due to geological processes, are written in the paper. Also there are considered the approaches to the evaluation of sinkhole probability indices and two currently used stochastic models of subsidence-sinkhole development i.e. collapsing process, namely, exponential and linear ones. The physical risk of land loss is the simple integral characteristic of the both probability and strength of karst impact on the technosphere objects. On this statement there's based the developed scale, that makes it possible to objectively assess the degree of sinkhole danger in urban areas based on its two main indices — occurrence intensity and funnel diameter.

Введение

Любые геологические процессы — и экзогенные, и эндогенные — характеризуются вероятностью их проявления на земной поверхности и силой их негативного воздействия на окружающую среду. Именно поэтому они представляют угрозу для человека или инженерных объектов и в последние двадцать лет называются также геологическими опасностями [10–12, 28, 29].

В районах покрытого карста главную опасность несут провалы и просадки земной поверхности, которые чаще всего называются карстовыми. На наш взгляд, термин «карстово-суффозионные воронки» намного лучше отражает то, что происходит в нерастворимых грунтах над ослабленными участками растворимых пород, а именно — локальное деформирование и разрушение покровной толщи по мере выноса песков и раздробленных глин в трещинно-карстовые коллекторы (рис. 1).

На 0-й, начальной стадии в основании грунтовой толщи появляются условия развития этого процесса: в растворимых отложениях формируется или освобождается от заполнителя ослабленный участок — карстовая полость, широкая трещина или другая подземная карстовая форма, способная инициировать провалообразование (рис. 1, а). На 1-й стадии нижний экранирующий слой в силу тех или иных причин, например, вследствие снижения напора трещинно-карстовых вод и случайного гидроразрыва глин [1], увеличения пролета ослабленного участка или снижения прочности связных грунтов разрушается, и начинается вынос, или массовая суффозия песков (рис. 1, б). Если имеет место обрушение растворимых пород кровли карстовой полости, которое на рис. 1 не показано, то оно, как правило, сразу же влечет за собой обрушение нижнего разделяющего пласта, а в его отсутствие — истечение несвязных грунтов.

На 2-й стадии истечение песков продолжается, область выноса достигает верхнего экранирующего слоя, в подошве которого возникает и растет промежуточная полость (рис. 1, в). А дальше, на 3-й стадии, в зависимости от низких или высоких показателей свойств и состояния грунтов, их мощности и скорости выноса процесс при одном и том же строении массива может завершиться образованием воронки оседания

(рис. 1, з) или воронки провала (рис. 1, д). При продолжающемся или возобновляющемся выносе грунтов локальное оседание земной поверхности на 3-й стадии может предшествовать провалу — на 4-й (рис. 1, з, д). В толще с большим или меньшим числом прослоев связанных и несвязных грунтов чередующихся стадий их обрушения и истечения будет соответственно больше или меньше вплоть до предельного случая, когда покровная толща однослойная и целиком сложена глинами или песками. Большую роль в процессе провалообразования играет не только техногенное нарушение режима уровней подземных вод, но и изменения уровней в ходе деформирования-разрушения грунтов (рис. 1). Этот вопрос, выходящий за рамки статьи, рассматривается, например, в работах [1, 3, 10, 28].

1. Показатели опасности провалообразования и риска потерь от этого процесса

В инженерной геологии карстовых районов главным показателем силы воздействия воронок на объекты техносферы служит их диаметр: средний (D_{cp}) или максимальный (D_{max}). А основным вероятностным показателем — интенсивность провалообразования λ :

$$\lambda = \lambda^*/S = N/TS, \quad (1)$$

где N , T , S — количество, время образования и площадь распространения воронок; λ^* — частота, или среднестатистическая вероятность, их появления:

$$\lambda^* = N/T. \quad (2)$$

Очевидно, что интенсивность процесса — это его частота, нормированная по площади.

Поскольку N — величина безразмерная ($[N] = [1]$), а независимые размерности времени и длины — это в данном случае «год» и «километр», то размерности частоты и интенсивности составляют $[\lambda^*] = [T^{-1}]$ и $[\lambda] = [T^{-1} \cdot L^{-2}]$, а единицы их измерения — $(\text{год}^{-1}) \equiv (1/\text{год})$ и $(\text{год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}) \equiv (1/\text{год} \cdot \text{км}^2)$. Заметим также, что повто-

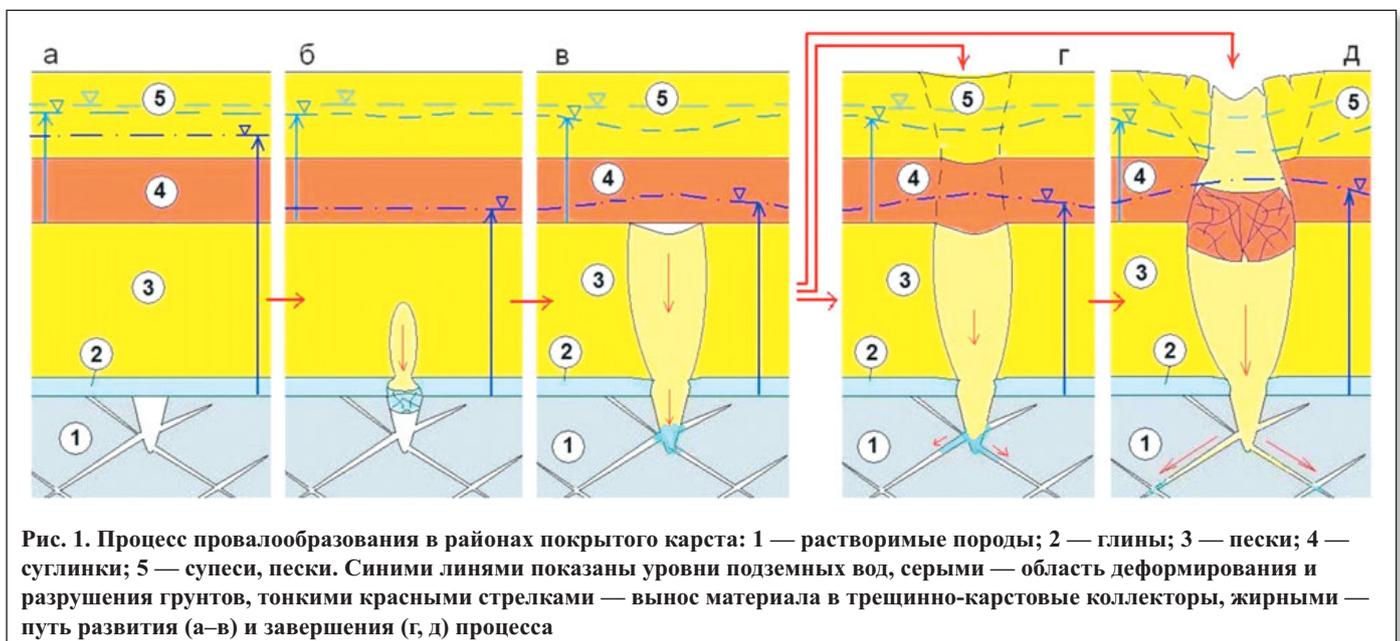
ряемость — величина, обратная частоте: $\Delta t^* = 1/\lambda^*$. Она определяет среднестатистический период времени, в течение которого происходит или может произойти одно событие.

Наиболее общая и общепринятая формула риска записывается в виде [12, 25, 30]:

$$R = P_o \cdot D_o, \quad (3)$$

где P_o — вероятность (probability) поражения объекта (object), D_o — ущерб (damage) от его повреждения или разрушения за заданное время Δt . Интервалом Δt , как правило, служит либо единичный отрезок времени $\Delta t = 1$ год, либо срок эксплуатации объекта $\Delta t = T_o$, в первом случае получаем ежегодный ущерб, во втором — полный. Представляется, что риск ежегодных потерь, позволяя сравнивать значения разных типов и видов риска для одного объекта или одной разновидности риска для разных объектов, а также находить интегральный ущерб от нескольких опасностей, представляет в первую очередь научно-методический интерес. С практической точки зрения важнее риск, выраженный в виде полных потерь, так как он помогает принять решение: «строить, или не строить, строить дешево или дорого» при планировании и проектировании конкретных объектов.

Формула (3) свидетельствует о том, что риск — это вероятный ущерб, который может быть причинен вполне определенному объекту (реципиенту опасности и риска) в течение определенного времени. Отсюда следует, что в качестве основных признаков типизации риска провалообразования и иных природных и техноприродных рисков целесообразно выбрать сначала существующие способы выражения ущерба, а их всего два: 1) физические и 2) денежные либо эквивалентные деньгам потери, а затем типы объектов-реципиентов. С позиций инженерной геологии реципиентами геологических процессов являются: 1) территории, 2) здания и сооружения, 3) население, 4) окружающая среда. При этом мы получаем две самостоятельные группы физического (I) и экономиче-



ского (II) риска, внутри которых с полным правом можем рассматривать: 1) территориальный, или земельный, 2) инженерный, или технический, 3) социальный и 4) экологический риски в зависимости от того, в каких единицах они выражены.

Ущерб D_o , обозначенный в (3) курсивом, чтобы отличать его от диаметра D , может быть прямым и косвенным. Определение суммарных, общих потерь — это сложная экономическая задача. Решить ее на высоком научно-техническом уровне возможно лишь усилиями большого коллектива высококвалифицированных специалистов разного профиля — геологов, проектировщиков, строителей, экономистов и др. [2].

Если ограничиться вычислением прямого ущерба и в качестве реципиентов риска рассматривать только новые здания и сооружения, чтобы не учитывать износ конструкций, а также земельные угодья, то есть некоторую территорию, то он равен:

$$D_o = C_o \cdot V_o = (C_o)_d, \quad (4)$$

где C_o — стоимость (cost) объекта, $(C_o)_d \leq C_o$ — стоимость его поврежденных или вышедших из строя частей; V_o — экономическая уязвимость (vulnerability) объекта:

$$V_o = (C_o)_d / C_o. \quad (5)$$

Выражения (4), (5) позволяют с единых позиций оценивать физический и экономический ущерб от поражения инженерных объектов и территорий геологическими процессами.

Действительно, что такое физическая уязвимость V_o' земельного участка для провала? Очевидно, что это отношение средней или максимальной площади воронки $S_b = \pi D^2/4$ — части объекта, которая разрушена в результате реализации одного события и не подлежит использованию в хозяйственных целях, ко всей площади участка-объекта S_o :

$$V_o' = S_b / S_o = \pi D^2 / 4 S_o. \quad (5a)$$

При не очень большой площади S_o , стоимость разных частей которой примерно одинакова, имеем: $V_o' = V_o$. При этом материальный ущерб, составляющий

$$D_o' = S_o \cdot V_o' = S_b, \quad (4a)$$

полностью согласуется с экономическим ущербом (4), так как $(C_o)_d = S_b \cdot (C_o / S_o)$, где C_o / S_o — стоимость единичной площади участка.

Полагать, что $V_o' = V' = S_b / S$ [11, с. 132], на наш взгляд, неверно. Если интересующим нас участком служит вся территория ($S > S_o$), то ее событийная уязвимость равна $V' = S_b / S < V_o' = S_b / S_o$. Ущерб же согласно выражению (4a) составит $D' = S \cdot V' = S_b = D_o'$. Другими словами, при единичном проявлении процесса на каком-либо участке земной поверхности доля его потерь, то есть уязвимость будет, очевидно, тем больше, чем меньше его площадь. Ущерб при этом не зависит от площади участка.

Необходимо также отметить, что уязвимость инженерных объектов при их повреждении карстово-суффозионными воронками помимо площади послед-

них, а значит, и их диаметра, зависит от типа сооружения и площади его фундамента S_ϕ . Как следует из таблиц, составленных для типовых зданий [11, с. 115; 15, с. 43], она уменьшается с уменьшением D и увеличением S_ϕ . Минимальными значениями V_o характеризуются монолитные здания, максимальными — каркасные. К этому вопросу мы еще вернемся в четвертом разделе статьи.

Таким образом, выделяются две группы показателей риска провалообразования. Показатели первой ($N, D, S, T, \lambda^*, \lambda$) характеризуют источник опасности — процесс — и относятся к массиву пород и территории, в границах которых он проявляется. Характеристики второй ($S_\phi, S_o, T_o, V_o, C_o$) принадлежат реципиенту опасности. И те, и другие влияют на величину ущерба D_o , который служит одним из двух главных комплексных показателей риска. Другой главный комплексный показатель P_o представляет для инженера-геолога наибольший интерес и заслуживает отдельного обсуждения, которому посвящен следующий раздел статьи. Проблемы получения на практике некоторых из перечисленных выше характеристик рассмотрены в работе [2].

2. Общий подход и способы оценки карстово-суффозионного риска

В настоящее время, несмотря на имеющийся опыт учета в пространственно-временных прогнозах условий, факторов и механизмов формирования карстово-суффозионных воронок [3, 10, 11, 13, 20], в целом при математическом описании распределения провалов во времени они рассматриваются как случайные дискретные события. Поэтому общий подход к анализу риска провалообразования сейчас только один — вероятностно-статистический, а существующих способов его вычисления — два. Покажем их на примере стохастических моделей, используемых для оценки риска провалов в Москве и Нижегородской области.

Придерживаясь общепринятой формулы (3) и считая, что второй множитель (ущерб D_o) нами определен, видим, что оценка риска сводится к нахождению первого множителя — вероятности P_o . Согласно представлениям А.Л. Рагозина [12], которые нашли отражение в Рекомендациях [15], условная вероятность поражения объекта за срок его службы $T_o \leq 50$ лет, является линейной функцией частоты или интенсивности провалов:

$$P_o = \lambda^* \cdot P_s \cdot T_o = \lambda^* \cdot (S_o / S) \cdot T_o = \lambda_o^* \cdot T_o = \lambda \cdot S_o \cdot T_o, \quad (6)$$

где $P_s = S_o / S$ — геометрическая вероятность образования воронки на площади объекта S_o . Забегая вперед, отметим, что соотношение S_o / S можно, конечно, называть геометрической вероятностью, но суть в том, что $\lambda^* \cdot (S_o / S) = \lambda_o^*$ есть не что иное, как статистическая вероятность поражения именно площади S_o , а не всей территории S , в пределах которой она расположена ($S_o \leq S$). При этом, как следует из формулы (1), $\lambda_o^* = \lambda \cdot S_o$.

Более строгая с теоретических позиций стохастическая модель базируется на представлении о провалах как редких случайных событиях, распределение которых во времени подчиняется закону Пуассона.

Она предложена В.В. Толмачевым [24] и применяется для оценки карстового риска на территории Нижегородской области [16]. Согласно этому закону вероятность P_0 связана с показателями λ^* , S , λ , λ_0^* , S_0 , T_0 экспоненциальным уравнением:

$$P_0 = 1 - \exp(-\lambda^* \cdot S_0 \cdot T_0 / S) = 1 - \exp(-\lambda_0^* \cdot T_0) = 1 - \exp(-\lambda \cdot S_0 \cdot T_0). \quad (7)$$

Считается [4], что закон Пуассона и, следовательно, уравнение (7) справедливы, если опасный процесс стационарный ($\lambda^* = \text{const}$), его проявления ординарны (за малый промежуток времени происходит не более одного события), и отсутствует последствие (частота процесса не изменяется после той или иной его реализации). Это довольно сильные ограничения, особенно если речь идет о техноприродных процессах, когда воронки могут появляться попарно и их трудно считать независимыми событиями, да и характер процесса во времени сильно меняется, а порой становится циклическим [3]. Все они в той или иной степени относятся и к линейной модели (6), зато она не требует специального обоснования. При использовании же экспоненциальной модели (7) нужно показывать, что для данной выборки среднегодовое количество провалов на площади S , численно равное их частоте λ^* , равно эмпирической дисперсии s^2 случайной величины $X = \lambda^* \cdot \Delta t$, которая представляет собой ежегодное количество воронок и может принимать значения $x = 0, 1, 2, \dots, n$ (как правило, $n \leq 3-5$). Дело в том, что закон Пуассона однопараметрический [4, 6], и в нашем случае среднегодовое количество воронок $\lambda^* \cdot \Delta t$, где $\Delta t = 1$ год, как раз и является параметром распределения Пуассона, который по определению равен и математическому ожиданию $M[X]$, и дисперсии $D[X]$. Если $\lambda^* \cdot \Delta t \approx M[X] \neq s^2 \approx D[X]$, то вероятность P_0 можно найти с помощью уравнения (6).

На рис. 2, а показаны результаты вычисления вероятности образования хотя бы одной воронки на территории S по формулам (6), (7), в которых $P_s = S_0/S = 1$, $T_0 = t$. Видно, что при $\lambda^* \cdot t < 0.25$ ($t < 5$ лет для принятой на рисунке частоты $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$) значения P практически совпадают: их разность $\Delta P = P_6 - P_7 < 3\%$. Однако в отличие от экспоненциальной зависимости

линейная функция по сути дела показывает рост числа провалов во времени: $P = \lambda^* \cdot t = n$. И при достаточно большом значении t может оказаться, что $P > 1$ даже при очень малой частоте процесса. На рис. 2, а таким критически большим значением времени служит $t_{\text{кр}} = 20$ лет. Но так как вероятность не может быть больше единицы, а в качестве прогнозного интервала времени, на которое мы распространяем данные наблюдений, полученные за период времени T , выступает срок службы объекта T_0 , то следует ввести дополнительное условие: $P = 1$ при $t_{\text{кр}} = T_0 > 1/\lambda^* = \Delta t^*$ и записать линейную функцию в виде системы уравнений (8):

$$\begin{cases} P = \lambda^* \cdot t, & t_{\text{кр}} = T_0 \leq 1/\lambda^*; \\ P = 1, & t_{\text{кр}} = T_0 > 1/\lambda^*. \end{cases} \quad (8)$$

Принимая это условие, видим, что значения вероятности появления воронки на площади S , посчитанные по уравнениям (8), в которых $T_0 = 20$ лет, и (7), в котором $S_0/S = 1$ и $T_0 = t$, практически совпадают ($\Delta P < 3\%$) не только при малом, но и большом числе провалов $n = \lambda^* \cdot t > 3.5$ ($t > 70$ лет на рис. 2, а). В области средних значений $\lambda^* \cdot t = 0.75-1.5$ ($t = 15-30$ лет) разность ΔP увеличивается до 22–30% и даже 37% при $\lambda^* \cdot t = 1$ ($t = 20$ лет). Однако при той точности, с какой мы устанавливаем некоторые показатели опасности, например, время образования или возраст воронок и площадь их развития, эти цифры не кажутся очень большими. И, кроме того, завышение опасности на 20–30% не противоречит консервативному подходу к оценке устойчивости территорий, принятому в инженерных изысканиях и проектировании самых разных объектов.

На рис. 2, б приведены графики зависимости вероятности P_0 поражения объекта от его площади S_0 . Они рассчитаны по формулам (6), (7) для двух достаточно высоких значений интенсивности λ . Первое, $\lambda_1 = 0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, характеризует границу между II и III категориями устойчивости, второе, $\lambda_2 = 0.05 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, — между III и IV категориями [20–23]. Видно, что чем больше λ , тем большие значения вероятности дает линейная функция по сравнению с экспоненциальной. Так, пунктирные линии почти совпадают ($\Delta P_0 < 3\%$) на всем отрезке S_0 , показанном на рис. 2, б ($S_0 < 10 \text{ Га}$), а сплошные — только на его первой по-

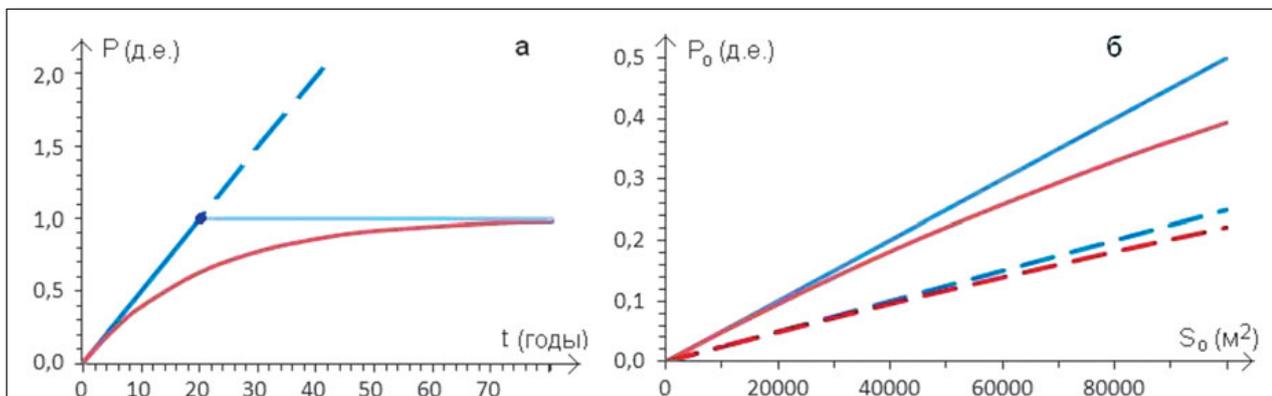


Рис. 2. Линейные (синие) и экспоненциальные (красные) графики зависимости вероятности P поражения территории от времени t при частоте провалообразования $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$ (а) и вероятности P_0 поражения объекта от его площади S_0 за время $T_0 = 50$ лет для двух значений интенсивности процесса λ : сплошные линии — $\lambda = 0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$, пунктирные — $\lambda = 0.05 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ (б)

ловине ($S_0 < 5$ Га). Увеличивается разность значений P_0 и при увеличении площади объекта. Однако для обычных зданий и сооружений площадью $S_0 < 10$ Га даже при столь высокой интенсивности, как λ_1 , она невелика ($\Delta P_0 < 11\%$), и в практических оценках риска ею можно пренебречь. При планировании работ по освоению, использованию и инженерной защите больших территорий следует применять уравнение (7). Если этого сделать нельзя, то, введя дополнительное условие: $P_0 = 1$ при $S_0 > 10^2/(\lambda T_0)$ (в гектарах), можно воспользоваться линейной функцией $P_0 = f(S_0)$, записанной в виде двух уравнений, аналогичных системе (8), допуская при этом, что вблизи $(S_0)_{кр} = 10^2/(\lambda T_0)$ вероятность, а значит, и риск могут оказаться завышенными на 30–37%. Для верхнего и нижнего синих графиков на рис. 2, б критической площадью участка-объекта, очевидно, будут $(S_0)_{кр} = 20$ Га и $(S_0)_{кр} = 40$ Га.

Рассмотренные выше и подобные им модели базируются на статистических данных о поверхностных карстовых формах. Они просты и эффективны, поэтому, если их можно использовать для прогноза провалов, то их и следует использовать. Однако даже в таких классических районах реализованной опасности, как Нижегородская область, Пермский край и Республика Башкортостан, существует много участков, где применение стохастических моделей по разным причинам невозможно либо встречает большие трудности. Первая причина: поверхностных карстовых форм нет, или они не обнаружены (это участки нереализованной, потенциальной опасности). Вторая — воронки есть, но их слишком мало для статистической обработки. Третья — провалы есть и много, но происходят в результате техногенного воздействия.

Во всех перечисленных выше случаях главной проблемой служит определение основных показателей опасности D и λ , при этом оптимальный путь прогноза среднего ($D_{ср}$) и максимального (D_{max}) диаметров воронки, на наш взгляд — расчетный. Он особенно актуален при крупномасштабных исследованиях и изысканиях на городских территориях, хотя, конечно, результаты, полученные тем или иным расчетным способом, могут сильно различаться [2]. Можно воспользоваться и методом натуральных аналогов (инженерно-геологических аналогий) [6, 18], но сходство условий и факторов процесса в изучаемом массиве и массиве-аналоге должно быть количественно обосновано

и представлено в виде численных значений определяющих критериев подобия. Это далеко не простая задача, особенно если речь идет не о геометрических, а кинематических характеристиках геологического процесса, например о его частоте или интенсивности.

В основе любых расчетных, в том числе и математических, моделей лежат методы механики горных пород и инженерной геодинамики. Все они базируются на схематизации инженерно-геологических условий, порой довольно существенной. Чтобы она была корректной, а результаты расчетов — адекватными, мы должны хорошо знать геологическое строение массива, свойства и состояние слагающих его грунтов, гидрогеологические условия, вид и уровень техногенной нагрузки. А главное — ясно представлять себе закономерности и механизм формирования карстово-суффозионных воронок (см. рис. 1). И это минусы детерминированного подхода и основанных на нем методов, в том числе и метода натуральных аналогов. Сильно осложняет применение расчетных моделей и стохастический характер некоторых факторов провалообразования. Но если рассчитать средний и максимальный диаметры воронки сейчас все-таки возможно [3, 28], то определение интенсивности λ в потенциально опасных районах — это далеко не решенная в настоящее время задача.

3. Определение частоты и интенсивности процесса

Ее решение, тем не менее, возможно, если признать, что первичным вероятностным показателем служит не интенсивность λ , а частота процесса λ^* , которая, как показывает формула (2), не привязана к площади конкретного района, участка или сооружения. Воспользуемся, например, данными работы [7], согласно которым в Москве $\lambda^* = 0.2$ год⁻¹, несмотря на то что все карстово-суффозионные воронки и зафиксированы на северо-западе города.

Принимая $\lambda^* = 0.2$ год⁻¹ = const (рис. 3, а) и учитывая, что $\lambda^* = \lambda S$, получим для опасного района Москвы (рис. 3, б), площадь которого составляет $S_1 = 10.8$ км² [8], значение $\lambda_1 = \lambda^*/S_1 = 0.0185$ км⁻²год⁻¹ (категория IV). Для потенциально опасных и неопасных районов общей площадью $S_2 = 173.0$ км² и $S_3 = 897.2$ км² оно во много раз меньше (рис. 3, в): $\lambda_2 = \lambda^*/S_2 = 0.0012$ км⁻²год⁻¹ (категория V) $\lambda_3 = \lambda^*/S_3 = 0.0002$ км⁻²год⁻¹. Так как в неопасных районах, выделенных при картографировании Москвы по инженерно-геологическим качественным и количественным признакам [8], провалы практически исключаются, то они относятся к категории VI, которая в данном случае характеризуется интенсивностью $\lambda_3 = 0.0002$ км⁻²год⁻¹. Причем величина λ_3 дает основания для проведения границы между категориями VI и V по значению интенсивности, равному, например, 0.001 км⁻²год⁻¹: VI ($\lambda < 0.001$ км⁻²год⁻¹), V ($\lambda = 0.001$ – 0.01 км⁻²год⁻¹). Представляется, что подход к определению λ , схематически показанный на рисунке 3, а, лежит в основе метода удаленности, разработанного И.А. Саваренским (1990). И, если вдуматься, та же самая предпосылка ($\lambda^* = \text{const}$) использована А.Л. Рагозиным и В.А. Елкиным (2003) при региональной оценке риска образования провалов в Республике Татарстан.

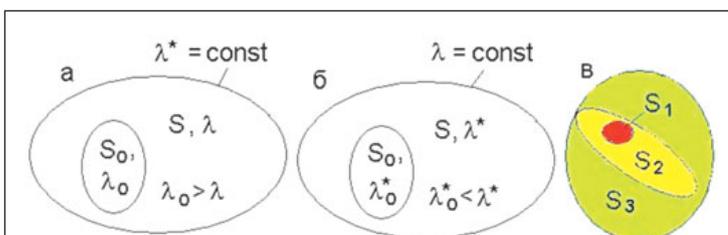


Рис. 3. Соотношение интенсивности λ и частоты λ^* проявлений процесса на оцениваемом участке (объекте) S_0 и всей территории S , ограниченной изолиниями $\lambda^* = \text{const}$ (а), $\lambda = \text{const}$ (б); и схема расположения опасного ($S_1 = 10.8$ км²), потенциально опасных ($S_2 = 173.0$ км²) и неопасных ($S_3 = 897.2$ км²) в карстово-суффозионном отношении районов Москвы (в)

Иная ситуация возникает, если мы задаемся условием: $\lambda = \lambda_0 = \text{const}$ (рис. 3, б). В этом случае, который рассмотрен в работе [4], учитывая также, что $\lambda = \lambda^*/S$, получим: $\lambda_0^*/\lambda^* = S_0/S$. Тогда максимальной частота будет на всей территории S : $\lambda^* = \lambda_0^* \cdot (S/S_0) = S \cdot \lambda$. С уменьшением оцениваемой площади S_0 среднестатистическая вероятность негативного события уменьшается: $\lambda_0^* = \lambda^* \cdot (S_0/S) = S_0 \cdot \lambda$. Именно на этой предпосылке ($\lambda = \text{const}$), как следует из уравнений (6), (7), базируется определение частоты провалов в пределах территориального или инженерного реципиента риска. Но это возможно лишь на втором, если не на третьем этапе анализа, когда с использованием метода удаленности или предложенного выше подхода границы районов или участков в изолиниях интенсивности уже проведены.

При оценке устойчивости районов покрытого карста давно и успешно используются две классификации (рис. 4), которые, строго говоря, являются результатом не классифицирования, а ранжирования двух основных показателей опасности. На рис. 4, а четко определены границы категорий I–V [21]. Последняя категория не подобна пяти первым. Мы не можем выделить районы VI категории только по результатам обследования, в ходе которого обнаружено, что число N , входящее в формулы (1), (2), равно нулю. Если в верхней части земной коры растворимые отложения отсутствуют, то такие участки мы должны просто исключить из рассмотрения на основании не столько детерминированного подхода, сколько здравого смысла. Если же они присутствуют, а мы, как и при выделении категорий I–V, стоим на стохастических позициях, то, несмотря на все другие неблагоприятные для образования карстово-суффозионных воронок условия и факторы, вероятность проявления карста на поверхности грунтовых массивов, хоть и небольшая, но есть. Поэтому категория VI либо не может стоять в этом ряду, либо должна быть задана некоторым, пусть крайне малым, значением λ , о чем говорилось выше.

Другая классификация устанавливает четыре категории устойчивости по значениям диаметра воронок (рис. 4, б) [9], от величины которого, как отмечалось в начале статьи, зависит степень или сила воздействия провала на объект. При этом возникает вопрос, почему все рекомендации по характеру застройки и защитным мероприятиям, содержащиеся в СП 116.13330.2012 [22] и нормативных документах, предшествующих этому своду правил, зависят главным образом от категорий, показанных на рис. 4, а? И почему так невнятно прописаны в них четыре последние категории (рис. 4, б)?

4. О расчетном пролете карстового провала

Ответ, по-видимому, заключается в том, что реальный пролет воронки, равный, например, 20 м или 40 м, абсолютно не устраивает проектировщиков: защититься от таких провалов трудно, если вообще возможно, а строить надо. Поэтому в начале 1980-х гг. в качестве основного параметра проектирования конструктивной противокрстовой защиты и был предложен так называемый «расчетный пролет l_d » [26]. Этот параметр «характеризует вероятное воздействие провалов на сооружение и представляет собой длину

а Саваренский И.А. (СНиП 1.02.07-87, 1987)		б Метелюк Н.С., Пушкарев В.В. (Методические рекомендации..., 1977)	
Категории устойчивости	Интенсивность провалов λ , км ² ·год ⁻¹	Категории устойчивости	Средний диаметр провалов D_{cp} , м
I	свыше 1.0	А	свыше 20
II	0.1 – 1.0	Б	10 – 20
III	0.05 – 0.1	В	3 – 10
IV	0.01 – 0.05	Г	до 3
V	до 0.01		
VI	Возможность провалов исключается		

Рис. 4. Две общепринятые классификации закарстованных территорий по основным показателям опасности

полной потери несущей способности его основания под подошвой фундамента» [16, с. 81]. Методика его вычисления изложена в [14, 17], а сам пролет позже был закреплен в ТСН 22–308–98 НН [27] и пока благополучно используется при строительстве зданий и сооружений в Нижегородской области [16] и не только там. Сейчас активно лоббируется предложение о введении этого пролета в актуализированные редакции некоторых нормативных документов РФ. На наш взгляд, делать этого никак нельзя.

Идея определения «расчетного пролета» возникла примерно в то же время, что и идея прогноза геологических процессов в показателях риска. И, несомненно, это был новый шаг в проектировании зданий и сооружений на закарстованных территориях. К сожалению, направлен он был не на выяснение возможной реакции объекта при появлении под ним воронки, а на вероятностно-статистическое определение ее пролета, который, хотя и имеет размерность длины, действительной длиной, шириной или диаметром не является. Поэтому его лучше называть фиктивным, или мнимым пролетом, тем более что прилагательному «расчетный» в механике грунтов, проектировании и строительстве придается совсем иной смысл. Величина l_d зависит от: 1) интенсивности провалов λ , их 2) среднего (D_{cp}) и 3) максимального (D_{max}) диаметров, 4) срока службы сооружения T_0 и 5) степени его ответственности, а также 6) формы и размеров фундамента в плане [27]. Причем с увеличением интенсивности λ и площади фундамента S_{ϕ} фиктивный «вероятностно-статистический» пролет возрастает.

Из опыта известно, что чем реже любой геологический процесс проявляется на земной поверхности, тем больше показатель его разрушающей силы, в нашем случае — диаметр D . Пролет же l_d при этом, наоборот, уменьшается. Но даже если бы этот закон был бы нам неизвестен, то повторяемость, как отмечалось, это ведь среднестатистический период времени. Когда точно случится событие, мы не знаем. Именно поэтому при строительстве в сейсмически опасных районах, а сейсмология первой ввела понятие «риск» в практику прогнозирования геологических процессов [11], балльность или магнитуда землетрясения, то есть сила его воздействия, принимается такой, какой она реально может быть по нашим оценкам.

По меньшей мере странным представляется и рост l_d с увеличением S_{ϕ} . Наиболее уязвимой при этом оказывается монолитная железобетонная плита, которая спасла не одно здание от сильных повреждений провалами. А самым безопасным и, следовательно, перспективным при строительстве в карстовых районах

— столбчатый фундамент, послуживший причиной полного разрушения многих сооружений.

В величине риска, а не мнимого диаметра (пролета) воронки надо учитывать λ , S_{ϕ} и другие характеристики системы «массив пород — сооружение». И все они, как показано в двух первых разделах статьи, намного лучше учитываются именно в рамках анализа риска. При этом инженер-геолог, слабо разбирающийся в современных технологиях строительства, бизнес-планах инвестора и экономической ситуации в стране, в своей научной деятельности и при разработке практических рекомендаций для нормативных документов вынужден привлекать специалистов в этих вопросах к решению междисциплинарной научно-практической задачи, использовать их знания и опыт для снижения ущерба. Тогда как авторы методики определения l_d практически лишают проектировщиков, строителей, экономистов и заказчиков строительства права голоса, права участвовать в принятии решений. Зачем что-то делать, если тебе говорят, что по результатам изысканий «расчетный пролет» равен, как это часто бывает на практике, 1,5 или 2 м, притом что истинный диаметр провала может составлять и 15, и 25 м?

5. Шкала опасности и риска поражения закарстованных территорий

Конечно, и с анализом риска дела обстоят далеко не просто. По этому вопросу существуют разные мнения, которые нашли отражение в многочисленных публикациях и региональных методических докумен-

тах, в том числе для Пермского края и Республики Башкортостан. В списке литературы они не приводятся, поскольку аналитический обзор всех этих работ — тема самостоятельного исследования. Но представляется, что главная трудность вычисления риска по общепринятой формуле (3) связана именно с оценкой уязвимости инженерных объектов. В решении этой задачи ведущая роль принадлежит проектировщикам и строителям. А инженерам-геологам следовало бы уделить основное внимание изучению массива пород и процесса провалообразования во всем их многообразии и взаимодействии, районированию территорий, получению достоверных статистических и расчетных характеристик опасности и основанному на них определению вероятности поражения объектов, о которой шла речь во втором разделе статьи. Этим, кстати, геологическую часть анализа риска можно было бы и ограничить.

И главный вопрос инженерно-геологической оценки риска заключается в том, какова реальная степень опасности закарстованной территории. Ведь ущерб от крупных, но редких провалов может оказаться меньше, чем от часто образующихся небольших воронок и, наоборот. При этом показатели λ и D_{cp} по отдельности (см. рис. 4) перестают быть признаками возможных потерь. Мерой же их суммарного действия и интегральной угрозы может служить удельный риск потери земельных угодий [12], записанный в виде [2]:

$$R_{уд}'' = \lambda \cdot (S_{в})_{cp} / S = (S_{в})_{cp} \cdot \lambda = \lambda \pi (D_{cp})^2 / 4, \quad (9)$$

где $(S_{в})_{cp} = \sum (S_{в})_i / N$ — средняя площадь воронки. Его размерность — $[T^{-1}]$, а выражается он обычно в $m^2/km^2 \cdot год$, $\%/год$ и называется также площадной интенсивностью процесса [20]. Безразмерным удельным ущербом ежегодный риск (9) станет, если умножить его, например, на время T_0 :

$$R_{уд}' = R_{уд}'' \cdot T_0. \quad (10)$$

Показатели (9), (10) удобны тем, что, поскольку они не зависят от площади, их значения одинаковы для всей территории S и отдельной ее площадки S_0 . Действительно, подставляя выражения (6) и (4а) в формулу (3), получаем физический риск (ущерб) с размерностью $[L^2]$:

$$R_0' = \lambda_0 \cdot T_0 \cdot (S_{в})_{cp} = \lambda \cdot S_0 \cdot T_0 \cdot (S_{в})_{cp}. \quad (11)$$

Для всей территории S он, естественно, будет больше в S/S_0 раз:

$$R' = \lambda \cdot T_0 \cdot (S_{в})_{cp} = \lambda \cdot S \cdot T_0 \cdot (S_{в})_{cp} / S = \lambda \cdot S \cdot T_0 \cdot (S_{в})_{cp}. \quad (11a)$$

Однако, поделив (11) и (11а) соответственно на S_0 и S , приходим к удельному (на единицу площади) ущербу (10).

Задаваясь теми или иными значениями риска (9) или (10), можно подобрать кривые, которые бы достаточно объективно отражали границы двух общепринятых категорий устойчивости, показанных на рис. 4. Что и было сделано для городских территорий с уче-

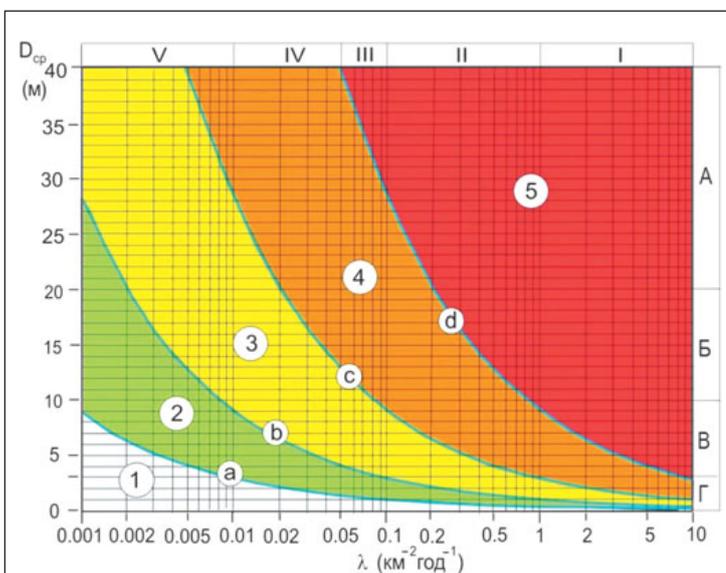


Рис. 5. Полулогарифмическая шкала опасности и риска образования карстово-суффозионных воронок на городских территориях: D_{cp} , λ — средний диаметр и интенсивность появления поверхностных карстовых форм; I–V, А–Г — категории устойчивости на рис. 4.

Зоны: 1 — провалов без последствий для хозяйственных объектов; 2 — допустимого риска; 3 — повышенного внимания; 4 — серьезной угрозы; 5 — неизбежных разрушений, Границы: а — $R_{уд}'' = 0,0628 \text{ м}^2/\text{км}^2 \cdot \text{год} = 6,28 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$, $R_{уд}' = 3,14 \cdot 10^{-6}$; б — $R_{уд}'' = 0,628 \text{ м}^2/\text{км}^2 \cdot \text{год} = 6,28 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$, $R_{уд}' = 3,14 \cdot 10^{-5}$; в — $R_{уд}'' = 6,28 \text{ м}^2/\text{км}^2 \cdot \text{год} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, $R_{уд}' = 3,14 \cdot 10^{-4}$; д — $R_{уд}'' = 62,8 \text{ м}^2/\text{км}^2 \cdot \text{год} = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$, $R_{уд}' = 3,14 \cdot 10^{-3}$

том опыта оценки совместного влияния D_{cp} и λ по «принципу шахматной доски» [11, с. 181; 27, с. 35; 28, с. 175] (рис. 5, 6). Согласно последнему, общая категория устойчивости, например III—В, находится на пересечении строк и столбцов таблицы, в которых записаны исходные категории I—V и А—Г.

Видно (рис. 5), что четыре границы (а–d) между пятью областями, или зонами опасности и риска (1–5) выражаются значениями $R_{уд}''$ и $R_{уд}'$, отличающимися на порядок и кратными числу π . Период времени при вычислении R_f принят равным $T_0 = 50$ лет согласно Рекомендациям [15]. В белой зоне «1» суммарный эффект вероятности появления воронок и силы их воздействия на сооружения настолько низкий, что опасность и риск здесь могут считаться нулевыми. Зеленая область «2» на рис. 5 — это зона допустимого риска, где возможный ущерб достаточно мал для того, чтобы признать его приемлемым, а проведение противокарстовых мероприятий — нецелесообразным. Зона «3» требует повышенного внимания и выполнения минимально необходимых, чаще всего профилактических мер защиты. В оранжевой зоне «4» опасность и риск сильно возрастают, и осуществление конструктивных или геотехнических мероприятий становится обязательным. В зоне «5» неизбежно полное разрушение зданий и сооружений, или же общий ущерб от небольших провалов настолько велик, что здесь целесообразно совсем отказаться от строительства.

Характеристики $R_{уд}''$ и $R_{уд}'$ четко отражают комплексный характер угрозы и в этом смысле являются объективными показателями. Кроме того, на рис. 6 видно, что плавные кривые а, b, с, d служат более объективными границами цветных полей еще и потому, что отсекают сверху или снизу их угловые части с чрезмерно высокими или низкими для того или иного поля значениями опасности и риска. Выбор же четырех граничных значений $R_{уд}''$ и $R_{уд}'$, безусловно, субъек-

тивен, как, впрочем, и любое ранжирование. Но в данном случае это позволяет легко адаптировать предлагаемую шкалу для иных территорий и видов строительства, так как изменение значений $R_{уд}''$ и $R_{уд}'$ автоматически приведет к изменению вида и положения кривых а, b, с, d.

Принимая любые, в том числе проектные, решения, мы всегда стремимся найти разумный баланс между излишней осторожностью и безрассудством. А это, на наш взгляд, как раз и достигается использованием показателей площадной интенсивности провалов и физического риска при выделении областей или категорий устойчивости территорий. При обосновании строительства конкретных сооружений от риска территориальных потерь нетрудно перейти к вычислению инженерного экономического ущерба, который может быть нанесен типовым зданиям. Решить эту задачу в общем виде крайне сложно, пока полностью не решена проблема уязвимости инженерных объектов. Однако, на наш взгляд, инженерно-геологическую оценку опасности и риска провалообразования вполне допустимо выполнять, пользуясь рассмотренной выше шкалой и определяя при необходимости вероятность поражения проектируемого объекта.

Заключение

Главной угрозой безопасного освоения и хозяйственного использования районов покрытого карста служат карстово-суффозионные воронки провала и оседания. Они образуются в результате гравитационного и фильтрационного деформирования и разрушения покровной толщи по мере выноса грунтов в трещинно-карстовые коллекторы. Процесс их формирования может развиваться и при заметном увеличении аккумуляционной емкости растворимых пород вследствие выщелачивания.

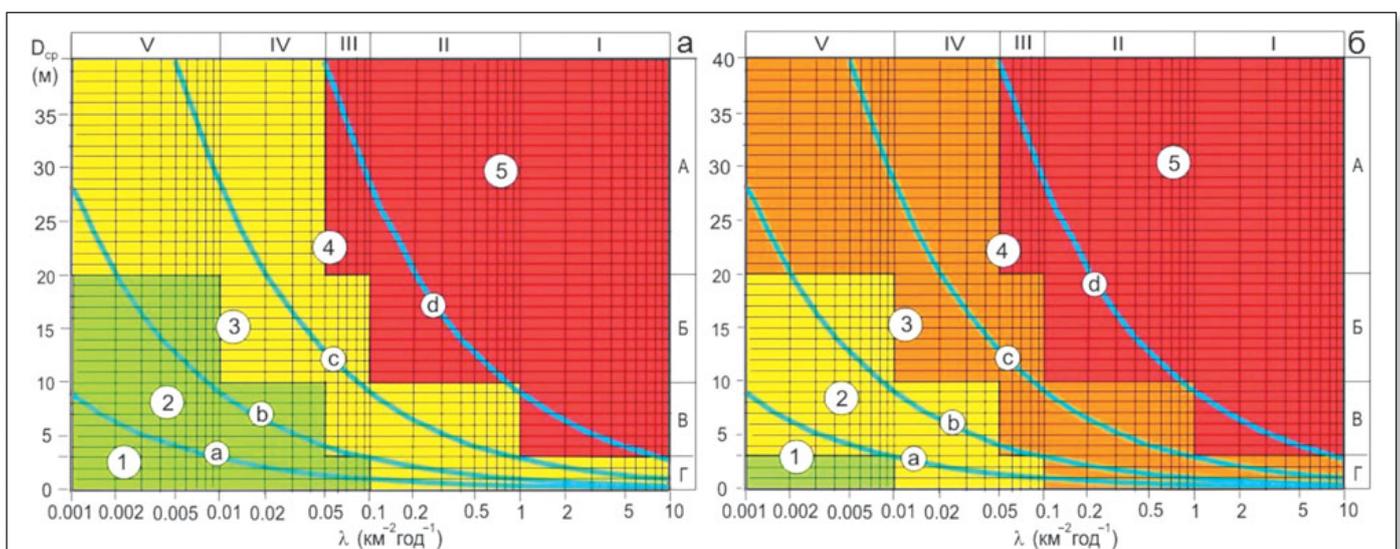


Рис. 6. Степень провальной опасности на закарстованных селитебных территориях (а) по В.В. Толмачеву [27] и суффозионной опасности (б) на территориях промышленного, гражданского и транспортного строительства по В.П. Хоменко [28]. Цвет: зеленый — строительство допускается без ограничений (а), очень низкая опасность, не накладывающая ограничений на строительство (б); желтый — строительство допускается при осуществлении противокарстовой защиты (а), низкая опасность, требующая незначительного удорожания строительства (б); оранжевый — средняя опасность, требующая значительного удорожания строительства (а); красный — строительство, как правило, не допускается (д), высокая опасность, делающая строительное освоение проблематичным (б). Остальные обозначения — прежние

Основным показателем силы воздействия воронок на объекты техносферы служит их средний или максимальный диаметр, а первичной вероятностной характеристикой — частота их появления. Интенсивность провалообразования — это результат нормирования частоты по площади территории, она зависит от того, какой мы представляем себе действующую площадь и как выполняется процедура нормирования (районирования).

Проектирование зданий и сооружений в карстовых районах на основании инженерно-геологических, в том числе и расчетных, данных о значениях диаметра и интенсивности провалов представляется обоснованным и проверенным временем. Но по отдельности эти показатели опасности не являются ее полноценными характеристиками. Удобными интегральными показателями и вероятности, и силы воз-

действия воронок на хозяйственные объекты служат площадная интенсивность процесса и риск поражения территории, объективно отражающие комплексный характер угрозы.

Оценку опасности и риска образования карстово-суффозионных воронок следует выполнять на основе районирования территории по условиям и факторам развития процесса. При этом цветовая палитра карты, учитывающей состав, строение и состояние пород, воздействие подземных вод и другие инженерно-геологические критерии, должна соответствовать палитре карты поверхностных карстовых форм, то есть цветовой гамме предлагаемой шкалы или, по крайней мере, стандартных категорий устойчивости. 

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16–17–00125).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. О двух формах разрушения связанных грунтов над полостью // Геозкология. 1993. № 2. С. 115–123.
2. Аникеев А.В. Некоторые вопросы оценки карстового риска // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: материалы Международ. науч.-практ. конф. «Геориск-2009». Т. 2. М.: Изд-во РУДН, 2009. С. 4–9.
3. Аникеев А.В., Леоненко М.В. Прогноз провалообразования при изменении гидродинамического режима на примере Дзержинского карстового района // Геозкология. 2013. № 2. С. 130–146.
4. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. 2-е изд. М.: Академия, 2008. 368 с.
5. Золотарев Г. С. Инженерная геодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1983. 328 с.
6. Королев В.Ю. Теория вероятности и математическая статистика. М.: ТК Велби, Проспект, 2008. 160 с.
7. Кофф Г.Л., Петренко С.И., Лихачева Э.А., Котлов В.Ф. Очерки по геозкологии и инженерной геологии Московского столичного региона. М.: Изд-во РЭФИА, 1997. 185 с.
8. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г. и др. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геозкология. 2011. № 3. С. 217–228.
9. Методические рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах. Киев: Изд-во НИИСК Госстроя СССР, 1977. 71 с.
10. Опасные экзогенные процессы / В.И. Осипов, В.М. Кутепов, В.П. Зверев и др. / под ред. В.И. Осипова. М.: ГЕОС, 1999. 290 с.
11. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / под ред. А.Л. Рагозина. М.: КРУК, 2003. 320 с.
12. Рагозин А.Л. Современное состояние и перспективы оценки и управления природными рисками в строительстве // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве / Минстрой России. М.: ПНИИИС, 1995. С. 9–25.
13. Рагозин А.Л., Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.
14. Рекомендации по использованию инженерно-геологической информации при выборе способов противокарстовой защиты / ПНИИИС. М.: Стройиздат, 1987. 81 с.
15. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / под ред. д.г.-м.н. А.Л. Рагозина / Москомархитектура, ГУ ГО ЧС г. Москвы. М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 59 с.
16. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области / Департамент градостроительного развития ... Нижний Новгород, 2012. 140 с.
17. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях / НИИОСП. М., 1985. 78 с.
18. Розовский Л.Б., Зелинский И.П., Воскобойников В.М. Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. Киев—Одесса: Вища школа, 1987. 208 с.
19. Саваренский И.А. Прогноз устойчивости территории методом удаленности от ближайшего проявления карста // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве. М.: Наука, 1990. С. 108–118.
20. Саваренский И.А., Мионов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / ПНИИИС Госстроя России. М., 1995. 167 с.
21. СНиП 1.02.07–87. Инженерные изыскания для строительства / ПНИИИС Госстроя СССР. М., 1987. 160 с.
22. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22–02–2003 / Минрегион России. М., 2012. 60 с.
23. СП 11-105-97. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой РФ. М., 2000. 99 с.
24. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
25. Толмачев В.В. О допустимых рисках строительства в карстовых районах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 5. С. 19–21.
26. Толмачев В.В., Троицкий Г.М. Определение расчетного размера карстового провала при проектировании противокарстовых фундаментов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 2. С. 22–24.
27. ТСН 22–308–98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. 1999. 72 с.
28. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
29. Щербаков С.В., Катаев В.Н. Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгур) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2011. Том 153, кн. 1. С. 203–224.
30. Kalsnes B., Nadim F., Lacasse S. Managing geological risk // Geologically Active / A.L. Williams, G.M. Pinches, C.Y. Chin et al. (eds). London: CRC Press, 2010. P. 111–126.