

УДК 624.131+551.435.8:519.2

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСК РАЗРУШЕНИЯ ПРОВАЛАМИ ГЛАВНЫХ ОБЪЕКТОВ НИЖЕГОРОДСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (НИАЭС)

© 2024 г. А. В. Аникеев¹, *¹Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, Россия

*E-mail: anikeev_alex@mail.ru

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 22.09.2024 г.

Принята к публикации 10.10.2024 г.

Главным показателем силы воздействия карстово-суффозионных провалов на окружающую среду служит диаметр воронок, а основным вероятностным показателем — интенсивность их образования. Риск потерь от провалов в общем виде представляет собой произведение вероятности поражения объекта-реципиента на ущерб от его повреждения или разрушения. Предложены формулы расчета ущерба и уязвимости, позволяющие с единых позиций оценивать физические и экономические инженерные и территориальные потери. Рассмотрены используемые в настоящее время экспоненциальная и линейная стохастические модели провалообразования, и показано, что при интенсивности процесса и площади объектов-реципиентов риска меньших $0.1 \text{ год}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ и 10 га соответственно, они дают близкие значения вероятности поражения последних. Линейная модель в виде системы двух уравнений лишена некоторых исходных ее недостатков и позволяет прогнозировать риск потерь и в случае невыполнения закона Пуассона. Оценка риска в статье базируется на полученных при изысканиях данных о провалах на территории Нижегородской атомной электростанции (НИАЭС). Установлено, что пуассоновский поток событий здесь не имеет места, и для прогноза выбрана линейная модель риска, записанная в виде произведения частоты поражения четырех основных сооружений НИАЭС на их уязвимость. С учетом некоторых допущений и конструктивных особенностей этих сооружений показано, что риск их запроектных аварий и риск выбросов радиации на промплощадке во много раз меньше допустимых значений, регламентируемых нормативными документами по использованию атомной энергии.

Ключевые слова: карст, карстово-суффозионные воронки, опасность, риск, стохастические модели, ущерб, уязвимость

DOI: 10.31857/S0869780924060028 EDN: AMFFCK

ВВЕДЕНИЕ

Участок строительства Нижегородской атомной электростанции (НИАЭС) площадью 20 км² выбран в Навашином районе Нижегородской обл. на границе с Владимирской обл., исходя из требований НП-032-01¹, и в основном по причинам экономическим, социальным и энергетическим [4]. Учет инженерно-геологических условий при этом отошел на второй план, и НИАЭС оказалась, по-видимому, первой в мире атомной станцией, спроектированной на территории интенсивного провалообразования в условиях покрытого сульфатно-карбонатного карста.

В результате долгих и скрупулезных комплексных изысканий, выполненных проектным институтом ОАО “НИАЭП” и рядом привлеченных научно-исследовательских и производственных организаций, с трудом выделен участок площадью $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$, где проявления карста на земной поверхности отсутствуют. Эта площадка, предназначенная для строительства главных сооружений, расположена на правом берегу р. Ока в 3-х км южнее нее и в 1 км западнее палеовреза р. Бол. Кутра на абс. отм. 110–130 м. Ближайшие населенные пункты: с. Монаково, с. Ефаново, д. Родиониха, д. Мартюшиха, с. Чудь (рис. 1).

Детальный анализ инженерно-геологических условий, их схематизация и детерминированная оценка опасности провалообразования на этой площадке выполнены в [2, с. 277–286]. Там же показано, что в природных условиях массив пород

¹ НП-032-01. Размещения атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности / Госатомнадзор РФ. М., 2002. 11 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200034263>.



Рис. 1. Местоположение площадки размещения основных сооружений НИАЭС.

в ее границах обладает 3–4-х кратным запасом устойчивости.

В настоящей работе, учитывая, что весь участок строительства относится к району реализованной карстово-суффозионной опасности, уместно оценить эту опасность и риск поражения главных сооружений НИАЭС воронками с вероятностно-статистических позиций.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА

Под карстово-суффозионной опасностью автор понимает процесс образования одноименных воронок, т.е. локальное деформирование и разрушение покровной толщи закарстованных массивов в результате выноса несвязных и раздробленных связанных грунтов в трещинно-карстовые коллекторы [1, 2]. Другими словами, это процесс провалообразования в районах покрытого карста. Называть провалы земли в таких районах РФ карстовыми, на наш взгляд, не вполне правильно.

В инженерном карстоведении при математическом описании распределения провалов во времени они рассматриваются как случайные дискретные события [5, 8, 14, 15]. И главным показателем силы их воздействия на здания и сооружения служит диаметр воронок — средний (D_{cp}) или максимальный (D_{max}), а основным вероятностным

показателем — интенсивность их образования λ [8, 11, 12, 16, 17]:

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

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

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

Наиболее общая и общепринятая формула риска потерь от природных опасностей записывается в виде [8, 9, 12, 19, 20]:

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

где P_o — вероятность (probability) поражения объекта, D_o — ущерб (damage) от его повреждения или разрушения за заданное время Δt . Интервалом Δt , как правило, служит либо единственный отрезок времени $\Delta t = 1$ год, либо срок эксплуатации объекта $\Delta t = T_o$, в первом случае получаем ежегодный ущерб, во втором — полный.

Ущерб D_o , обозначенный в (3) жирным шрифтом, чтобы отличать его от диаметра D воронки, может быть прямым и косвенным. 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, т.е. 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. Отметим также, что если неизвестную нам стоимость объекта принять равной $C_o = 100\%$, или $C_o = 1$, то, как следует из формулы (4), ущерб D_o тождественен уязвимости V_o . При этом не суть важно какая это уязвимость — экономическая или физическая, поскольку в данном случае ущерб прямой, сооружения новые и значения обоих типов уязвимости равны.

Уязвимость как свойство объекта утрачивать заданные функции при воздействии на него карстово-суффозионных воронок помимо площади последних $S_b = \pi D^2/4$, а значит и их диаметра D , зависит от типа сооружения и площади его фундамента S_f . Данные таблицы, составленной для типовых зданий [8, с. 115; 11, с. 42], показывают, что экономическая уязвимость уменьшается с уменьшением D и увеличением S_f . Минимальными значениями V_o характеризуются монолитные здания, максимальными — каркасные.

Таким образом, выделяются две группы показателей риска провалообразования. Показатели

первой ($N, S_b, D, S, T, \lambda^*, \lambda$) характеризуют источник опасности — процесс, и относятся к массиву пород и территории, в границах которых он проявляется. Характеристики второй группы ($S_\phi, S_o, T_o, V_o, C_o$) 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.

МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА

Придерживаясь общепринятой формулы (3) и считая, что второй сомножитель (ущерб D_o) нами определен, видим, что оценка риска сводится к нахождению первого сомножителя — вероятности P_o , обычно отождествляемой с опасностью. Согласно представлениям А.Л. Рагозина [9], которые нашли отражение в Рекомендациях [11] и в оценке карстового риска на территории Республики Татарстан [10], вероятность поражения объекта за срок его службы $T_o \leq 50$ лет является линейной функцией частоты или интенсивности провалов:

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

где $P_s = S_o/S$ — геометрическая вероятность образования воронки на площади объекта S_o . Последнее соотношение, конечно, можно назвать геометрической вероятностью, но суть в том, что $\lambda^* (S_o/S) = \lambda_o^*$ есть не что иное, как ежегодная 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 (1):

$$\lambda_o^* = \lambda S_o. \quad (7)$$

Более строгая с теоретических позиций стохастическая модель базируется на представлении о провалах как редких случайных событиях, распределение которых во времени подчиняется закону Пуассона, лежащему, к слову сказать, в основе анализа и других экзогенных геологических опасностей [3]. Она предложена В.В. Толмачевым [15] для оценки карстового риска на территории Нижегородской области и в настоящее время используется не только там [6, 12, 16, 17]. Согласно этой модели, вероятность P_o связана с показателями $\lambda^*, S, \lambda, \lambda_o^*, S_o, T_o$ экспоненциальным уравнением:

$$P_o = 1 - \exp(-\lambda^* S_o T_o / S) = 1 - \exp(-\lambda_o^* T_o) = 1 - \exp(-\lambda S_o T_o). \quad (8)$$

Считается [7], что закон Пуассона и, следовательно, уравнение (8) 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 [2, с. 255–276]. Все они в той или иной степени относятся и к линейной модели (6), зато она не требует специального обоснования. При использовании же экспоненциальной модели (8) нужно показывать, что для данной выборки среднегодовое количество провалов на площади S , численно равное их частоте λ^* , равно эмпирической дисперсии σ^2 случайной величины $X = \lambda^* \Delta t$, 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 [7, 12], и в нашем случае среднегодовое количество воронок $\lambda^* \Delta t$, 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 $\lambda^* \Delta t \approx M[X] \approx \sigma^2 \approx D[X]$, то вероятность P_o можно найти с помощью уравнения (6), но с некоторыми оговорками.

На рис. 2а показаны результаты вычисления вероятности образования хотя бы одной воронки на территории S согласно (6), (8), в которых $P_s = S_o/S = 1, T_o = t$. Видно, что при $\lambda^* t < 0.25$ ($t < 5$ лет для принятой на рисунке частоты $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$) значения P практически совпадают: их разность $\Delta P = (P_6 - P_8) < 3\%$. Однако в отличие от экспоненциальной зависимости линейная функция (6), по сути дела, показывает рост числа провалов во времени: $P = \lambda^* t = n$. И при достаточно большом значении t может оказаться, что $P > 1$ даже при очень малой частоте процесса. На рис. 2а таким критически большим значением времени служит $t_{кр} = 20$ лет.

Но вероятность не может быть больше единицы, а в качестве прогнозного интервала времени, на которое мы распространяем данные наблюдений, полученные за время t , выступает срок службы объекта T_o . Поэтому следует ввести дополнительное условие [1]: $P = 1$ при $t_{кр} = T_o > 1/\lambda^* = \Delta t^*$, где Δt^* — повторяемость процесса, и записать линейную функцию в виде системы двух уравнений (9):

$$\begin{cases} P = \lambda^* t, & t_{кр} = T_o \leq 1/\lambda^*; \\ P = 1, & t_{кр} = T_o > 1/\lambda^*. \end{cases} \quad (9)$$

Принимая это условие, видим на рис. 2а, что значения вероятности появления воронки на площади S , посчитанные по уравнениям (9), в которых $T_o = 20$ лет, и (8), в котором $S_o/S = 1$ и $T_o = t$, практически совпадают ($\Delta P < 3\%$) не только при малом, но и большом числе провалов $n = \lambda^* t > 3.5$ ($t > 70$ лет на рис. 2а). В области средних значений $\lambda^* t = 0.75-1.5$ ($t = 15-30$ лет) разность

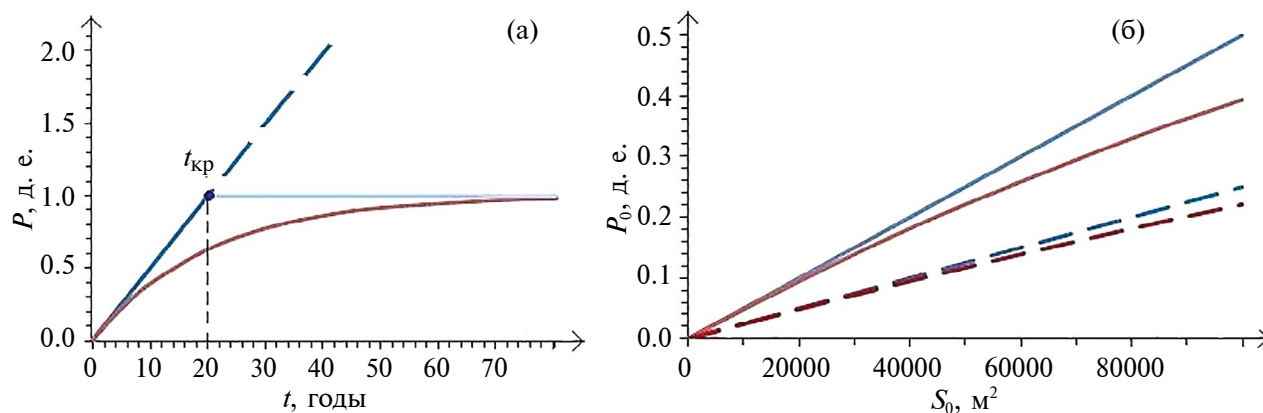


Рис. 2. Линейные (синие) и экспоненциальные (красные) графики зависимости вероятности P поражения территории от времени t при частоте провалообразования $\lambda^* = 0.05 \text{ год}^{-1}$ (а), и вероятности поражения объекта P_0 от его площади S_0 за время $T_0 = 50$ лет для двух значений интенсивности 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) [1].

ΔP увеличивается до 22–30% и даже 37% при $\lambda^* t = 1$ ($t_{кр} = 20$ 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. 2б приведены графики зависимости вероятности P_0 поражения объекта от его площади S_0 . Они рассчитаны по формулам (6) и (8) 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 [12, 14, 16–18]. 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. 2б ($S_0 < 10$ га), а сплошные – только на его первой половине ($S_0 < 5$ 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Карстологическая съемка территории площадью $S = 50 \text{ км}^2$ проведена коллективом ФГУП ИМГРЭ под руководством Н.А. Миронова в ходе изысканий в 2010 г. Почти в центре этой территории и находится промплощадка “Монаково” ($S_0 = 3.25 \text{ км}^2$), выбранная для строительства основных сооружений (рис. 3).

На площади $S = 50 \text{ км}^2$ зарегистрированы 335 поверхностных форм карста ($N_{\Sigma} = 335$). Они подразделены на: 1) провалы, 2) воронки диаметром $D \leq 20 \text{ м}$, 3) воронки диаметром $D > 20 \text{ м}$, 4) западины неясного генезиса. Первая группа выделялась

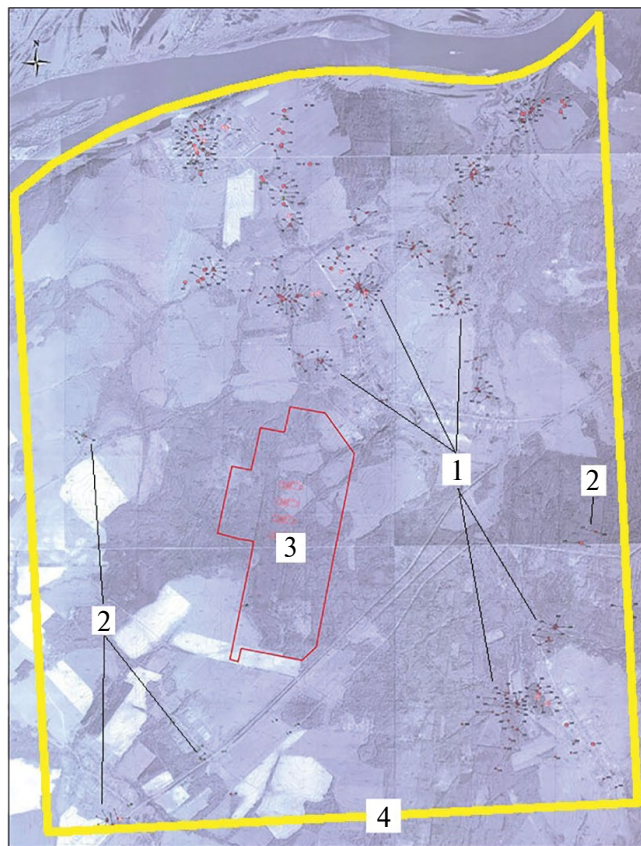


Рис. 3. Поверхностные проявления карста на участке НИАЭС и прилегающей территории: 1 – скопления воронок; 2 – одиночные воронки; 3 – площадка размещения основных сооружений; 4 – граница специальной съемки поверхностных карстовых форм в масштабе 1 : 10 000 на территории площадью $S = 50 \text{ км}^2$ (по материалам ОАО “НИАЭП”).

не по морфометрическим признакам. К провалам, согласно [14], отнесены разные по форме и размерам воронки, время появления которых на земной поверхности достоверно установлено.

Плотность всех локальных поверхностных форм карста высока: $N_{\Sigma}/S = 335/50 = 6.7 \text{ км}^{-2}$. Подавляющее их большинство находится в 0.55–2.80 км севернее и северо-восточнее границ промплощадки S_0 , 49 форм – на ЮВ территории S и единичные воронки – на В, З и ЮЗ (см. рис. 3). Эта же закономерность наблюдается и в распределении 14 провалов, которые образовались за время $T = 53$ года, с 1957 по 2009 г. включительно. Девять из них встречены севернее площадки (4 – в с. Чудь, 5 – в долине р. Куляковка), ближайший – в 1.50 км от ее границ. На расстоянии 2.20–2.75 км на ЮЗ (южнее д. Родиониха) и на ЮВ (в д. Мартюшиха) зафиксировано 1 и 4 провала соответственно.

Фактические данные об этих провалах сведены в табл. 1. Видно, что эмпирическая дисперсия σ^2 случайной величины X – ежегодного количества провалов λ_i^* за время T_i – почти в 2 раза больше ее среднестатистического значения – частоты провалов $\lambda^* = N/T$. Из этого следует, что пуассоновский поток событий здесь не имеет места, поскольку, как отмечалось, закон Пуассона однопараметрический.

Так как $\lambda^* = 0.2642 \text{ год}^{-1}$ (см. табл. 1), то критическое значение времени, при котором справедливо первое уравнение системы (9) составляет $t_{\text{кр}} = 1/\lambda^* = 3.785 \approx 4.0$ года. Очевидно, что оно много меньше рекомендуемого в [11] срока службы инженерно-технических объектов ($T_0 = 50$ лет), и, следовательно, $P = 1$. Другими словами, в течение прогнозного интервала времени, принимаемого равным $T_0 = 50$ лет, образование хотя бы одной воронки на площади $S = 50 \text{ км}^2$ – событие достоверное.

Так как, согласно (1), интенсивность провалов – это их частота, нормированная по площади, то, ориентируясь на значения $\lambda^* = 0.2642 \text{ год}^{-1}$ и $S = 50 \text{ км}^2$, видим, что интенсивность процесса на рассматриваемой территории равна $\lambda = 0.00528 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-2}$. Такое ее значение на порядок больше тех, которые всеми правдами и неправдами, в том числе и с использованием метода удаленности от ближайшего проявления карста

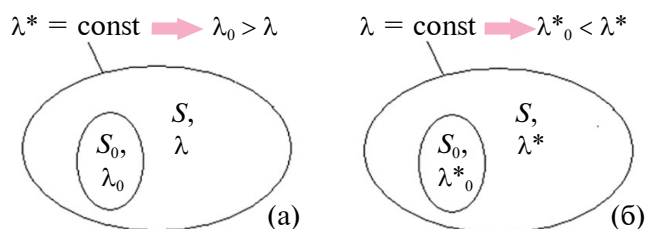


Рис. 4. Соотношение интенсивности λ и частоты λ^* провалов на оцениваемом участке (объекте) S_0 и всей территории S , ограниченной изолиниями $\lambda^* = \text{const}$ (а) и $\lambda = \text{const}$ (б).

[13, 14], получены при изысканиях для площадок двух проектируемых энергоблоков. Тем не менее, принимаем именно это значение в качестве расчетного не только для всей территории площадью $S = 50 \text{ км}^2$, но и промплощадки $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$ – территориального объекта-реципиента риска, а также для всех расположенных на ней сооружений НИАЭС (инженерных объектов-реципиентов). То есть используем второй подход к стохастическим прогнозам [1, 2], согласно которому интенсивность $\lambda = 0.00528 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-2} = \text{const}$ (рис. 4б). Тогда из (7) следует, что частота провалов на площади $(S_0)_i$ того или иного инженерного объекта-реципиента риска равна:

$$(\lambda^*_o)_i = (S_0)_i \lambda = \lambda^* (S_0)_i / S. \quad (10)$$

Первый подход, предполагающий, что $\lambda^* = \text{const}$ (рис. 4а), лежит в основе вышеупомянутого метода удаленности [13], а также региональной оценки провального риска [10].

На промплощадке проектом предусмотрено возведение энергоблоков № 1 и № 2. Каждый из них состоит из 4-х одинаковых главных сооружений (рис. 5). Результаты вычисления $(\lambda^*_o)_i$, где нижний индекс “i” соответствует порядковому номеру объекта ($i = 1, 2, 3, 4$), приведены в табл. 2.

Видим (см. табл. 2), что частота образования провалов под тремя первыми объектами находится в интервале значений $(\lambda^*_o)_{1,2,3} = (2.1\text{--}3.2) \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$. Под последним – башенной испарительной градирней, она в 3–4 раза больше: $(\lambda^*_o)_4 = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.

Таблица 1. Эмпирический закон (строки 1–3) и параметры распределения (строки 4–6) годового числа провалов $X = \lambda_i^*$ за время T_i ($T = \Sigma T_i = 53$ года)

1	Значения $X(\lambda^*_i)$	0	1	2	3
2	Частоты (T_i)	45	4	2	2
3	Частоты (T_i/T)	0.8491	0.0755	0.0377	0.0377
4	Среднее значение $X_{cp} = \lambda^* = \sum \lambda^*_i T_i / T$				0.2642
5	Дисперсия $\sigma^2 = (\sum T_i (\lambda^*_i - \lambda^*)^2) / T$				0.4963
6	Отношение σ^2 / X_{cp}				1.88

Таблица 2. Размеры основных сооружений энергоблоков № 1, № 2 и значения частоты провалообразования $(\lambda^*_o)_i$ в их основании

№ п/п	Основные сооружения				S , (км ²)	$(S_o)_i/S$, (10 ⁻⁴)	Частота провалов	
	Название	Размеры, (м)		$(S_o)_i$, (м ²)			λ^* , (год ⁻¹)	$(\lambda^*_o)_i$, (10 ⁻⁵ год ⁻¹)
1	Реакторное здание	72.0	78.0	5616.0	50	1.123	0.264	2.97
2	Вспомогательное реакторное здание	60.0	66.0	3960.0		0.792		2.09
3	Здание турбины	101.2	60.0	6072.0		1.214		3.21
4	Башенная испарительная градирня диаметром $D=143.6$ м			16187.5		3.237		8.55

Теперь, определив частоту процесса в границах каждого сооружения на основании того, что $\lambda = \text{const}$, можем оценить инженерный риск ежегодных потерь $(R_o)_i$, воспользовавшись общепринятым выражением (3), в котором первый сомножитель (вероятность P_o поражения объектов провалами) целесообразно принять равным $(P_o)_i = (\lambda^*_o)_i$. И, если стоимость объектов мы принимаем равной $(C_o)_i = 1$, то, как показано в первой части статьи, вычисление второго сомножителя (ущерба D_o) сводится к определению уязвимости сооружений: $(D_o)_i = (V_o)_i$.

Назначение в качестве расчетной не полной, как того требует (6), а ежегодной вероятности поражения инженерных сооружений провалами прямо следует из требований нормативных документов по использованию атомной энергии, которые, по существу, регламентируют величину ежегодного физического риска разрушения объектов. Согласно этим требованиям допустимое значение частоты запроектных аварий составляет $(\lambda^*_{a, \text{доп}}) \equiv (R_a)_{\text{доп}} = 10^{-6} \text{ год}^{-1}$, а разрушений корпуса реактора и, следовательно, выбросов радиации – $(\lambda^*_{p, \text{доп}}) \equiv 10^{-7} (R_p)_{\text{доп}} \text{ год}^{-1}$. Значения и первой, и второй частоты (риска) свидетельствуют о том, что в России требования к строительству АС^{2,3} чрезвычайно высокие: вероятность и аварийных ситуаций, и радиоактивного загрязнения территории должна быть практически нулевой.

С учетом вышеперечисленных соображений запишем окончательно формулу вычисления риска запроектных аварий (R_a) в виде:

$$(R_a)_i = (\lambda^*_o)_i \cdot (V_o)_i, \quad (11)$$

² НП-064-05. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Ростехнадзор, 2006. 87 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200043834>.

³ ОПБ-88/97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). М.: Госатомнадзор России, 1998. <https://ruzkabel.ru/assets/files/pnae-g-1-011-97>.

где $(V_o)_i$ – физическая уязвимость i -го объекта при его поражении карстово-суффозионной воронкой. Значения $(\lambda^*_o)_i$ для четырех главных инженерных объектов каждого энергоблока, посчитаны в табл. 2, а значения $(V_o)_i$ можно в первом приближении найти, воспользовавшись приложением 6 из Рекомендаций [11, с. 42], составленным для типовых зданий. При этом мы вынуждены допустить равенство физической и экономической уязвимостей объектов, так как в этом приложении указаны значения последней. Однако для недавно построенных, а тем более проектируемых сооружений это допущение, как отмечалось, полностью корректно.

Уязвимость зданий и сооружений любого типа для провалов [11, приложение 6, с. 42] зависит от соотношения $S_b/(S_{\phi})_i$, в котором S_b – средняя или максимальная площадь воронок, $(S_{\phi})_i$ – площадь фундамента основных сооружений. В материалах изысканий указано, что тип фундаментов для реакторных отделений – забивные сваи, объединенные монолитным железобетонным ростверком под монолитной железобетонной плитой; для здания турбины – забивные сваи, объединенные

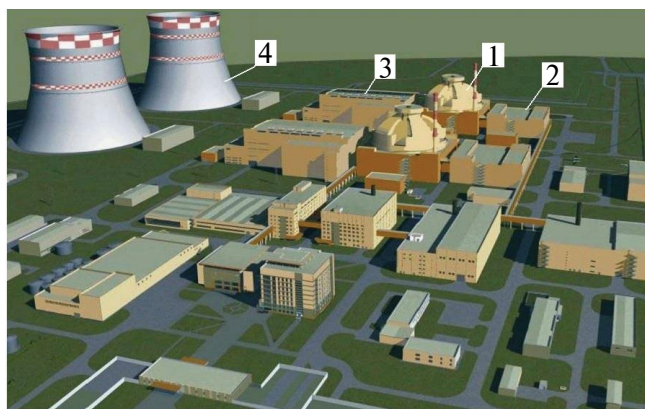


Рис. 5. Макет энергоблоков Нижегородской АЭС: 1 – реакторное здание, 2 – вспомогательное реакторное здание, 3 – здание турбины, 4 – башенная испарительная градирня (по материалам ОАО НИАЭС).

Таблица 3. Расчетные значения максимального диаметра возможных провалов $D_{\max}$ (по материалам ОАО НИАЭП) и отношение максимальной площади воронок $(S_{\text{в}})_{\max}$ к площади фундаментов главных объектов $(S_{\text{ф}})_i = (S_{\text{о}})_i$

№ объекта	Энергоблок № 1				Энергоблок № 2			
	$D_{\max}$	$(S_{\text{в}})_{\max}$	$(S_{\text{о}})_i$	$(S_{\text{в}})_{\max}/(S_{\text{о}})_i$	$D_{\max}$	$(S_{\text{в}})_{\max}$	$(S_{\text{о}})_i$	$(S_{\text{в}})_{\max}/(S_{\text{о}})_i$
	м	м ²	д.е.		м	м ²	д.е.	
1	15.0	176.6	5818.0	0.031	14.7	169.6	5818.0	0.030
2	15.0	176.6	3960.0	0.045	14.7	169.6	3960.0	0.043
3	15.0	176.6	6072.0	0.029	14.7	169.6	6072.0	0.028
4	15.0	176.6	16187.5	0.011	14.7	169.6	16187.5	0.010

Таблица 4. Результаты вычисления риска $(R_{\text{а}})_i$ запроектных аварий основных сооружений НИАЭС по (11)

№ п/п	Сооружения	Уязвимость $(V_{\text{о}})_i$, (д.е.)	Частота поражения $(\lambda^*_{\text{о}})_i$, (год ⁻¹)	Риск $(R_{\text{а}})_i$, (10 ⁻⁸ год ⁻¹)
1	Реакторное здание	0.002	0.0000297	5.9
2	Вспомогательное реакторное здание	0.002	0.0000209	4.2
3	Здание турбины	0.002	0.0000321	6.4
4	Башенная испарительная градирня	0.002	0.0000855	17.0

монолитным железобетонным ростверком под ленточными монолитными фундаментами; для башенной испарительной градирни – забивные сваи по монолитному ростверку под кольцевой фундамент вытяжной башни.

Из сказанного следует, что площадь зданий и фундаментов реакторных отделений совпадают, и $(S_{\text{ф}})_{1,2} = (S_{\text{о}})_{1,2}$. Для зданий турбины и градирни, строго говоря, $(S_{\text{ф}})_{3,4} < (S_{\text{о}})_{3,4}$. Но, учитывая, что ленточный и кольцевой фундаменты этих объектов опираются на сваи, связанные монолитными железобетонными ростверками, с уверенностью полагаем, что их устойчивость много больше устойчивости типовых столбчатых или ленточных фундаментов, и принимаем $(S_{\text{ф}})_{3,4} \approx (S_{\text{о}})_{3,4}$. Таким образом, площадь фундаментов главных сооружений НИАЭС определена; ее значения, равные значениям $(S_{\text{о}})_i$, приведены в табл. 2.

В материалах ОАО НИАЭП представлены результаты четырех вариантов оценки диаметра карстово-суффозионных воронок. На наш взгляд, наиболее приемлемым для промплощадки, где проявлений карста на земной поверхности нет, служит расчетный вариант, так как при этом учитываются заметно отличающиеся от прилегающей территории состояние, свойства грунтов и, главное, геологическое строение массивов-оснований энергоблоков 1 и 2.

В табл. 3 приведены наибольшие расчетные значения диаметра провалов, полученные в ходе изысканий по методике В.П. Хоменко [18]. Видно, что даже в этом случае $(S_{\text{в}} = \max)$ соотношение $S_{\text{в}}/(S_{\text{ф}})_i$ существенно меньше 0.1. Тогда, ориентируясь на величину $S_{\text{в}}/(S_{\text{ф}})_i < 0.1$ и учитывая, что

согласно конструктивным решениям устойчивость основных сооружений НИАЭС заметно больше устойчивости типовых монолитных зданий гражданского назначения, находим по Рекомендациям [11, с. 42], что уязвимость всех четырех объектов одинакова и равна $(V_{\text{о}})_{1,2,3,4} = V_{\text{о}} = 0.002$.

Подставляя найденное таким образом значение $V_{\text{о}} = 0.002$ и значения $(\lambda^*_{\text{о}})_{1,2,3,4}$, показанные в табл. 2, в (11), видим, что ежегодный риск запроектных аварий главных сооружений лежит в интервале $(R_{\text{а}})_{1-4} = 4.2 \cdot 10^{-8} - 1.7 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹ (табл. 4). Эти значения в 5.9-23.8 раза меньше допустимой величины $(R_{\text{а}})_{\text{доп}} = (\lambda^*_{\text{а}})_{\text{доп}} = 10^{-6}$ год⁻¹.

Что касается выбросов радиации, то допустимое для них значение $(R_{\text{р}})_{\text{доп}} = (\lambda^*_{\text{р}})_{\text{доп}} = 10^{-7}$ год⁻¹ всего в 1.68 раза больше риска запроектных аварий реакторного отделения, равного $(R_{\text{а}})_1 = 5.9 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹ (см. табл. 4). Отличие не настолько велико, чтобы с уверенностью судить о радиоактивной безопасности объекта.

Заметим, однако, что риск $(R_{\text{а}})_1$ – это вероятность разрушения только реакторного здания. А выбросы радиации возможны лишь в результате разрушения корпуса реактора, который находится внутри этого здания и характеризуется своей собственной устойчивостью к внешним воздействиям. Вероятность же совместного наступления этих двух событий – разрушения и здания $(R_{\text{а}})_1$, и корпуса реактора $R_{\text{к.р.}}$ воронкой, вследствие чего и происходит радиоактивный выброс, находится по правилу умножения вероятностей [7]. Поэтому, даже не зная точно величину физической уязвимости корпуса реактора для провалов, но уверенно полагая, что она достаточно мала, можем смело

утверждать, что произведение вышеназванных вероятностей будет во много раз меньше значения 10^{-7} год^{-1} : $(R_a)_1 \cdot R_{\text{к.р.}} \ll (R_p)_{\text{доп}} = (\lambda^*)_{\text{доп}}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На площадке размещения основных сооружений ($S_0 = 3.25 \text{ км}^2$) НИАЭС карстово-суффозионные воронки отсутствуют. Однако весь участок проектируемого строительства площадью 20 км^2 в Навашином районе Нижегородской области находится на территории интенсивного провалообразования, развивающегося в условиях покрытого сульфатно-карбонатного карста. В этой связи представляется интересным и важным оценить карстово-суффозионную опасность и устойчивость объектов НИАЭС к провалам не только с детерминированных, но и вероятностно-статистических позиций.

С этих позиций провалы рассматриваются как случайные дискретные события. И главным показателем силы их воздействия на здания и сооружения служит средний или максимальный диаметр воронок. А основным вероятностным показателем — интенсивность их образования, хотя она и является результатом нормирования частоты провалов — первичной вероятностной характеристики процесса — по площади территории. То есть величина интенсивности сильно зависит от того, какой мы представляем себе действующую площадь и как выполняется процедура нормирования (районирования).

В самом общем виде риск потерь от природных опасностей, в том числе и карстово-суффозионной, — это произведение вероятности поражения объекта-реципиента на ущерб от его повреждения или разрушения. Формулы прямого ущерба и экономической уязвимости позволяют с единых позиций оценивать физические и экономические потери от поражения инженерных объектов и территорий геологическими процессами. И если неизвестную, как правило, инженеру-геологу стоимость объекта принять равной 100% или 1, то прямой ущерб становится тождественным уязвимости. При этом для проектируемых или недавно построенных зданий и сооружений значения двух типов уязвимости (физической и экономической) равны друг другу.

В настоящее время используются две стохастические модели провалообразования в карстовых районах: строгая экспоненциальная и приближенная линейная. Последняя дает возможность оценить риск потерь и в том случае, когда эмпирическая дисперсия ежегодного количества провалов не равна его среднестатистическому значению. Но при больших значениях времени прогноза она даже при малой частоте процесса может показывать вероятность >1 . Линейная модель, записанная в виде системы двух уравнений,

лишена этого недостатка и дает значения вероятности провалообразования, практически равные тем, которые получаются с помощью экспоненциальной пуассоновской модели не только при малых, но и больших значениях времени.

В ходе карстологической съемки, выполненной при изысканиях коллективом ФГУП ИМГРЭ, на территории площадью $S = 50 \text{ км}^2$, в центре которой находится промплощадка $S_0 = 3.25 \text{ км}^2$, зарегистрированы 335 поверхностных форм карста. Они подразделены на: 1) провалы, 2) воронки диаметром $D \leq 20 \text{ м}$, 3) воронки диаметром $D > 20 \text{ м}$ и 4) западины неясного генезиса. К первой группе отнесены 14 разных по форме и размерам воронок с известной датой появления. Все они образовались за время $T = 53$ года, с 1957 по 2009 г. включительно.

Статистическая обработка фактических данных об этих провалах ($N = 14$) свидетельствует, что на рассматриваемой территории пуассоновский поток событий не имеет места, поэтому для оценки риска запроектных аварий основных сооружений НИАЭС, допустимое значение которого регламентируется нормативными документами по использованию атомной энергии, выбрана не экспоненциальная, а линейная модель. Она записана в виде произведения частоты поражения четырех главных инженерных объектов НИАЭС на их уязвимость.

Значения первого сомножителя в модели риска найдены с использованием второго подхода к стохастическим прогнозам, согласно которому интенсивность $\lambda = N/TS = 14/(53 \cdot 50) = 0.00528 \text{ год}^{-1} \text{ км}^{-2} = \text{const}$. Первый подход, базирующийся на предпосылке $\lambda^* = \text{const}$ (в нашем случае $\lambda^* = N/T = 14/53 = 0.2642 \text{ год}^{-1}$), лежит в основе метода удаленности и региональных оценок карстово-суффозионного риска.

Учет конструктивных особенностей основных объектов НИАЭС и посчитанные соотношения площади их фундаментов и площади возможных на промплощадке воронок позволили определить значения второго сомножителя в уравнении риска — уязвимости объектов, по табличным данным об уязвимости типовых зданий и сооружений. В итоге оказалось, что риск $(R_a)_{1-4}$ разрушения четырех главных сооружений НИАЭС существенно меньше допустимого риска запроектных аварий $(R_a)_{\text{доп}}$ объектов атомной энергетики: $(R_a)_{\text{доп}}/(R_a)_{1-4} = 5.9-23.8$.

Если же говорить о радиоактивной безопасности участка проектируемого строительства в целом, то можно *a priori* утверждать, что риск выбросов радиации как вероятность совместного наступления двух событий — разрушения и реакторного здания $(R_a)_1$, и корпуса реактора $R_{\text{к.р.}}$ воронкой, во много раз меньше допустимого значения риска радиоактивных выбросов, установленного нормативными документами: $(R_a)_1 \cdot R_{\text{к.р.}} \ll (R_p)_{\text{доп}}$. Таким образом,

и с позиций стохастической оценки карстово-суффозионной опасности площадка размещения основных сооружений НИАЭС, как ни странно, выбрана очень удачно.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникеев А.В. Опасность и риск образования воронок провала и оседания в карстовых районах: основные показатели, подходы и способы оценки // Инженерная геология. 2016. № 5. С. 10–18.
2. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
3. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
4. Глинский М.Л., Егорова В.А., Чертков Л.Г. Особенности геологического строения участка размещения Нижегородской АЭС и их учет в проектных решениях ее строительства // Разведка и охрана недр. 2012. № 10. С. 49–52.
5. Карстоведение. Ч. 3. Инженерное карстоведение: учеб. пос. / Кол. авт. [В.Н. Дублянский, Г.Н. Дублянская, В.Н. Катаев и др.]. Пермь: Перм. гос. нац. ун-т, 2011. 288 с.
6. Катаев В.Н., Щербаков С.В., Золотарев Д.Р., Дробинина Е.В. Оценка карстовой опасности в отложениях мела на примере территории п. Вышкова Брянской области // Инженерная геология. Т. XVII. № 3. 2022. С. 44–63.
7. Малугин В.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Юрайт, 2024. 470 с.
8. Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд. фирма “КРУК”, 2003. 320 с.
9. 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.
10. Рагозин А.Л., Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.
11. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Под ред. А.Л. Рагозина. М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 59 с.
<https://docs.cntd.ru/document/3666750>
12. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород, 2012. 140 с. <https://docs.cntd.ru/document/465562526>
13. 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.
14. Саваренский И.А., Миронов Н.А. Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Госстроя России, 1995. 167 с.
15. Толмачев В.В. Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
16. ТСН 11-301-2004По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на территории Пермской области. Пермь, 2004. 122 с. <https://libinfo.org/nsi/index.php?file=c3604011>
17. ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. 1999. 72 с.
<https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294814/4294814947.pdf>
18. Хоменко В.П. Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах: матер. Межд. симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева и др. Пермь: ПГНИУ, 2015. С. 50–60.
19. Birkmann J. Risk // Encyclopedia of Natural Hazards. Peter T. Bobrowsky, Ed., Springer, 2013. P. 856–862.
20. 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.

PROBABILISTIC-STATISTICAL ASSESSMENT OF KARST AND SUFFOSION HAZARD AND RISK OF DESTRUCTION BY SINKHOLES OF THE MAIN FACILITIES AT THE NIZHNY NOVGOROD NPP

A. V. Anikeev^{a, #}

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

[#]*E-mail: anikeev_alex@mail.ru*

In the mathematical description of sinkhole distribution with time, sinkholes are considered as random discrete events. The diameter of funnels is the main indicator of sinkhole impact power on the environment, and the intensity of sinkhole occurrence is the main probabilistic index. Most generally, the risk of losses from karst-suffosion sinkholes is the product of subsidence probability by the damage caused by a recipient object deformation or destruction. Formulas of direct damage and vulnerability have been derived, allowing for a unified assessment of physical and economic losses from damage to engineering and territorial facilities

caused by geological processes. Two currently used stochastic models of sinkhole formation in covered karst areas are considered, i.e. exponential and linear models. It is shown that with the intensity of the process and the area of risk recipients less than $0.1 \text{ year}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ and 10 ha, respectively, these models give close values of the probability of damage to recipient objects. The linear model, written as a system of two equations, is devoid of some of its disadvantages and allows one to predict the risk of losses in case of non-compliance with Poisson's law. In the article, the assessment of the risk of radioactive emissions and out-of-design accidents at the site of the projected NNPP power units is based on data obtained during surveys on 14 sinkholes formed over 53 years in an area of 50 km^2 , in the center of which the industrial site is located. The Poisson flow of events is found to take no place in this area, and a linear risk model has been chosen for the forecast, written as the product of the frequency of sinkholes occurrence under the four main structures of the NNPP by their vulnerability. Taking into account some assumptions and design features of engineering facilities, it is shown that the risk of their beyond-design accidents and the risk of radiation emissions at the industrial site are many times less than their permissible values specified by regulatory documents on the use of atomic energy in Russian Federation.

Keywords: damage, hazard, karst, karst-suffosion sinkholes, nuclear power plant, Poisson's law, risk, stochastic models, vulnerability

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. [Sinkhole hazard and risk of its formation in karst areas: main indices, approaches and methods of evaluation]. *Inzhenernaya geologiya*, 2016, no. 5, pp. 10–18 (in Russian)
2. Anikeev, A.V. [Collapse and subsidence sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
3. Viktorov, A.S. [The main problems of mathematical morphology of the landscape]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 252 p. (in Russian)
4. Glinskii, M.L., Egorova, V.A., Chertkov, L.G. [Geological structure specifics at the location of the Nizhny Novgorod NPP and their consideration in the design solutions for its construction]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2012, no.10, pp. 49–52. (in Russian)
5. [Karstology. Part 3. Engineering karstology: a textbook]. V.N. Dublyanskii, G.N. Dublyanskaya, V.N. Kataev, et. al. Perm, Perm State National University, 2011, 288 p. (in Russian)
6. Kataev, V.N., Shcherbakov, S.V., Zolotarev, D.R., Drobinina, E.V. [Karst hazard assessment in chalk deposits on the example of Vyshkov settlement, Bryansk oblast]. *Inzhenernaya geologiya*, 2022, vol. XVII, no. 3, pp. 44–63. (in Russian)
7. Malugin, V.A. [Probability theory and mathematical statistics: textbook and workshop for secondary professional education]. Moscow, Yurait Publ., 2024, 470 p. (in Russian)
8. [Natural hazards in Russia. Assessment and management of natural risks. Thematic volume]. A.L. Ragozin, Ed., Moscow, KRUK Publ., 2003, 320 p. (in Russian)
9. Ragozin, A.L. [Current state and prospects of assessment and management of natural risks for construction]. In: [Analysis and assessment of natural and human-induced risk for construction]. Moscow, PNIIS, 1995, pp. 9–25. (in Russian)
10. Ragozin, A.L., Yolkin, V.A. [Regional assessment of karst hazard and risk]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsii*. 2003, no. 4, pp. 33–52. (in Russian)
11. [Recommendations for the assessment of geological risk in the territory of Moscow]. A.L. Ragozin, Ed. Moscow, GUP NIATs Publ., 2002, 59 p. (in Russian)
12. [Recommendations for engineering survey, design, construction and the operation of buildings and engineering structures in karst-prone areas of the Nizhny Novgorod region]. Nizhny Novgorod, 2012, 140 p. (in Russian)
13. Savarenskii, I.A. [The forecast of territory stability by the method of remoteness from the nearest karst manifestation]. In: [Forecast of changes in engineering and geological conditions upon construction]. Moscow, Nauka Publ., 1990. pp. 108–118. (in Russian)
14. Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. [Guidelines for engineering and geological surveys in karst development areas]. Moscow, PNIIS, Gosstroif of Russia, 1995, 167 p. (in Russian)
15. Tolmachev, V.V. [A probabilistic approach to assessing the sustainability of karst areas and designing karst-control measures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1980, no. 3, pp. 98–107. (in Russian)
16. TSN 11-301-2004Po. [Regional construction standards 11-301-2004Po. Engineering geological survey for construction in the territory of Perm region]. Perm, 2004, 122 p. (in Russian)
17. TSN 22-308-98 NN. [Regional construction standards 22-308-98 NN. Engineering survey, design, construction and the operation of buildings and engineering structures in karst-prone areas of the Nizhny Novgorod region]. 1999. 72 p. (in Russian)
18. Khomenko, V.P. [Karst sinkhole formation: mechanism and hazard assessment]. In: [Environmental safety and construction in karst areas. Proc. Int. Symp.]. V.N. Kataev et al., Eds., Perm, Perm State University, 2015, pp. 50–60. (in Russian)
19. Birkmann, J. Risk. In: Encyclopedia of natural hazards. P.T. Bobrowsky, Ed., Springer, 2013, pp. 856–862.
20. Kalsnes, B., Nadim, F., Lacasse, S. Managing geological risk. In: Geologically active. A.L. Williams, G.M. Pinches, C.Y. Chin et al., Eds. London, CRC Press, 2010, pp. 111–126.