

УДК 624.131+622.83:551.435.8

АККУМУЛЯЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ РАСТВОРИМЫХ ПОРОД КАК ОСНОВНОЙ ПОКАЗАТЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ РАЙОНОВ ПОКРЫТОГО КАРСТА

© 2019 г. А. В. Аникеев

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
e-mail: anikeev_alex@mail.ru*

Поступила в редакцию 7.06.2019 г.

В инженерной геологии районов покрытого карста наиболее актуальной и сложной проблемой является локальный прогноз провалообразования. Особенно остро она стоит там, где воронки провала и оседания отсутствуют, не зарегистрированы или плохо выражены в рельефе, т.е. в районах нереализованной (потенциальной, ожидаемой) провальной опасности. В статье обсуждается один из возможных подходов к решению этой проблемы. Он базируется на сравнении объема удаленных из покровной толщи несвязных и раздробленных связных грунтов с аккумуляционной емкостью закарстованного массива — объемом полого карстового пространства, способного принимать и накапливать обломочный материал. Самый общий результат выноса грунтов в трещинно-карстовые коллекторы — их разуплотнение в области деформирования-разрушения покровной толщи. Для трех канонических схем строения этой области из уравнения баланса массы грунтов до и после разрыхления получены критические значения объема обломочного материала, дальнейший вынос которого приведет к провалу земной поверхности. Рассмотрены некоторые приемы и способы оценки аккумуляционной емкости растворимых пород и показаны серьезные отличия в прогнозировании устойчивости закарстованных и подработанных территорий с помощью обсуждаемого расчетного метода. Полученные результаты и процедура оценки устойчивости массива пород раскрываются на примере площадки строительства основных сооружений Нижегородской АЭС, которая оказалась первой в мире атомной электростанцией, расположенной на территории интенсивного развития сульфатно-карбонатного карста.

Ключевые слова: *аккумуляционная емкость растворимых пород, воронки провала и оседания, закарстованная территория, карст, разуплотнение грунтов, суффозия, устойчивость.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201953-14>

ВВЕДЕНИЕ

Какими бы слабыми ни были грунты, перекрывающие закарстованный массив, каким бы сильным ни было техногенное воздействие, проявления карста в основании сооружений и на земной поверхности исключаются, если аккумуляционная емкость растворимых пород, отражающая их способность принимать и накапливать обломочный материал, недостаточно велика. Другими словами, трещиноватость и закарстованность подстилающих отложений определяют саму возможность образования провалов. Но именно эти показатели не только состояния массива, но и провальной опасности до сих пор остаются наименее изученными, что не в последнюю очередь связано с высокой стоимостью глубокого бурения.

В отличие от горного дела, которое оперирует заданными геометрическими характеристиками полого подземного пространства, инженерная геология сталкивается с высокой степенью их неопределенности. Математически строгое описание не просто трещинно-порового, но и полого пространства закарстованного массива — задача чрезвычайно сложная. Если же кроме его геометрии нужно учитывать растворимость горных пород, режим подземных вод и техногенные изменения последнего — сложная вдвойне.

Решение этой проблемы требует долгой и кропотливой работы, в основе которой лежит совместный анализ данных инженерно-геологических, гидрогеологических, гидрохимических, геофизических, спелеологических и других исследований. Несмотря на серьезные трудности

и высокие трудозатраты, ставить и решать задачу оценки аккумуляционной емкости закарстованных отложений необходимо.

ОБЪЕМ ВЫНЕСЕННЫХ ГРУНТОВ И РАЗРЫХЛЕНИЕ ПОКРОВНОЙ ТОЛЩИ

Самым общим результатом выноса несвязных и раздробленных связных грунтов объемом ΔV из покровной толщи с не очень высокой исходной пористостью n_0 является увеличение последней до среднего значения n в области деформирования-разрушения объемом V_0 (рис. 1). И уравнение баланса массы грунта до и после разрыхления записывается в виде [5, 7]:

$$\rho_s(1 - n_0)V_0 = \rho_s(1 - n)V = \rho_s(1 - n)(V_0 + \Delta V), \quad (1)$$

где ρ_s – плотность минеральной части грунта; $V = V_0 + \Delta V$.

Из уравнения (1) следует, что

$$\Delta V = V_0(n - n_0)/(1 - n) = kV_0, \quad (2)$$

а из опытов – что провал земной поверхности образуется только после того, как высота области V_0 достигнет мощности толщи h [5, 17, 24]. При этом для канонических схем области деформирования-разрушения, показанных на рис. 1, минимальный объем грунтов $\Delta V = V_{кр}$, удаление которых обеспечивает появление заметной глазу воронки, равен:

$$V_{кр} = k\pi R^2 h/3, \quad (3)$$

$$V_{кр} = k\pi R^2 h, \quad (4)$$

$$V_{кр} = 4k\pi a^2 h/3, \quad (5)$$

где a – малая полуось “эллипсоида”, крайние значения которой x_1, x_2 ($x_1 \leq a \leq x_2$) определяются моделью зонального строения области влияния ослабленного участка [8].

Уравнение (2) и вытекающие из него зависимости (3-5) могут служить для оценки устойчивости территории и прогноза возможности появления на ней воронок, если сопоставить значение $V_{кр}$ с величиной аккумуляционной емкости V_a закарстованного массива. Из них также следует, что $V_{кр} \rightarrow 0$ при $h \rightarrow 0$ и особенно при $R \rightarrow 0$, так как объем $V_{кр}$ прямо пропорционален h в первой степени и R^2 – во второй [7]. Этим хорошо объясняется тот факт, что деформирование мощной грунтовой толщи и оседание большой площади земной поверхности происходят, как правило, в форме медленного прогиба с небольшой амплитудой, тогда как провалы появляются внезапно, могут быть очень глубокими и иногда возобнов-

ляются. Кроме того, $V_{кр} \rightarrow 0$ при $n_0 \rightarrow n$, что указывает на возможность просадок грунтов при отсутствии закарстованных отложений, например при увлажнении (лессы) или вибрации (рыхлые пески).

Большой опыт горных инженеров свидетельствует, что три основные формы разрыхления (см. на рис. 1) наблюдаются в самых разных породах – скальных, полускальных и дисперсных. А переход пород из монолитного в раздробленное состояние характеризуется коэффициентом разрыхления [1, 9, 11, 15, 18, 20-22, 25, 28]:

$$K_p = \rho_m/\rho_p, \quad (6)$$

где ρ_m, ρ_p – плотности пород в массиве исходная и в раздробленном состоянии соответственно. При первоначальном обрушении K_p может изменяться в пределах 1.08-2.10. Однако чаще всего его значения, при которых породы, разрушаясь, заполняют полое пространство и воспринимают на себя давление вышележащих пластов, составляют $K_p = 1.15-1.80$. Используется также коэффициент остаточного разрыхления $K_{оп}$, которым характеризуются раздробленные породы по истечении времени или в результате нескольких циклов обрушения. Он заметно меньше коэффициента первичного разрыхления: $K_{оп} = 1.10-1.30$ [15, 25, 28].

Нетрудно видеть, что коэффициент $K_p = \rho_m/\rho_p = (1 - n_0)/(1 - n)$ в формуле (6) связан с коэффициентом $k = (n - n_0)/(1 - n_0)$ в выражениях (2-5) соотношением:

$$K_p = k + 1. \quad (7)$$

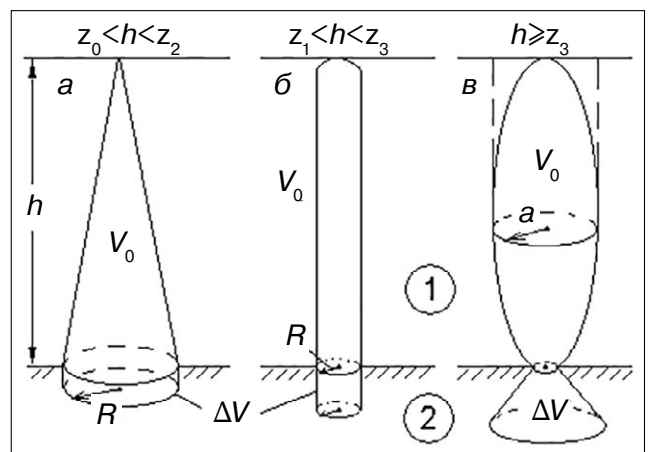


Рис. 1. Схемы к расчету критического объема грунта $V_{кр} = \Delta V$, вынос которого из области деформирования V_0 , аппроксимированной круговым конусом, цилиндром и эллипсоидом, приведет к провалам земной поверхности: 1 – грунтовая толща, 2 – закарстованный массив, $z_{0,1,2,3}$ – характерные отметки мощности в модели области влияния отверстия [8], позволяющей определить объем V_0 .

Поэтому уравнение (2) записывается также в виде:

$$\Delta V = (K_p - 1)V_0. \quad (2a)$$

Таким образом, рассмотренный выше подход к прогнозу провалов справедлив для районов не только покрытого, но и голого карста, которые занимают соответственно 70% и 30% площади распространения на земной суше растворимых отложений (46.9×10^6 км²). Однако первым, кто предложил оценивать устойчивость карбонатного массива, сравнивая объем карстовой полости с объемом заполняющих ее при обрушении скальных пород, был, по-видимому, Г.М. Шахунянц [27].

АККУМУЛЯЦИОННАЯ ЕМКОСТЬ ЗАКАРСТОВАННОГО МАССИВА

Использование обсуждаемого в статье, по сути дела, горно-геологического подхода к оценке устойчивости закарстованных территорий требует нахождения аккумуляционной емкости V_a растворимых отложений – объема их полого пространства, которое способно принимать и накапливать обломочный материал. Понятие “аккумуляционная емкость”, введенное достаточно давно [5-7], предполагает зависимость этой характеристики от многих условий и факторов, в том числе от минерального состава, трещиноватости и растворимости закарстованных пород, режима и химического состава подземных вод. В первом приближении аккумуляционная емкость карстующихся отложений равна:

$$V_a = V_m (K_k + v_k \cdot T / \Delta h), \quad (8)$$

где V_m – объем массива пород или области аккумуляции, в пределах которой может откладываться обломочный материал; Δh – высота этой области ($V_m / \Delta h$ – ее средняя площадь); K_k – коэффициент открытой трещинно-карстовой пустотности; v_k – скорость карстовой денудации; T – рассматриваемый промежуток времени (в инженерной геологии обычно срок службы зданий и сооружений). Если $v_k \rightarrow 0$ и $v_k \cdot T / \Delta h \ll K_k$, то:

$$V_a = V_m \cdot K_k. \quad (8a)$$

Так, для инженерно-геологических условий, показанных на рис. 2, область аккумуляции V_m представляет собой усеченный конус, и выражение (8a) принимает вид:

$$V_a = \pi m K_k [3D^2 + 2m \cdot \text{ctg} \varphi'_0 (3D + 2m \cdot \text{ctg} \varphi'_0)] / 12, \quad (9)$$

где $m = \Delta h$ – мощность карбонатных пород, $D = 2R$ – диаметр или пролет ослабленного участка (входного отверстия в трещинно-поровое про-

странство), φ'_0 – угол откоса песков под водой. При малом пролете входного отверстия ($D \ll m \cdot \text{ctg} \varphi'_0$) уравнение (9) упрощается:

$$V_a = \pi m^3 K_k \cdot \text{ctg}^2 \varphi'_0 / 3. \quad (9a)$$

Если пьезометрическая поверхность трещинно-карстовых вод имеет заметный уклон, то их горизонтальная скорость велика, угол при нижнем основании конуса V_m (см. рис. 2) в направлении движения воды будет значительно меньше, а в противоположном направлении – несколько больше φ'_0 , и значение V_m увеличится.

При интенсивном же отборе трещинно-карстовых вод объем V_m и, следовательно, емкость V_a возрастают очень сильно (рис. 3).

На рис. 3а видно, что после принудительного разрушения экранирующего слоя над системой суффозионных полостей и выноса вышележащих песков в поровое пространство нижнего слоя, имитирующего закарстованные породы, это пространство оказывается полностью закольцованным. При этом размеры области аккумуляции в массиве зависят от положения эксплуатационных скважин в плане, интервала и интенсивности откачек (рис. 3б). В пользу этого вывода свидетельствуют и результаты, полученные Ф.В. Котловым в ходе комплексного изучения суффозии на участке Замоскворецкой дренажной системы [16].

Обращает на себя внимание, что в бортах ослабленной зоны 3, несмотря на одинаково задаваемые там условия, возникают не сплошные линейные, а отдельные (локальные) суффозионные полости (см. рис. 3а). Причем наибольших размеров они достигают у прозрачных стенок лотка 1,

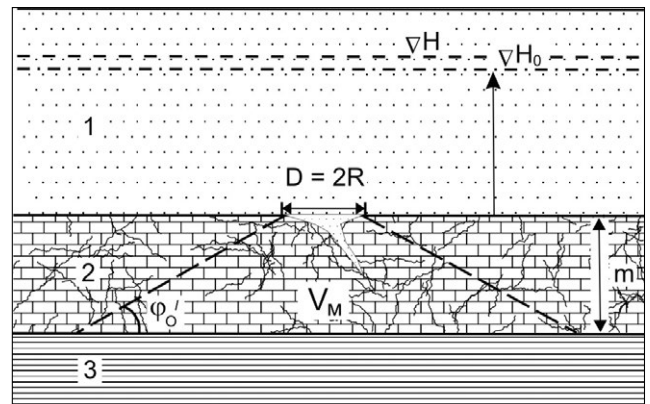


Рис. 2. Схема к определению аккумуляционной емкости растворимых пород: 1 – пески, 2 – закарстованные известняки с маломощным глинистым элювием в кровле, 3 – глины тугопластичные, $H \geq H_0$ – уровни подземных вод, $D = 2R$ – диаметр (пролет) участка ослабления массива – входного (в область аккумуляции V_m) отверстия; φ'_0 – угол откоса песков под водой.

2, где и образовались провалы в модели. Очевидно, это связано с тем, что на контактной поверхности работает лишь трение скольжения грунтов по стенке, которое заметно меньше угла их внутреннего трения. Именно снижением трения во многом объясняется образование воронок над подземными коллекторами или у стенок колодцев и буровых скважин. Поэтому модельную ситуацию, показанную на рис. 3а, с позиций оценки геологического строения можно трактовать как пересечение погребенного эрозионного вреза (3) разрывными тектоническими нарушениями (1, 2).

ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ АККУМУЛЯЦИИ ГРУНТОВ В МАССИВЕ

Из ф. (8а) следует, что при $K_k = 1$ оценка аккумуляционной емкости сводится к определению объема одиночной полости-приемника $V_a = V_M = \Delta V$, которой в массиве может и не быть. Но даже если она есть, то чаще всего не настолько большая, чтобы обеспечить образование воронки на земной поверхности: $V_a = V_M < \Delta V = V_{кр}$ (см. рис. 1).

Объемы изолированной полости ΔV и области деформирования-разрушения (разрыхления) V_0 прямо пропорциональны их высотам – Δh и h_0 соответственно. Причем область V_0 может воспринимать на себя давление перекрывающих грунтов и “подбучивать”, т.е. подпирать их, не достигая земной поверхности, поэтому в общем случае $h_0 \neq h$. Тогда из выражений (2) и (2а) имеем:

$$\Delta h \sim h_0 k = h_0 (K_p - 1), \quad (10)$$

$$h_0 \sim \Delta h k = \Delta h / (K_p - 1). \quad (10a)$$

В работе В.Н. Андрейчука предложено следующее прогностическое уравнение [3]:

$$h_{см} = \Delta h K_p / (K_p - 1), \quad (11)$$

где, по образному выражению автора, $h_{см}$ – высота смыкания обвального свода и догоняющей его осыпи, при которой провалообразование прекращается. Вывод ф. (11) не приводится, но поскольку $h_{см} = \Delta h + h_0$ (рис. 4), то легко видеть, что это уравнение является еще одной формой записи условий (10) и (10а), если высоту области разрыхления V_0 считать не от кровли, а от подошвы полости.

Подход, основанный на сравнении h_0 (или $h_{см}$) и Δh , применяет и Г. Адерхолд [2], реконструируя механизм карстовых провалов в Земле Гессен (Германия). Того же подхода придерживается В.П. Хоменко [26], выполняя ретроспективный прогноз известного в Нижегородской области Пивоваровского провала. В статье И.А. Южанина и А.М. Терлецкого [28] рассмотрена методика послойного (снизу вверх) суммирования мощности отдельных слоев после разрушения $h_i \cdot K_p$ и сопоставления значения $\sum h_i \cdot K_p$ с общей высотой возможной зоны обрушения $m_b + \sum h_i$, где m_b – вынимаемая мощность пласта очистной выработки ($m_b \equiv \Delta h$).

Все вышесказанное свидетельствует о том, что одним из самых важных, если не главным, критерием устойчивости закарстованных территорий является глубина залегания ослабленных участков растворимых пород и, следовательно, мощность перекрывающих их грунтов. Это прямо следует из

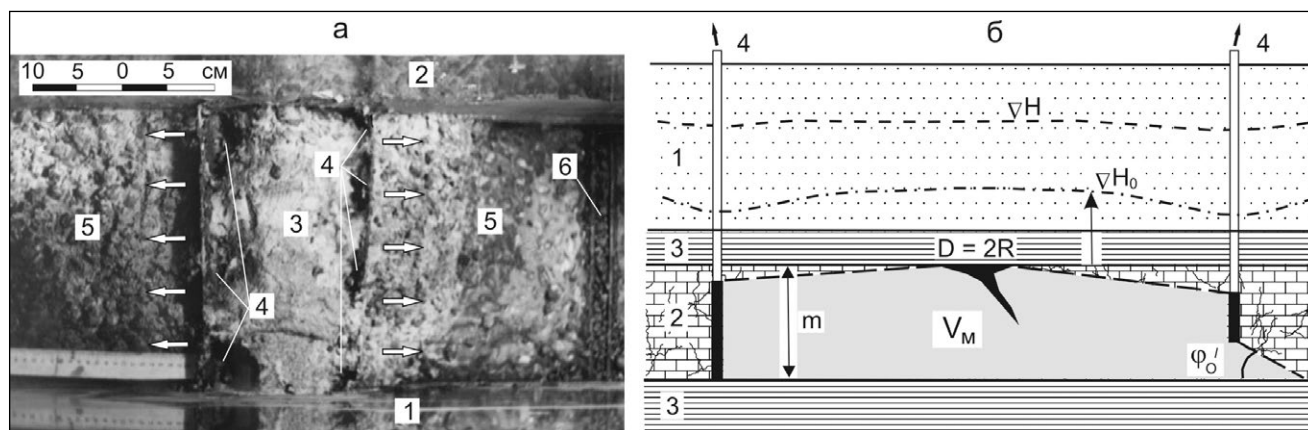


Рис. 3. Вид физической модели сверху после зачистки верхней песчаной толщи и экранирующего глинистого слоя, разрушенных в ходе опытов (а), и увеличение области аккумуляции V_M в результате интенсивной откачки трещинно-карстовых вод (б).

а: 1, 2 – лицевая и задняя стенки лотка; 3 – выполненный песком “палеоврез” (ослабленная зона); 4 – суффозионные полости; 5 – трещинно-поровое пространство “закарстованных пород”, запечатанное песчано-глинистым материалом; 6 – правая дрена для снижения напора воды в нижнем слое модели (левая дрена на фотографии не видна); стрелками показано направление движения напорной воды.

б: 4 – водозаборные скважины; остальные обозначения приведены на рис. 2.

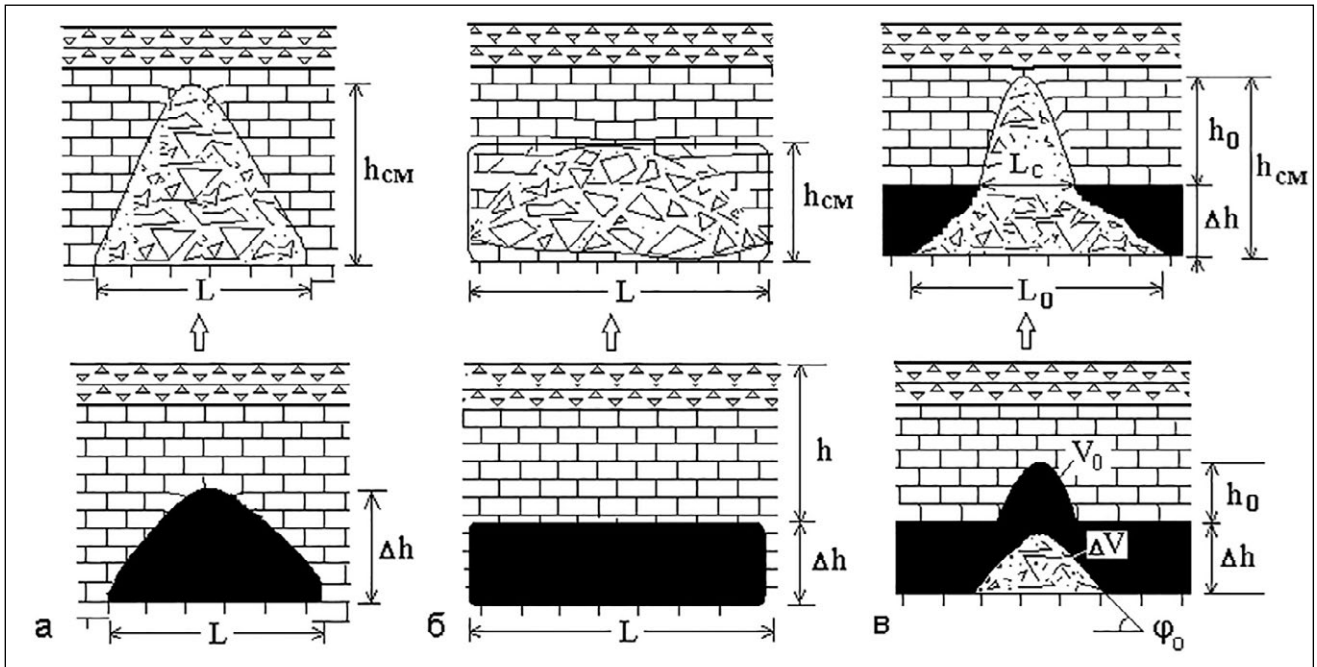


Рис. 4. Схемы обрушения горных пород над полостью, для которых в выражениях (10) справедлив знак равенства (а, б), и схема наблюдаемого в массиве обрушения кровли пещер (в).

уравнений (2-5). И огромная заслуга В.Н. Андрейчука [3] заключается в том, что он наглядно показал справедливость этого утверждения на примере районов развития Кунгурской и Ледяной пещер на Урале и ряда пещер в Западной Украине.

К сожалению, в настоящее время величина мощности покровной толщи закарстованных массивов является критерием устойчивости только для территории Республики Башкортостан¹. В нормативных документах, регулирующих изыскания и строительство в других карстовых районах^{2,3,4,5}, этот критерий не прописан.

¹ ТСН 302-50-95. РБ. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях / Госстрой Республики Башкортостан. Уфа, 1996. 41 с. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4294814/4294814948.htm>

² Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: Картолитография, 1984. 15 с. <https://docplan.ru/Index1/45/45188.htm>

³ Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области / Департамент градостроительного развития Нижегородской обл. Нижний Новгород, 2012. 140 с. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293758/4293758833.htm>

⁴ ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области / Администрация Нижегородской обл. Комитет архитектуры и градостроительства. Нижний Новгород, 1999. 72 с. <https://mooml.com/d/spravochnye-posobiya-k-snip/12969/>

⁵ ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области / Администрация Пермской обл. Пермь, 2004. 122 с. <https://studopedia.org/4-177843.html>

Возвращаясь к уравнениям (10, 10а), отметим, что заменить в них знак пропорциональности “~” на знак равенства мы имеем право тогда, когда форма карстовой полости и области разрыхления над ней примерно одинакова (рис. 4 а, б). На это обстоятельство обратил внимание еще Г.М. Шахунянц [27].

На рис. 4в показана схема развития процесса над карстовой пещерой в зрелой стадии ее развития. Она отражает результаты спелеологических наблюдений и обследования гротов Кунгурской и Ледяной пещер на Урале [3, 4, 13], а также Ново-мурадымовской пещеры в Башкирии. Очевидно, что зависимость h_{cm} (или h_0) от Δh при этом будет более сложной, чем та, что предусмотрена ф. (11). Этот вопрос подробно рассматривается в последнем разделе статьи на конкретном примере. Ниже остановимся на некоторых особенностях оценки устойчивости закарстованных и подработанных территорий.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПРОВАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ

Из трех канонических схем (см. на рис. 1) условию равенства форм областей выноса (деформирования, разрыхления покровной толщи) и аккумуляции удовлетворяет только схема на рис. 1б. Но если трубообразная форма канала течения или обрушения присуща многим воронкам, то вертикальная цилиндрическая полость в растворимых

породах – явление довольно редкое. Крупные горизонтальные полости, протяженность которых много больше их высоты, встречаются гораздо чаще.

Еще чаще приходится сталкиваться с ситуацией, когда трещинно-карстовые коллекторы представляют не вполне ясную пространственную систему связанных между собой небольших полостей. Размеры же полого пространства подработанных массивов, как отмечалось во введении, заранее известны. И в этом состоит, пожалуй, главное отличие инженерной геологии карстовых районов от горного дела.

Другое серьезное отличие заключается в выборе и оценке величины коэффициента разрыхления. Известно [15], что с ростом отношения глубины выработки h к ее высоте m_b он возрастает и максимальных значений достигает при $h/m_b \approx 3-4$, а затем снижается. Уменьшается он, как уже говорилось, и с течением времени, а также при увеличении количества циклов обрушения, что объясняется соответственно статическим и динамическим уплотнением грунтов. Эти зависимости учитываются при размещении выработок, определении порядка отработки пластов и управлении горным давлением [25, 28]. И горные инженеры вправе ориентироваться на промежуточные, между K_{op} и K_p , ближе к первому, значения коэффициента разрыхления: $K_{op} \leq K_p' < K_p$.

Тех же горно-геологических позиций, по-видимому, придерживается и В.Н. Андрейчук [3], не затрагивающий этот вопрос, но рекомендуемый достаточно низкие значения K_p некоторых типов пород, встречающихся в районе Кунгурской и Ледяной пещер. Так, для песчаных и гравийно-галечниковых отложений назначаемый им коэффициент разрыхления равен $K_p = 1.0-1.1$.

Действительно, в плотных моделях, приготовленных из сухого кварцевого мелкого полукатанного песка, значения коэффициента разрыхления получаются равными $K_p = 1.05-1.12$ [5-8]. Однако заметим, что даже при самой тщательной укладке и трамбовке плотность этих моделей не превышала $\rho_0 = 1.60-1.67$ г/см³, т.е. начальная пористость была больше либо равной $n_0 = 0.37-0.40$. В массиве же значения $n_0 \geq 0.37-0.40$ характерны для песчаной толщи средней плотности сложения [12]; у плотных мелких, а тем более средних и крупных песков начальная пористость заметно меньше.

Средняя конечная пористость в области деформирования моделей составляла $n = 0.42-0.44$, тогда как для максимально рыхлого сложения идеальных сыпучих тел $n = 0.48$. В несвязных грунтах, частицы которых угловатые, и в пылеватых пес-

ках она может быть больше $n = 0.48$. Кроме того, в грунтовой толще пески, как правило, водонасыщенные или влажные. А в них, хотя и по разным причинам, могут существовать, не разрушаясь, достаточно крупные пустоты – от 2-10 мм до первых дециметров [7]. И их общая пористость может быть существенно выше, чем у воздушно-сухих песков. Именно поэтому для оценки устойчивости несвязных грунтов предложено пользоваться величиной конечной пористости $n = 0.5$ [5, 6].

С учетом всего вышесказанного значения коэффициента разуплотнения песчаной толщи, равные $K_p = 1.15-1.25$, не кажутся чрезмерно большими. Для гравийно-галечниковых отложений они будут еще больше хотя бы по причине высоких значений угла дилатансии [22].

Если не рассматривать обрушение пород над крупной карстовой полостью, то в отличие от подработанных массивов маловероятно, что вынос обломочного материала в трещинно-поровое пространство растворимых отложений будет сопровождаться его последующим уплотнением в этом пространстве – статическим или динамическим. Скорее, следует ожидать неограниченного увеличения пористости вынесенных грунтов на фоне роста области аккумуляции V_m (см. рис. 2, 3). В области выноса V_0 (см. рис. 1) уплотнение возможно, однако появление воронки на земной поверхности или под сооружением, на наш взгляд, намного опасней ее последующей эволюции, так как мы знаем об этом и можем принять соответствующие тому или иному случаю меры защиты. О редких крупных провалах с катастрофическими последствиями речь сейчас не идет, а примеры успешного выполнения противокарстовых мероприятий и предотвращения большого экономического и социального ущерба после того, как воронка образовалась в основании здания, есть [19].

Таким образом, используя обсуждаемый подход для оценки возможности возникновения карстово-суффозионных воронок в покровной толще закарстованного массива и на ее поверхности, необходимо учитывать форму не только области выноса (деформирования-разрушения, разрыхления) грунтов (см. рис. 1), но и области аккумуляции (см. рис. 2-4). И, проводя расчеты, следует ориентироваться на значения коэффициентов k или K_p , но не K_{op} . При этом, конечно, надо быть уверенным, что собственно карстовый процесс (коррозия, выщелачивание и отчасти эрозия) не сильно отразится на величине аккумуляционной емкости растворимых пород в течение прогнозируемого отрезка времени T . Другими словами, нужно показать, что эти породы закарстованные, но не карстующиеся.

УСТОЙЧИВОСТЬ ОСНОВАНИЯ НИЖЕГОРОДСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (НИАЭС)

Участок строительства НИАЭС площадью 20 км² выбран на границе Нижегородской и Владимирской областей по ряду причин энергетического и социально-экономического характера с учетом [10] и требований НП-032-01⁶. Учет инженерно-геологических условий при этом отошел на второй план, и Нижегородская АЭС оказалась первой в мире атомной станцией, размещенной на территории развития активного сульфатно-карбонатного карста.

В ходе скрупулезных комплексных изысканий, выполненных проектным институтом ОАО «НИАЭП» с привлечением ряда производственных и научно-исследовательских организаций [10], с большим трудом выделена площадка размещения основных сооружений (3,25 км²), в границах которой проявления карста на земной поверхно-

сти отсутствуют. И, естественно, встал вопрос, не образуется ли «завтра» провал на этой площадке, пока еще свободной от поверхностных карстовых форм? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно хотя бы вкратце остановиться на инженерно-геологических условиях строительства.

На рис. 5 видно, что площадка размещения энергоблоков удалена и от р. Оки, и от палеовреза р. Бол. Кутра. Мощность слабых четвертичных грунтов здесь минимальная, а твердых глинистых и полускальных отложений уржумского яруса – максимальная. Гидрогеологические условия участка характеризуются наличием двух водоносных комплексов. Верхний, напорно-безнапорный слабоводоносный комплекс с абсолютными отметками установившегося уровня от 92-118 до 124-126 м приурочен к четвертичным пескам, прослоям и линзам уржумских песчаных пород, известняков, доломитов и мергелей. Нижний комплекс состоит из казанско-сакмарского (верхнего) и сакмарского (нижнего) водоносных пластов. Они разделены водоупорными ангидритами и монолитными гипсами общей мощностью до 20-28 м. Но на площадке АЭС верхний

⁶ НП-032-01. Размещения атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности / Госатомнадзор РФ. М., 2002. 11 с. <https://internet-law.ru/stroyka/doc/41356>

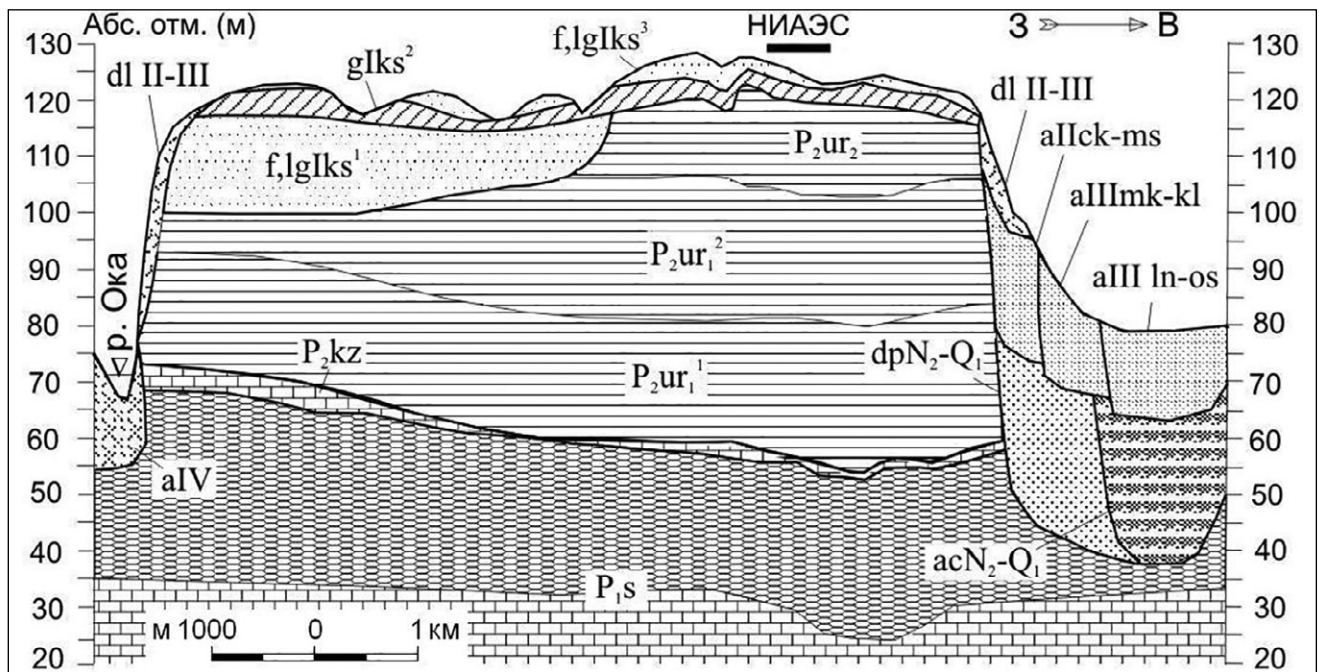


Рис. 5. Геологический разрез участка строительства Нижегородской АЭС (по материалам ОАО «НИАЭП»). Пермская система, нижний отдел: P_s – сульфатно-карбонатная толща сакмарского яруса; средний отдел: P_{kz} – доломиты, мергели и глины казанского яруса; $P_{ur_1^1}$, $P_{ur_1^2}$ – мергелисто-глинистая толща нижнего ($P_{ur_1^1}$, $P_{ur_1^2}$ – нижняя и верхняя пачки) и верхнего подъярсовуржумского яруса. Плиоцен – нижний плейстоцен: acN_2-Q_1 , dpN_2-Q_1 – песчано-глинистые аллювиально-коллювиальные и оползневые отложения. Четвертичная система: $gIks^2$ – моренные суглинки донского оледенения; $f,IgIks^1$, $f,IgIks^3$ – водноледниковые пески времени наступания и отступления ледника; $aIck-ms$ – песчаные отложения III н/п террасы (чекалинский и московский горизонты); $aIIImk-kl$, $aIIIIn-os$, aIV – аллювиальные песчано-глинистые грунты II (микулинский и калининский горизонты) и I (ленинградский и осташковский горизонты) н/п террас и поймы. НИАЭС – площадка строительства.

водоносный (казанско-сакмарский) пласт практически отсутствует, а приуроченные к сакмарским доломитам воды нижнего пласта залегают на глубине 97-98 м. Их уровень устанавливается на 46-50 м выше кровли доломитов, на абсолютных отметках 80-97 м.

Из результатов инженерно-геологических изысканий следует также, что водопроницаемость карбонатных пород массива-основания АЭС компенсируется их слабой растворимостью, а средняя растворимость сульфатных пород – их непроницаемостью. Начиная с глубины 18-19 м, подземные воды становятся слабоагрессивными и к сульфатным, и к карбонатным породам. Их минерализация увеличивается с глубиной и на отметках подошвы уржумской толщи настолько высока (3-5 г/л), что следует ожидать не растворения пород, а выпадения вещества из раствора.

Конечно, гипс может растворяться, даже если минерализация воды достигает 7 г/л, и его растворимость зависит не только от минерализации подземных вод [14]. Однако в данных условиях наблюдается именно осаждение гипса. Об этом свидетельствуют результаты комплексных геологических, гидрогеологических и геохимических исследований – натуральных и лабораторных.

Изменение напора трещинно-карстовых вод в окрестности промплощадки крайне мало: $I = \Delta H / \Delta L = 0.003 - 0.004$, где $\Delta H = 8$ м – падение напора на пути движения подземных вод $\Delta L = 2.0 - 2.7$ км, мала и скорость их горизонтального движения. Таким образом, из четырех условий развития карста, сформулированных Д.С. Соколовым [23], не выполняются три: 1 – для пород и 2 – для подземных вод, что позволяет оценить устойчивость массива пород, исходя из определенных предположений следующим образом.

Максимальная мощность сильнотрещиноватых и раздробленных сакмарско-казанских отложений, вскрытых скважинами в их кровле, равна $(h_{0.3})_{\max} = 4.1$ м за пределами стройплощадки. Тем не менее допускаем существование на площадке АЭС (3.25 км²) не только этой ослабленной (раздробленной) зоны, но и достаточно большой в плане полости высотой $\Delta h \approx (h_{0.3})_{\max} = 4$ м.

Средняя мощность покровной толщи на площади 3.25 км² составляет $h = 69.6$ м, и почти вся эта толща представлена уржумскими отложениями, которые относятся в основном к твердым связным и полускальным грунтам ($K_p = 1.3 - 1.5$). Поэтому принимаем: $h = 70$ м, $(K_p)_{\text{ср}} = 1.4$ или, в соответствии с ф. (7), $(k)_{\text{ср}} = 0.4$, а также цилиндрическую форму канала обрушения уржумских пород.

Учитывая низкую скорость движения трещинно-карстовых вод, считаем на основании урав-

нения Бернулли, что скорость движения воды в крупной изолированной полости будет пренебрежимо малой. Это позволяет выбрать коническую форму области аккумуляции с углом откоса $\varphi_0 = 45^\circ$ (рис. 6).

Полагая в ф. (4) $h \leq h_0$ и $R = L_c/2$, подставляем в нее $k = k_{\text{ср}} = 0.4$ и заменяем $V_{\text{кр}}$ на объем усеченного круглого конуса высотой Δh , диаметр верхнего и нижнего оснований которого равен соответственно L_c и $L_0 = L_c + 2\Delta h$ (см. рис. 6). Тогда после несложных преобразований ф. (4) получим условие выхода провала на земную поверхность в виде:

$$(\Delta h - 0.4h_0)L_c^2 + 2\Delta h^2L_c + 4\Delta h^3/3 \geq 0. \quad (12)$$

Неравенство (12) по-разному выполняется в 3-х случаях: при: 1) $\Delta h - 0.4h_0 > 0$; 2) $\Delta h - 0.4h_0 = 0$, и 3) $\Delta h - 0.4h_0 < 0$. Поскольку $\Delta h = 4$ м, $h_0 = 70$ м и $\Delta h - 0.4h_0 = -24$ м, то мы имеем дело с последним, третьим случаем, значения L_c для которого лежат в интервале 0-2.67 м.

Столь малая ширина области деформирования (разуплотнения, обрушения) характерна для каналов течения несвязных грунтов. Иными словами, проявления карста на земной поверхности при условии $0 \leq L_c \leq 2.67$ м возможны лишь в случае реализации процесса массовой суффозии [8]. Но доля суффозионно-неустойчивых грунтов в общей мощности пород уржумского яруса средней перми ($P_{2\text{ur}}$) очень мала. Выдержанный по простиранию прослой мелких песков мощностью 2.9-4.6 м наблюдается лишь в подошве отложений верхнего подъяруса ($P_{2\text{ur}_2}$). В нижней пачке ниж-

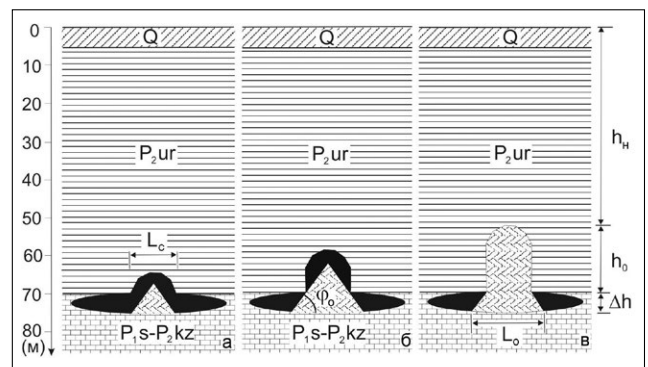


Рис. 6. Схематизация массива пород на площадке строительства энергоблоков и стадии обрушения покровной толщи: Δh – высота гипотетической карстовой полости на контакте сакмарско-казанских ($P_{1s} - P_{2kz}$) растворимых и уржумских (P_{2ur}) нерастворимых отложений; L_c – пролет свода обрушения и области разрыхления грунтов; h_0 – максимальная высота канала обрушения, h_n – мощность ненарушенной толщи, $h_0 + h_n = h$ – мощность покровной толщи, с поверхности сложной маломощными четвертичными отложениями (Q).

него подъяруса ($P_2ur_1^1$) линзы и прослои алевроитов и песков вообще отсутствуют (см. рис. 5). Отсюда следует, что образование провалов вследствие развития суффозии массы на стройплощадке исключается.

Поэтому, исходя из свойств и состояния уржумских пород, полагаем, что пролет свода их обрушения (диаметр верхнего основания усеченного конуса, в пределах которого накапливается обломочный материал) будет в 3-5 раз больше значения $L_c = 2.67$ м. Решая уравнение (12) относительно h_0 подстановкой $\Delta h = 4$ м, $L_c = 8.0-13.4$ м, находим, что высота области деформирования-разрушения равна $h_0 = 23.3-17.2$ м, т.е. примерно в 3-4 раза меньше h .

Таким образом, в природных условиях площадка размещения основных сооружений НИАЭС характеризуется 3-4-кратным запасом устойчивости: $K_y = h/h_0 = 3.0-4.1$. При этом, учитывая, что мощность ненарушенной толщи равна $h_n = h - h_0 \approx 47-53$ м (см. рис. 6), трудно представить себе приложенное с поверхности техногенное воздействие (статическое, динамическое или фильтрационное), которое могло бы вывести нижнюю разрушенную часть покровной толщи из равновесия. Другое дело, если оно будет приложено изнутри массива, например в виде откачек трещинно-карстовых вод, но согласно проектным решениям такой вид воздействия исключается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для инженера-геолога районы покрытого карста представляют наибольший интерес не только потому, что имеют на Земле самое широкое распространение. Важнее то, что в отличие от районов голого карста они наиболее благоприятны, если не сказать пригодны, для хозяйственного освоения и жизни человека в целом. И чем больше мощность покровной толщи закарстованных массивов, тем более справедливо это утверждение.

В инженерной геологии карстовых районов или, что то же самое, в инженерном карстоведении наиболее актуальной, да и сложной, пожалуй, проблемой является локальный прогноз провалообразования. Особенно остро она стоит там, где воронки провала и оседания отсутствуют, не зарегистрированы или плохо выражены в рельефе, т.е. в районах нереализованной (потенциальной, ожидаемой) провальной опасности. Один из возможных подходов к решению этой проблемы, изложенный в статье, базируется на сравнении объема удаленных из покровной толщи несвязных и раздробленных связных грунтов с аккумуляционной емкостью закарстованного массива — объе-

мом полого карстового пространства, способного принимать и накапливать обломочный материал.

Понятие “аккумуляционная емкость” предполагает зависимость этой характеристики от целого комплекса условий и факторов, в том числе минерального состава, трещиноватости и растворимости пород, режима трещинно-карстовых вод и интенсивности техногенного воздействия. Ее отождествление с объемом отдельной карстовой полости справедливо далеко не всегда, но главное — оно не способствует постановке и решению проблемы количественной оценки этого очень важного, если не основного показателя устойчивости закарстованных территорий.

Определение аккумуляционной емкости растворимых пород — сложная и далеко не решенная в настоящее время задача, которую, тем не менее, нужно и ставить, и решать. При этом необходимо учитывать кардинальные отличия инженерной геологии карстовых районов от горного дела, которое давно использует эффект увеличения объема горных пород при их обрушении в своих целях.

Разрыхление грунтов — второй краеугольный камень обсуждаемого в статье подхода к оценке устойчивости закарстованных территорий. Этот процесс служит одним из значимых механизмов самоорганизации геологической среды, которая “стремится” противостоять внешним воздействиям и сохранить равновесие. Здесь в явном виде проявляется справедливость принципа Ле Шателье-Брауна. Но в отличие от подработанных территорий, используя эффект разуплотнения грунтов при оценке провальной опасности в карстовых районах, следует ориентироваться на максимальные значения коэффициента первичного разрыхления пород. В противном случае прогнозируемая устойчивость массива окажется неоправданно заниженной.

Если инженерно-геологические условия поддаются достаточно простой схематизации, то рассмотренный в статье подход к прогнозу провалообразования уже сейчас можно использовать на практике. Об этом свидетельствуют результаты оценки устойчивости грунтового основания энергоблоков Нижегородской атомной электростанции

Особенность строительства НИАЭС заключается в том, что все ее объекты расположены на территории развития активного сульфатно-карбонатного карста. В результате инженерно-геологических изысканий выделена площадка размещения основных сооружений, где поверхностные формы карста отсутствуют, а мощность твердых глинистых грунтов, перекрывающих закарстованные породы, максимальна. Установлено также,

что скорость растворения пород в зоне затрудненного водообмена крайне мала. В этих природных условиях, как следует из выполненных расчетов, основанных на сопоставлении аккумуляционной емкости закарстованного массива с объемом области разрыхления покровной толщи, площадка главных сооружений НИАЭС характеризуется 3-4-кратным запасом устойчивости.

Источник финансирования. *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме №г.р. АААА-А19-119021190077-6.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авершин С.Г.* Сдвигение горных пород при подземных разработках. М.: Углетехиздат, 1947. 245 с.
2. *Адерхолд Г.* Классификация провалов и мульды оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий // Пер. с нем. В.В. Толмачева. Под ред. Е.В. Копосова. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. 112 с.
3. *Андрейчук В.Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Изд-во "Прут", 1999. 52 с.
4. *Андрейчук В.Н., Дорофеев Е.П., Лукин В.С.* Органнне трубы в карбонатно-сульфатной кровле пещер // Пещеры. Проблемы изучения. Пермь, 1990. С. 16-23.
5. *Аникеев А.В.* Моделирование провалообразования в песчаной покровной толще закарстованного массива // Геологические исследования литосферы / Отв. ред. В.М. Моралев. М.: Наука, 1988. С. 52-56.
6. *Аникеев А.В.* Закономерности деформирования несвязных грунтов над карстовой полостью // Инженерная геология карста: докл.Международ.симп. Т.1. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1993. С. 67-72.
7. *Аникеев А.В.* Особенности разрушения влажных и водонасыщенных песков покровной толщи в карстовых районах // Геоэкология. 1995. № 1. С. 72-79.
8. *Аникеев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. 2006. № 6. С. 544-553.
9. *Барановский В.И.* Влияние природных факторов на выбор способов разработки угольных пластов на глубоких горизонтах. М.: Госгортехиздат, 1963. 179 с.
10. *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.
11. *Глушко В.Т., Широков А.З.* Механика горных пород и охрана выработок. Киев: Наукова думка, 1967. 153 с.
12. Грунтоведение. 6-е изд., перераб. и доп. // Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А. и др. / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
13. *Дорофеев Е.П.* Взаимосвязь подземных и поверхностных карстовых форм на примере Кунгурской пещеры // Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна. Вып. 8 (Тр. совещания в г. Горький в октябре 1965 г.). М.: Изд-во "Транспорт", 1968. С. 147-151.
14. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2006. 256 с.
15. *Казикаев Д.М.* Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд. М.: Недра, 1981. 288 с.
16. *Котлов Ф.В.* Изменение природных условий территории Москвы под влиянием деятельности человека и их инженерно-геологическое значение. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 264 с.
17. *Краматдзян А.А., Линдквист П.-А., Мансон А. и др.* О формах областей течения в сыпучих материалах при выпуске // ФТПРПИ. 1994. № 2. С. 34-46.
18. *Куликов В.В.* Совместная и повторная разработка рудных месторождений. М.: Недра, 1972. 328 с.
19. *Мулюков Э.И., Колесник Г.С., Мартин В.И., Арасланов Р.Я.* Ликвидация аварии здания в г. Уфе, вызванной активизацией карстового процесса // Строительство на закарстованных территориях. Тез. докладов Всесоюзного совещания (Подольск, 22-23 ноября 1983) // М.: НИИОСП, 1983. С. 115-117.
20. *Петухов И.М., Линьков А.М., Фельдман И.А. и др.* Защитные пласты. Л.: Недра, 1972. 424 с.
21. *Порцевский А.К.* Геомеханическое обоснование выбора технологии подземной добычи руды с последующим использованием пустот: автореф. дисс. ... д.т.н. М.: МГОУ, 2006. 58 с.
22. *Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б.* Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // ФТПРПИ. 1986. № 4. С. 13-16.
23. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
24. *Стажевский С.Б.* К выбору формы и креплению выработок // ФТПРПИ. 1986. № 5. С. 27-32.
25. *Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В.* Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1977. 503 с.
26. *Хоменко В.П.* Карстово-обвальные процессы "простого" типа: полевые исследования // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 40-48.
27. *Шахуняц Г.М.* Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.

28. Южанин И.А., Терлецкий А.М. К вопросу определения высоты зоны обрушения пород // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2008. № 3. С. 122-127.

REFERENCES

1. Avershin, S.G. *Sdvizhenie gornyykh porod pri podzemnykh razrabotkakh* [Rock displacement upon underground mining]. Moscow, Ugletekhizdat Publ., 1947, 245 p. (in Russian)
2. Aderhold, G. *Klassifikatsiya provalov i mul'd osedaniy v karstoopasnykh raionakh Gessena. Rekomendatsii po otsenke geotekhnicheskikh riskov pri provedenii stroitel'nykh meropriyatiy.* [Classification of collapses and subsidence in karst hazardous areas of Hesse. Recommendations for the evaluation of geotechnical risks during construction activities]. Translated from German by V.V. Tolmachev. Edited by E.V. Kopusov. Nizhny Novgorod, NNGASU, 2010. 112 p. (in Russian)
3. Andreichuk, V.N. *Provaly nad gipsovymi peshcherami-labirintami i otsenka ustoichivosti zakarstovannykh territoriy* [Collapses above gypsum labyrinth caves and stability assessment of karstified terrains]. Chernovtsy, Prut Publ., 1999, 52 p. (in Russian)
4. Andreichuk, V.N., Dorofeev, E.P., Lukin, V.S. [Solution pipes in the carbonate-sulfate roof of caves]. *Peshchery. Problemy izucheniya* [Caves. Problems of study]. Perm, 1990, pp. 16-23. (in Russian)
5. Anikeev, A.V. [Modeling sinkhole development in the sand cover of karst massif]. *Geologicheskie issledovaniya litosfery* [Geological Studies of the Lithosphere]. V.M. Moralev, Ed. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 52-56. (in Russian)
6. Anikeev, A.V. [Regularities of deformation of incoherent soils over a karst cavity]. *Inzhenernaya geologiya karsta: Doklady Mezhdunarodnogo simpoziuma. T.1* [Engineering Geology of karst. Proc. Intern. Symp., vol. 1] Perm, Perm. St. Univ. Publ., 1993, pp. 67-72. (in Russian)
7. Anikeev, A.V. *Osobennosti razrusheniya vlazhnykh i vodonasyshchennykh peskov pokrovnoi tolshchi v karstovykh raionakh* [Specifics of moist and water-saturated mantle sand destruction in karst areas]. *Geoekologiya*, 1995, no. 1, pp. 72-79. (in Russian)
8. Anikeev, A.V. *Suffoziya. Mekhanizm i kinematika svobodnoi suffozii* [Suffosion: mechanism and kinematics of free suffosion]. *Geoekologiya*, 2006, no. 6, pp. 544-553. (in Russian)
9. Baranovskii, V.I. *Vliyanie prirodnnykh faktorov na vybor sposobov razrabotki ugol'nykh plastov na glubokikh gorizontalakh* [The influence of natural factors on the choice of ways to develop coal beds at deep horizons]. Moscow, Gosgortekhzizdat Publ., 1963, 179 p. (in Russian)
10. Glinskii, M.L., Egorova, V.A., Chertkov, L.G. *Osobennosti geologicheskogo stroeniya uchastka razmeshcheniya Nizhegorodskoi AES i ikh uchet v proektnykh resheniyakh ee stroitel'stva* [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)
11. Glushko, V.T., Shirokov, A.Z. *Mekhanika gornyykh porod i okhrana vyrabotok* [Rock mechanics and mine workings protection]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967, 153 p. (in Russian)
12. *Gruntovedenie* [Soil and rock engineering]. Trofimov, V.T., Ed., Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2005, 1024 p. (in Russian)
13. Dorofeev, E.P. [The relationship of underground and surface karst forms by the example of the Kungur cave]. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya zemlyanogo polotna* [Design, construction and operation of the roadbed]. Issue. 8, Proc. Meeting in Gorky in October 1965. Moscow, Transport Publ., 1968, pp. 147-151. (in Russian)
14. Zverev, V.P. *Podzemnye vody zemnoi kory i geologicheskie protsessy* [Groundwater in the Earth's crust and geological processes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2006, 256 p. (in Russian)
15. Kazikaev, D.M. *Geomekhanicheskie protsessy pri sovmestnoi ipovtornoj razrabotke rud* [Geomechanical processes in combined and repeated development of ores]. Moscow, Nedra Publ., 1981, 288 p. (in Russian)
16. Kotlov, F.V. *Izmenenie prirodnnykh uslovii territorii Moskvy pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka i ikh inzhenerno-geologicheskoe znachenie* [Changes in the natural conditions of Moscow territory under the influence of human activity and their engineering geological significance]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962, 264 p. (in Russian)
17. Kramadzhyan, A.A., Lindkvist, P.-A., Manson, A. et al. *O formakh oblastei techeniya v sypuchikh materialakh pri vypuske* [On the forms of flow domains in granular materials at their release]. *FTPRPI*, 1994, no. 2, pp. 34-46. (in Russian)
18. Kulikov, V.V. *Sovmestnaya i povtornaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy* [Joint and repeated development of ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1972, 328 p. (in Russian)
19. Mulyukov E.I., Kolesnik, G.S., Martin, V.I., Arasl'nov, R.Ya. [Elimination of the accident with the building in Ufa city caused by the activation of karst process]. *Stroitel'stvo na zakarstovannykh territoriyakh. Tez. Dokladov V Vsesoyuznogo soveshchaniya, Podol'sk, 22-23 noyabrya 1983* [Construction in karst areas. Abstracts of the All-Union Conference, Podolsk, November 22-23, 1983]. Moscow, NIIOSP, 1983, pp. 115-117. (in Russian)
20. Petukhov, I.M., Lin'kov, A.M., Fel'dman, I.A. et al. *Zashchitnye plasty* [Protective rock beds]. Leningrad, Nedra Publ., 1972, 424 p. (in Russian)

21. Portsevskii, A.K. *Geomekhanicheskoe obosnovanie vybora tekhnologii podzemnoi dobychi rudy s posleduyushchim ispol'zovaniem pustot. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. Nauk* [Geomechanical substantiation of the choice of underground ore mining technology, followed by the use of voids. Extended Abstract of Dr. Sci. (Techn.) Diss.]. Moscow, MGOU Publ., 2006, 58 p. (in Russian)
22. Revuzhenko, A.F., Stazhevskii, S.B. *Ob uchete dilatatsii v osnovnykh spravochnykh formulakh mekhaniki sypuchikh sred* [On accounting for dilatancy in basic reference formulas of granular solid mechanics]. *FT-PRPI*, 1986, no. 4, pp. 13-16. (in Russian)
23. Sokolov, D.S. *Osnovnye usloviya razvitiya karsta* [Basic conditions of karst development]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962, 322 p. (in Russian)
24. Stazhevskii, S.B. *K vyboru formy i krepleniyu vyrabotok* [To the choice of form and fixing mine workings]. *FTPRPI*, 1986, no. 5. pp. 27-32. (in Russian)
25. Turchaninov, I.A., Iofis, M.A., Kaspar'yan, E.V. *Osnovy mekhaniki gornykh porod* [Fundamentals of rock mechanics]. Leningrad, Nedra Publ., 1977, 503 p. (in Russian)
26. Khomenko, V.P. *Karstovo-obval'nye protsessy "prostogo" tipa: polevye issledovaniya* [Karst-collapse processes of "simple" type: field studies]. *Inzhenernaya geologiya*, 2009, no. 4, pp. 40-48. (in Russian)
27. Shakhunyants, G.M. *Zemlyanoie polotno zheleznykh dorog. Voprosy proektirovaniya i rascheta* [Roadbed railways. Design and calculation issues. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1953, 827 p. (in Russian)
28. Yuzhanin, I.A., Terletskii, A.M. *K voprosu opredele-niya vysoty zony obrusheniya porod* [To the question of determining the height of rock collapse zone]. *Naukovipratsi UKRNDMI NAN Ukraini*, 2008, no. 3. pp. 122-127. (in Russian)

ACCUMULATION CAPACITY OF SOLUBLE ROCKS AS THE MAIN STABILITY INDEX IN COVERED KARST AREAS

© 2019 A. V. Anikeev

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia
E-mail: anikeev_alex@mail.ru*

For an engineering geologist, covered karst areas are of special interest, not only because these are the most widespread on the Earth. More important, unlike the areas of bare karst, these areas are more favorable and suitable for economic development and human life as a whole. And the study shows that the greater is the thickness of the cover series, the more true is this statement.

The local forecast of sinkholes appears to be the most important and difficult engineering geological problem in these areas. It is especially acute there, where collapses and subsidence are absent, not registered, or poorly expressed in the relief, that is, in the areas of unrealized (potential, expected) sinkhole hazard. One of the possible approaches to solving this problem is discussed in the paper. It is based on comparing the volume of incoherent and fractured rock removed from the cover deposits with the accumulation capacity of the karst massif, i.e., the volume of hollow space in the karstic massif capable of receiving and accumulating clastic material.

The most common result of soils outflow in fissure-karst reservoirs is their loosening in the deformed-de-structed area of the overburden. For the three canonical schemes of this area structure, the critical values of clastic matter volume were obtained from the equation for soil mass balance before and after loosening, the further removal of which will lead to the failure of the earth's surface. Some techniques and methods for assessing the accumulation capacity of soluble rocks are considered and serious differences in the use of the discussed approach in predicting the stability of karstified and undermined territories are revealed. In particular, it is shown that in karst areas, when performing calculations, one should be guided by the maximum values of the coefficient of primary loosening of soils. Otherwise, the predicted stability of the overburden will prove to be unjustifiably underestimated. The results obtained and the procedure for assessing the stability of covered karst terrains by the proposed method are exemplified by the construction site of the main buildings of the Nizhny Novgorod NPP (3.25 km²), where there are no collapse and subsidence sinkholes. However, the entire construction site (20 km²) is located in the area of active sulphate-carbonate karst. From the engineering-geological point of view, this is the main feature of the facility design.

Keywords: *accumulation capacity of soluble rocks, collapse and subsidence sinkholes, karst, soil decompaction, suffosion (piping process), stability of karstified terrain.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201953-14>