

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 551.448:624.131

КАРСТОВО-СУФФОЗИОННО-ОБВАЛЬНОЕ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЕГО ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

© 2022 г. В. П. Хоменко^{1,*}, О. К. Криночкина^{1,**}

¹ *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, Москва, 129337 Россия*

**e-mail: khomenko_geol@mail.ru*

***e-mail: vdovinaok@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.10.2021 г.

После доработки 27.10.2021 г.

Принята к публикации 12.11.2021 г.

Рассматривается малоизученная генетическая разновидность карстового провалообразования, характерная для районов, где в геологическом разрезе присутствуют карстующиеся горные породы, перекрытые несвязными водонасыщенными или неводонасыщенными дисперсными породами, которые в первом случае могут подстилаться водоупорным слоем. В этих геологических условиях появление одиночных, а иногда и многочисленных карстово-суффозионно-обвальных провалов на земной поверхности или под подошвами фундаментов может быть вызвано: а) растворением карстующихся пород; б) внезапным образованием сквозной щели в перекрывающим их водонепроницаемом слое; в) динамическими или ударными воздействиями на несвязные дисперсные породы; г) появлением в них восходящего потока подземных вод. Последний из перечисленных иницирующий фактор часто принимает вид восстановления пониженного уровня подземных вод из-за прекращения искусственного отбора воды из карстующихся пород. На застроенных территориях карстово-суффозионно-обвальное провалообразование может привести к деформированию и даже разрушению зданий и сооружений. Изучение данного феномена на лабораторных физических моделях показало, что карстово-суффозионно-обвальные провалы представляют собой результат развивающегося снизу вверх суффозионно-обвального разрушения дисперсных пород, в котором значительную роль играет их разжижение. Предложена концепция причин и механизма этого процесса, на основе которой были разработаны прогностические решения расчетно-теоретического характера, позволяющие оценивать принципиальную возможность образования карстово-суффозионно-обвальных провалов и их размеры с учетом параметров сооружений, для которых они представляют угрозу.

Ключевые слова: карст, суффозия, разжижение, провал, прогноз

DOI: 10.31857/S0869780922010076

ВВЕДЕНИЕ

Термин “(смешанные) карстово-суффозионно-обвальные провалы” впервые (по крайней мере, в методической литературе) был предложен в 1995 г. И.А. Саваренским и Н.А. Мироновым [4], которые понимали под этим словосочетанием некоторую переходную форму между карстово-суффозионными и карстово-обвальными провалами. Аналогичной позиции придерживался и один из авторов данной статьи, пока в 2005 г. не предложил применять этот термин для наименования самостоятельной генетической разновидности карстовых провалов [7], которую он ранее квалифицировал как подтип карстово-суффозионных провалов [5].

В качестве английского эквивалента термина “карстово-суффозионно-обвальный провал” В.П. Хо-

менко и В.В. Толмачевым было предложено использовать словосочетание “liquefaction-collapse sinkhole” [10], поскольку в формировании таких провалов важную роль играет разжижение несвязных дисперсных пород (liquefaction). Это было установлено экспериментально [5], и тем самым подтвердились ранее высказанные на этот счет теоретические предположения [2, 3].

Есть все основания предполагать, что карстово-суффозионно-обвальное провалообразование распространено гораздо шире, чем это можно себе представить, особенно, если оно имеет природное происхождение, связанное с растворением карстующихся пород, однако доказать это довольно трудно. Идентифицировать карстово-суффозионно-обвальные провалы бывает намного легче, когда их происхождение связано с дей-



Рис. 1. Карстово-суффозионно-обвальное провал, образовавшийся в 1982 г. в г. Дзержинск Нижегородской обл. на участке водозабора подземных вод в период снижения интенсивности их эксплуатации.

ствием техногенных факторов и при этом отчетливо прослеживаются причинно-следственные связи. Обычно в таких случаях этот тип провалообразования начинает замещать карстово-суффозионное провалообразование фреатического типа [9] при нарушении гидродинамического режима подземных вод. Можно привести два наиболее ярких примера такого рода.

Первый связан с ситуацией, сложившейся в поселке Итода, находящемся в уезде Тагава префектуры Фукуока (Япония), где в 1952 г. начали появляться провалы, имеющие в плане размеры от 2 до 12 м и глубину до 4 м, что сопровождалось деформациями зданий и сооружений [11]. Поселок расположен в районе угольного месторождения Чикухо на территории, где закарстованные палеозойские известняки перекрыты четвертичными песками мощностью от 2 до 5 м. Первоначально уровень подземных вод располагался выше кровли известняков, но в результате шахтного водоотлива он стал снижаться, и это вызвало появление карстово-суффозионных провалов фреатического типа. Затем в результате закрытия угольных шахт началось восстановление уровня подземных вод, что привело к карстово-суффозионно-обальному провалообразованию. Всего в течение 17 лет сформировалось около 90 карстовых провалов обоих генетических типов.

Вторым примером служит карстовое провалообразование вблизи крупного водозабора подземных вод в промышленной зоне г. Дзержинск Нижегородской области. Отбор воды шел из двух водоносных горизонтов, разделенных водоупорным пластом верхнепермских глин (средней мощностью около 14 м): безнапорных надкарсто-

вых вод, присутствующих в вышележащих четвертичных песках (средней мощностью около 50 м), и напорных карстовых вод в нижележащих верхнепермских известняках и доломитах.

Водозабор начал работу в 1935 г. и до 1960 г. откачивал только надкарстовые воды, что привело к снижению их уровня на 12 м. С 1960 г. началась эксплуатация карстовых вод, в результате чего их пьезометрический напор был снижен на 15 м. С конца 1970-х гг. интенсивность отбора воды из обоих водоносных горизонтов постепенно снижалась. В 1967 г. на участке водозабора появился первый провал, в 1975 и 1976 г. — еще три, а с 1981 г. провалообразование резко возросло. В этот период, совпадающий с периодом восстановления уровней воды в обоих водоносных горизонтах, за 4 года возникло 10 провалов диаметром от 4 до 14 м и глубиной от 1 до 5 м, один из которых показан на рис. 1. К серьезному материальному ущербу это к счастью не привело.

Согласно интерпретации В.П. Хоменко [6], на стыке 1970-х и 1980-х гг. на рассматриваемом участке суффозионное разрушение песков нисходящим фильтрационным потоком сменилось их фильтрационным разрушением восходящим фильтрационным потоком. Иными словами, в Дзержинске в принципе произошло то же, что в японском поселке Итода: вместо карстово-суффозионных провалов фреатического типа стали формироваться карстово-суффозионно-обальные провалы. Однако следует отметить, что существует не диаметрально противоположный, но несколько иной взгляд на этот вопрос [1].

Таким образом, геологические условия, в которых проявляется карстово-суффозионно-об-

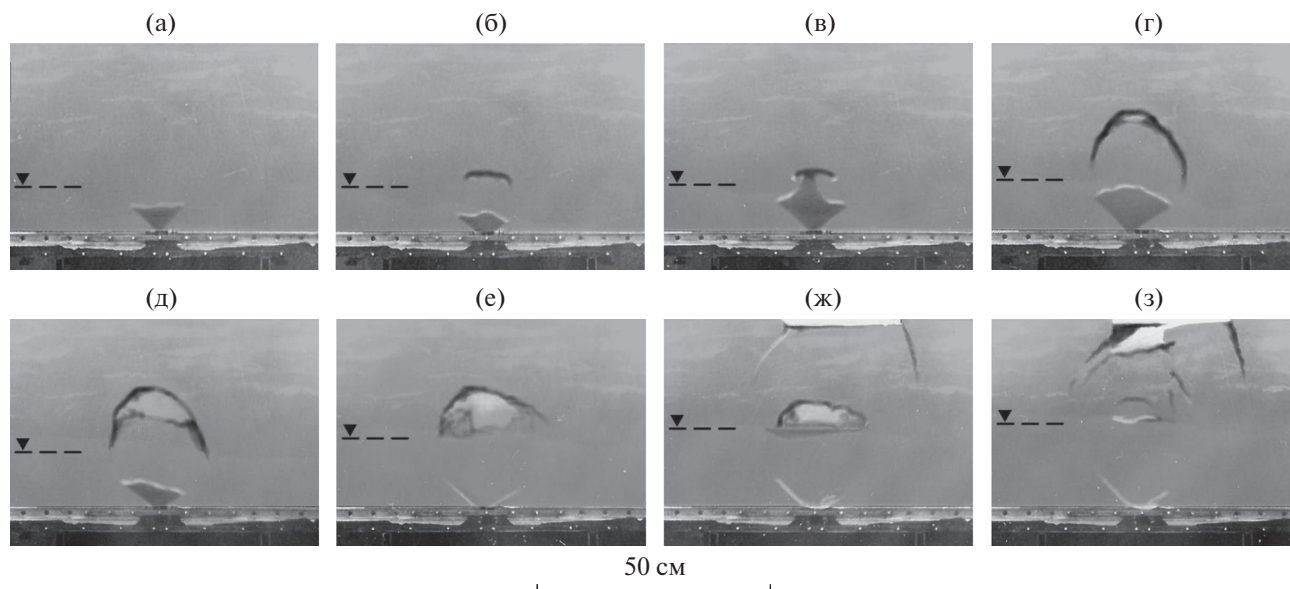


Рис. 2. Результаты лабораторного физического моделирования процесса формирования карстово-суффозионно-обвального провала, вызванного подъемом уровня подземных вод выше кровли растворимых пород, перекрытых несвязными дисперсными породами. Последовательное разрушение несвязных пород: (а) разжижение; (б) обрушение; (в) разжижение и обрушение; (г–е) обрушение; (ж) разжижение и обрушение; (з) обрушение в виде провала.

вальное провалообразование, характерны для разных регионов планеты, а сам этот феномен представляет серьезную опасность для объектов строительства и окружающей среды. Вместе с тем процесс формирования карстово-суффозионно-обвальных провалов изучен недостаточно, а его прогнозирование сталкивается с трудностями объективного характера.

ПРИРОДА ФЕНОМЕНА

Для формирования карстово-суффозионно-обвального провала необходимы следующие геологические условия:

1) в растворимых породах должны присутствовать раскрывающиеся в их кровле карстовые полости или расширенные трещины, лишенные заполнителя;

2) растворимые породы могут быть перекрыты водонепроницаемым слоем, содержащим сквозные нарушения сплошности (щели), контактирующие с трещинами или полостями, присутствующими в растворимых породах;

3) над растворимыми породами или над перекрывающим их водоупором должны залегать водонасыщенные или неводонасыщенные несвязные дисперсные породы.

В этих условиях по разным причинам, имеющим как естественный, так и искусственный характер, может начаться прерывистое фильтрационно-гравитационное разрушение несвязных грунтов, перекрывающих растворимые породы.

Как показали эксперименты [5, 6], это разрушение протекает в виде циклического формирования сменяющих друг друга полостей двух типов: заполненных (полости разжижения) и не заполненных (полости обрушения) водой. Вторые ограничены сверху параболическими сводами и возникают над первыми в результате обрушения их кровли, а первые образуются на месте вторых после их заполнения вытесненной водой и имеют форму обращенных вершиной вниз конусов (рис. 2).

Процесс начинается в зоне контакта несвязных пород с входом в карстовую полость или расширенную трещину, или с входом в сообщающееся с ней сквозное нарушение сплошности водоупорного пласта, покрывающего растворимые породы. Дальнейшее разрушение дисперсных пород, которое можно назвать суффозионно-обвальным, распространяется снизу вверх внутри некоторой конусообразной области (рис. 3), но не выше пьезометрического уровня воды, присутствующей в растворимых породах. Если ширина верхней части этой области окажется достаточной для обрушения вышележащих несвязных или связных дисперсных пород с выходом на земную поверхность, на ней появится провал.

Следует также отметить, что продвижение вверх фронта разрушения дисперсных пород может быть приостановлено при наличии слоев связных пород в их толще. Если один из них имеет достаточно большую мощность, разрушение не продвинется выше его подошвы. В противном

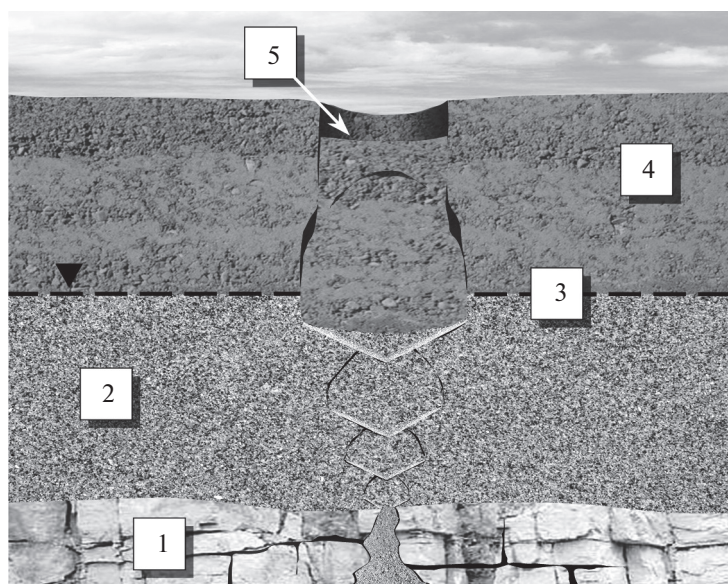


Рис. 3. Финальная стадия формирования карстово-суффозионно-обвального провала. 1 — растворимые породы; 2 — несвязные дисперсные породы; 3 — уровень подземных вод; 4 — несвязные или связные дисперсные породы; 5 — провал.

случае этот слой тоже будет вовлечен в суффозионно-обвальный процесс.

Что касается начальной стадии развития суффозионно-обвального процесса, то возможны два варианта развития событий, тесно связанные с вызывающими их причинами. Можно было бы выделить два подтипа карстово-суффозионно-обвальных провалов по характеру начального разрушения несвязных пород, однако это нецелесообразно, потому что в дальнейшем процесс формирования провала в обоих случаях развивается одинаково.

Разрушение несвязных пород может начаться в виде их разжижения, что может быть вызвано тремя причинами. Первая причина — динамические или ударные воздействия на водонасыщенные несвязные породы, в том числе при гидравлическом ударе, сопровождающем карстово-обвальное провалообразование “сложного” типа [8]. Второй причиной может послужить внезапное появление сквозного нарушения в водонепроницаемом слое, перекрывающем полость растворения, например, в результате его “случайного гидроразрыва” по А.В. Аникееву [1]. Обе эти причины “сработают” только если несвязные породы насыщены водой, а пьезометрический уровень воды в растворимых породах превышает уровень подошвы несвязных пород. Третьей причиной является появление в водонасыщенных несвязных породах восходящего фильтрационно-го потока, в том числе, при подъеме уровня подземных вод выше кровли растворимых пород, когда перекрывающие их несвязные породы не насыщены водой, как это показано на рис. 2 и 4.

Другой вариант начала процесса разрушения несвязных пород — их обрушение, которое может быть вызвано только расширением полости растворения (рис. 5). Такого развития событий в основном следует ожидать в ходе естественного протекания карстового процесса.

ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОВАЛООБРАЗОВАНИЯ

На основе концептуальной модели карстово-суффозионно-обвального провалообразования была разработана методика прогностической оценки его опасности для существующих или проектируемых сооружений на расчетно-теоретической основе. Ранее предложенные решения [6] не включали определение критической ширины первоначальной полости обрушения дисперсных пород, не предлагали упрощенных вариантов прогностических расчетов для условно однородных толщ и не учитывали параметров сооружения, под фундаментом которого формируется провал. Статья призвана устранить эти пробелы.

Расчет радиуса нижней части области суффозионно-обвального разрушения (рис. 6а)

При естественном протекании карстового процесса верхняя часть заполненной водой полости растворения медленно расширяется на контакте с подошвой водонасыщенных несвязных пород. Когда ее ширина достигнет критической величины, над ней произойдет вывал вышележащих несвязных пород, и в них появится полость обрушения, ограниченная сверху сводом, имею-

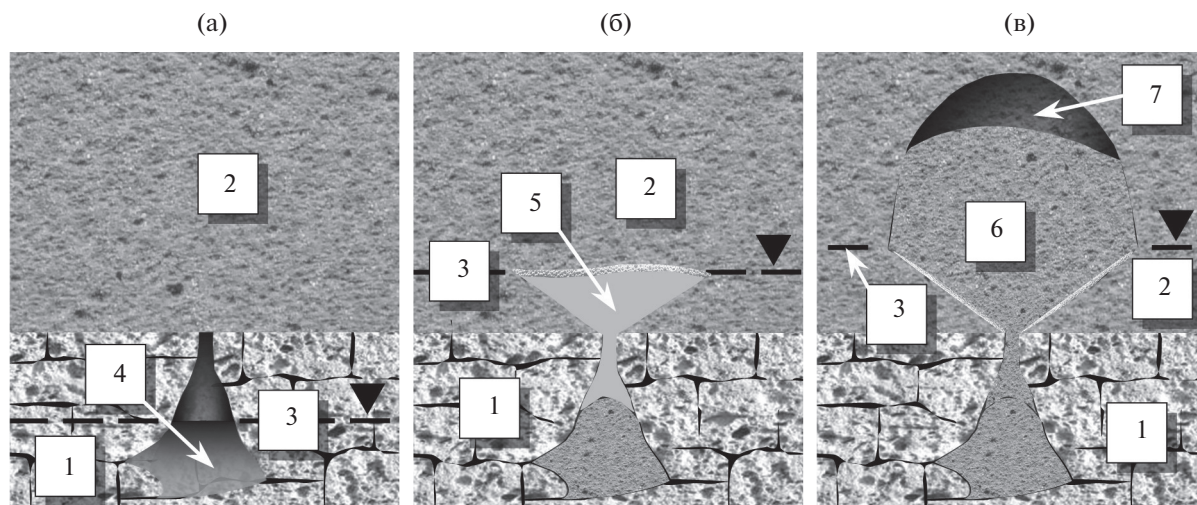


Рис. 4. Первый вариант начальной стадии формирования карстово-суффозионно-обвального провала: (а) подъем уровня подземных вод; (б) разжижение; (в) обрушение. 1 – растворимые породы; 2 – неводонасыщенные несвязные дисперсные породы; 3 – уровень подземных вод; 4 – полость растворения, частично заполненная водой; 5 – полость разжижения, заполненная водой; 6 – неводонасыщенные несвязные породы, испытавшие обрушение; 7 – полость обрушения, незаполненная водой.

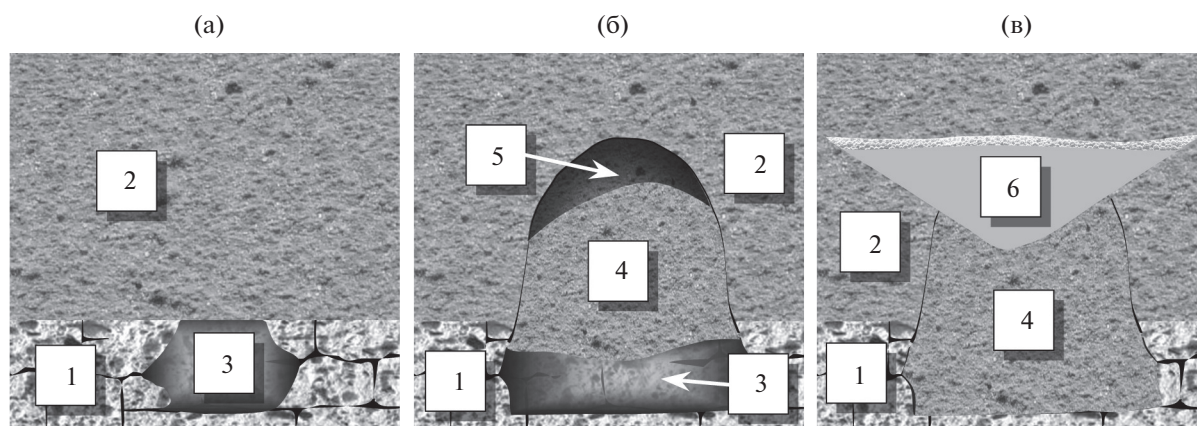


Рис. 5. Второй вариант начальной стадии формирования карстово-суффозионно-обвального провала: (а) расширение полости растворения; (б) обрушение; (в) разжижение. 1 – растворимые породы; 2 – водонасыщенные несвязные дисперсные породы; 3 – полость растворения, заполненная водой; 4 – водонасыщенные несвязные породы, испытавшие обрушение; 5 – полость обрушения, незаполненная водой; 6 – полость разжижения, заполненная водой.

щим форму параболоида вращения (см. рис. 5). Область, внутри которой происходит суффозионно-обвальное разрушение дисперсных пород, будет в этом случае иметь форму, близкую к форме расширяющегося сверху прямого круглого усеченного конуса (см. рис. 3).

Выраженный в метрах радиус нижней части области суффозионно-обвального разрушения водонасыщенных несвязных пород, начинающегося с их обрушения в полость растворения (r_0), может быть рассчитан по формуле:

$$r_0 = 2(\beta f R + 4c)/3\gamma', \quad (1)$$

где f – коэффициент крепости (по М.М. Протодьяконову) водонасыщенных несвязных пород, испытывающих начальное обрушение; R – их сопротивление разрыву, кПа; c – их удельное сцепление, кПа; γ' – удельный вес несвязных пород, взвешенных в воде, принимаемый равным 10 кН/м^3 . Величина f определяется с помощью известной формулы:

$$f = \text{tg} \varphi + c/\sigma_z, \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения водонасыщенных несвязных пород, испытывавших начальное обрушение, град.; σ_z – вертикальное нормальное напряжение в их подошве, кПа.

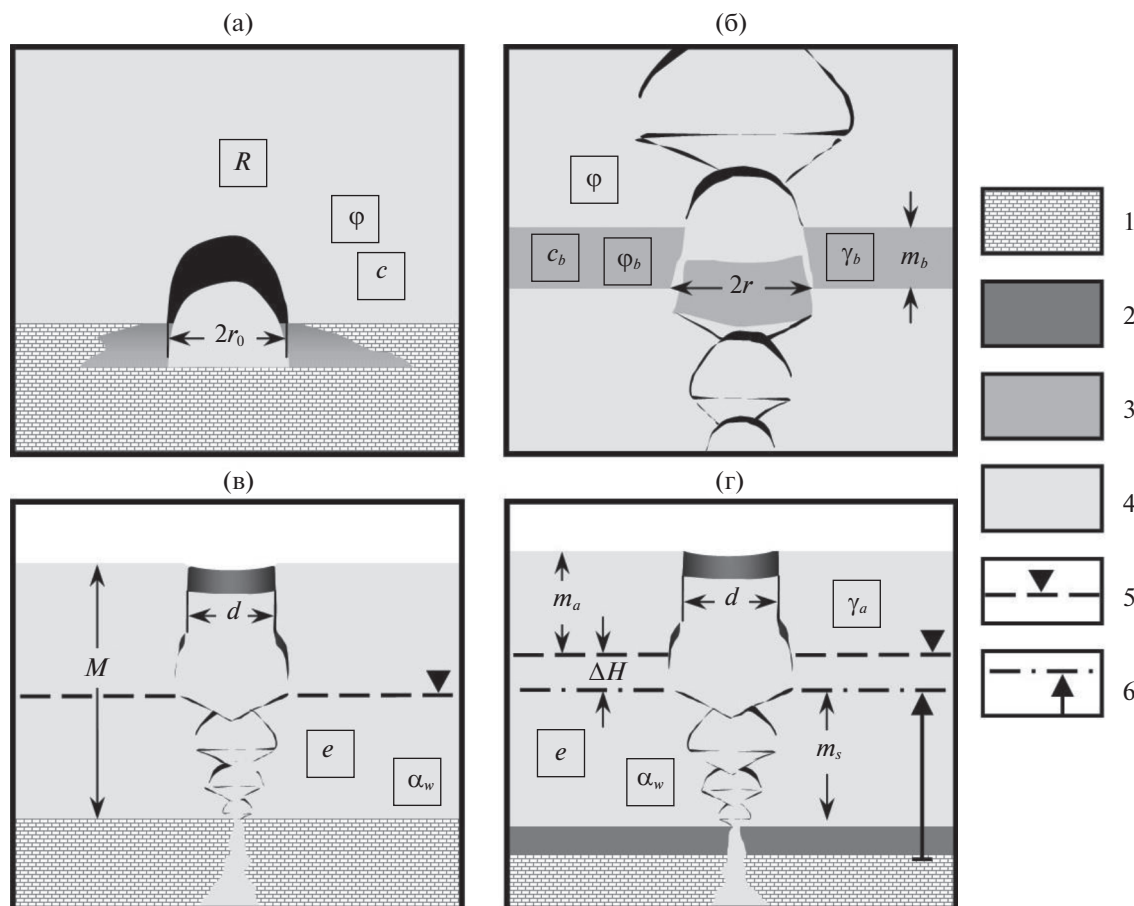


Рис. 6. Схемы к прогностической оценке: (а) радиуса нижней части области суффозионно-обвального разрушения; (б) возможности вовлечения слоя связных пород в суффозионно-обвальный процесс; (в) диаметра провала, формирование которого вызвано подъемом уровня подземных вод выше кровли растворимых пород (упрощенный расчет); (г) диаметра провала и возможности его формирования в условно однородной толще несвязных пород при наличии в них подземных вод (упрощенный расчет). Буквенные обозначения расшифрованы в тексте. 1 – растворимые породы; 2 – водонепроницаемые связные дисперсные породы, перекрывающие растворимые породы; 3 – связные дисперсные породы, подстилаемые и перекрытые несвязными дисперсными породами; 4 – несвязные дисперсные породы; 5 – уровень подземных вод; 6 – пьезометрический уровень воды, присутствующей в растворимых породах.

Оценка возможности вовлечения слоя связных пород в суффозионно-обвальный процесс (рис. 6б)

Ранее отмечалось, что слой связных пород, перекрытый и подстилаемый водонасыщенными несвязными породами, в принципе способен воспрепятствовать развитию суффозионно-обвального процесса. Слой связных пород может сыграть роль такого барьера только при соблюдении условий, выражаемых формулами:

$$r \leq m_b G \times \left[\sqrt{1 + 2(2c_b + \gamma_b m_b \xi_b \operatorname{tg} \varphi_b) \operatorname{tg} \varphi / \gamma'' m_b G^2} - 1 \right], \quad (3)$$

$$G = (\gamma_b \operatorname{tg} \varphi - 2\gamma'' \xi_b \operatorname{tg} \varphi_b) / \gamma'', \quad (4)$$

где r – радиус области суффозионно-обвального разрушения на уровне подошвы слоя связных пород, м; m_b – его мощность, м; c_b – удельное сцепление слагающих его пород, кПа; γ_b – их удель-

ный вес, кН/м³; ξ_b – коэффициент их бокового давления; φ_b – их угол внутреннего трения, град.; φ – угол внутреннего трения водонасыщенных несвязных пород, перекрывающих слой связных пород, град.; γ'' – удельный вес несвязных пород, насыщенных водой, принимаемый равным 20 кН/м³.

Величина ξ_b может быть рассчитана по известной формуле:

$$\xi = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2). \quad (5)$$

Упрощенный расчет диаметра провала, формирование которого вызвано подъемом уровня подземных вод выше кровли растворимых пород (рис. 6в)

В определенных ситуациях растворимые породы с раскрывающимися в их кровле незаколотыми или расширенными

трещинами бывают перекрыты до земной поверхности толщей несвязных пород, которая может считаться условно однородной. Если при этом уровень подземных вод расположен ниже кровли растворимых пород, то его неограниченный подъем может привести к образованию провала (см. рис. 2), размеры которого оцениваются по следующим формулам:

$$d = 0.38NM/(0.19 + N), \quad (6)$$

$$N = \left[1 - 0.56\sqrt[3]{(e+1)/e} \right] / \operatorname{tg} \alpha_w, \quad (7)$$

где d — диаметр провала, формирование которого вызвано подъемом уровня подземных вод выше кровли растворимых пород, перекрытых условно однородными неводонасыщенными несвязными породами m ; M — мощность толщи условно однородных несвязных пород, m ; e — их коэффициент

пористости; α_w — угол их естественного откоса под водой, град.

Упрощенный расчет диаметра провала и оценка возможности его формирования в условно однородной толще несвязных пород при наличии в них подземных вод (рис. 6г)

Если в условно однородной толще несвязных пород присутствуют грунтовые надкарстовые воды, процесс суффозионно-обвального разрушения этих пород может начаться с их разжижения (см. рис. 4). В таких случаях, независимо от того перекрыты ли растворимые породы водоупорным слоем с существующим или внезапно возникающим сквозным нарушением его сплошности (как показано на рис. 6г) или нет (как показано на рис. 3), при образовании провала его диаметр рассчитывается с использованием формул:

$$d = 2N(m_s - z), \quad (8)$$

$$z = (N\gamma''m_s - A\gamma_a m_a) \left[1 + \sqrt{1 + B\gamma_a m_a (2Nm_s - 0.38m_a) / (A\gamma_a m_a - N\gamma''m_s)^2} \right] / B, \quad (9)$$

$$A = 0.38 + N, \quad (10)$$

$$B = 0.38\gamma' + 2N\gamma'', \quad (11)$$

где d — диаметр провала, формирование которого вызвано суффозионно-обвальным разрушением условно однородных несвязных пород, начинающегося с их разжижения, m ; m_s — мощность зоны насыщения условно однородных несвязных пород, m ; γ_a — удельный вес условно однородных несвязных пород, слагающих зону аэрации, кН/м^3 ; m_a — мощность зоны аэрации, m .

Как уже отмечалось, суффозионно-обвальное разрушение несвязных пород в принципе не может распространиться выше пьезометрического уровня воды, присутствующей в растворимых породах. По этой причине в предлагаемой расчетной схеме возможность формирования карстово-суффозионно-обвального провала оценивается следующим выражением:

$$z \geq \Delta H, \quad (12)$$

где ΔH — превышение уровня подземных вод над пьезометрическим уровнем воды в растворимых породах, m .

Универсальная оценка возможности образования карстово-суффозионно-обвального провала и его диаметра

В связи со сложностью соответствующих расчетов целесообразно осуществлять универсальную оценку карстово-суффозионно-обвальной опасности для сооружения с учетом его парамет-

ров графоаналитическим способом, как это показано на рис. 7. Графики, имеющие вид двух ломаных линий построены в системе ортогональных координат, где вертикальная ось совпадает с вертикалью, проведенной через центр ожидаемого провала.

Если графики не пересекаются, карстово-суффозионно-обвальное провалообразование невозможно. В случае же их пересечения, диаметр ожидаемого карстово-суффозионно-обвального провала должен быть равен:

$$d = 2r_x, \quad (13)$$

где d — диаметр карстово-суффозионно-обвального провала, появление которого вызвано любыми причинами m ; r_x — абсцисса точки пересечения графиков.

Сначала удобнее построить график изменения по глубине увеличивающегося снизу верх радиуса области суффозионно-обвального разрушения дисперсных пород (r). Аналитически это изменение выражается формулой:

$$r_n = r_0 + \sum_{i=1}^n N_i \Delta m_{si}, \quad (14)$$

где r_n — радиус горизонтального сечения области суффозионно-обвального разрушения на расчетном уровне $i = n$, m ; n — количество расчетных уровней; i — порядковый номер расчетного уров-

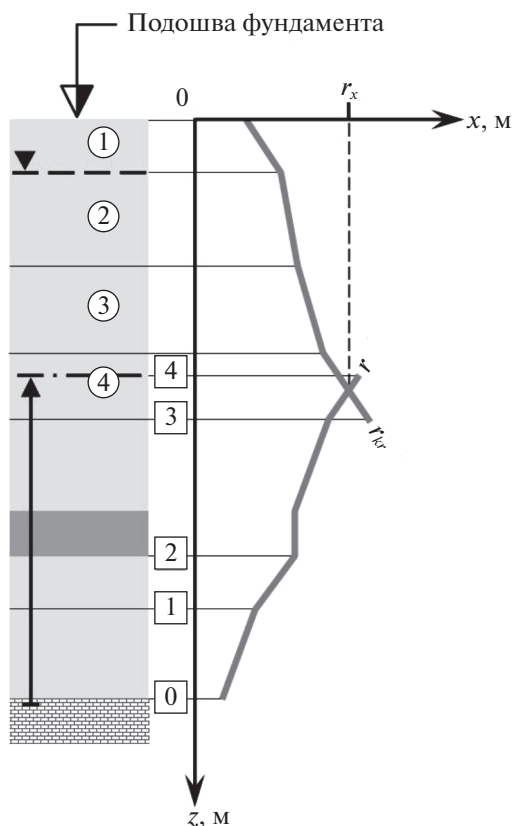


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая принцип универсальной оценки возможности образования карстово-суффозионно-обвального провала с учетом параметров сооружения, для которого он представляет угрозу. Цифрами в квадратах показаны номера расчетных уровней, для которых определяется величина r . Цифрами в кругах показаны номера слоев дисперсных пород, включаемых в расчет величины r_{kr} . Условные обозначения в колонке слева см. на рис. 6. Буквенные обозначения расшифрованы в тексте.

ня, начиная от кровли первого снизу слоя несвязных пород; N — величина, рассчитываемая по (7), где e и α_w представляют собой параметры несвязных пород, испытывающих суффозионно-обвальное разрушение и залегающих между расчетными уровнями с номерами i и $i-1$; Δm_{si} — их мощность.

Если ожидается, что суффозионно-обвальное разрушение несвязных пород начнется с их обрушения (см. рис. 4), величина r_0 рассчитывается по формулам (1) и (2), а если с разжижения (см. рис. 5), то она принимается равной нулю. Верхняя точка графика изменения по глубине радиуса области суффозионно-обвального разрушения не может занимать положение выше пьезометрического уровня воды, присутствующей в растворимых породах.

Затем строится график изменения по глубине увеличивающейся сверху вниз критической величины радиуса области суффозионно-обвального разрушения дисперсных пород (r_{kr}), обеспечивающей образование провала. Аналитическое выражение этого изменения выглядит так:

$$r_{krn} = 2 \left[\sum_{i=1}^n (\sigma'_{yi} + \sigma''_{yi}) m_i \operatorname{tg} \varphi_i + 2 \sum_{i=1}^n m_i c_i \right] / \left(p + \sum_{i=1}^n \gamma_i m_i \right), \quad (15)$$

$$\sigma'_{yi} = \left(p \alpha_{i-1} + \sum_{i=1}^n \gamma_{i-1} m_{i-1} \right) \xi_i, \quad (16)$$

$$\sigma''_{yi} = \left(p \alpha_i + \sum_{i=1}^n \gamma_i m_i \right) \xi_i, \quad (17)$$

где r_{krn} — критическая величина радиуса горизонтального сечения области суффозионно-обвального разрушения, обеспечивающая обрушение дисперсных пород до подошвы фундамента, начиная с подошвы n -го слоя m ; n — количество слоев дисперсных пород, перекрывающих область суффозионно-обвального разрушения до подошвы фундамента; i — порядковый номер слоя, начиная от подошвы фундамента; $(\)_i$ — параметр i -го слоя; σ'_{yi} — горизонтальное нормальное напряжение в кровле слоя, кПа; σ''_{yi} — то же, в его подошве, кПа; m — мощность слоя ($m_0 = 0$), м; φ — угол внутреннего трения слагающих его пород, град.; c — их удельное сцепление, кПа; γ — их удельный вес, кН/м³; p — давление под подошвой фундамента, кПа; $(\)_{i-1}$ — параметр слоя, залегающего над i -м; α — коэффициент, значения которого принимаются по табл. 5.8 СП 22.13330.2011¹ ($\alpha_0 = 1$); ξ — коэффициент бокового давления пород, слагающих слой, который рассчитывается по (5).

ВЫВОДЫ

1. Процесс формирования карстово-суффозионно-обвальных провалов характерен для районов распространения растворимых пород, перекрытых несвязными дисперсными породами, которые могут быть отделены от растворимых пород водоупорным слоем. В мировой практике известны случаи, когда появление таких провалов приводило к заметному материальному, социальному и экологическому ущербу.

¹ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*/ Минстрой России. М.: Стандартинформ, 2017. 176 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>

2. Для образования карстово-суффозионно-обвальных провалов достаточно присутствия в растворимых породах даже не полостей, а расширенных трещин. Причинами этих феноменов часто являются такие техногенные воздействия на геологическую среду, как восстановление уровней подземных вод искусственно сниженных для разных целей (водопонижение, осушение, эксплуатация водоносных горизонтов), так и динамические нагрузки. Карстовые провалы этого генетического типа могут иметь и естественное происхождение.

3. Экспериментальное изучение карстово-суффозионно-обвального провалообразования показало, что этот процесс в достаточной мере детерминирован и имеет в своем развитии определенные ограничения. Это позволяет прогностически оценивать на расчетно-теоретической основе возможность появления таких провалов под фундаментами зданий и сооружений и их ожидаемые диаметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. М.: РУДН, 2017. 328 с.
2. *Парфенов С.И.* Карстово-суффозионные явления на Ходынском поднятии в г. Москве // Новые методы изучения инженерно-геологических условий: матер. научных заседаний секции инженерной геологии МОИП за 1977–1978 гг. М.: Наука, 1981. С. 34–38.
3. *Саваренский А.П.* Влияние взвешивающего гидродинамического давления на образование карстово-суффозионных провалов (на примере р-на г. Дзержинска) // Тез. докладов к совещанию по обобщению опыта научных исследований, изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений в районах распространения карста. Горький. 1965. С. 125–126.
4. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста. М.: ПНИИИС Минстроя России, 1995. 167 с.
5. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.
6. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
7. *Хоменко В.П.* Причины и механизм карстового провалообразования на территории г. Дзержинска Нижегородской области // Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: матер. междунар. симп. (25–30 мая 2004, Пермь, Россия). Пермь: ПГУ, 2004. С. 208–212.
8. *Хоменко В.П.* Феномен “материнских” и “дочерних” карстовых провалов и его опасность для строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 11. С. 10–12.
9. *Хоменко В.П.* Геоморфологический техногенез, связанный с карстово-суффозионным провалообразованием фреатического типа // Геоэкология. 2020. № 2. С. 10–15.
10. *Khomenko V.P., Tolmachev V.V.* Sinkholes // Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. *Bobrowsky P.T., Marker B.* (eds.). Cham, Springer, 2018. P. 836–840.
11. *Nogushi T., Takahashi R., Tokumitsu Y.* Small sinking holes in limestone area with special reference to drainage of coal mines // Land subsidence: Proc. of Tokyo Symposium, September 1969. V. 2. Paris, 1970. P. 467–477.

LIQUEFACTION-COLLAPSE SINKHOLE FORMATION AND ASSESSMENT OF ITS DANGER TO BUILDINGS AND STRUCTURES

V. P. Khomenko^{a, #} and O. K. Krinochkina^{a, ##}

^a National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337 Russia

[#]e-mail: khomenko_geol@mail.ru

^{##}e-mail: vdovinaok@mail.ru

An understudied genetic type of karst sinkhole formation is considered, which is typical for areas where karstic rocks are covered by saturated or unsaturated incoherent soils, moreover saturated ones can have an impermeable bed. It takes place only when an unfilled dissolution cavity or fissure contacts incoherent soil either directly or through a breach in the layer of cohesive impermeable soil overlying karst deposits. In this geological setting, the emergence of single (and sometimes numerous) liquefaction-collapse sinkholes on the Earth surface or under foundations can be caused by the dissolution of karst rocks, the sudden occurrence of a breach in the overlying impermeable layer, a dynamic or shock loading on saturated incoherent soils, and the development of vertical ascending water flow in it. The latter trigger is often manifested as the recovery of previously lowered groundwater level due to pumping of karstic water. In built-up areas, this can lead to destruction of buildings and structures initially by piping-collapse sinkholes and later by liquefaction-collapse sinkholes. The in-laboratory simulation modeling had shown that these sinkholes are the result of discontinuous and cyclic hydraulic-gravitational failures of soil cover. During this process the cavities in incoherent soils appear and disappear and every next appearing cavity is situated above previous disappearing cavity. The process

begins at the contact between incoherent soil and dissolution cavity or communicating with it breach in impermeable layer which consists of cohesive soil and covers soluble rock. The failures of incoherent soil spread up to karst water piezometric level inside the widening from below to top cone-like area. Collapse sink formation can complete it. This process can be stopped only by a sufficiently thick layer of cohesive soil, if it exists in soil cover. The conception of triggers and mechanisms of this process have been formed. The predictive theoretical decisions have been proposed. They allow estimating the possibility of liquefaction-collapse sink-hole formation and the size of final collapse sink, taking into consideration parameters of an endangered engineering structure.

Keywords: karst, piping, liquefaction, collapse sinkhole, prediction

REFERENCES

1. Anikeev, A.V. *Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska* [Collapse and subsidence sinkholes in karst regions: formation mechanisms, prediction, and risk assessment]. Moscow, RUDN Publ., 2017, 328 p. (in Russian)
2. Parfenov, S.I. *Karstovo-suffozionnye yavleniya na Khodynском podnyatii v g. Moskve* [Karst-piping phenomena within Khodynka tectonic uplift in Moscow city]. New methods of research of engineering geological conditions. Proc. of Sci. Meetings of Engineering geological section MOIP during 1977–1978. Moscow, Nauka Publ., 1981, pp. 34–38. (in Russian)
3. Savarenskii, A.P. *Vliyanie vzyeshivayushchego gidrodinamicheskogo davleniya na obrazovanie karstovo-suffozionnykh provalov (na primere r-na g. Dzerzhinska)* [Influence of heave hydrodynamic force on karst-piping sinkholes' formation (as an example of Dzerzhinsk city)]. Abstracts to conference for generalization of experience in scientific research, site investigation, design, construction, and operating of structures in karst-prone areas. Gor'kii, 1965, pp. 125–126. (in Russian)
4. Savarenskii, I.A., Mironov, N.A. *Rukovodstvo po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam v rayonakh razvitiya karsta* [Manual for geological site investigations in karst-prone areas]. Moscow, PNIIS Publ., 1995, 167 p. (in Russian)
5. Khomenko, V.P. *Karstovo-suffozionnye protsessy i ikh prognoz* [Karst piping and its prediction]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 97 p. (in Russian)
6. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffozionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffozion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
7. Khomenko, V.P. *Prichiny i mekhanizm karstovogo provaloobrazovaniya na territorii g. Dzerzhinska Nizhegorodskoi oblasti* [Triggers and mechanisms of collapse sinkholes' formation in Dzerzhinsk city, Nizhny Novgorod province]. *Karstovedenie – XXI vek: teoreticheskoe i prakticheskoe znachenie: Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma (25–30 maya 2004, Perm', Rossiya)* [Karstology – XXI theoretical and practical significance: Proc. of the Int. Symp. (25–30 May, 2004, Perm, Russia)]. Perm, Perm St. Univ., 2004, pp. 208–212. (in Russian)
8. Khomenko, V.P. *Fenomen “materinskikh” i “dochernikh” karstovykh provalov i ego opasnost' dlya stroitel'stva* [Phenomenon of mother-and-daughter sinkholes and its danger for civil engineering]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2010, no. 11, pp. 10–12. (in Russian)
9. Khomenko, V.P. *Geomorfologicheskii tekhnogenez, svyazannyi s karstovo-suffozionnym provaloobrazovaniem freaticeskogo tipa* [Geomorphological technogenesis related to phreatic piping-collapse sinkhole formation]. *Geoekologiya*, 2020, no. 2, pp. 10–15. (in Russian)
10. Khomenko, V.P., Tolmachev, V.V. Sinkholes. In: *Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Bobrowsky, P.T., Marker, B., Eds., Cham, Springer, 2018, pp. 836–840.
11. Nogushi, T., Takahashi, R., Tokumitsu, Y. Small sinking holes in limestone area with special reference to drainage of coal mines. In: *Land subsidence: Proc. of Tokyo Symposium, September 1969, vol. 2, Paris, 1970*, pp. 467–477.