

А.В. АНИКЕЕВ

*Кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (Москва)
Тел.: (495) 6089605, e-mail: anikeev_alex@mail.ru*

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОГО ПРОЦЕССА

Определение «карстово-суффозионный» появляется в научной литературе в конце 1940-х гг. применительно к поверхностным формам покрытого карста. В 1960-е гг. оно широко используется российскими карстоведами для обозначения воронок, образовавшихся на поверхности покровной толщи закарстованных массивов (Огильви, 1948; Кавеев, 1956; Соколов, 1962; Максимович, 1963; Короткевич, 1964; Ступишин, 1967 и др.).

Позже возникает понятие «карстово-суффозионные процессы», под которыми в инженерном карстоведении по сути дела подразумеваются провалы и оседание земной поверхности в районах покрытого карста. При этом собственно карстовый процесс может и не играть существенной роли, а учитываться лишь постольку, поскольку его подземные формы принимают и аккумулируют обломочный материал. Именно такой смысл обычно вкладывается сейчас в это понятие (Кожевникова, 1974; Парфенов, 1981; Толмачев и др., 1986; Хоменко, 1986; Кутепов, Кожевникова, 1989 и др.).

В этой связи неприятие термина «карстово-суффозионные процессы», например, В.Т. Трофимовым (2009) вызывает удивление, тем более что имя прилагательное составлено по всем правилам русского языка: ключевое слово стоит на последнем месте. Тем самым подчеркивается, что в отличие от «суффозионно-карстовых» процессов определяющую роль играет суффозия. Не менее удивительны и словосочетания «карстовые провалы, карстовые деформации, карстовая опасность», когда рассматривается формирование воронок на поверхности мощной (до 50–70 м и более) толщи глинисто-песчаных грунтов, перекрывающих растворимые породы, как например, в Нижегородской области (Толмачев, Ройтер, 1990; ТСН 22-308-98 НН, 1999) или в Республике Татарстан (Рагозин, Елкин, 2003).

Постановка проблемы

Принимая определение «карстово-суффозионный», автор полагает, что речь все-таки должна идти о процессе, а не процессах, хотя формы его реализации в массиве и на дневной поверхности могут быть самыми разными. Но связано это лишь с чрезвычайным разнообразием инженерно-геологических, природных условий и множеством возможных сочетаний основных, первичных, принципиально отличных друг от друга механизмов процесса, которых на самом деле не много. Таким образом, под карстово-суффозионным процессом будем понимать деформирование и разрушение покровной толщи закарстованных массивов (гравитационное и фильтрационное) в результате выноса песчаного и раздробленного глинистого материала в трещинно-карстовые коллекторы, учитывая, что этот комплексный

процесс может развиваться и на фоне увеличения аккумуляционной емкости растворимых пород за счёт их выщелачивания.

Безусловно, количественная оценка опасности собственно карстового процесса необходима. Но анализ растворимости пород и геохимического режима подземных вод представляет собой важную самостоятельную и достаточно сложную задачу. Совместный же анализ химических и механических закономерностей провалообразования – задача сложная вдвойне. Поэтому, рассматривая процесс только с геомеханических позиций нужно быть уверенным, что влияние на него выщелачивания пород пренебрежимо мало. По нашим оценкам, выполненным с использованием данных о скорости карстовой денудации, полученным Ф.П. Саваренским (1950) и В.П. Зверевым (2006), такая ситуация имеет место, например, в Москве и, по-видимому, в других районах глубокого залегания карбонатного карста. Если размеры полости заметно увеличиваются и в рассматриваемый промежуток времени их нельзя считать константой даже в первом приближении, то это обстоятельство должно и может быть учтено в краевых условиях и основных уравнениях, переменными в которых служат размеры.

Представляется, что наличие двух комплексных детерминированных моделей поведения связных и несвязных дисперсных грунтов над полостью, которые характеризуются той или иной степенью водонасыщения, и испытывают то или иное гидродинамическое давление, позволило бы осуществлять локальный прогноз образования провалов в покровной толще любого строения в любых гидрогеологических условиях. Причем общий методологический подход к их созданию должен базироваться на представлениях о динамической перестройке геологической среды при внешних воздействиях. И основополагающим при этом является фундаментальный принцип Ле Шателье, согласно которому любое внешнее воздействие на находящуюся в равновесии систему вызывает развитие в ней процессов, стремящихся ослабить это воздействие. Другими словами, массив горных пород как бы стремится к самосохранению и из множества вариантов своего поведения и изменения структуры выбирает тот, который обеспечивает его наибольшую устойчивость в новых условиях.

Обрушение связных грунтов

Выделяются две формы нарушения сплошности слоя связных грунтов над карстовой или промежуточной полостью – классический механизм образования окна в водоупоре, или первая форма и механизм случайного гидроразрыва слабопроницаемых пород, или вторая форма (Аникеев, 1993). Вторая форма представляет собой типичный пример чисто вынужденного процесса, когда вес грунтов мал по сравнению с фильтрационной нагрузкой и не входит в уравнение предельного равновесия. Его изучению посвящено много работ автора, поэтому здесь рассматривается лишь первая форма разрушения, которая может трактоваться как свободный процесс, так как его главным действующим фактором служит объемный вес пород.

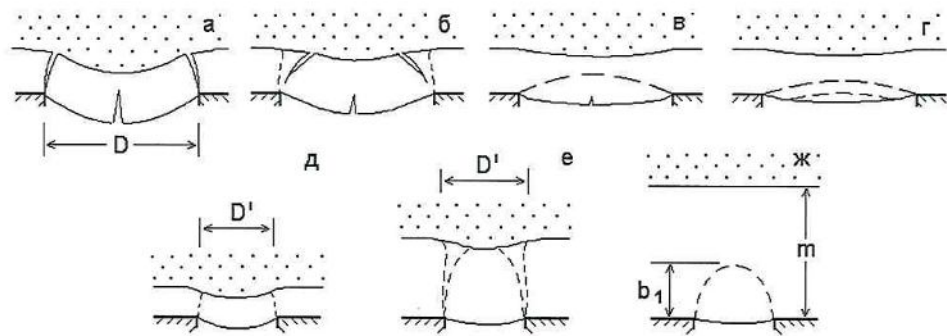


Рис. 1. Характер деформирования-разрушения слоя связных грунтов над полостью (первая форма) в зависимости от их консистенции (а – мягкопластичной, б – пластичной, в – полутвердой, г – твердой) и соотношения мощности слоя и пролета полости m/D (д–ж). Центральная трещина отрыва (а–в), характерна для вытянутых в плане ослабленных участков.

На рис. 1 видно, что классический механизм заключается в изгибе слоя и образовании трещин отрыва. Чем прочнее слой и больше его мощность, тем меньше амплитуда прогиба и положение трещины, начинающиеся на кромках ослабленного участка. Замыкаясь внутри пласта, они и образуют свод обрушения. Отсюда следует, что для количественного описания первой формы разрушения слоя малой мощности пригодны теории оболочек и плит. В частности, при $m/D < 0.25$ нужную на практике точность обеспечивает использование элементарных формул балочек. Но именно с практической точки зрения прогноз формирования сквозных отверстий в таких пластах не представляет большого интереса: а priori понятно, что они не могут служить надежными экранами. А корректная оценка устойчивости достаточно мощных, а также прочных разделяющих пластов независимо от их мощности должна, очевидно, базироваться на гипотезах сводообразования (рис. 1).

Если высота свода b_1 много больше мощности слоя m , то поверхность смещения в глинах может оказаться практически вертикальной (рис. 1, а, б, д), что позволяет использовать в расчетах и хорошо разработанную схему среза грунтов по цилиндрической поверхности. Но при этом необходимо учесть перераспределение напряжений в окрестности карстовой полости.

Сделать это в первом приближении можно, введя в расчет давление от веса свода обрушения ($\sigma_{св}$), который формируется в песках над срезаемым блоком глин (Аникеев, 1993; Хоменко, 2003). Если пески водонасыщенные и имеет место перетекание подземных вод (рис. 2), то уравнение предельного равновесия слабопроницаемого слоя записывается в виде (Аникеев, 1993):

$$R_{кр}(\sigma_{св} + \sigma^*) = m(2\sigma_{св} + \sigma^*)\xi_1 \operatorname{tg}\varphi_1 + 2mC. \quad (1)$$

В уравнении (1) напряжения $\sigma^* = \gamma_1^* m$ от фиктивного веса глин $\gamma_1^* = \gamma_1' + \gamma_w I$ учитывают гидродинамическое давление $\gamma_w I$. Здесь $\gamma_1' = (\gamma_{s1} - \gamma_w)(1 - n_1)$ – это объемный вес взвешенного в воде глинистого грунта, γ_{s1} – объемный вес минеральной части, $\gamma_w \approx 10 \text{ кН/м}^3$ – вес воды, n_1 – пористость грунта, $I = \Delta H/m$ – градиент перетекания, ΔH – разность напоров грунтовых и трещинно-карстовых вод. Коэффициент распора, угол внутреннего трения и сцепление глин в уравнении (1) обозначены как ξ_1, φ_1, C .

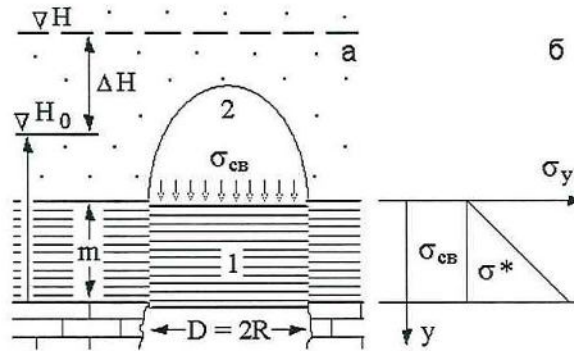


Рис. 2. Схема к расчету устойчивости экранирующего слоя мощностью m на срез (а) и эпюра вертикального давления (б): 1 – смещаемый блок, 2 – свод обрушения, D – диаметр ослабленного участка, H , H_0 – уровни подземных вод, $\sigma_{св}$ – среднее давление от веса песков в пределах свода, σ^* – фиктивные (с учетом гидродинамического воздействия) напряжения от веса глин.

Если средние напряжения от веса песка $\gamma_2' = (\gamma_{s2} - \gamma_w)(1 - n_2)$ в пределах свода ($\sigma_{св}$) находятся по формуле М. М. Протодяконова (1933):

$$\sigma_{св} = \gamma_2' R_{кр} / 2 \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (2)$$

то диаметр окна, которое может образоваться в водоупоре, определяется выражением (Хоменко, 2003):

$$D_{кр} = 2G_1 m [(1 + 2(\gamma_1' m \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1 + 2C) \operatorname{tg} \varphi_2 / \gamma_2' G_1^2 m)^{0.5} - 1], \quad (3)$$

где $G_1 = (\gamma_1' \operatorname{tg} \varphi_2 - 2\gamma_2' \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1) / \gamma_2'$, φ_2 – угол трения песков.

Образование провалов в слое несвязных грунтов

Результаты комплексного изучения суффозии массы позволяют утверждать, что развитию этого процесса противостоят фундаментальные свойства несвязных грунтов – трение и дилатансия, которые определяют поведение несвязных грунтов независимо от степени их влажности, поэтому базовым процессом является гравитационное деформирование сыпучей среды (Аникеев, 2006). Обособляются три формы движения таких тел (Клейн, 1977): начальная, обусловленная разрыхлением; первая, характеризующаяся трубообразным каналом течения; и вторая, когда канал заметно расширяется вблизи отверстия, а цилиндрическим становится на некотором удалении от него. Но действительно серьезное различие гравитационного истечения воздушно-сухих и водонасыщенных песков, установленное в опытах, относится только к кинематике процесса. Оно заключается в том, что весовой расход первых пропорционален диаметру полости в степени 2.5, а вторых – в степени 2 (Аникеев, 2006). Однако и в том и в другом случае кинематика и механизм процесса хорошо объясняются существованием области влияния ослабленного участка растворимых пород, которая характеризуется зональным строением (рис. 3).

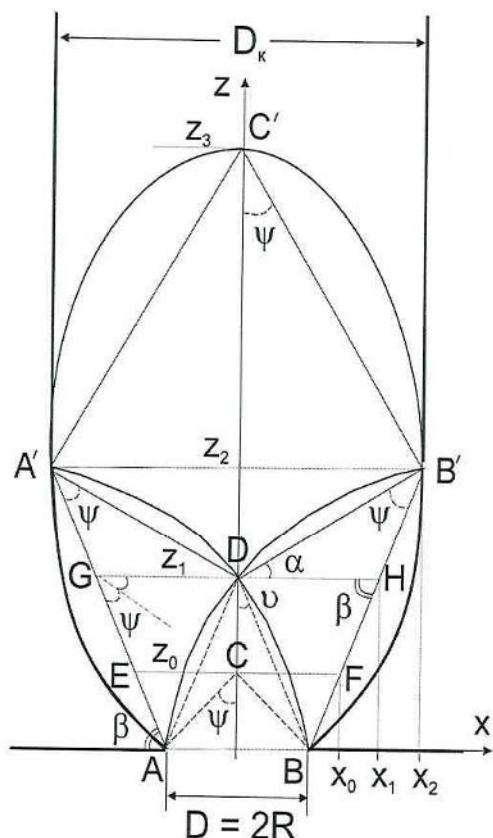


Рис. 3. Зональное строение области влияния полости AB в несвязных грунтах: ACB – зона полных сдвижений, или выпадающий свод (зона свободного падения частиц в режиме быстрого истечения сыпучих тел); ADB – зона разгрузки напряжений, разуплотнения и потенциального обрушения в статике, а в динамике – зона преимущественного столкновения частиц; $AA'DB'BDA$ – зона опорного давления и возможного скольжения (в динамике – зона пластического течения); $AA'DB'B$ – динамический «свод»; $DA'C'B'D$ – зона перехода от аномально низких и высоких напряжений к литостатическим (зона возможного прогиба и разуплотнения в статике) и зона перехода от сходящегося движения к поршневому (в динамике); $AA'C'B'B$ – область влияния ослабленного участка или эллипсоид выпуска в режиме быстрого движения; $\alpha = \pi/4 - \varphi_2/2$, $\beta = \pi/4 + \varphi_2/2$, $\psi = \varphi_2$, $\nu \approx \varphi_2/2$, φ_2 – угол трения; D_k – диаметр канала течения песков.

Размеры отдельных зон и всей области влияния являются функциями пролета карстовой полости и угла внутреннего трения грунтов:

$$D_k = 2x_0 = 2R/\sin\varphi_2, \quad (4)$$

$$z_0 = R/\operatorname{tg}\psi = R/\operatorname{tg}\varphi_2, \quad (5)$$

$$D_k = 2x_1 = R(1 + \sin\varphi)/\sin^2\varphi, \quad (6)$$

$$z_1 = R/\operatorname{tg}\nu = R(1 + 2\sin\varphi_2)/2\operatorname{tg}\varphi_2 \cdot \sin\varphi_2 \approx R/\operatorname{tg}(\varphi_2/2), \quad (7)$$

$$D_k = 2x_2 = R(1 + \sin\varphi_2)^2/2\sin^3\varphi_2, \quad (8)$$

$$z_2 = z_1 + R(1 + \sin\varphi_2)/4\operatorname{tg}\varphi_2 \cdot \sin^2\varphi_2, \quad (9)$$

$$z_3 = z_2 + x_2/\operatorname{tg}\varphi_2, \quad (10)$$

где $\varphi_2 = \varphi'_\mu + \nu$; $\nu_{\min} \leq \nu \leq \nu_{\max}$ – связанный с упаковкой частиц и изменяющийся при деформировании угол дилатансии, φ'_μ – угол контактного, или эффективного трения такого сыпучего материала, для которого $\nu = 0$ (Ревуженко, Стажевский, 1986).

Непостоянство угла трения осложняет интерпретацию процесса, поэтому на практике удобно и вполне допустимо пользоваться значениями φ_{\min} или φ_{\max} в зависимости от свойств и состояния несвязных грунтов. Эти значения легко находятся по величине остаточного сопротивления сдвигу или пиковой прочности и в самом первом приближении отвечают значениям угла откоса грунтов предельно рыхлого и плотного сложения.

Уравнения (4)–(7) определяют размеры области влияния на стадии неустановившегося, а (7)–(10) – установившегося движения. Причем $D_k = 2x_0$ является максимально возможной шириной канала, при первой форме движения песков ($D \leq D_k \leq 2x_0$), а $D_k = 2x_1$ и $D_k = 2x_2$ – его минимальным и максимальным диаметрами, если реализуется вторая форма ($2x_1 \leq D_k \leq 2x_2$).

Уравнения (4), (6), (8) позволяют решить и обратную задачу вычисления пролета отверстия D в основании песчаной толщи по известным значениям диаметра свежих воронок ($D_v \approx D_k$). Эта задача интересна также с точки зрения постановки геофизических исследований и выявления мест потенциального провалообразования.

Некоторые особенности динамической перестройки несвязных грунтов

Эксперименты показывают, что поведение песчаной толщи в окрестности ослабленного участка, в том числе и над срезаемым блоком глин (рис. 2), сильно зависит от мощности толщи (h) и ширины участка ($D = 2R$). Если $h/R < 1/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2 \approx 2.6$, где $\xi_2 = \text{tg}^2(\pi/4 - \varphi_2/2)$ – коэффициент распора песков, то в полость смещается грунтовый цилиндр, вес которого уменьшен трением по его боковой поверхности (рис. 4). Если $1/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2 \leq h/R \leq \text{ctg}(\varphi_2/2)$, то опускается свод, стрела подъема которого равна $b_1 = R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2$. При $h/R > \text{ctg}(\varphi_2/2)$ формируется коническая или параболическая зона обрушения высотой $b_1 = R/\text{tg}\varphi_2$, и вертикальное давление грунтов над полостью стабилизируется, но на ее краях резко возрастает. Эти особенности структурной организации массива и бифуркация процесса, обусловленные взаимодействием всех зон области влияния и особенно зон обрушения, разгрузки и опорного давления (рис. 3), записаны в виде:

$$\sigma_z = \gamma_2 h / (1 - h\xi_2 \text{tg}\varphi_2 / R), \quad h < R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2; \quad (11)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 R / 4\xi_2 \text{tg}\varphi_2, \quad R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2 \leq h \leq R/\text{tg}(\varphi_2/2) \approx z_1; \quad (12)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 R / 3 \text{tg}\varphi_2 \div \gamma_2 R / 2 \text{tg}\varphi_2, \quad h > R/\text{tg}(\varphi_2/2) \approx z_1. \quad (13)$$

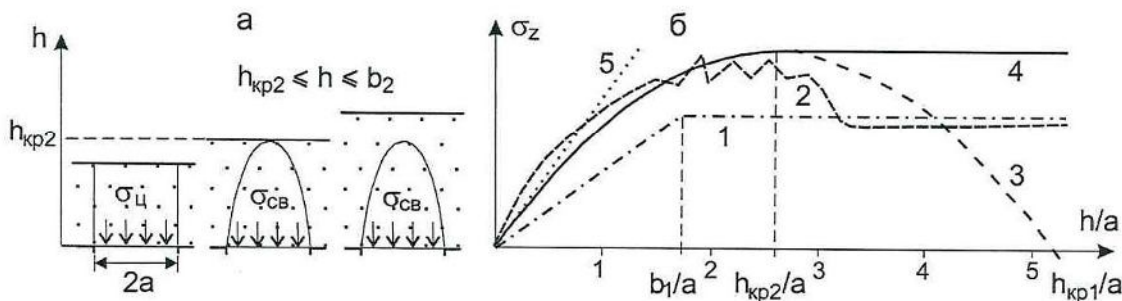


Рис. 4. Смещение грунтового цилиндра и формирование свода обрушения при малой мощности слоя песков (а) и изменение вертикального давления в подошве слоя в зависимости от его мощности (б): 1, 2 – по М.М. Протождяконову, 1933 (1 – расчетная, 2 – экспериментальная кривые); 3 – по А. Бирбаумеру, 1913 (Терцаги, 1933; Шахунянц, 1953); 4 – кривая для случая, показанного на рис. а; 5 – литостатическое давление; b_1 , b_2 – высота зон обрушения пород и разгрузки напряжений (z_0 , z_1 на рис. 3); $a = R$ – полупролет или радиус ослабленного участка; $h_{kp1} = R/\xi_2 \text{tg}\varphi_2$, $h_{kp2} = R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2$ – критические значения мощности.

Для песчаной толщи мощностью $h < R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2$, которая находится в состоянии предельного равновесия, равенство (11) принимает вид $\sigma_z = \gamma_2 h / (1 - h\xi_2 \text{tg}\varphi_2 / R) = (F - N) / \pi R^2 = 0$. Отсюда, сдвигающая и удерживающая силы равны ($F = N$), и для прогноза диаметра свежих провалов вполне пригодна классическая схема среза грунтов по кругу цилиндрической поверхности – модель Бирбаумера (рис. 4). В слоях мощностью $h \geq R/2\xi_2 \text{tg}\varphi_2$ реализуется

механизм сводообразования, поэтому $\sigma_z \neq 0$, и при подстановке в уравнение (1) давления песков (12) или (13), мы получаем квадратное уравнение. Его решение при $h > R \cdot \text{ctg}(\varphi_2/2)$, когда $\sigma_{\text{св}} = \sigma_z = \gamma R/2 \text{tg}\varphi_2$, и записано в виде (3).

Разработанная модель поведения несвязных грунтов в окрестности ослабленного участка массива растворимых пород позволяет оценить и концентрацию вертикальных напряжений на кромках полости, которая нередко инициирует провалообразование. Для плоской задачи и случая $h/a \gg \text{ctg}(\varphi_2/2)$ коэффициент концентрации имеет вид:

$$K_z = 1 + 2 \text{tg}(\varphi_2/2) \sin(\varphi_2/2) / \varphi_2. \quad (14)$$

Безразмерные напряжения K_z , посчитанные по формуле (14), хорошо отражают известную тенденцию роста опорного давления с увеличением прочности пород и глубины залегания ослабленного участка. Они не противоречат экспериментальным данным, а также результатам так называемых точных расчетов по формулам теории упругости.

Прогноз карстово-суффозионной опасности и риска

Все вышесказанное может быть проиллюстрировано на примере участка проектируемого строительства высотного жилого комплекса в Москве. Первый этап оценки опасности и риска – анализ инженерно-геологических условий – выполнялся на основе серии специальных карт, построенных в масштабе 1:2000. На втором этапе проведено типологическое районирование территории и выделен потенциально опасный участок. Третий этап – это схематизация массива пород в выбранном таксоне и формулировка рабочей гипотезы (рис. 5).

Видно, что согласно первому сценарию нижний слой смещается по цилиндрической поверхности (рис. 5, б), а согласно второму – формируется параболический свод обрушения высотой $b_1 = m$ (рис. 5, в). При этом блоки, консольно-зависающие над сводообразным вывалом 3, неустойчивы и смещаются сразу вслед за ним, поэтому верхний и нижний пролеты сквозного отверстия в водоупоре примерно одинаковы (см. также рис. 1, е). В обоих случаях вследствие медленного развития процесса и высокой плотности верхнего слоя реализуется первая форма движения песков, и диаметр свежей воронки (D_1) практически равен диаметру полости (D). К определению последнего и сводится решение задачи четвертого этапа.

Используя модель среза, полагаем сначала, что мощность верхнего слоя заведомо велика, то есть, считаем, что выполняется условие (13) и, следовательно, справедливо решение (3). Если окажется, что это не так, то переходим к условию (12), а если же и оно не отражает действительности, то – к условию (11). Причем для предпоследнего (12) и последнего (11) случаев, подставляя в уравнение предельного равновесия (1) соответственно $\sigma_{\text{св}} = \sigma_z = \gamma_2' R/4 \xi_2 \text{tg}\varphi_2$ и $\sigma_{\text{св}} = \sigma_z = \gamma h / (1 - 2h \xi_2 \text{tg}\varphi_2 / D)$, получим:

$$D_1 \approx D = 2G_2 m [(1 + 2(\gamma_1 * m \xi_1 \text{tg}\varphi_1 + 2C) 2 \xi_2 \text{tg}\varphi_2 / \gamma_2' G_2^2 m)^{0.5} - 1], \quad (15)$$

где $G_2 = (\gamma_1 * 2 \xi_2 \text{tg}\varphi_2 - \gamma_2' \text{tg}\varphi_1 \xi_1) / \gamma_2' < G_1$ в решении (3);

$$D_1 \approx D = 2(\gamma_2' h^2 \xi_2 \text{tg}\varphi_2 + \gamma_1 * m^2 \xi_1 \text{tg}\varphi_1 + 2mC) / (\gamma_2' h + \gamma_1 * m). \quad (16)$$

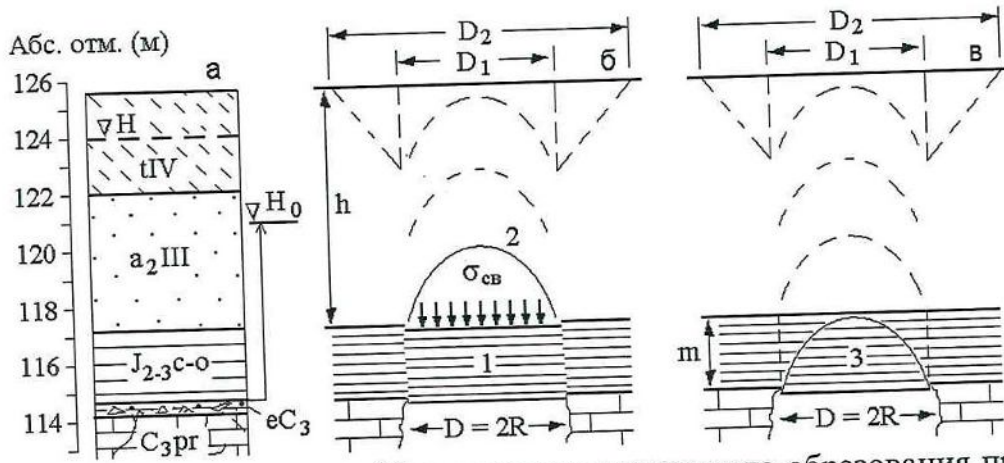


Рис. 5. Строение массива пород (а) и сценарии возможного образования провалов (б, в): eC_3 – элювий карбонатных пород, tIV – насыпные грунты; a_2III – верхнечетвертичные аллювиальные пески второй надпойменной террасы; $J_{2-3}c-o$ – известняки перхуровской толщи верхнего карбона; C_{3rg} – глины келловейского и оксфордского ярусов верхней и средней юры; 3 – свод обрушения в глинах. Тонкими пунктирными линиями показано последовательное развитие поверхностей смещения. Остальные обозначения – на рис. 2.

Таблица 1. Результаты определения $D_1 = D$, полученные на основе модели среза методом последовательных приближений (расчетные характеристики грунтов и силового воздействия подземные вод приведены в табл. 2)

Значения мощности глинистого (m) и песчаного (h) слоев и номер расчетной зависимости (№)			Диаметр полости D и провала $D_1 = D$ (м)		Критические значения мощности песков (м)	
m (м)	h (м)	№	D	Средний D_{cp}	$h_{кр2} = D/4(\xi tg\varphi)_2$	$h_{кр3} = b_2 = z_1 = D/2tg(\varphi_2/2)$
2	9.5	(15)	6.3	6.8	8.2	11.0
3	8.5	(16)	7.4		9.6	12.9

Для первого сценария процесса окончательные результаты вычислений показаны в табл. 1. Видно, что при $m = 2$ м верно решение (15), а при $m = 3$ м – (16). Решение (3) не имеет места, так как независимо от мощности глин мощность песков оказывается меньше высоты зоны разгрузки напряжений.

Для определения размера воронок по второму сценарию (рис. 5, в) использовалась модель Протодяконова: $D = 2b_1 \cdot tg\varphi$, в которой $b_1 = m$, а коэффициент трения $tg\varphi$ заменен на коэффициент крепости глинистых пород $(tg\varphi_1 + C/\sigma_z)$, представляющий собой отношение их сдвиговой прочности τ к величине сжимающих напряжений σ_z на уровне кровли полости:

$$D_1 \approx D = 2m \cdot (tg\varphi_1 + C/\sigma_z), \quad (17)$$

Здесь, учитывая малую мощность зоны аэрации, равную $h + m - H$ (рис. 3), мы пренебрегаем для простоты увеличением веса песка в ней на величину $\Delta\gamma_2 = \gamma_2 - \gamma_2'$ (γ_2 – вес влажного песка) и полагаем, что $\sigma_z \approx \gamma_2' h + \gamma_1^* m$.

Таблица 2. Результаты определения диаметра провалов, полученные с учетом силового воздействия подземных вод на основании модели (17)

Расчетные характеристики грунтов нижнего (индекс «1») и верхнего («2») слоев мощностью m и h соответственно										Диаметр полости D и провала $D_1 = D$ (м)	
m , м	h , м	ΔH , м	γ_{s1} , кН/м ³	n_1	φ_1 , град	C , кПа	γ_{s2} , кН/м ³	n_2	φ_2 , град	D , м	D_{cp} , м
2	9.5	3	27.4	0.56	17	58	26.5	0.38	32	2.9	3.6
3	8.5	3	27.4	0.56	17	58	26.5	0.38	32	4.3	

Полученные результаты свидетельствуют о том (табл. 2), что как и в первом случае (см. табл. 1) главным фактором устойчивости при прочих равных условиях является мощность разделяющего слоя. Видно также, что модель сводообразования предсказывает значения диаметра почти в 2 раза меньшие, чем модель среза. Добавим, что с учетом роста напряжений на кромках карстовой полости диаметр провалов уменьшается еще на 9–14 %.

На заключительной, пятой стадии работ определялся физический и экономический ущерб в соответствии с методикой оценки геологического риска на территории г. Москвы (Рекомендации, 2002). При этом серьезных трудностей геологического плана не возникает, а вопросы, связанные с определением интенсивности процесса, удалось решить на основе результатов последнего картирования территории города (Осипов, 2011).

Список литературы

- Аникеев А.В. О двух формах разрушения связных грунтов над полостью // Геоэкология. 1993. № 2. С. 124–132.
- Аникеев А.В. Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. 2006. № 6. С. 544–553.
- Зверев В.П. Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2006. 256 с.
- Клейн Р.Г. Строительная механика сыпучих тел. М.: Стройиздат, 1977. 249 с.
- Кавеев М. С. Карстово-суффозионные явления в левобережной части долины Волги в пределах Татарской АССР // Известия ВГО. 1956. Т. 88, N 5. С. 61–66.
- Кожевникова В.Н. О роли динамики и режима подземных вод в формировании карстово-суффозионных процессов (на примере некоторых районов г. Москвы) // Инженерные изыскания при строительстве. Вып. 5(33). Сер. 2. М.: Стройиздат, 1974. С. 22–27.
- Короткевич Г. В. О карстово-суффозионных формах и мерах предупреждения их развития при строительстве // Грунтоведение и инженерная геология. Л.: ЛГУ, 1964. С. 155–160.
- Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
- Максимович Г. А. Основы карстологии. Т.1. Вопросы морфологии, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Перм. книжное изд-во, 1963. 444 с.
- Огильви Н. А. Карст, его значение для эксплуатации угольных месторождений в Подмосковном бассейне и пути его изучения // Карстология. Вып. 1 / Тр. Молотовской карст. конф. (26 янв. – 1 февр. 1947 в г. Молотов). Молотов: Изд-во Мол. государственного ун-та, 1948. С. 37–43.

Осипов В.И. Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геозкология. 2011. № 3. С.195–197.

Парфенов С.И. Карстово-суффозионные явления на Ходыньском поднятии в г. Москве // Новые методы изучения инженерно-геологических условий. М.: Наука, 1981. С. 34–38.

Соколов Д. С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.

Рагозин А.Л., Елкин В.А. Региональная оценка карстовой опасности и риска // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2003. № 4. С. 33–52.

Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б. Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // ФТПРПИ. 1986. № 4. С. 13–16.

Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Под ред. д.г.м.-н. А. Л. Рагозина / Москомархитектура, ГУ ГО ЧС г. Москвы. М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 59 с.

Саваренский Ф.П. Избранные сочинения. Отв. ред. Н.Н. Славянов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 412 с.

Ступишин А.В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского университета, 1967. 291 с.

Терцаги К. Строительная механика грунтов на основе его физических свойств. Пер. с нем. под ред. Н.М. Герсеванова. М.-Л.: Госстройиздат, 1933. 392 с.

Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М., 1986. 176 с.

Толмачев В. В., Ройтер Ф. Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. 152 с.

Трофимов В.Т. О необходимости совершенствования и аккуратного развития понятийно-терминологической базы инженерно-геологического изучения современных геологических процессов и явлений // Тр. Межд. науч. конф. (Москва, геол. ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова. 29–30 января 2009 г.). Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: Изд. МГУ, 2009. С. 7–9.

ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород, 1999. 72 с.

Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.

Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

Шахунянц Г.М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.