

ОЦЕНКА КАРСТОВО-СУФФОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НОВЫХ ЛИНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА В МОСКВЕ

Аникеев А.В., Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г.

(Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва)

Аннотация: На примере участка в центре Москвы изложены основные принципы оценки опасности развития процессов, связанных с карстом, для строящихся линий метрополитена. Приведены результаты районирования территории по механизмам возможного развития карстово-суффозионного процесса. Даны расчетные модели для определения диаметра провалов.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия, карстово-суффозионная опасность, объекты метро, провалы, районирование.

Введение. В настоящее время в Москве активно ведется проектирование и строительство новых линий метрополитена. Инженерно-геологические изыскания по их трассам требуют научного сопровождения, одной из основных задач которого является оценка карстово-суффозионной опасности, под которой понимается опасность образования воронок в покровной толще закарстованных массивов и на дневной поверхности. Важность этой задачи обусловлена тем, что Москва находится на территории покрытого карбонатного карста, 16 % площади которой занимают потенциально опасные в карстово-суффозионном отношении районы. Причем мощность, состояние, свойства нерастворимых грунтов и подстилающих их растворимых пород в этих районах изменяются в широких пределах.

Разработанная процедура оценки карстово-суффозионной опасности рассматривается на примере участка Калининско-Солнцевской линии "Третьяковская" – "Волхонка" – "Деловой центр" протяженностью около 5.7 км. Начало строительства (станция "Третьяковская") находится на правом берегу Водоотводного канала. Линия метро пересекает канал и трижды пересекает р. Москву. Конец строительства запроектирован в районе ММДЦ Москва-Сити.

На «Карте опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов» масштаба 1 : 10 000, входящей в комплект крупномасштабных геологических карт г. Москвы, участок относится к потенциально опасной категории по опасности современных карстово - суффозионных процессов и к опасной категории по опасности древних карстовых форм. То есть в пределах этой территории при определенных условиях возможны деформации земной поверхности, связанные с карстом.

Инженерно-геологические условия

Территория строительства захватывает пойму, вторую (мневниковскую) и третью (ходынскую) надпойменные террасы р. Москвы. Абсолютные отметки земной поверхности изменяются от 123.6 м на пойме до 142.5 м на третьей надпойменной террасе. Это исторический центр города, где естественная поверхность практически полностью изменена строительной планировкой. Южнее Храма Христа Спасителя проектируемая трасса идет по долине заключенного в подземный коллектор ручья Черторый. Вдоль трассы встречаются и другие в настоящее время засыпанные более мелкие водотоки. Мощность насыпи здесь достигает 6–7 м.

Геологическое строение территории строительства обусловлено её расположением в долине современной р. Москвы и в центральной части древней доледниковой долины (рис.1). Здесь дочетвертичные отложения подверглись интенсивному размыву, и в четвертичное время произошло накопление песчаной толщи водноледниковых и аллюви-

альных отложений. Её мощность на большей части трассы составляет 20–30 м. Пески преимущественно подстилаются верхнекаменноугольными терригенно-карбонатными породами, среди которых вдоль трассы преобладают трещиноватые и закарстованные известняки. К четвертичным пескам и верхнекаменноугольным известнякам приурочены горизонты подземных вод, имеющие напорно-безнапорный характер. Вблизи русла р. Москвы территория подтоплена.

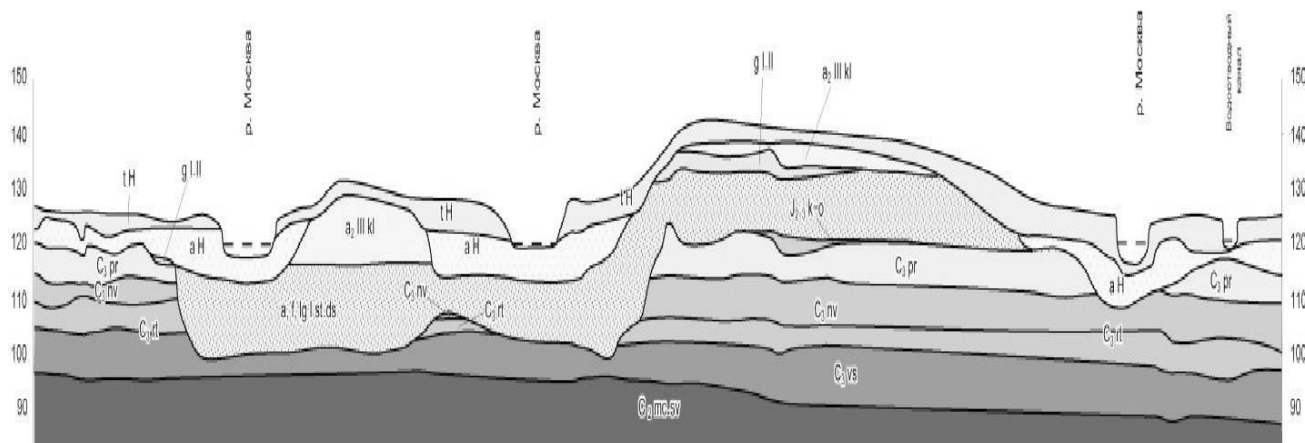


Рис. 1. Геологический разрез участка Калининско-Солнцевской линии метрополитена от станции «Третьяковская» до станции «Деловой Центр».

Четвертичные отложения: tH – современные техногенные образования, aH – современный аллювий поймы, a₂IIIkl – верхнечетвертичные аллювиальные отложения II надпойменной террасы р. Москвы, gI-II – морена донского и московского горизонта, a, f, lgIst-ds – нижнечетвертичные водноледниковые отложения. Юрские отложения: J₂₋₃k-o – средне-верхнеюрские отложения келловейского и оксфордского ярусов. Верхнекаменноугольные отложения: C₃pr – перхуровская толща, C₃nv – неверовская толща, C₃rt – ратмировская толща, C₃vs – воскресенская толща. Средне- и верхнекаменноугольные отложения: C₂₋₃ms-sv – мячковский горизонт и суворовская толща кривякинского горизонта.

Районирование территории по особенностям образования воронок

По степени карстово-суффозионной опасности вся территория отнесена к потенциально опасной категории, поскольку карбонатные отложения каменноугольной системы перекрыты либо песчано-глинистыми четвертичными отложениями, либо юрскими и каменноугольными глинистыми слабопроницаемыми породами мощностью менее 10 м. Составлена карта районирования территории строительства по особенностям развития карстово-суффозионного процесса. Легенда к карте приведена в таблице 1. Выделено 5 районов, геологическое строение которых обусловило выбор расчетных моделей и расчетных параметров для определения диаметра карстово-суффозионных провалов.

Район 1. Глинистые дочетвертичные породы отсутствуют. На карбонатных отложениях залегают песчано-глинистые отложения четвертичной системы.

К этому району отнесена большая часть территории. Она приурочена к местам выхода на дочетвертичную поверхность перхуровских, реже – измайловских, ратмировских или мячковско-суворовских известняков. Породы сильно разрушены и закарстованы, в верхних горизонтах представлены щебнем и дресвой, иногда – мукой.

Район 2. На известняках залегают глины каменноугольного возраста, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями. Мощность каменноугольных глин не превышает 3 м.

Район 3. На известняках залегают глины каменноугольного возраста, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями. Мощность каменноугольных глин составляет 3-10 м.

Район 4. На известняках каменноугольного возраста залегают юрские глинистые отложения мощностью до 3 м, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями.

Район 5. На известняках каменноугольного возраста залегают юрские глинистые отложения мощностью 3-10 м, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями.

Таблица 1

Легенда к карте районирования по особенностям развития карстово-суффозионного процесса

Строение терригенной толщи, перекрывающей закарстованный массив	Мощность слабо-проницаемого глинистого слоя	Станции метро и средний диаметр возможных провалов на участке их расположения
На известняках залегают четвертичные песчано-глинистые отложения	0 м	«Деловой центр»: $D_{cp} = 3.2$ м, «Волхонка»: $D_{cp} = 2.4$ м
На известняках залегают каменноугольные глины, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями	0–3 м	–
	3–10 м	«Кутузовский проспект»: $D_{cp} = 4.0$ м
На известняках залегают юрские глины, перекрытые четвертичными песчано-глинистыми отложениями	0–3 м	«Плющиха»: $D_{cp} = 4.9$ м, «Волхонка»: $D_{cp} = 4.2$ м
	3–10 м	–

Определение диаметра провалов

На рассматриваемом отрезке трассы проектируемая линия метрополитена целиком проходит в скальных и полускальных грунтах верхнего и среднего карбона. Поэтому карстово-суффозионной опасности, под которой в настоящее время обычно понимается угроза образования провалов покровной толщи закарстованных массивов, подвержены приповерхностные сооружения – вестибюли станций, переходы между ними, эскалаторные, вентиляционные шахты и другие. Применительно к тоннельным сооружениям речь может идти лишь о карстово-обвальной опасности, вызванной обрушением растворимых и нерастворимых пород в основании тоннеля. Но эта опасность здесь практически исключается, так как крупные открытые карстовые полости, способные инициировать обрушение, в ходе изысканий не обнаружены. На их отсутствие указывает и анализ фондовых материалов. Судя по описанию колонок буровых скважин, вдоль этого отрезка трассы не зарегистрированы даже небольшие по глубине (0.1–0.2 м) провалы бурового снаряда.

На основе анализа инженерно-геологических условий и факторов образования карстово-суффозионных провалов выполнены расчеты устойчивости массива на участках четырех станций проектируемого отрезка Калининско-Солнцевской линии – «Волхонка», «Плющиха», «Кутузовский проспект» и «Деловой Центр». Именно для них дан прогноз размеров карстово-суффозионных воронок, формирование которых возможно в покровной толще закарстованных массивов и на земной поверхности.

Станция «Волхонка»

Результаты схематизации массива пород на этом участке представлены на рисунке 2. Рабочая гипотеза, тесно связанная с результатами схематизации, заключается в сле-

дующем. На большей площади участка имеет место свободная суффозия массы, то есть истечение водонасыщенных песков в трещинно-карстовые коллекторы в гидростатических условиях под действием собственного веса (рис. 2, а). При этом реализуется вторая форма движения несвязных грунтов, и канал истечения сильно расширяется в нижней части. Выше УГВ в результате последовательного образования сводов обрушения возникает трубообразный канал, характеризующий первую форму течения песков. Точно такой же канал формируется и там, где в разрезе изредка присутствует разделяющий глинистый пласт, а отметки УГВ практически совпадают с отметками кровли этого пласта. Отличие лишь в том, что здесь для формирования канала требуется разрушение экранирующего слоя (рис. 4, б).

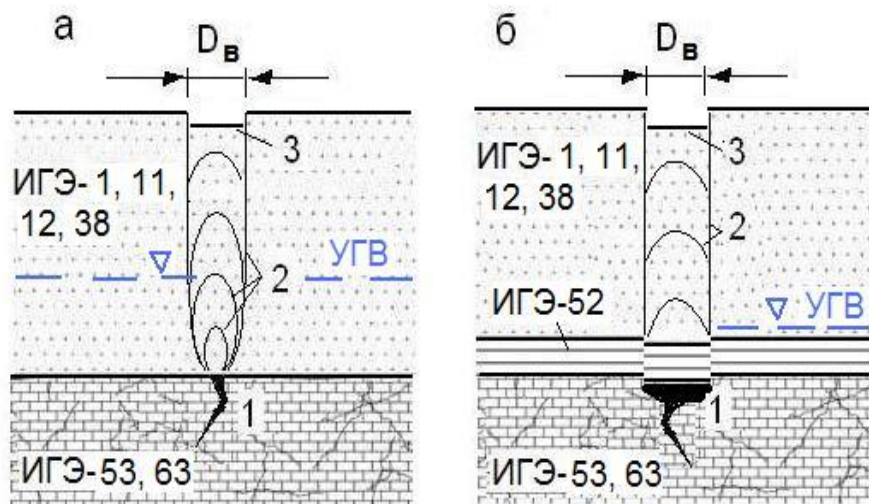


Рис. 2. Механизм развития карстово-суффозионного процесса, рабочая гипотеза и схемы образования воронок на участке станции «Волхонка» для случаев однослойной (а) и двухслойной (б) покровной толщи: 1 – ослабленный участок закарстованных пород; 2 – канал течения и обрушения песков (а) или обрушения глин и песков (б) на разных стадиях развития процесса; 3 – свежий провал земной поверхности; 4 – первичный свод обрушения в песках, под действием веса которого происходит смещение глин. ИГЭ – инженерно-геологические элементы, выделенные в ходе изысканий.

Размер провалов в основании приповерхностных сооружений метрополитена и на земной поверхности для случая, показанного на рисунке 2а, рассчитывался с помощью модели свободной суффозии массы [1, 6]. Рассматривался наихудший сценарий развития процесса, и в качестве расчетного принимался максимальный диаметр канала в соответствии с выражением [1]:

$$D_{\text{в}} = D_{\text{к}} = D(1 + \sin \varphi)^2 / 4 \sin^3 \varphi, \quad (1)$$

где D – диаметр или пролет ослабленного участка, φ – угол внутреннего трения песков.

Результаты расчетов показаны в таблице 2, из которой следует, что по значениям $(D_{\text{в}})_{\text{ср}}$ и $(D_{\text{в}})_{\text{макс}}$ большая часть площадки относится к категории Г [3, 4]. При этом необходимо отметить, что в соответствии с консервативным подходом к оценке устойчивости использовались наименьшие значения φ , полученные при изысканиях с доверительной вероятностью 0.95. Учитывалось также, что в нижней части покровной толщи, где возможно расширение канала, залегают пески лишь трех элементов: ИГЭ-11, 12, 38. Кроме того, открытые полости на участке не обнаружены, поэтому в качестве расчетного значения ширины ослабленного участка D на основании того же консервативного подхода принималось среднее значение глубины провалов бурового снаряда в карбонатных породах на территории Москвы.

Для случая, показанного на рисунке 2б, определение диаметра канала, а значит, и воронки сводится к определению ширины зоны обрушения глин (ИГЭ-52). При этом в рассматриваемых условиях целесообразно использовать модифицированную модель среза экранирующего пласта по кругу цилиндрической поверхности [1, 6]. Согласно этой модели диаметр сквозного отверстия в слабопроницаемых водонасыщенных грунтах, испытывающих перетекание подземных вод, равен:

$$D_{в} = D_{к} = D = 2Gm[(1 + 2(\gamma_1^*m \cdot \text{tg}\varphi_1 \xi_1 + C)\text{tg}\varphi_2/\gamma_2'G^2m)^{0.5} - 1], \quad (2)$$

где $G = (\gamma_1^* \text{tg}\varphi_2 - \gamma_2' \text{tg}\varphi_1 \xi_1)/\gamma_2'$. Нижними индексами «1» и «2» здесь обозначены показатели свойств нижнего и верхнего слоев модели: γ – объемный вес, $\text{tg}\varphi$, ξ – коэффициенты трения и бокового распора. Нижний глинистый слой характеризуется также мощностью m и сцеплением C . Гидродинамическое воздействие на него учитывалось в виде объемных сил, которые увеличивают или уменьшают фиктивный вес глин: $\gamma_1^* = \gamma_1' \pm \gamma_w I$, где γ_1' – объемный вес взвешенного в воде грунта, $I = \pm \Delta H/m$ – градиент перетекания, $\gamma_w \approx 10 \text{ кН/м}^3$ – вес воды. Вес полностью водонасыщенного грунта (связного или несвязного) рассчитывался по формуле $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w)/(1 + e)$, где γ_s – вес минеральной части, e – коэффициент пористости. Выше УГВ в уравнение (2) вводится объемный вес влажных грунтов γ .

Таблица 2

Результаты определения диаметра карстово-суффозионных воронок $D_{в}$ на участке станции «Волхонка» с использованием расчетной модели суффозии массы (1)

№ ИГЭ	Ширина ослабленного участка (D)	Угол трения песков (φ)	Диаметр ($D_{в}$)	Среднее значение ($D_{в}$) _{ср}
	м	град.	м	
11, 12	0.5	28	2.6	2.4
38		31	2.1	

Результаты расчетов показаны в таблице 2, из которой следует, что по значениям $(D_{в})_{ср}$ и $(D_{в})_{\text{max}}$ большая часть площадки относится к категории Г [3, 4]. При этом необходимо отметить, что в соответствии с консервативным подходом к оценке устойчивости использовались наименьшие значения φ , полученные при изысканиях с доверительной вероятностью 0.95. Учитывалось также, что в нижней части покровной толщи, где возможно расширение канала, залегают пески лишь трех элементов: ИГЭ-11, 12, 38. Кроме того, открытые полости на участке не обнаружены, поэтому в качестве расчетного значения ширины ослабленного участка D на основании того же консервативного подхода принималось среднее значение глубины провалов бурового снаряда в карбонатных породах на территории Москвы.

Таблица 3

Результаты определения диаметра провалов $D_{в}$ на участке станции «Волхонка» по схеме смещения грунтового цилиндра с использованием уравнения (2)

Расчетные характеристики нижнего (1) и верхнего (2) слоев модели						$D_{в}$	$(D_{в})_{ср}$
Слой 1 (ИГЭ-52)			Слой 2 (ИГЭ-38)				
$m,^*$ м	$\gamma_1,$ кН/м ³	$C,$ кПа	$\varphi_1,$ град	$\gamma_2,$ кН/м ³	$\varphi_2,$ град	м	
0.8	17.5	47	13	18.7	31	3.8	4.2
1.2						4.6	

*Примечание. * Значения мощности по скважинам 28028 и 28030*

Расчетные значения показателей свойств (с доверительной вероятностью 0.95) и результаты расчетов приведены в таблице 3. Видно, что при наличии в разрезе экранирующего слоя диаметр карстово-суффозионных провалов заметно увеличивается. Однако распространение глин ИГЭ-52 на участке станции «Волхонка» крайне ограничено. Поэтому к среднему значению диаметра 4.2 м, показанному в таблице 3, следует относиться как к максимально возможному показателю опасности: $(D_{в})_{\max} = 4.2$ м. А наиболее вероятным средним значением может служить значение $(D_{в})_{\text{ср}} = 2.4$ м (табл. 2). И окончательно устойчивость площадки согласно нормативным документам по среднему значению диаметра провалов определяется категорией Г (≤ 3 м), а по максимальному – В ($3 \text{ м} < D \leq 10 \text{ м}$).

Станция «Плющиха»

На этом участке схематизированный разрез полностью соответствует тому, что показан на рисунке 2б. Несвязные грунты подстилаются экранирующими глинами (ИГЭ-52) достаточно малой мощности, для которых вполне корректна модель среза (2).

Некоторые отличия от участка станции «Волхонка», связанные с мощностью экрана, свойствами перекрывающих его песков и гидрогеологическими условиями, не вносят принципиальных изменений в расчетную схему. Поэтому ограничимся лишь общим выводом о том, что здесь средний и максимальный диаметры прогнозируемых воронок соответственно в 2 и 1.5 раза больше: $(D_{в})_{\text{ср}} = 4.9$ м и $(D_{в})_{\max} = 6.3$ м. По этим значениям $D_{в}$ участок станции «Плющиха» относится к категории В [3, 4].

Станция «Кутузовский проспект»

Покровная толща здесь также двухслойная, но подстилают ее не породы верхнего карбона, а нерасчлененная толща известняков и доломитов суворовской толщи верхнего (ИГЭ-73) и подольско-мячковского горизонта среднего (ИГЭ-74) карбона. Их аккумуляционная емкость практически не ограничена. Нижний экранирующий пласт сложен глинистыми отложениями воскресенской толщи верхнего карбона (ИГЭ-70) Ее мощность, что очень важно, достигает 7.7 м. При этом модель среза даже в применявшейся выше модификации перестает быть корректной.

В этом случае хорошей альтернативой модели Бирбаумера – среза столба пород [5, 7] – может служить модель обрушения параболического свода [2], отражающая реальный механизм образования провалов. Для решения нашей задачи – оценки диаметра окна в водоупоре – она записывается в виде [1]:

$$D_1 = 2m \cdot (\text{tg} \varphi_1 + C/\sigma_z), \quad (3)$$

где C и φ_1 – сцепление и угол трения глин; $\sigma_z = \sigma_h + \sigma^* = \sigma_{h+m}$; $\sigma_h = \gamma_2 h_a + \gamma_2' h_b$; γ_2 , γ_2' – вес влажных и взвешенных в воде песков; $h_a = h + m - H$ и $h_b = H - m$ – их мощность; $\sigma^* = \gamma_1^* m$ (см. рис. 2). Силовое воздействие подземных вод, как и раньше, учитывалось в фиктивном объемном весе экранирующего слоя: $\gamma_1^* = \gamma_1' + \gamma_w I$.

Первая форма движения песков, показанная на рисунке 2б, реализуется в достаточно крупных или плотных песках при их постепенном истечении в полость-приемник, а также во влажных несвязных грунтах или в песках не очень большой мощности независимо от их свойств, состояния и интенсивности гидродинамического воздействия. При этом диаметр свежего провала $D_{в}$ на земной поверхности или в основании сооружения примерно равен диаметру «окна» D_1 в слабопроницаемом разделяющем слое (рис. 3).

Именно такая ситуация прогнозируется на участке станции «Кутузовский проспект», где низы разреза несвязных грунтов сложены крупными плотными и, следовательно, «прочными» песками ИГЭ-39. Учитывая также, что мощность песчаной толщи h не очень велика по сравнению с диаметром отверстия D_1 , полагаем, что и здесь значение D_1 служит расчетным значением диаметра воронки (рис. 3, см. также рис. 2б).

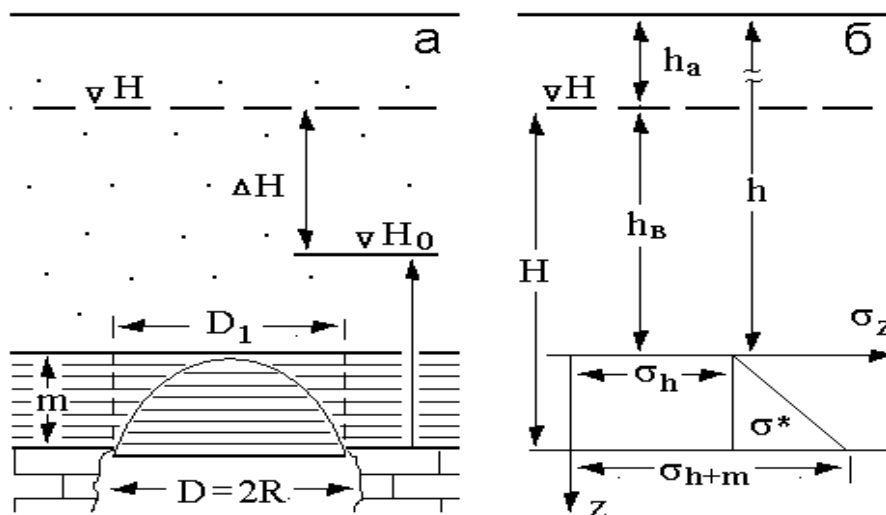


Рис. 3. Схема к определению диаметра сквозного отверстия D_1 при обрушении экранирующего слоя в пределах параболического свода высотой m (а) и эпюра вертикального давления слабопроницаемых грунтов (б): σ^* – фиктивные (с учетом гидродинамического воздействия) напряжения от веса глин; H, H_0 – уровни подземных вод.

Результаты расчетов свидетельствуют об очень близких значениях D_B на участках станций «Кутузовский проспект» и «Плющиха», которые находятся в разных инженерно-геологических условиях. Причины такого совпадения – предмет самостоятельного исследования и отдельной публикации. Поэтому ограничимся констатацией того факта, что по значениям $(D_B)_{cp} = 4.0$ м и $(D_B)_{max} = 6.0$ м участок станции «Кутузовский проспект» относится к категории В [3, 4].

Станция «Деловой Центр»

Двухслойное строение покровной толщи – слой связных грунтов (СГ) в подошве и – несвязных (НГ) с поверхности – наблюдается и в окрестности станции «Деловой Центр» (рис. 4). Это, впрочем, неудивительно, так как схема «СГ–НГ», иногда повторяющаяся вверх по разрезу (СГ–НГ–СГ–НГ и т.д.), является основной для территории Москвы. Обратная последовательность (НГ–СГ–НГ–СГ) имеет место, но карстово-суффозионные провалы, по образному выражению Л.Г. Черткова, на таком месте в Москве не имеют места.

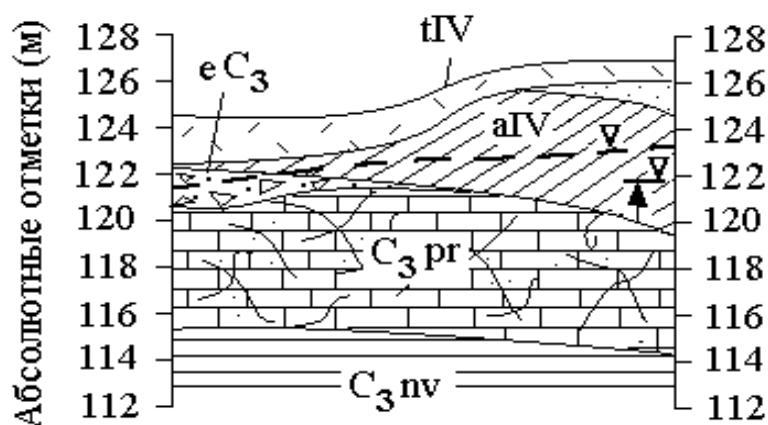


Рис. 4. Схематическое строение массива пород на участке станции «Деловой центр»: tIV – техногенные преимущественно песчаные грунты; aIV – аллювиальные суглинки с прослоями супесей и песков; C_{3pr}, C_{3nv} – перхуровская карбонатная и неверовская глинистая толщи верхнего карбона; eC_3 – элювий карбонатных пород. Пунктирной линией и стрелкой показаны уровни грунтовых и трещинно-карстовых вод.

На этом участке средняя (по колонкам 8-ми пробуренных скважин) мощность разделяющего слоя оказалась равной $m_{\text{cp}} = 2.6$ м, максимальная – $m_{\text{max}} = 5.3$ м. Опасность провалообразования, количественно выраженная величиной диаметра возможной воронки, при этих значениях m определялась с использованием уравнений (2), (3). Зависимость (1), предсказывающая сильное увеличение диаметра канала над окном в водопоре, не применялась, так как по целому ряду признаков реализация 2-й формы течения грунтов здесь исключается.

Вычисления показывают, что при $m_{\text{cp}} = 2.6$ м, диаметр возможных провалов лежит в интервале $(D_{\text{в}})_{\text{cp}} = 2.7\text{--}3.7$ м, а при $m_{\text{cp}} = 5.3$ м – $(D_{\text{в}})_{\text{max}} = 4.4\text{--}5.2$ м. Вероятность же реализации этих провалов нам неизвестна и вряд ли может быть установлена при существующем уровне знаний о распределении подземных карстовых форм по размерам. Поэтому, считая сценарии, положенные в основу расчетов, равновероятными, получим: $D_{\text{cp}} = (2.7 + 3.7)/2 = 3.2$ м, $D_{\text{max}} = (5.2 + 4.4)/2 = 4.8$ м. При этом участок станции «Деловой центр» относится к категории В ($3 \text{ м} < D \leq 10 \text{ м}$).

Заключение

Размер возможных провалов в основании сооружения является одним из важнейших показателей при выборе проектных решений и защитных мероприятий. Для линий метрополитена, характеризующихся большой протяженностью, выбору расчетной модели всегда должно предшествовать районирование территории, позволяющее выделить участки, в пределах которых карстово-суффозионный процесс будет развиваться по определенному механизму. Такой подход к оценке карстово-суффозионной опасности был использован, например, в рамках работ по научному сопровождению инженерно-геологических изысканий на участке Калининско-Солнцевской линии от станции Третьяковская до станции Деловой Центр, результаты которых представлены в настоящей статье.

Литература

1. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.
2. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. Ч. 1. Давление горных пород. Изд. 3-е. М.: Госгориздат, 1933. 127 с.
3. СП 11-105-97. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов / Госстрой РФ. М., 2000. 99 с.
4. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Минрегион России. М., 2012. 60 с.
5. Терцаги К., Пек Р. Механика грунтов в инженерной практике. Пер. с англ. М.: Госстройиздат, 1958. 503 с.
6. Хоменко В. П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003.
7. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.