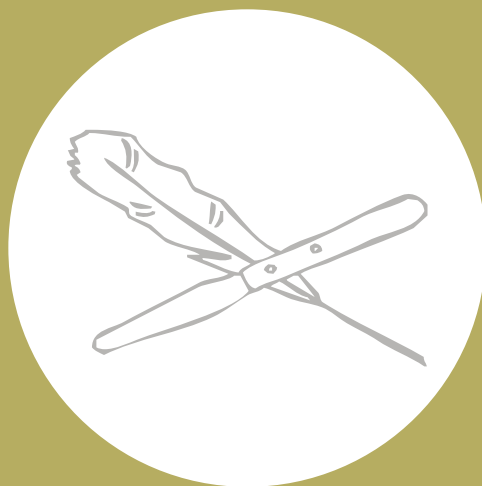


ГРУНТОВЕДЕНИЕ

№ 1(20)
2023



DOI 10.53278/2306-9139-2023-1-20-54-70

УДК 551.435.832

ВЛИЯНИЕ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА АКТИВНОСТЬ РАЗВИТИЯ КАРСТА (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКОВ В Г. МОСКВЕ, В НИЖЕГОРОДСКОЙ И ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТЯХ)

INFLUENCE OF CLAY DEPOSITS ON KARST DEVELOPMENT ACTIVITY (ON THE EXAMPLE OF SITES IN MOSCOW, NIZHNY NOVGOROD AND VLADIMIR REGIONS)

© 2023 г. Т. Г. Ковалёва¹, З. В. Селина², С. В. Щербаков³, В. А. Чижова⁴, А. А. Новикова⁵
© 2023 T. G. Kovalyova¹, Z. V. Selina², S. V. Scherbakov³, V. A. Chizhova⁴, A. A. Novikova⁵

^{1,2,3,5} ФГАОУВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
ул. Букирева, д. 15, г. Пермь, 614068, Россия

^{1,2,3,5} Perm State National Research University, Bukireva str., 15, Perm, 614068, Russia

^{1,2,3,4,5} ООО «ПКУБЗ», ул. Сушчевский Вал, д. 5, стр. 3, г. Москва, 127018, Россия

^{1,2,3,4,5} "Anti-Karst and Coastal Protection" LLC, Sushchevsky Val str., 5, p. 3, Moscow, 127018, Russia

kovalevatg@mail.ru¹, zoya.kivileva@mail.ru², sherbakov@antikarst.ru³,
chizhova@antikarst.ru⁴, novikova@antikarst.ru⁵

Аннотация. В статье поднимается вопрос влияния мощности перекрывающих отложений на возможность образования карстового провала и их роли в развитии подземной закарстованности. Часто наличие мощной перекрывающей глинистой толщи рассматривается как надежная защита от активных карстовых процессов, однако во многих случаях это не так. В работе приведены примеры развития карстового процесса при разных мощностях и свойствах перекрывающих глинистых отложений. Кроме того, приведен пример наличия опасности для подземной части сооружения и непрогнозируемом провалообразовании.

Abstract. The paper considers the issue of the influence of the thickness of overlying deposits on the possibility of the formation of a karst sinkhole and their role in the development of underground karst formation. Often, the presence of thick overlying clayey rock strata is considered as a reliable protection against active karst processes; however, in many cases this is not the case. The paper gives examples of the development of the karst process at different thicknesses and properties of overlying deposits. In addition, an example of the presence of a danger to the underground part of the structure and unpredictable sinkhole formation is given.

Ключевые слова: карст, карстопроявление, перекрывающая глинистая толща, карстоопасность

Keywords: karst, karst form, overlying clayey rock strata, karst hazard

Введение

Проблема оценки карстоопасности территории в связи с широким ее освоением и новым строительством, в том числе, линейных протяженных объектов является актуальной и дискуссионной. На настоящий момент отсутствуют единые правила и подходы к определению опасности карста, во многих случаях в различных частях страны оценка производится по-разному, с учетом региональных особенностей. С одной стороны, это хорошо и обосновано, так как при оценке карстоопасности должны учитываться индивидуальные особенности и условия развития карста, с другой стороны, возникают прецеденты, когда нормы, работающие

и обоснованные в условиях одного региона, пытаются применять в условиях развития карста другого района, особо не углубляясь в особенности геологического строения. В частности, одним из критериев отнесения территории к неопасной в карстово-суффозионном отношении является наличие мощной толщи глинистых пород.

Теоретический анализ

В нормативной литературе указаны признаки неопасной в карстово-суффозионном плане территории. Например, такой признак неопасной категории описывается в СП 22.13330.2016 (изм. 3): наличие водоупора, покрывающего водораство-

римые горные породы, мощностью более 10 м (таблица 6.16 [17]). Следует отметить, что в измененной редакции СП 22.13330.2016 (изм. 4) этот показатель убран и в действующей редакции совсем не указывается мощность водоупора, обеспечивающего защиту от активизации карстовых процессов. В измененной редакции предлагается устанавливать категорию опасности в карстово-суффозионном отношении по наличию подземных и поверхностных карстопроявлений, и лишь в случае невозможности установления категории опасности по вышеуказанным признакам, рекомендуется использовать дополнительные признаки (мощность водоупорного слоя, градиент вертикальной фильтрации, мощность рыхлых грунтов и др.), учитывающие региональные особенности развития карста, без количественного уточнения.

Водоупор — это выдержанные слабопроницаемые породы, изолирующие смежные элементы гидрогеологического разреза [4]. К таким, практически непроницаемым породам, относятся суглинки, глины и все массивные кристаллические и осадочные породы, если они не трещиноватые [22]. Таким образом, согласно некоторым редакциям нормативных документов, если на участке есть толща глинистых грунтов, перекрывающая карстующиеся отложения, мощностью 10 м и более, то при прочих условиях (отсутствии на поверхности деформаций, полостей внутри карстового массива, значение градиента вертикальной фильтрации менее 1) территорию можно отнести к неопасной.

Несложно догадаться, как такой признак появился в федеральном нормативном документе. Если обратиться к Инструкции по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве, то можно заметить, что эта норма была заимствована из них, в несколько измененном виде. Так, п. 4.8.6 [9] говорит о том, что «неопасные районы характеризуются отсутствием проявления карста на поверхности земли, наличием водоупоров из юрских и каменноугольных глин, толщиной, как правило, более 10 м и отсутствием нарушенного режима подземных вод». Таким образом, здесь подчеркивается возраст глинистых отложений (юрский или каменноугольный), которые могут считаться достаточной защитой при мощности 10 м и более. В федеральном же нормативном документе указание на возраст исчезло, а ведь это существенное уточнение, так как глины разного возраста и генезиса характеризуются различными физико-механическими свойствами, которые, как уже отмечалось ранее, являются основой для оценки водоупорных свойств.

Практика карстологических исследований говорит о том, что не все глинистые отложения могут

служить абсолютной защитой для карстующихся пород. Водоупорные и защитные свойства зависят прежде всего от физико-механических свойств глинистой толщи, а также наличия прослоев и включений в ней. Так, к настоящему времени в выведенном из статуса базовых федеральных нормативных актов СП 11–105–97 ч. II [16], в пункте 5.1.7 говорится, что водоупорная толща грунтов, как правило, обеспечивающая защиту от возможности появления карста на земной поверхности, может изменяться от 10–30 м (при выдержанной мощности плотных глин, с отсутствием линз и прослоев песка, супеси, водоносных суглинков, трещин и других нарушений) до 60–100 м (при наличии в покрывающей толще слоев песков, песчаников, мергелей, а также тектонических нарушений). Такая формулировка как раз соответствует практическому опыту карстологических исследований и строению участков, на которых отсутствуют или развиты карстовые формы.

Как правило, при оценке и расчете диаметра возможного карстового провала используют модель среза горных пород по цилиндрической поверхности, предложенную А. Бирбаумером в 1913 г. Данную схему смещения «столба» грунта по цилиндрической поверхности над карстовой или промежуточной полостью для расчета диаметра возможного провала впервые применил Г. М. Шахуняц в 1953 г. [21] Суть расчетного метода заключается в следующем. Сдвигающей силой, вызывающей перемещение грунта в полость-приемник, служит вес пород в объеме цилиндра. Ей противостоит суммарная удерживающая сила, как результат действия удельных сил трения и сцепления грунтов по боковой поверхности смещения цилиндра [2]. Модель предусматривает постепенный рост подземной полости за счет растворения и обрушения стенок, а также формирование над ней продвигающегося вверх эллиптического свода обрушения. При достижении им предельной глубины h_0 происходит сдвигание грунта и формирование провала [8]. В дальнейших расчетах в данной работе использована формула, приведенная А. В. Аникеевым под номером 3.29 [2], основанная на модели А. Бирбаумера.

Необходимо отметить, что во всех модификациях круглоцилиндрической модели (Г. М. Троицкий, В. П. Хоменко [19]) диаметр провала на поверхности соответствует диаметру полости, хотя в действительности это не всегда так, что подтверждается, например, работой В. Н. Андрейчука [1], где приведены результаты обследования карстовых пещер и земной поверхности над ними.

Провалы небольших размеров могут формироваться за счет образования и роста в толще

перекрывающих грунтов полостей канального типа. Например, упоминал об этом механизме А. В. Ступишин [18], говоря о провальных явлениях в покровных суглинках Среднего Поволжья, при этом ширина зафиксированных бурением и вскрышными работами каналов-полостей (вертикальных трубообразных каналов разрыхления и обрушения грунтов [2]) составляла около 0,5 м.

Таким образом, в определенных условиях глинистые отложения даже при большой мощности не могут обеспечить защиту от выхода полости на поверхность. Как показывает практический опыт и исследования [1, 18], в глинистых отложениях формируются полости канального типа. Диаметр и форма профиля таких полостей зависят от свойств грунтов перекрывающей толщи, их мощности и интенсивности трещиной раздробленности [1]. Субвертикальные трубообразные полости-каналы в толще связных грунтов приурочены к наиболее ослабленным участкам массива, характеризующихся повышенной трещиноватостью и раздробленностью грунтов. Формирование трубообразных полостей происходит при частых колебаниях уровня трещинно-карстовых вод и обычно растянуто во времени на десятилетия и даже сотни лет. Механика процесса зарождения и развития трубообразных полостей до сих пор изучена слабо. Для определения максимального диаметра трубообразной полости, пронизывающей толщу связных грунтов, была выведена эмпирическая зависимость [10]:

$$D_{pipe} = \exp(I_L) \cdot D_{fis} \frac{9,8 \rho m}{c} \quad (1)$$

где ρ — плотность грунта, г/см³; D_{fis} — суммарная ширина раскрытия трещин в связных и полускальных грунтах, м; m — мощность грунтового слоя (ГС) или инженерно-геологического элемента (ИГЭ), м; c — удельное сцепление, кПа; I_L — показатель текучести, д.е. (для полускальных грунтов принимается меньшим 0). Показатель суммарной ширины раскрытия трещин (D_{fis}) работает относительно точно в диапазоне мощностей глинистой толщи не более 20,0 м.

Изучению влияния мощности перекрывающих отложений и их физико-механических свойств на развитие карстового процесса на территории субъектов Российской Федерации посвящены работы Аникеева А. В., Катаева В. Н., Щербакова В. В., Ковалёвой Т. Г., Кочева А. Д. и др. [2, 6, 7, 11, 12, 14, 15].

Методика исследований

Рассмотрим условия и возможность образования карстовых провалов при наличии толщи связных

грунтов, обладающих разным генезисом и свойствами, при этом минералогический состав глин в данном исследовании не рассматривался, анализировались только их физико-механические свойства. Влияние мощности перекрывающих глинистых отложений на развитие карстового процесса изучалось на примере трех опорных участков: 1 — район Покровское-Стрешнево, Северо-Западный административный округ Москвы; 2 — д. Пологовка в Арзамасском районе Нижегородской области; 3 — д. Пивоварово во Владимирской области.

На начальном этапе для каждой территории была изучена поверхностная закарстованность с выделением участков развития карстовых форм путем анализа топографических карт и космоснимков различного масштаба. Далее определено геологическое строение по данным карстологического бурения. По результатам лабораторных исследований получены физико-механические свойства перекрывающих и карстующихся отложений.

На следующем этапе был выполнен расчет вновь ожидаемого карстового провала на поверхности земли по формулам и зависимостям, предложенным А. В. Аникеевым [2], для чего разработан специализированный алгоритмизированный метод, основанный на анализе инженерно-геологического разреза, при котором для каждого грунтового слоя или инженерно-геологического элемента определяется наиболее вероятный механизм (провальный, карстово-суффозионный) деформирования над полостью. Расчеты в этом случае производятся снизу-вверх по разрезу от полости, заложенной на стыке перекрывающих грунтов и карстующихся пород. Данный метод апробирован путем сравнения параметров уже существующих воронок и прогнозируемых диаметров возможных новых карстовых провалов (оседаний) вблизи расчетных скважин [3, 13].

Краткая карстологическая характеристика опорных участков

Опорный участок 1. На территории г. Москвы и Московской области карстующимися отложениями являются преимущественно известняки и доломиты каменноугольного возраста, перекрывающимися грунтами часто служат каменноугольные и юрские глинистые отложения (рис. 1а). На территории г. Москвы по данным территориальных геологических фондов ПГО «Центргеология» зафиксировано 42 карстово-суффозионных провала, с 1988 г. здесь случаев образования карстово-суффозионных деформаций не зафиксировано.

По данным карстологического бурения геологический разрез представлен песчано-глинистыми



четвертичными образованиями различного генезиса, твердыми покровными глинами оксфордского и кимериджского ярусов позднеюрского (J_3o+km) возраста и глинами позднекаменноугольного (C_3) возраста, переслаивающимися с карстующимися известняками позднекаменноугольного (C_3) возраста (таблица 1). На поверхности, вблизи опорной скважины, карстопроявления не зафиксированы. В толще каменноугольных известняков могут образовываться незаполненные карстовые полости с незначительной высотой (по данным изучения архивных материалов высота полостей 0,2–1,5 м со средним значением 0,8 м). При этом объем полостей, способных накапливать обломочный материал, составляет первые десятки кубических метров. Помимо самой полости, большое значение в протекании карстового процесса имеет аккумуляционная емкость карстующейся толщи (способность закарстованных пород принимать и аккумулировать несвязные и раздробленные связанные вышележащие грунты). Трещиноватость каменноугольных известняков, из-за защищенности от внешних факторов покровными глинами, как правило, незначительна, прослеживается она в первых

метрах кровли растворимой толщи.

Опорный участок 2. Другая картина наблюдается на территории д. Пивоварово Владимирской области. На поверхности зафиксированы многочисленные карстопроявления (рис. 2). При этом в геологическом разрезе участвуют пермские уржумские (P_{2ur}) глины мощностью более 45 м, характеризующиеся повышенной трещиноватостью, наличием прослоев известняка, песчаника, мергеля и супеси. Карстующимися породами являются ниже- и среднепермские карбонатные и сульфатные породы [5, 20, 23].

Провалообразование на данной территории происходит по двум сценариям. По модели среза горных пород по круглоцилиндрической поверхности, а именно, за счет формирования в карстовом массиве незаполненных полостей больших размеров (по данным изучения архивных материалов с диаметрами 10,0–20,0 м и средней высотой 2,0 м). Полости больших размеров формируются из-за высокой трещиноватости массива сульфатных пород на большую глубину и высокой скорости их растворения. Их объем и аккумуляционная емкость сульфатных пород составляют тысячи кубических

Таблица 1. Физико-механические характеристики свойств грунтов, используемые в расчетах*

№ ИГЭ	Наименование ИНЭ (возраст)	Мощность	Плотность грунта	Коэффициент пористости	Число пластичности	Показатель текучести	Коэффициент водонасыщения	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление	Суммарная ширина раскрытия трещин в связанных и полускальных грунтах
		<i>m</i>	ρ	<i>e</i>	<i>I_p</i>	<i>I_L</i>	<i>S_r</i>	<i>E</i>	ν	φ	<i>c</i>	<i>D_{fis}</i>
		<i>m</i>	г/см³	д.е.	%	д.е.	д.е.	МПа	д.е.	°	кПа	<i>m</i>
Опорный участок 1												
1	суглинок (tQ)	0,8	1,97	0,649	13,9	0,350	0,850	12	0,35	20	28	0,034
2	песок ср.кр. (aQ)	4,0	2,02	0,600			0,900	33	0,23	36	6	
3	суглинок (lbQ)	2,7	1,93	0,680	8,5	0,520	0,800	9	0,35	10	20	0,140
4	песок ср.кр. (flgQ)	2,5	1,91	0,625			0,700	20	0,23	34	4	
5	суглинок (flgQ)	0,8	2,10	0,510	11,1	0,370	0,910	20	0,00	23	50	0,040
6	глина (J ₃ o+km)	14,8	1,79	1,069	36,8	-0,040	0,930	30	0,40	17	97	0,148
Опорный участок 2												
1	песок ср.кр. (flgQ)	2,3	1,91	0,663			0,230	35	0,26	38	1	
2	глина (P ₂ ur)	46,8	2,01	0,695	22,9	0,125	0,890	38	0,40	20	54	1,170
Опорный участок 3												
1	песок ср.кр. (flgQ)	0,9	1,69	0,755			0,655	38	0,26	37	2	
2	суглинок (flgQ)	7,7	2,07	0,534	13,4	-0,423	0,805	24	0,35	24	33	0,470
3	глина (flgQ)	3,5	1,95	0,796	19,1	0,463	0,995	16	0,40	15	45	0,105
4	песок ср.кр. (flgQ)	5,8	1,99	0,549			0,655	48	0,26	32	2	
5	суглинок (P ₂ ur)	20,0	2,04	0,583	10,0	-0,163	0,874	23	0,35	29	42	1,300
6	суглинок (P ₂ ur)	15,5	2,07	0,552	10,1	0,193	0,921	23	0,35	20	57	0,884

*В расчетах использованы свойства грунтов, залегающих над карстующимися отложениями (согласно методике А.В. Аникеева)

метров, что позволяет большому объему перекрывающих отложений перемещаться в карстовый массив при формировании провала на поверхности земли. Для данной территории образование полостей в карбонатных породах пермского возраста ввиду их незначительных размеров (мощность от 0,1 до 5,7 м, со средним значением 0,9 м), в отличие от полостей в сульфатных породах, имеет меньшее значение в формировании провалов на поверхности земли. В случае слабой закарстованности сульфатной толщи, протекание карстового процесса идет за счет образования полостей в карбонатных породах по механизму трубообразного канала.

Опорный участок 3. Аналогичная ситуация отмечается на территории Арзамасского района Нижегородской области вблизи д. Пологовка. В карстологической скважине (рис. 1в) вскрыты песчано-глинистые отложения четвертичного возраста, мощная толща пермских уржумских (P_{2ur}) суглинков (более 35 м). Карстующимися породами здесь являются сульфатные породы пермского возраста. Согласно описанию, суглинки имеют многочисленные включения и прослои песчаников, алевролитов, мергелей и т.д., то есть являются неоднородными по составу и свойствам, в связи с чем в слое образуются зоны разуплотнения и повышенной трещиноватости, по которым атмосферные осадки могут проникать в карстующуюся толщу. Глинистые грунты по результатам лабораторных исследований обладают высоким сцеплением (табл. 1), благодаря чему они могут долго держать своды карстовых полостей, которые, в свою очередь, формируют системы подземных пустот. Например, при бурении скважины

произошел провал бурового инструмента, высота карстовой полости составила 7,4 м, при этом общая мощность перекрывающей глинистой толщи – 35,5 м (рис. 1). На поверхности при этом зафиксированы многочисленные карстопроявления (рис. 3). Учитывая широкое развитие поверхностных карстовых форм, можно предположить, что в скором времени данная полость, достигнув критических размеров, выйдет на поверхность в виде новой провальной формы, в результате одновременного смещения грунтов по цилиндрической поверхности в полость или за счет постепенного разрыхления.

Результаты расчетов диаметров вновь ожидаемых провалов на поверхности земли для опорных участков.

Для **опорного участка 1** выполнен расчет с использованием показателей физико-механических свойств грунтов покровных отложений (табл. 1). В расчетах в качестве начального размера карстовой полости D_0 принят диаметр 1,5 м, высота h_p 0,5 м, как наиболее характерные для каменноугольных карбонатных отложений. Скорость растворения v_r принята как средняя для труднорастворимых скальных грунтов 0,005 м/год, согласно таблице 6.15 СП22.13330.2016. С учетом скорости растворения, за 100 лет конечный диаметр полости, участвующий в расчетах, составит 2,0 м. Как видно из расчета (рис. 4), образование карстово-суффозионной деформации на поверхности земли не прогнозируется.

Ниже приведены расчеты диаметров ожидаемых провалов на поверхности земли, учитывающие



Рис. 2. Карстовый провал 2016 года в районе д. Пивоварово

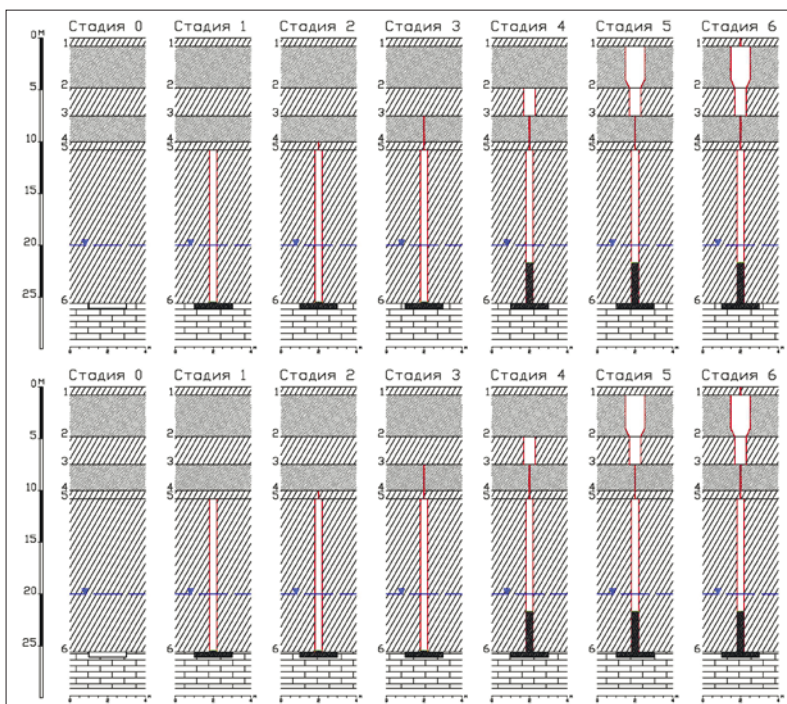


Рис. 3. Карстовый провал в Арзамасском районе Нижегородской области

Моделируемая горная выработка		c-1
Данные по проектируемому сооружению		
Срок службы сооружения, лет	t	100
Данные по закарстованности карстующейся толщи		
Карстующийся грунт	известняк	
Начальный диаметр полости, м	D_0	1,5
Скорость растворения породы, м/год	v_r	0,005
Конечный диаметр полости за срок службы объекта, м	D_1	2,0
Высота полости, м	h_p	0,5
Мощность зоны активного карстования, м	m_k	1,5
Коэффициент открытой трещиной пустотности, д.е.	K_k	0,05
Глубина установления трещинно-карстовых вод, м	H_k	20,0
Аккумулятивная емкость карстовой полости, м ³	V_{a0}	1,6
Аккумулятивная емкость трещиной пустотности, м ³	V_{a1}	15,3
Аккумулятивная емкость карстующейся толщи, м ³	V_a	16,9

Результаты моделирования деформации в основании фундамента

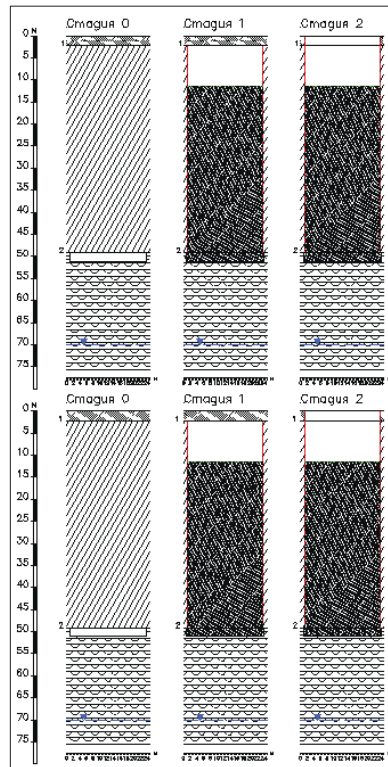
Диаметр при быстром / медленном развитии суффозии, м	d_F / d_S	0 / 0
Вероятность развития быстрой / медленной суффозии	$P_{\text{suff}} / P_{\text{sufS}}$	0,09 / 0,91
Вероятность образования деформации по типу провала при развитии быстрой / медленной суффозии	$P_{\text{dsF}} / P_{\text{dsS}}$	0,57 / 0,57
Вероятность образования деформации по типу провала	P_d	0,57
Рекомендуемый тип карстово-суффозионной деформации	нет	
Рекомендуемый расчетный диаметр, м	d	нет



Инженерно-геологическая модель														Общие расчеты	Полость в связных грунтах						Полость в несвязных грунтах при суффозионном истечении					
№ п/п	№ ИГЭ (слоя)	Тип грунта	Мощность		Плотность грунта	Коэффициент пористости	Число пластичности	Показатель текучести	Коэффициент водонасыщения	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление		Суммарная ширина раскрытия трещин в связ- ных и полускальных грунтах	Мощность (высота) слоя с учетом глубины заложения фундамента	Общее давление от собственного веса грунта и внешней нагрузки	Критический диаметр полости для обрушения связных грунтов	Максимальный диаметр трубообразного кана- ла-полости в толще связных грунтов	Диаметр полости в кровле слоя ¹		Критический диаметр полости для обрушения несвязных грунтов	быстром		медленном	
			м	г/см³																д.е.	%		д.е.	д.е.	МПа	д.е.
1	1	глина	0,8	1,97	0,649	13,9	0,350	0,850	12	0,35	20	28	0,034	0,8	15,4					4,1	0,0		0,0	0,0	0,0	0,00
2	2	песок	4,0	2,02	0,600			0,900	33	0,23	36	6		4,0	94,6						0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	
3	3	глина	2,7	1,93	0,680	8,5	0,520	0,800	9	0,35	10	20	0,140	2,7	145,7	1,4	0,6	0,6	0,6							
4	4	песок	2,5	1,91	0,625			0,700	20	0,23	34	4		2,5	192,5					0,00	0,0	0,0	0,0	0,0		
5	5	глина	0,8	2,10	0,510	11,1	0,370	0,910	20	0,00	23	50	0,040	0,8	209,0	0,8	0,0	0,0	0,0							
6	6	глина	14,8	1,79	1,069	36,8	-0,040	0,930	30	0,40	17	97	0,148	14,8	468,6	17,7	0,4	0,4	0,4							

Рис. 4. Расчет диаметра карстового провала на опорном участке №1

Моделируемая горная выработка		c-2
Данные по проектируемому сооружению		
Срок службы сооружения, лет	t	100
Данные по закарстованности карстующейся толщи		
Карстующийся грунт		гипс
Начальный диаметр полости, м	D_0	15,0
Скорость растворения породы, м/год	v_r	0,080
Конечный диаметр полости за срок службы объекта, м	D_1	23,0
Высота полости, м	h_p	2,0
Мощность зоны активного карстования, м	m_k	24,5
Коэффициент открытой трещиной пустотности, д.е.	K_k	0,05
Глубина установления трещинно-карстовых вод, м	H_k	70,0
Аккумулятивная емкость карстовой полости, м ³	V_{a0}	830,5
Аккумулятивная емкость трещиной пустотности, м ³	V_{a1}	37962,9
Аккумулятивная емкость карстующейся толщи, м ³	V_a	38793,4
Результаты моделирования деформации в основании фундамента		
Диаметр при быстром / медленном развитии суффозии, м	d_F / d_S	22,6 / 22,6
Вероятность развития быстрой / медленной суффозии	$P_{\text{suFF}} / P_{\text{suFS}}$	0,07 / 0,93
Вероятность образования деформации по типу провала при развитии быстрой / медленной суффозии	$P_{\text{dsF}} / P_{\text{dsS}}$	0,73 / 0,73
Вероятность образования деформации по типу провала	P_d	0,73
Рекомендуемый тип карстово-суффозионной деформации		провал
Рекомендуемый расчетный диаметр, м	d	22,6



Инженерно-геологическая модель														Общие расчеты	Полость в связных грунтах				Полость в несвязных грунтах при суффозионном истечении							
№ п/п	№ ИГЭ (слоя)	Тип грунта	Мощность		Плотность грунта	Коэффициент пористости	Число пластичности	Показатель текучести	Коэффициент водонасыщения	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление		Суммарная ширина раскрытия трещин в связ- ных и полусвязных грунтах	Мощность (высота) слоя с учетом глубины заложения фундамента	Общее давление от собственного веса грунта и внешней нагрузки	Критический диаметр полости для обрушения связных грунтов	Максимальный диаметр трубообразного кана- ла-полости в толще связных грунтов	Диаметр полости в кровле слоя ¹		Критический диаметр полости для обрушения несвязных грунтов	быстром		медленном	
			m	ρ																e	IP		IL	Sr	E	ν
1	1	песок	2,3	1,91	0,663				0,230	35	0,26	38	1		2,3	43,1					0,24	22,6	22,6	22,6	22,6	
2	2	глина	46,8	2,01	0,695	22,9	0,125	0,890	38	0,40	20	54	1,170	46,8	964,9	25,8	22,6	22,6	22,6							

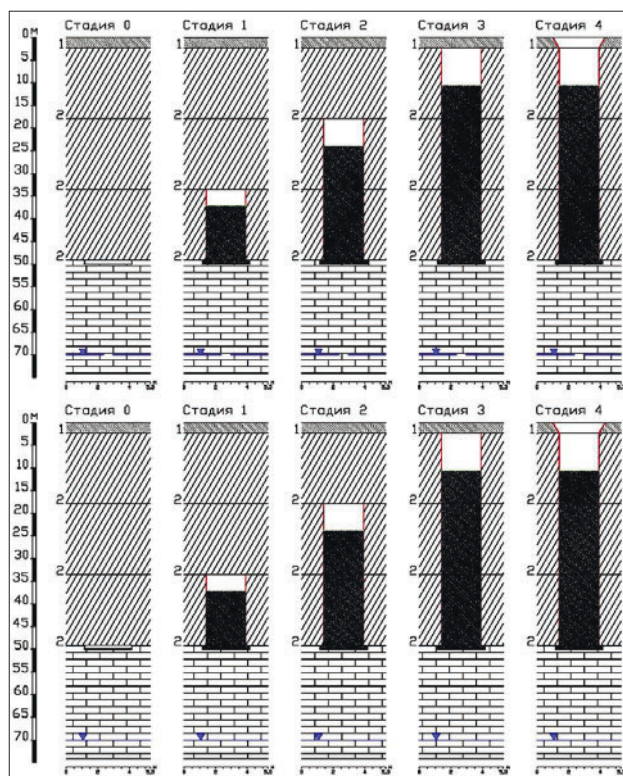
Рис. 5. Расчет диаметра карстового провала на опорном участке №2 при условии развития полости в сульфатах

возможный критический диаметр полости в момент сдвига грунтов по цилиндрической поверхности и диаметр вертикального трубообразного канала разрыхления в толще связных грунтов, величина которого зависит от физико-механических свойств перекрывающих грунтов, их мощности и интенсивности трещиной раздробленности.

Для опорного участка 1 действия удельных сил трения и сцепления грунтов по боковой поверхности смещения цилиндра способны удерживать покровные отложения от обрушения грунтов в полость-приемник до тех пор, пока ее размеры не

достигнут 17,7 м. В толще каменноугольных карбонатных отложений полости таких размеров не зафиксированы, следовательно, образование провала за счет одномоментного обрушения грунтов невозможно. Ввиду слабой трещиноватости карстового массива, незначительных размеров полостей в нем и, как следствие, объема полости и аккумуляционной емкости карстового массива, грунту из перекрывающей толщи некуда перемещаться. В результате отсутствия области аккумуляции грунтов покровных отложений или незначительного ее объема, в толще дисперсных отложений фор-

Моделируемая горная выработка		c-2
Данные по проектируемому сооружению		
Срок службы сооружения, лет	t	100
Данные по закарстованности карстующейся толщи		
Карстующийся грунт		гипс
Начальный диаметр полости, м	D_0	15,0
Скорость растворения породы, м/год	v_r	0,080
Конечный диаметр полости за срок службы объекта, м	D_1	23,0
Высота полости, м	h_p	2,0
Мощность зоны активного карстования, м	m_k	24,5
Коэффициент открытой трещиной пустотности, д.е.	K_k	0,05
Глубина установления трещинно-карстовых вод, м	H_k	70,0
Аккумулятивная емкость карстовой полости, м ³	V_{a0}	830,5
Аккумулятивная емкость трещиной пустотности, м ³	V_{a1}	37962,9
Аккумулятивная емкость карстующейся толщи, м ³	V_a	38793,4
Результаты моделирования деформации в основании фундамента		
Диаметр при быстром / медленном развитии суффозии, м	d_F / d_S	22,6 / 22,6
Вероятность развития быстрой / медленной суффозии	P_{sufF} / P_{sufS}	0,07 / 0,93
Вероятность образования деформации по типу провала при развитии быстрой / медленной суффозии	P_{dsF} / P_{dsS}	0,73 / 0,73
Вероятность образования деформации по типу провала	P_d	0,73
Рекомендуемый тип карстово-суффозионной деформации		провал
Рекомендуемый расчетный диаметр, м	d	22,6



Инженерно-геологическая модель														Общие расчеты		Полость в связных грунтах				Полость в несвязных грунтах при суффозионном истечении																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
№ п/п		№ ИГЭ (слой)		Тип грунта		Мощность		Плотность грунта		Коэффициент пористости		Число пластичности								Показатель текучести		Коэффициент водонасыщения		Модуль деформации		Коэффициент Пуассона		Угол внутреннего трения		Удельное сцепление		Суммарная ширина раскрытия трещин в связных и полусвязных грунтах		Мощность (высота) слоя с учетом глубины заложения фундамента		Общее давление от собственного веса грунта и внешней нагрузки		Критический диаметр полости для обрушения связных грунтов		Максимальный диаметр трубообразного канала-полости в толще связных грунтов		Диаметр полости в кровле слоя ¹		Критический диаметр полости для обрушения несвязных грунтов		Диаметр полости в подошве слоя ²		Диаметр канала течения (полости) с учетом смежных слоев несвязных грунтов		Диаметр полости в подошве слоя ³		Диаметр канала течения (полости) с учетом смежных слоев несвязных грунтов																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
						м	г/см³	д.е.	%	д.е.	д.е.	МПа	д.е.	°	кПа	м	м	кПа	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м	м

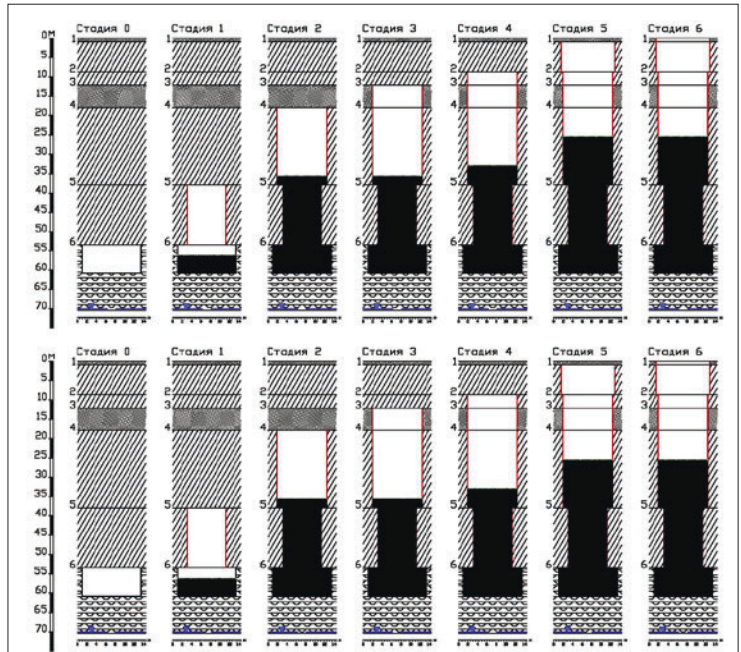
Рис. 6. Расчет диаметра карстового провала на опорном участке №2 при условии развития полости в карбонатах

мируются вертикальные трубообразные каналы разрыхления и обрушения грунтов незначительных размеров, которые не способствуют развитию деформаций на поверхности земли. Данный расчет подтверждается отсутствием карстовых деформаций на поверхности земли для опорного участка.

Для **опорного участка 2** выполнены два расчета ожидаемого диаметра карстово-суффозионного провала (рис. 5, 6). Первый расчет выполнен при

условии развития карстовой полости в сульфатных породах. В расчетах в качестве начального размера карстовой полости (D_0) принят диаметр 15,0 м, высота (h_p) 2,0 м, а также скорость растворения (v_r) 0,080 м/год, характерная для сульфатных пород пермской системы. С учетом скорости растворения, за 100 лет конечный диаметр полости, участвующий в расчетах, составит 23,0 м. Данная полость заложена на контакте перекрывающих и карстующейся

Моделируемая горная выработка		c-2
Данные по проектируемому сооружению		
Срок службы сооружения, лет	t	100
Данные по закарстованности карстующейся толщи		
Карстующийся грунт		гипс
Начальный диаметр полости, м	D_0	15,0
Скорость растворения породы, м/год	v_r	0,080
Конечный диаметр полости за срок службы объекта, м	D_1	23,0
Высота полости, м	h_p	2,0
Мощность зоны активного карстования, м	m_k	24,5
Коэффициент открытой трещиной пустотности, д.е.	K_k	0,05
Глубина установления трещинно-карстовых вод, м	H_k	70,0
Аккумулятивная емкость карстовой полости, м ³	V_{a0}	830,5
Аккумулятивная емкость трещиной пустотности, м ³	V_{a1}	37962,9
Аккумулятивная емкость карстующейся толщи, м ³	V_a	38793,4
Результаты моделирования деформации в основании фундамента		
Диаметр при быстром / медленном развитии суффозии, м	d_F / d_S	22,6 / 22,6
Вероятность развития быстрой / медленной суффозии	P_{sufF} / P_{sufS}	0,07 / 0,93
Вероятность образования деформации по типу провала при развитии быстрой / медленной суффозии	P_{dsF} / P_{dsS}	0,73 / 0,73
Вероятность образования деформации по типу провала	P_d	0,73
Рекомендуемый тип карстово-суффозионной деформации		провал
Рекомендуемый расчетный диаметр, м	d	22,6



Инженерно-геологическая модель														Общие расчеты	Полость в связных грунтах				Полость в несвязных грунтах при суффозионном истечении							
№ п/п	№ ИГЭ (слой)	Тип грунта	Мощность		Плотность грунта	Коэффициент пористости	Число пластичности	Показатель текучести	Коэффициент водонасыщения	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление		Суммарная ширина раскрытия трещин в связ- ных и полусвязных грунтах	Мощность (высота) слоя с учетом глубины заложения фундамента	Общее давление от собственного веса грунта и внешней нагрузки	Критический диаметр полости для обрушения связных грунтов	Максимальный диаметр трубообразного кана- ла-полости в толще связных грунтов	Диаметр полости на кровле слоя ¹		Критический диаметр полости для обрушения несвязных грунтов	быстром		медленном	
			м	г/см³																е	IP		IL	Sr	E	ν
1	1	песок	2,3	1,91	0,663				0,230	35	0,26	38	1		2,3	43,1					0,24					
2	2	глина	15,6	2,01	0,695	22,9	0,125	0,890	38	0,40	20	54	0,390	15,6	350,3	14,0	2,5	2,5	2,5							
3	2	глина	15,6	2,01	0,695	22,9	0,125	0,890	38	0,40	20	54	0,390	15,6	657,6	10,0	2,5	2,5	2,5							
4	2	глина	15,6	2,01	0,695	22,9	0,125	0,890	38	0,40	20	54	0,390	15,6	964,9	8,6	2,5	2,5	2,5							

Рис. 7. Расчет диаметра карстового провала на опорном участке №3

щихся отложений. В результате процесс протекает по классическому сценарию обрушения перекрывающих отложений в полость с формированием на поверхности карстового провала диаметром 22,9 м (рис. 5), что является сопоставимым с зафиксированными диаметрами молодых карстово-суффозионных деформаций (2,5–61,5 м, при среднем значении 18,9 м) на территории опорного участка.

Второй расчет выполнен при условии форми-

рования карстовой полости в карбонатных отложениях. В расчетах в качестве начального размера карстовой полости D_0 принят диаметр 2,5 м, высота h_p 0,9 м, как наиболее часто встречающиеся в пермских карбонатных отложениях на близлежащей территории. Скорость растворения v_r принята как средняя для труднорастворимых скальных грунтов 0,005 м/год, согласно таблице 6.15 СП22.13330.2016. С учетом скорости растворения, за 100 лет конеч-

ный диаметр полости, участвующий в расчетах, составит 3,0 м. Также толща глин (мощность 46,8 м) разбита на 3 равных слоя по 15,6 м, ввиду некорректного расчета ширины раскрытия трещин для слоев мощностью более 20,0 м. В этом случае получаем расчетный диаметр вновь ожидаемого провала на поверхности земли 3,3 м, образующийся за счет разрыхления и обрушения грунтов в вертикальном трубообразном канале-полости (рис. 6).

Для **опорного участка 3** также выполнен расчет (рис. 7) ожидаемого диаметра карстово-суффозионного провала. В качестве начального размера карстовой полости (D_0) принят диаметр 7,4 м, высота (h_p) 7,4 м, в соответствии с полостью вскрытой в данной скважине и условным ее принятием шарообразной формы. Скорость растворения (v_r) принята как средняя для среднерастворимых скальных грунтов 0,050 м/год, согласно таблице 6.15 СП22.13330.2016. С учетом скорости растворения, за 100 лет конечный диаметр полости, участвующий в расчетах, составит 12,4 м. Как видно из расчета, образование карстово-суффозионной деформации на поверхности земли прогнозируется с диаметром 11,3 м.

Разрез опорного участка 3 по данным карстологической скважины представлен переслаиванием песчано-глинистых отложений. Как видно из модели (рис. 7), преобладающим механизмом деформации грунтов является обрушение вышележащих грунтов в полость, только для слоя 5 деформация развивалась за счет трубообразной полости-канала.

Для данного опорного участка схема обрушения схожа с опорным участком 2 при условии развития крупной незаполненной полости в сульфатных породах и их трещиноватости (значения объема полости и аккумуляционной емкости карстующихся пород более тысячи метров кубических), позволяющих перемещение крупных масс

обломочного материала вниз.

Влияние физико-механических свойств и мощности перекрывающих глинистых отложений на результаты расчетного диаметра прогнозируемой карстовой деформации

Для определения влияния физико-механических свойств и мощности перекрывающих отложений на расчетный диаметр провала абстрагируемся от реальных скважин. Рассмотрим идеализированную модель, в которой использованы свойства оксфордско-кимериджских глин юрского возраста (J_3o+km) опорного участка 1 (Московская область), уржумских глин пермского возраста (P_{2ur}) опорного участка 2 (Владимирская область) и свойства уржумских глин (P_{2ur}), полученных по результатам исследований на территории Пермского края (табл. 2). Для каждого слоя выполнены расчеты для мощности 3, 6, 9 и 12 м.

При исследовании характеристик покровных отложений рассмотрим возможный критический диаметр полости, формирующейся на контакте карстующихся пород и перекрывающей толщи, при котором происходит сдвиг последних в полость-приемник. Также определим диаметр вертикального трубообразного канала разрыхления и обрушения грунтов, который может формироваться в глинистых отложениях при их определенных свойствах и мощности.

На первом этапе работы были выполнены расчеты диаметров вновь ожидаемых провалов с использованием свойств, полученных в результате лабораторных исследований в рамках инженерно-геологических изысканий, приведенных в таблице 2. На втором этапе рассчитали ожидаемые диаметры при изменении начальных свойств (плотности грунта (ρ), угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (c)). Шаг изменений для сцепления и угла внутреннего трения принят 20%, для плотности грунта — 10% (шаг изменения значений

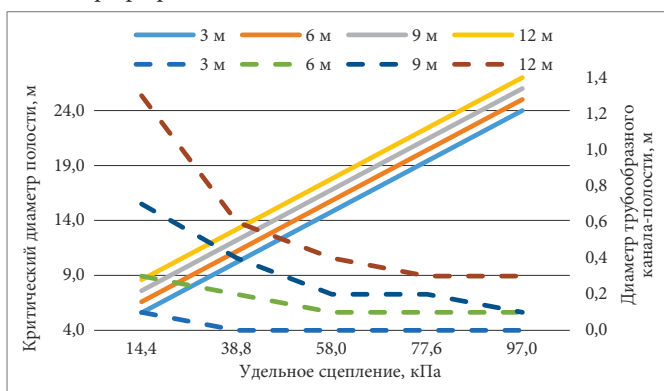
Таблица 2. Физико-механические свойства грунтов, используемых в расчетах

Плотность грунта	Коэффициент пористости	Число пластичности	Показатель текучести	Коэффициент водонасыщения	Модуль деформации	Коэффициент Пуассона	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление
ρ	e	I_p	I_L	S_r	E	ν	φ	c
г/см ³	д.е.	%	д.е.	д.е.	МПа	д.е.	°	кПа
Глина (J_3o+km) Московская область								
1,79	1,069	36,8	-0,04	0,93	30	0,4	17	97
Глина (P_{2ur}) Владимирская область								
2,01	0,695	22,9	0,13	0,89	37	0,4	20	54
Глина (P_{2ur}) Пермский край								
1,90	0,795	18,9	0,34	0,92	14	0,4	15	40

Таблица 3. Изменение критического диаметра при изменении свойств и мощности юрских глин

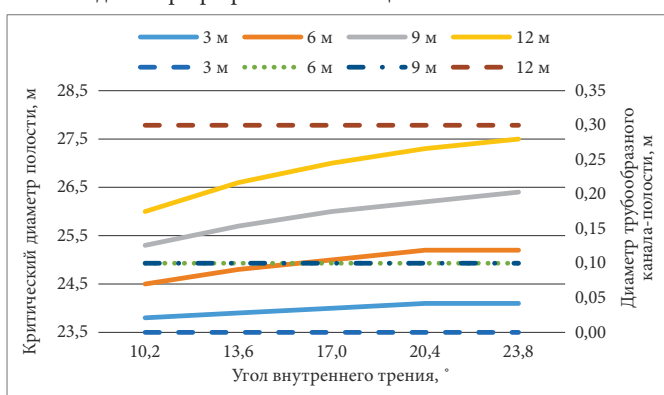
Влияние сцепления на критический диаметр при различной мощности

Удельное сцепление, кПа	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
14,4 (20% от с)	5,6 / 0,1	6,6 / 0,3	7,6 / 0,7	8,6 / 1,3
38,8 (40% от с)	10,2 / -	11,2 / 0,2	12,2 / 0,4	13,2 / 0,6
58,0 (60% от с)	14,8 / -	15,8 / 0,1	16,8 / 0,2	17,8 / 0,4
77,6 (80% от с)	19,4 / -	20,4 / 0,1	21,4 / 0,2	22,4 / 0,3
97,0 (100% от с)	24,0 / -	25,0 / 0,1	26,0 / 0,1	27,0 / 0,3



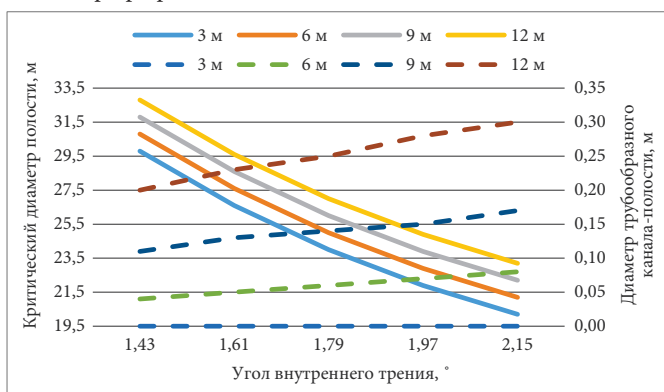
Влияние угла внутреннего трения на критический диаметр при различной мощности

Угол внутреннего трения, °	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
10,2 (60% от ф)	23,8 / -	24,5 / 0,1	25,3 / 0,1	26,0 / 0,3
13,6 (80% от ф)	23,9 / -	24,8 / 0,1	25,7 / 0,1	26,6 / 0,3
17,0 (100% от ф)	24,0 / -	25,0 / 0,1	26,0 / 0,1	27,0 / 0,3
20,4 (120% от ф)	24,1 / -	25,2 / 0,1	26,2 / 0,1	27,3 / 0,3
23,8 (140% от ф)	24,1 / -	25,2 / 0,1	26,4 / 0,1	27,5 / 0,3



Влияние плотности на критический диаметр при различной мощности

Плотность грунта, г/см³	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
1,43 (80% от ρ)	29,8 / -	30,8 / 0,04	31,8 / 0,11	32,8 / 0,20
1,61 (90% от ρ)	26,6 / -	27,6 / 0,05	28,6 / 0,13	29,6 / 0,23
1,79 (100% от ρ)	24 / -	25,0 / 0,06	26,0 / 0,14	27,0 / 0,25
1,97 (110% от ρ)	21,9 / -	22,9 / 0,07	23,9 / 0,15	24,9 / 0,28
2,15 (120% от ρ)	20,2 / -	21,2 / 0,08	22,2 / 0,17	23,2 / 0,30



Сплошными линиями показаны значения критического диаметра карстовых полостей, штрих-пунктирными линиями показаны значения диаметра канала-полости при изменении свойств глин.

прочностных показателей принят в два раза больше плотности, ввиду большей вариации значений этих характеристик в природных условиях для одного и того же грунта).

Результаты расчетов критического диаметра и диаметра канала-полости в зависимости от различной мощности и свойств перекрывающих отложений для глинистых грунтов приведены в таблицах 3–5.

Для глинистых грунтов независимо от возраста наблюдается зависимость увеличения критического

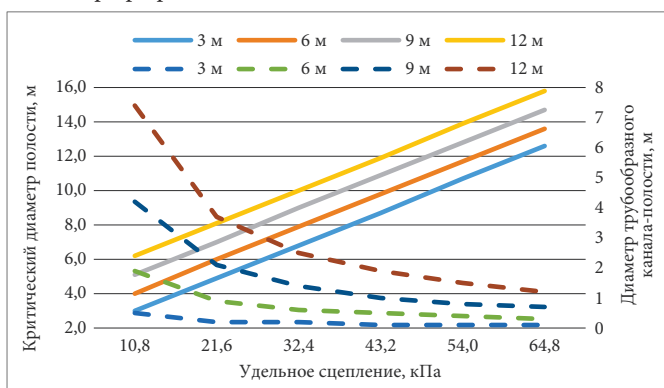
диаметра полости и канала-полости от увеличения мощности, что вполне логично.

Диапазон значений критического диаметра возрастает при изменении угла внутреннего трения только для существенной мощности глин (12,0 м), для минимальной толщи (3,0 м) изменения незначительны. То есть изменения угла внутреннего трения оказывают влияние только в случае мощной толщи глин. В формуле (1) расчета максимального диаметра трубовообразной полости угол внутреннего трения не принимает

Таблица 4. Изменение критического диаметра при изменении свойств и мощности пермских глин на территории Владимирской области

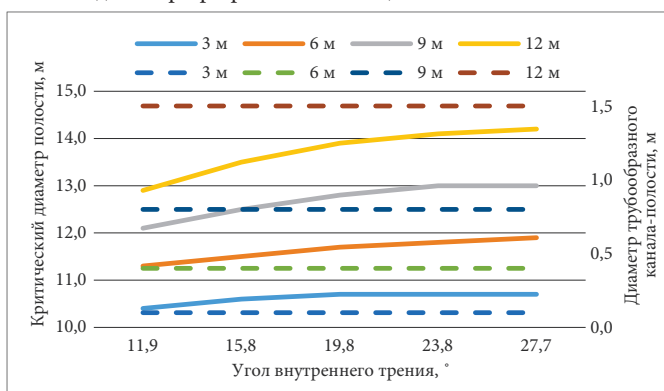
Влияние сцепления на критический диаметр при различной мощности

Удельное сцепление, кПа	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
10,8 (20 % от с)	3,0 / 0,5	4,0 / 1,9	5,1 / 4,2	6,2 / 7,4
21,6 (40 % от с)	4,9 / 0,2	6,0 / 0,9	7,0 / 2,1	8,1 / 3,7
32,4 (60 % от с)	6,8 / 0,2	7,9 / 0,6	9,0 / 1,4	10,0 / 2,5
43,2 (80 % от с)	8,7 / 0,1	9,8 / 0,5	10,9 / 1,0	11,9 / 1,9
54,0 (100 % от с)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
64,8 (120 % от с)	12,6 / 0,1	13,6 / 0,3	14,7 / 0,7	15,8 / 1,2



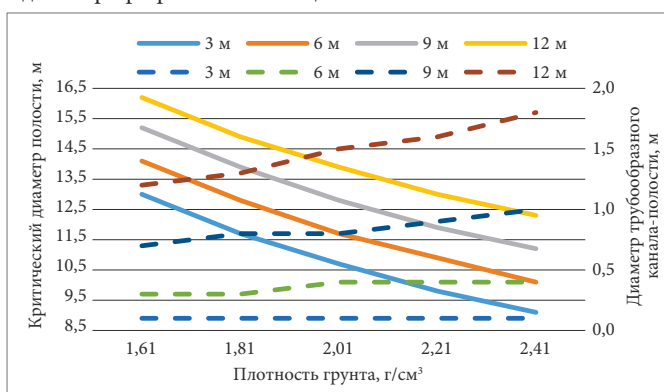
Влияние угла внутреннего трения на критический диаметр при различной мощности

Угол внутреннего трения, °	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
11,9 (60% от ф)	10,4 / 0,1	11,3 / 0,4	12,1 / 0,8	12,9 / 1,5
15,9 (80% от ф)	10,6 / 0,1	11,5 / 0,4	12,5 / 0,8	13,5 / 1,5
19,8 (100% от ф)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
23,8 (120% от ф)	10,7 / 0,1	11,8 / 0,4	13,0 / 0,8	14,1 / 1,5
27,7 (140% от ф)	10,7 / 0,1	11,9 / 0,4	13,0 / 0,8	14,2 / 1,5



Влияние плотности на критический диаметр при различной мощности

Плотность грунта, г/см³	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
1,61 (80% от ρ)	13,0 / 0,1	14,1 / 0,3	15,2 / 0,7	16,2 / 1,2
1,81 (90% от ρ)	11,7 / 0,1	12,8 / 0,3	13,9 / 0,8	14,9 / 1,3
2,01 (100% от ρ)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
2,21 (110% от ρ)	9,8 / 0,1	10,9 / 0,4	11,9 / 0,9	13,0 / 1,6
2,41 (120% от ρ)	9,1 / 0,1	10,1 / 0,4	11,2 / 1,0	12,3 / 1,8



* Сплошными линиями показаны значения критического диаметра карстовых полостей, штрих-пунктирными линиями показаны значения диаметра канала-полости при изменении свойств глин.

участие, поэтому при изменении значений угла внутреннего трения диаметр остается постоянным.

Выявлена зависимость увеличения критического диаметра при увеличении значений сцепления и обратная зависимость при увеличении плотности грунта, независимо от мощности глинистых грунтов. При этом, для показателя трубообразного канала-полости наблюдается обратная картина:

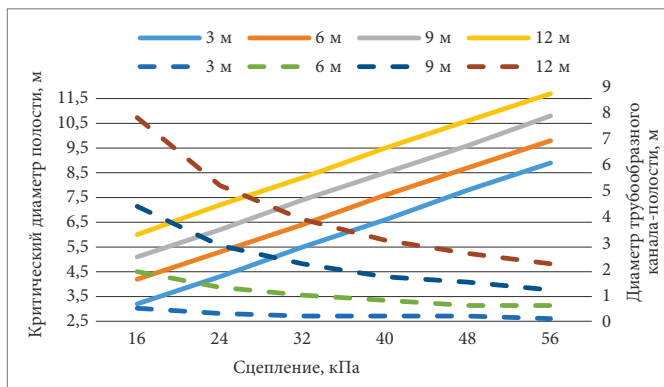
с увеличением сцепления диаметр уменьшается, а при увеличении плотности грунта — растет.

Можно сделать вывод, что удельное сцепление оказывает наибольшее влияние на изменение значений критического диаметра полости и канала-полости, на втором месте по значимости находится плотность грунта, и незначительное влияние оказывает изменение угла внутреннего трения.

Таблица 5. Изменение критического диаметра при изменении свойств и мощности пермских глин на территории Пермского края

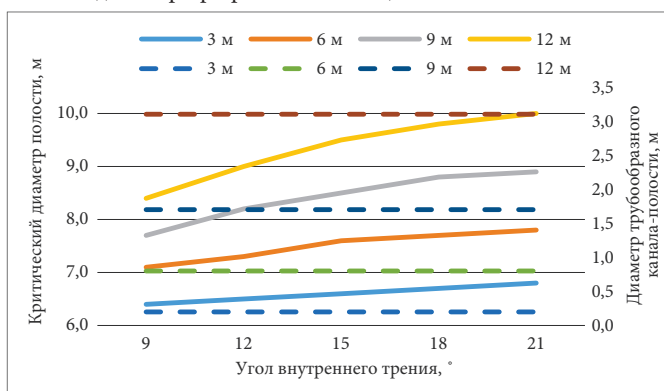
Влияние сцепления на критический диаметр при различной мощности

Удельное сцепление, кПа	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
10,8 (20 % от с)	3,0 / 0,5	4,0 / 1,9	5,1 / 4,2	6,2 / 7,4
21,6 (40 % от с)	4,9 / 0,2	6,0 / 0,9	7,0 / 2,1	8,1 / 3,7
32,4 (60 % от с)	6,8 / 0,2	7,9 / 0,6	9,0 / 1,4	10,0 / 2,5
43,2 (80 % от с)	8,7 / 0,1	9,8 / 0,5	10,9 / 1,0	11,9 / 1,9
54,0 (100 % от с)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
64,8 (120 % от с)	12,6 / 0,1	13,6 / 0,3	14,7 / 0,7	15,8 / 1,2



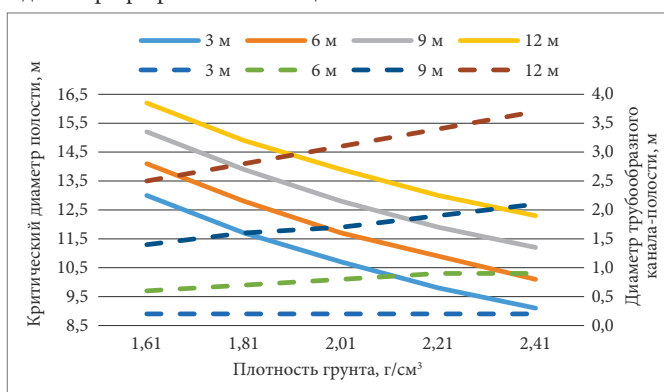
Влияние угла внутреннего трения на критический диаметр при различной мощности

Угол внутреннего трения, °	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
11,9 (60% от ф)	10,4 / 0,1	11,3 / 0,4	12,1 / 0,8	12,9 / 1,5
15,9 (80% от ф)	10,6 / 0,1	11,5 / 0,4	12,5 / 0,8	13,5 / 1,5
19,8 (100% от ф)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
23,8 (120% от ф)	10,7 / 0,1	11,8 / 0,4	13,0 / 0,8	14,1 / 1,5
27,7 (140% от ф)	10,7 / 0,1	11,9 / 0,4	13,0 / 0,8	14,2 / 1,5



Влияние плотности на критический диаметр при различной мощности

Плотность грунта, г/см³	Критический диаметр полости / диаметр полости-канала при мощности глин			
	3 м	6 м	9 м	12 м
1,61 (80% от ρ)	13,0 / 0,1	14,1 / 0,3	15,2 / 0,7	16,2 / 1,2
1,81 (90% от ρ)	11,7 / 0,1	12,8 / 0,3	13,9 / 0,8	14,9 / 1,3
2,01 (100% от ρ)	10,7 / 0,1	11,7 / 0,4	12,8 / 0,8	13,9 / 1,5
2,21 (110% от ρ)	9,8 / 0,1	10,9 / 0,4	11,9 / 0,9	13,0 / 1,6
2,41 (120% от ρ)	9,1 / 0,1	10,1 / 0,4	11,2 / 1,0	12,3 / 1,8



* Сплошными линиями показаны значения критического диаметра карстовых полостей, штрих-пунктирными линиями показаны значения диаметра канала-полости при изменении свойств глин.

Наибольший диапазон и максимальные значения критического диаметра отмечены у юрских глин (табл. 3). Для них характерны значения диаметра более 15 м, при этом значения сцепления, которое оказывает наибольшее влияние, для юрских глин достаточно высокие. Высокое значение сцепления, в свою очередь, обуславливает маленькие (менее 0,5 м) диаметры трубообразного канала-по-

лости, которые не приводят к явной деформации на поверхности земли. В таблице 3 при сцеплении 14,4 кПа выявлено увеличение в диаметрах трубообразного канала-полости, особенно при мощности глин более 10 м. следует отметить, что значения менее 30 кПа для юрских глин не характерны, следовательно, провалообразование за счет одномоментного обрушения грунтов в полость можно

исключить. Юрские отложения, распространенные на территории Москвы и Московской области, являются, как правило, надежной защитой от выхода карстовых полостей на поверхность в виде провалов, так как полости таких критических диаметров, необходимых для полного обрушения, не формируются в карбонатных грунтах каменноугольного возраста, распространенных на данной территории, что подтверждается многочисленными инженерно-геологическими скважинами. Также аккумуляционная емкость карбонатных пород на территории Москвы, показывающая, сколько обломочного материала может вместить в себя карстовый массив в случае формирования карстового провала, достигает первых десятков кубических метров, что несоизмеримо меньше объема, который должен будет переместиться вниз в случае провала. По этой причине для г. Москвы разработана и применяется при оценке карстоопасности своя Инструкция по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям [9].

Глины пермского возраста имеют широкое распространение на территории центральной России и входят в состав перекрывающей толщи как для карбонатных, так и для сульфатных пород, в которых размер карстовых полостей может быть близок к значениям критического диаметра (табл. 4–5). При этом свойства пермских глин сильно изменяются в связи с включениями в них разнообразных прослоев (песчаников, мергелей и других пород). Для данных отложений не исключен сценарий развития в перекрывающих отложениях каналов-полостей с диаметрами до 10 м. При этом часто в многослойных разрезах провалообразование обусловлено комбинацией двух моделей, часть слоев обрушается в нижележащую полость, а в части развивается вертикальный трубообразный канал разрыхления и обрушения грунтов, по которому происходит миграция дисперсного материала в нижележащую полость-приемник.

Результаты и их обсуждение

Таким образом, наличие мощной перекрывающей глинистой толщи не исключает процесс провалообразования. При анализе условий и факторов развития карста важно обращать внимание на генезис, возраст, сложение перекрывающей глинистой толщи и литологию карстующихся грунтов. Как видно из таблицы 1, юрские и каменноугольные глины, обеспечивающие в условиях развития карста г. Москвы надежную защиту, обладают очень высоким удельным сцеплением, тогда как пермские глинистые отложения имеют значительно меньшие значения удельного сцепления, а также характеризуются наличием различных включений

и прослоев. В случаях, когда на поверхности видны карстовые формы, конечно, исключать развитие процесса нельзя. Когда же этих форм, на первый взгляд, нет, а перекрывающая глинистая толща достаточно мощная и есть соблазн рекомендовать неопасную категорию в карстово-суффозионном отношении, т.е. исключить провалообразование, все-таки необходимо свои прогнозы подтверждать расчетом либо моделированием, только в этом случае будет минимизирована вероятность ошибки, а с ней и недооценка карстового процесса.

Выявлена зависимость между свойствами перекрывающих отложений и их способностью препятствовать сдвигу «столба» грунта по цилиндрической поверхности в полость-приемник, согласно модели А. Бирбаумера. Модель предусматривает постепенный рост подземной полости до тех пор, пока удерживающая сила (действия удельных сил трения и сцепления грунтов по боковой поверхности смещения цилиндра) превысит сдвигающую силу (вес вышележащих пород). Помимо образования провалов за счет одномоментного сдвига вышележащих грунтов в полость, процесс провалообразования также протекает в результате разрыхления и обрушения грунтов в вертикальных трубообразных каналах по ослабленным трещиноватым зонам.

Установлено, что для глинистых грунтов независимо от возраста наблюдается зависимость увеличения критического диаметра полости и канала-полости от увеличения мощности. Независимо от мощности глинистых грунтов выявлено увеличение критического диаметра при увеличении значений сцепления, и обратная зависимость при увеличении плотности грунта. Изменение угла внутреннего трения оказывает влияние только в случае мощной толщи глин (с увеличением угла внутреннего трения увеличивается значение критического диаметра).

На графиках хорошо видно, что с ростом критического диаметра полости диаметр канала-полости уменьшается, и наоборот, что также является показателем влияния физико-механических свойств грунта. С увеличением удельного сцепления и уменьшением плотности грунта (вес вышележащих грунтов снижается) ширина трубообразного канала-полости в перекрывающих глинистых отложениях уменьшается, и слой может удерживаться над полостью как можно дольше (пока полость в карстующихся отложениях не достигнет критического диаметра).

Можно сделать вывод, что сцепление имеет наибольшее влияние на изменение значений критического диаметра и диаметра полости-канала, на втором месте по значимости находится плотность

грунта, и незначительное влияние оказывает изменение угла внутреннего трения.

Вместе с вышеизложенными результатами, касающимися возможности проявления карста на поверхности, необходимо обратить внимание, что наличие глинистой толщи, обеспечивающей защиту от провалообразования, не гарантирует отсутствие подземных форм карста и безопасности подземной части сооружений (фундаментов глубокого заложения).

Ярким примером этого является участок, расположенный вблизи г. Покров Владимирской области. Геологический разрез схож с разрезом Московской области: перекрывающие отложения — песчаные четвертичные образования, твердые глины юрского возраста, карстующиеся грунты — каменноугольные известняки. С поверхности также развита мощная толща торфов, что косвенно является признаком неопасной территории в отношении карста. В разрезе присутствует надежная водоупорная толща юрских глинистых отложений мощностью 18 м. Водоносных горизонтов два: безнапорный грунтовый и напорный трещинно-карстовый.

Поверхностные карстовые формы в пределах участка не выявлены. При оценке карстоопасности описываемого участка, исходя из мощности и свойств глинистых отложений, отсутствия поверхностных карстовых форм, категория опасности в карстово-суффозионном отношении предварительно была определена как неопасная (согласно СП 22.13330.2016, изм. 3). Однако на более детальной стадии исследований при проходке инженерно-геологических скважин под опоры искусственного сооружения была вскрыта полость высотой 1,5 м на контакте перекрывающих глинистых и карстующихся карбонатных пород. Дополнительные исследования установили, что размеры полости в плане составляют не менее 7,5 м. Учитывая подземную закарстованность данный участок оценивается как потенциально

опасный в карстово-суффозионном отношении (согласно СП 22.13330.2016, изм. 4). Принимая во внимание карстологические условия, маловероятно, что эта полость выйдет на поверхность, но она может создать риск потери устойчивости свайного фундамента, проектная глубина заложения которого была принята на 2 м выше кровли карстовой полости.

Выводы

При оценке карстоопасности территории необходимо учитывать не только мощность перекрывающих глинистых отложений, но и их возраст, генезис, сложение и физико-механические свойства. Следует принимать во внимание тот факт, что часто процесс провалообразования при наличии перекрывающей толщи глинистых грунтов идет не по классическому механизму, а с образованием в глинах полостей-каналов. Продемонстрирована прямая зависимость их диаметров от мощности перекрывающих отложений. Выявлено, что наибольшее влияние на значения расчетных диаметров оказывает сцепление и плотность грунтов.

Возможность образования и диаметры поверхностных карстовых форм целесообразно проверять расчетом с использованием аналитических формул или компьютерного моделирования, не полагаясь лишь на величину мощности перекрывающей глинистой толщи. Наличие мощной водоупорной перекрывающей толщи, обеспечивающей защиту от поверхностных карстопроявлений, не исключает наличие подземных полостей и риска потери устойчивости фундаментов глубокого заложения. Исследованию подземной закарстованности в таких случаях надо уделить особое внимание. Также необходимо отметить, что в активности развития провалообразования определяющую роль играет литологический тип карста, однако, к сожалению, в действующей редакции СП 22.13330.2016 в признаках процесса этот пункт отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчук В. Н. Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. — Черновицы : Прут, 1999. — 52 с.
2. Аникеев А. В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах : механизмы образования, прогноз и оценка риска. — М., РУДН, 2017. — 328 с.
3. Бажутин П. И. Прогноз и оценка карстово-суффозионных деформаций // Геология в развивающемся мире : сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / отв. ред. А. М. Циферова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. — Пермь, 2020. — С. 554–557.
4. Всеволожский В. А. Основы гидрогеологии : учебник. — М., Изд-во МГУ, 2007. — 448 с.
5. Галошин О. А., Ильина И. И. Пивоваровский карстовый участок // Инженерные изыска-

- ния в строительстве : реферативный сборник. Сер. 5. — 1968. — № 12. — С. 34–37.
6. Дробинина Е. В., Катаев В. Н. Изучение изменчивости физико-механических свойств перекрывающих отложений в карстологическом прогнозе // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. — 2021. — Том 7 (73). — № 2. — С. 316–330.
7. Дробинина Е. В., Катаев В. Н. Покровная толща карстовых массивов : изучение в целях карстологического прогноза. // Природа. — 2019. — № 11. — С. 62–72.
8. Дублянский В. Н., Дублянская Г. Н., Катаев В. Н. и др. Карстоведение. Ч. 3 Инженерное карстоведение : учеб. пособие. — Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2011. — 288 с.
9. Инструкции по инженерно-геологическим и геоэкологическим изысканиям в г. Москве. — М. : Правительство Москвы ; Мосархитектура. — 2004.
10. Катаев В. Н. Отчет о научно-исследовательской работе «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области». — Пермь, 2010.
11. Катаев В. Н., Щербаков С. В., Золотарев Д. Р., Лихая О. М., Ковалева Т. Г. Влияние геологического строения территории на распределение карстовых форм (на примере территории г. Кунгура) // Вестник Пермского университета. Геология. — 2009. — № 11. — С. 77–93.
12. Кивилева З. В., Бажутин П. И., Щербаков С. В. Влияние мощности перекрывающей толщи на интенсивность развития карста (на примере Мосальского района Калужской области) // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. — Пермь, 2019. — С. 308–312.
13. Ковалёва Т. Г., Кивилева З. В., Юркина А. Р. Применение методики послойного аналитико-графического моделирования для определения расчетного диаметра карстового провала // Геология и полезные ископаемые Западного Урала (90-летию геологического факультета посвящается) : сборник научных статей / под общ. ред. П. А. Красильникова ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. — 2021. — Вып. 4 (41). — С. 263–167.
14. Ковалёва Т. Г., Селина З. В., Чижова В. А., Новикова А. А. Влияние глинистых отложений на активность развития карста // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта — 1 апреля 2022 г.). — М. : ГеоИнфо, 2022. — С. 187–192.
15. Кочев А. Д. Изучение механизма образования карстово-суффозионных воронок в г. Москве // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы шестнадцатой общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, М., 01–03 декабря 2021 года / ООО «Геомаркетинг» ; ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве» ; Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве» — Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. — М. : Геомаркетинг, 2021. — С. 105–120. — EDN AVXTHJ.
16. СП 11–105–97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. — М. : Госстрой России, 2000. — 94 с.
17. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. — М. : Минрегион России, 2016. — 224 с.
18. Ступишин А. В. Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. — Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1967.
19. Толмачев В. В., Троицкий Г. М., Хоменко В. П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. — М., 1986. — 176 с.
20. Хоменко В. П. Карстово-обвальные провалы «простого» типа : полевые исследования // Инженерная геология. — 2009. — № 4. — С. 40–48.
21. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. — М. : Трансжелдориздат, 1953. — 827 с.
22. Шварцев С. Л. Общая гидрогеология : учебн. для вузов. — М. : Недра, 1996. — 423 с.
23. Khomenko V. P., Leonenko M. V. The collapse of clays covering a karst cavity : in-situ investigation, conceptual model and prediction // Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development : Proceedings of the XVI ECSMGE, Edinburgh, UK, 13–17 September 2015. Vol. 4 : Slopes and Geohazards. — ICE Publishing, 2015. — P. 2269–2274.