

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

УДК 551

Стохастический учет физико-механических свойств грунтов и данных о закарстованности массива в расчетных методах прогноза параметров карстовых провалов

П.И. Бажутин, В.Н. Катаев, С.В. Щербаков

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, г. Пермь, ул. Букирева 15. E-mail: pavel.bazhutin.96@mail.ru, kataev@psu.ru,
greyvr@mail.ru

(Статья поступила в редакцию 28 ноября 2022 г.)

В данной статье рассматривается проблема вычисления морфометрических параметров возможных карстовых форм расчетными методами прогноза. Прогнозный диаметр карстового провала является важнейшим параметром при проектировании сооружений в районах развития карста, а современные требования нормативной документации указывают на обязательное применение именно расчетных методов прогноза. Несмотря на это, на сегодняшний день не существует единого подхода, способного обеспечить получение истинного результата в различных геологических условиях. В статье предлагается авторский подход, позволяющий повысить точность прогнозирования, а также получить количественное описание достоверности расчетного диаметра возможной карстовой формы.

Ключевые слова: *карст, карстовый провал, расчетный диаметр, расчетные методы прогноза, детерминистический подход.*

DOI: 10.17072/psu.geol.22.2.121

Введение

Детерминистические методы расчета карстовых провалов в последнее время стали неотъемлемой частью инженерно-карстологических изысканий. Данный факт обоснован требованиями нормативной документации (п. 6.12.12 СП 22.13330.2016). Правомерность таких требований широко обсуждается в научных кругах (Толмачев, 2010; Толмачев, Леоненко, 2018) и является одним из наиболее острых вопросов к нормативной документации, регулирующей проведение инженерно-геологических изысканий в районах развития карста. Однако, несмотря на имеющиеся дискуссии, существует устойчивый запрос на развитие детерминистических подходов к оценке диаметров прогнозируемых карстовых провалов.

Учитывая многообразие механизмов образования карстовых провалов, большинство

существующих методов расчета основаны на модели Бирбаумера, представляющей собой срез столба грунта над карстовой полостью по круглоцилиндрической поверхности. Применимость такой модели обоснована лишь при определенном геологическом строении массива. Несмотря на это, популярность схематизации карстового процесса по модели Бирбаумера обусловлена не столько ее научной точностью, а простотой, позволяющей учесть послойное строение и свойства массива (Аникеев, 2017).

Как известно, ни один подход к расчету карстовых провалов не может гарантировать получение истинного результата, а результаты, полученные при использовании различных методик в одних геологических условиях, далеко не всегда будут соответствовать друг другу. Такое обстоятельство объясняется несовершенством существующих подходов, сложностью процесса, а так-

же невысокой степенью достоверности исходных данных.

Только лишь в случае наличия достоверных исходных данных мы вправе делать вывод о точности и правомерности использования той или иной прогнозной модели. В целом, исходные данные, учитываемые при вычислении параметров возможных карстовых деформаций, можно разделить на два крупных блока:

- физико-механические свойства покровных отложений;

- данные о закарстованности толщи растворимых пород.

Как уже было сказано выше, существующие детерминистические подходы к прогнозу диаметров карстовых провалов основаны на схематизации обрушения толщи отложений, перекрывающих карстовую полость, по круглоцилиндрической поверхности, где ведущую роль играют физико-механические свойства грунтов. Однако определение истинных свойств грунтового массива является проблемой, неразрешенной на сегодняшний день, что широко рассматривается в статье Е.Н. Богданова и А.Е. Богданова (2003).

Не менее важной является проблема оценки закарстованности карстующейся толщи. По мнению А.В. Аникеева (2019), определяющую роль в протекании карстовых процессов играет аккумуляционная емкость растворимых пород, отображающая способность массива принимать и накапливать обломочный материал. Стоит отметить, что аккумуляционная емкость толщи растворимых пород в большей степени определяется трещинным пространством массива и в меньшей – объемом незаполненных карстовых полостей.

В зоне активного водообмена преимущественное гидрогеологическое значение для подземного стока имеют расширенные локальным растворением межпластовые трещины. Их вертикальные размеры (раскрытость) изменяются от 0,1 до 0,5, реже – 0,7 м, преимущественно в местах расширения трещин растворением. В зонах локализации подземного стока, где перемещение вод так же, как и в межпластовых пространствах, субгоризонтально, преимущественное развитие получают каналовые и гротообразные

полости, разделенные участками трещинной проницаемости. Иными словами, зоны локализации подземных вод имеют четкообразное строение по типу «*полость-трещина-полость*». Полости, вскрываемые скважинами в зоне горизонтальной циркуляции трещинно-карстовых вод, часто обводнены, при этом только полости зон локализации подземного стока имеют практически круглогодичное обводнение, остальные – в многоводные периоды года. В межводные периоды карстовый массив максимально сдренирован. Вертикальные размеры полостей, вскрываемых скважинами, изменяются в широких пределах от долей метра до первых десятков метров. Статистическое обобщение сведений о размерах более чем 1000 карстовых полостей в районах развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста Пермского края свидетельствует о том, что вертикальные размеры полостей изменяются от 0,1 м до 18 м при их среднем значении – 1,9 м (Катаев, 2019).

Приведенная информация свидетельствует о сложности получения достоверных данных о морфометрии трещинно-полостного пространства закарстованного массива и его гидрогеологической активности, а неверный учет физико-механических свойств покровных грунтов, даже в случае выбора корректной методики определения расчетного диаметра карстового провала, может привести к результату, не соответствующему действительности.

Методика выполнения исследования

В основе выполненного исследования заложена методика вычисления параметров карстово-суффозионных деформаций с помощью послойного аналитико-графического моделирования, разработанная сотрудниками ПГНИУ. Данная методика является модификацией подхода, предложенного А.В. Аникеевым (2017).

Вычисление параметров провала по данной методике основывается на анализе геологического разреза, при котором для каждого отдельного грунтового слоя определяется наиболее вероятный механизм деформирования над полостью и рассчитываются параметры этих деформаций.

Одним из главных параметров, регулирующих механизм деформирования, является критический диаметр карстовой полости, при котором произойдет обрушение грунтового слоя. Определение критического диаметра полости (D_{cr}) для связных грунтов по принятой методике производится по формуле 1:

$$D_{cr} = 2m \left(\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \tan \phi + \frac{2c(1-I_L)}{\sigma_{z,p}} \right), \quad (1)$$

где

- m – мощность грунтовых слоев, м;
- ϕ – угол внутреннего трения, градус;
- c – удельное сцепление, кПа;
- I_L – показатель текучести, д.е.;
- $\sigma_{z,p}$ – давление от собственного веса грунта и нагрузки от сооружения на глубине залегания полости, кПа.

Согласно данной формуле, наибольшую роль в устойчивости слоя грунта над полостью имеют его мощность и прочностные показатели отложений: удельное сцепление (c) и угол внутреннего трения (ϕ). Очевидно, что неверная оценка этих параметров неминуемо приведет к завышенным или заниженным результатам расчетного диаметра карстового провала.

Согласно ГОСТ 20522-2012, грунтовая единица массива считается однородной, ес-

ли мера отклонения опытных данных составляет не более 15% для физических и не более 30% для механических свойств грунтов. Даже такие допустимые отклонения исходных данных способствуют неверной оценке критического диаметра до 50%.

Для примера рассмотрим грунтовый слой, параметры которого будут использованы в дальнейших расчетах. В табл. 1 приведены мощность и нормативные значения физико-механических свойств расчетного грунтового слоя. Однако, допустив факт изменения механических свойств грунтового слоя в пределах возможных 30%, возникает заметное изменение критического диаметра карстовой полости, при котором произойдет обрушение слоя.

Учитывая приведенные значения, отметим, что процент отклонения механических свойств грунтов практически в равной степени совпадает с отклонением значений критического диаметра полости, при котором происходит обрушение вышележащих грунтов. Необходимо иметь в виду, что полученный результат может характеризоваться еще большими значениями, если принять во внимание факт неоднородности еще и физических свойств грунтового слоя.

Таблица 1. Сравнение вычисленных критических диаметров карстовой полости при изменении нормативных значений физико-механических свойств грунтового слоя на 30%

Условие, согласно которому приняты физико-механические свойства грунтового слоя	Мощность	Плотность грунта	Показатель текучести	Угол внутреннего трения	Удельное сцепление	Критический диаметр полости для обрушения связных грунтов
	m	ρ	I_L	ϕ	c	D_{cr}
	м	г/см ³	д.е.	°	кПа	м
Нормативные значения физико-механических свойств	5,5	1,75	0,40	15,0	27,0	5,51
Значения физико-механических свойств в случае снижения нормативных значений на 30%	5,5	1,75	0,40	10,5	18,9	4,05
Значения физико-механических свойств в случае завышения нормативных значений на 30%	5,5	1,75	0,40	19,5	35,1	6,85
Среднее значение				15,0	27,0	5,47
Коэффициент вариации, %				30%	30%	26%

Обычно полости критического диаметра в основании толщи связных грунтов формируются крайне редко и, как правило, приводят к образованию катастрофических провалов на дневной поверхности. Чаще процесс идет по другому сценарию, при котором на участках развития тектонических и структурных трещин, пронизывающих массивы пород, в толще связных грунтов могут быть сформированы субвертикальные трубообразные каналы-полости. Такие каналы всегда приурочены к наиболее ослабленным участкам массива, характеризующимся повышенной трещиноватостью и раздробленностью грунтов покровной толщи. Формирование трубообразных полостей происходит при частых колебаниях уровней трещинно-карстовых вод и обычно растянуто во времени на десятилетия и даже сотни лет.

В целом, механика процесса формирования и развития трубообразных полостей до сих пор изучена слабо. Диаметр и форма в профиле полостей канального типа зависят от свойств грунтов, их мощности и интенсивности трещиной раздробленности. Для определения максимального диаметра трубообразной полости, пронизывающей толщу связных грунтов, рекомендуется пользоваться следующей эмпирической зависимостью (2):

$$D_{pipe} = e^{1L} D_{fis} \frac{9,8\rho m}{c}, \quad (2)$$

где

e – коэффициент пористости, д.е.;

ρ – плотность грунта, г/см³;

D_{fis} – суммарная ширина раскрытия трещин в связных грунтах, м.

Определение величины ширины раскрытия трещин является весьма условным и может быть по-разному интерпретировано разными геологами, наиболее точно ширина трещин определяется по анализу керна.

Однако сколь точной бы ни была оценка поведения слоя грунта над полостью, проведение таких расчетов может оказаться лишним смыслом, если емкостные свойства закарстованной толщи являются недостаточными для аккумуляции вышележащих отложений. Учитывая невозможность однозначного определения емкостных параметров толщи растворимых пород, любые про-

гнозные расчеты будут основаны на допущениях разной степени значимости.

Такое обстоятельство дополнительно осложняется тем, что принимаемые допущения являются субъективным выбором исследователя, обоснованным его знаниями о геологическом строении участка и понимании кинематики протекания процесса в целом. В конечном итоге, единожды проведенное вычисление может оказаться весьма отдаленным от истины.

Ввиду вышесказанного, авторами статьи предлагается дополнительно учитывать стохастическую роль физико-механических свойств грунтов и параметров закарстованности в детерминистических расчетах диаметров возможных карстовых провалов.

Обоснование выбора территории исследования

Для исследований, в качестве пилотных, были выбраны участки в пределах территории г. Кунгура (рис. 1).

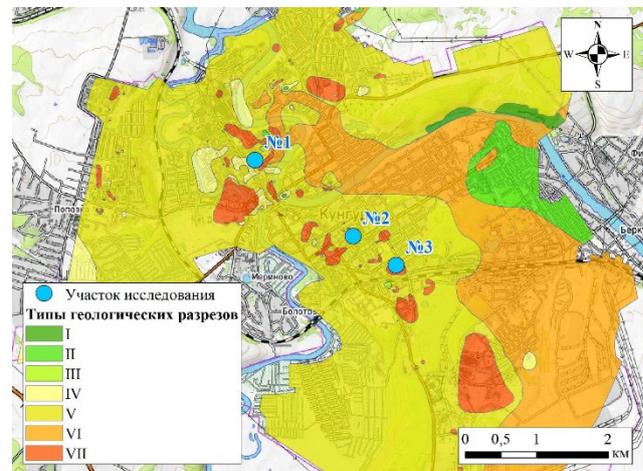


Рис. 1. Распространение типов геологического разреза и положение исследуемых участков

Территория города располагается в сложных структурно-тектонических и геолого-гидрогеологических условиях, в пределах западного крыла Уфимского вала. Карстующаяся толща представлена породами кунгурского яруса пермской системы. В свою очередь, кунгурский ярус стратиграфически подразделяется на филипповский и иренский горизонты. В геологическом разрезе данных

горизонтов преимущественное развитие получили карбонатные и карбонатно-сульфатные отложения соответственно.

С середины 30-х – конца 40-х гг. XX в. по настоящее время в пределах г. Кунгура было выполнено большое количество инженерно-карстологических исследований. С середины 60-х гг. XX в. Кунгурским стационаром Горного института УрО РАН и Верхне-КамТИСИЗ были выполнены наиболее масштабные исследования, представленные изучением инженерно-геологических условий территории, фиксацией карстовых проявлений и систематизацией имеющихся материалов. Так, для этой территории имеются данные более чем по 3000 буровым скважинам, а в результате карстологического мониторинга за 55–60 лет в северной части города зафиксировано 386 карстовых провалов. Для северной части города, учитывая ее площадь и срок наблюдения, согласно СП 11-105-97, ч. II (табл. 5.1–5.2), характерна II категория устойчивости относительно интенсивности провалообразования с ориентировочным значением 0,2 шт./км²/год.

Учитывая степень изученности геологического строения г. Кунгура, а также материалы фиксации провалов в момент их образования, территория города является уникальным объектом для апробации методик и подходов к оценке карстовой опасности.

Характеристика исследуемых участков

В пределах г. Кунгура выделены 7 генерализованных типов геологического разреза, определяющих устойчивость территории города (Катаев и др., 2009). Ввиду того, что по территории города типы разреза распространены неравномерно и существенно отличаются по степени карстовой опасности, для апробирования рассматриваемого в статье подхода к оценке диаметра возможных карстовых форм были выбраны 3 участка, характеризующиеся различными типами геологического строения (IV, V и VII типы геологического разреза). Выбранные типы наиболее закарстованы и распространены на 71,3% территории города – в их пределах зафиксировано 95,3% всех проявлений карста: провалов, воронок, полостей. Типы геологического разреза представляют собой со-

четание карстующихся и перекрывающих отложений различного состава и генезиса:

– тип IV – переслаивающиеся сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта перекрыты четвертичными аллювиально-делювиальными отложениями;

– тип V – переслаивающиеся сульфатно-карбонатные отложения иренского горизонта перекрыты обвальными карстовыми отложениями неоген-четвертичного возраста, которые в свою очередь покрыты четвертичными аллювиально-делювиальными отложениями;

– тип VII – сульфатные отложения иренского горизонта перекрыты обвальными карстовыми отложениями неоген-четвертичного возраста, которые в свою очередь покрыты четвертичными аллювиально-делювиальными отложениями.

Необходимо отметить, что, несмотря на генерализацию типов геологического разреза, инженерно-геологические условия даже в пределах одного типа разреза могут являться принципиально различными. Вследствие чего в пределах одного типа геологического строения механизмы образования карстовых деформаций могут значительно отличаться. В связи с этим в пределах территорий с IV, V и VII типом геологического разреза были выделены квазиоднородные участки, для которых характерны единые механизмы образования карстовых провалов. Важно отметить, что даже в одних инженерно-геологических условиях механизм провалообразования может быть отличен, поэтому правильнее в данном контексте именовать его как механизм образования провалов в общем случае.

В табл. 2 приведена характеристика участков относительно количества и параметров зафиксированных карстовых провалов в момент их возникновения, а также сведения о встреченных карстовых полостях в ходе бурения геологических скважин.

В целом, можно отметить, что рассматриваемые участки отличаются высокой степенью закарстованности. Однако, несмотря на их малую площадь и однородное геологическое строение, в пределах участков 1 и 3 отмечается бимодальное распределение карстовых форм, указывающее на различные механизмы провалообразования (рис. 2), что дополнительно подтверждает необъектив-

ность проведения единичного расчета параметров возможной карстовой формы.

Учитывая вышесказанное, кажется очевидным, что утверждать об объективности прогнозной модели можно лишь в том случае, если в результате многочисленных вычислений, включающих в себя стохастический учет физико-механических свойств грунтов и данные о закарстованности растворимой толщи, кривые распределения

диаметров расчетных и фактически зафиксированных провалов имеют идентичный вид. При этом наличие верифицированной и объективной прогнозной модели не может гарантировать получение истинного расчетного диаметра возможного карстового провала в конкретной точке исследования до тех пор, пока в модель не будут внесены максимально точные данные о геологическом строении участка.

Таблица 2. Карстологическая характеристика участков исследований

Номер исследуемого участка	Тип геологического строения	Площадь участка, км ²	Карстовые провалы				Карстовые полости				Механизм образования провалов в общем случае
			количество, шт.	диаметр, м			количество, шт.	вертикальные размеры, м			
				мин.	макс.	средн.		мин.	макс.	средн.	
1	IV	0,07	9	0,3	14,5	2,5	5	0,4	3,5	1,6	карстово-суффозионно-обвальный
2	V	0,06	8	0,9	5,0	2,1	10	0,2	10,0	3,1	карстово-обвальный
3	VII	0,04	8	1,5	10,0	4,3	3	1,0	1,5	1,3	карстово-обвальный

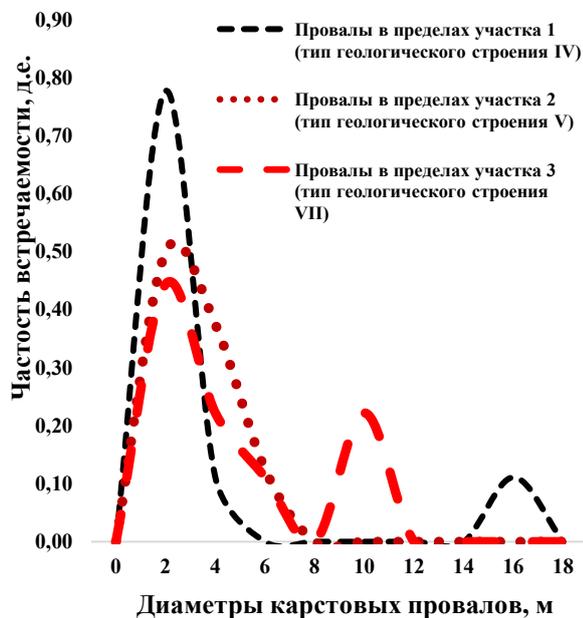


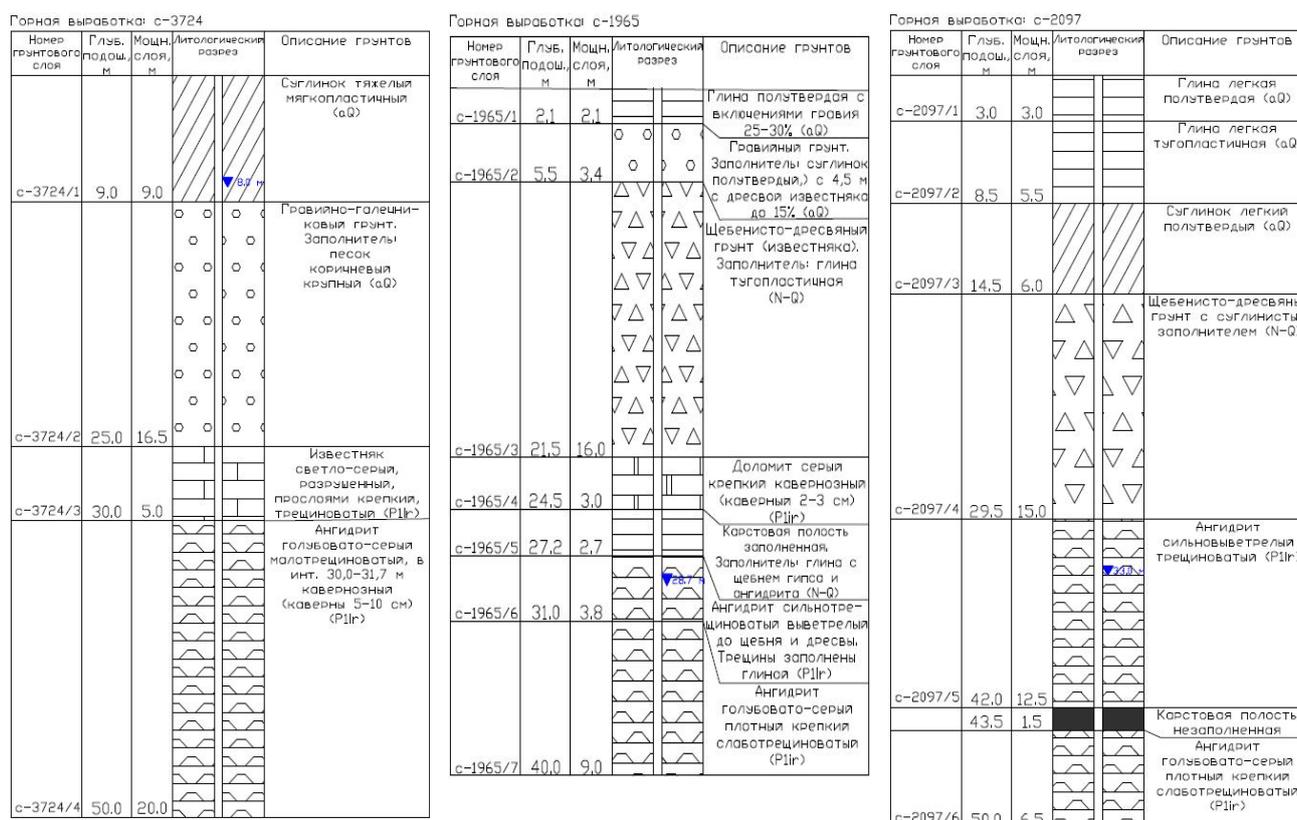
Рис. 2. Графики распределения диаметров зафиксированных карстовых провалов в границах исследуемых участков

Для оценки правомерности и точности применения предлагаемой методики следует принять допущение, что расчетный диаметр карстового провала должен соотноситься с диаметрами фактически отмеченных провалов в непосредственной близости от точки исследования. С этой целью в пределах каждого из рассматриваемых участков были выбраны буровая скважина и ближайшие к ней карстовые провалы с известными морфометрическими параметрами (табл. 3).

Данные, полученные при бурении скважин, явились основой для выполнения детерминистических расчетов. Сводные геологические разрезы, построенные по результатам бурения, приведены на рис. 3. Физико-механические свойства встреченных грунтовых слоев, а также ширина раскрытия трещин для связных грунтов, указаны в табл. 4.

Таблица 3. Параметры карстовых провалов, зафиксированных в непосредственной близости от буровых скважин

Номер исследуемого участка	Тип геологического строения	Номер буровой скважины	Расстояние до карстового провала, м	Характеристика провалов			
				диаметры, м			глубина, м
				макс.	мин.	средн.	
1	IV	с-3724	10	15,0	14,0	14,5	6,0
2	V	с-1965	29	5,0	5,0	5,0	5,0
3	VII	с-2097	16	4,0	3,0	3,5	2,6



а) Участок 1 (тип геологического разреза IV)

б) Участок 2 (тип геологического разреза V)

в) Участок 3 (тип геологического разреза VII)

Рис. 3. Сводные геологические разрезы скважин и физико-механические свойства встреченных в них грунтовых слоев

Результаты

Вычисление прогнозных параметров карстовых деформаций для участков, где были пробурены скважины, выполнялось в автоматизированном режиме посредством расчетных модулей авторской разработки на базе MS Excel. Отправной точкой вычислений является карстовая полость, закладываемая на контакте сульфатных пород с перекрывающими отло-

жениями. В дальнейшем происходит послойное моделирование поведения грунтовых слоев над полостью. Однако ввиду сложности учета физико-механических свойств карбонатных пород, залегающих на контакте с моделируемыми карстовыми полостями в пределах участков 1 и 2, их механизм поведения рассматривался через возможность формирования «органных труб» над полостью, широко развитых на данной территории.

Таблица 4. Физико-механические свойства грунтовых слоев, слагающих покровные отложения

Номер скважины	Номер грунтового слоя	Физико-механические свойства грунта							$D_{fis},$ м
		$\rho,$ г/см ³	$e,$ д.е.	$I_p,$ %	$I_L,$ %	$S_r,$ д.е.	$\varphi,$ °	$c,$ кПа	
с-3724	с-3724/1	1,83	0,867	14,0	0,62	0,830	17	22	0,05
	с-3724/2	1,89	0,397	-	-	1,000	36	2	-
с-1965	с-1965/1	1,85	0,896	20,0	0,40	0,881	10	18	0,08
	с-1965/2	1,76	0,865	7,0	0,30	0,743	19	5	0,02
	с-1965/3	2,16	0,500	10,0	0,30	0,920	29	9	-
с-2097	с-2097/1	1,90	0,784	23,0	0,15	0,880	17	20	0,06
	с-2097/2	1,75	0,960	23,0	0,40	0,740	15	27	0,04
	с-2097/3	1,91	0,650	9,0	0,05	0,700	23	20	0,05
	с-2097/4	1,95	0,420	8,0	-0,20	0,930	25	12	-

Примечание к таблице: ρ – плотность грунта, г/см³; e – коэффициент пористости, д.е.; I_p – число пластичности, %; I_L – показатель текучести, д.е.; S_r – коэффициент водонасыщения, д.е.; φ – угол внутреннего трения, °; c – удельное сцепление, кПа; D_{fis} – суммарная ширина раскрытия трещин в связных грунтах

Ширина таких «органных труб» может достигать до 1–2 м (Катаев, Кадебская, 2010), что было учтено в прогнозной модели. Стоит отметить, что для слоев карстово-обвальных отложений, встреченных на участках 2 и 3, диаметр трубообразного канала-полости также учитывался путем принятия возможности формирования в них «органных труб».

Моделирование механизма деформирования грунтового слоя производится главным образом по двум расчетным схемам, в зависимости от того, является слой связным или несвязным грунтом. В дальнейшем поведение грунта предопределяется его физико-механическими свойствами и возможностью перемещения в толщу закарстованного массива. Таким образом производится очередное моделирование поведения каждого грунтового слоя, встреченного в скважине, в результате чего определяется итоговый диаметр карстового провала.

Учитывая стохастическую роль физико-механических свойств грунтов и параметров закарстованности в детерминистических расчетах, авторами статьи было произведено

многочисленное вычисление диаметров карстовых провалов при случайном изменении входных параметров. Так, для нормативных значений физико-механических свойств грунта, приведенных в табл. 4, возможность их отклонения была принята как 15% для физических и 30% для механических свойств. Среди показателей закарстованности массива случайные изменения производились для диаметра и высоты карстовой полости, а также для мощности зоны активного карстообразования. Допустимые пределы отклонения перечисленных показателей закарстованности указаны в табл. 5.

Стоит отметить, что параметры полостного пространства были определены как интервал значений фактически вскрытых карстовых полостей в границах рассматриваемых участков. В свою очередь, мощность зоны активного карстообразования, представляющая собой интервалы глубин, в пределах которых распространены трещиноватые породы, определена на основе анализа колонок буровых скважин, расположенных в пределах исследуемых участков (рис. 3).

Таблица 5. Показатели закарстованности, принятые в прогнозной модели

Номер исследуемого участка	Тип геологического строения	Номер буровой скважины	Диаметр / Высота карстовой полости, м		Мощность зоны активного карстообразования, м	
			от	до	от	до
1	IV	с-3724	0,4	3,5	2,0	15,0
2	V	с-1965	0,2	10,0	6,0	18,0
3	VII	с-2097	1,0	1,5	8,0	20,0

Каждое вычисленное значение фиксировалось, составляя общую выборку возможных диаметров карстовых провалов при различных входных данных. Вычисления производились до тех пор, пока дисперсия получаемой выборки не достигла значения дисперсии зафиксированных карстовых провалов в пределах рассматриваемого участка. Удовлетворимое количество вычислений в общем случае составило от 1000 до 3000.

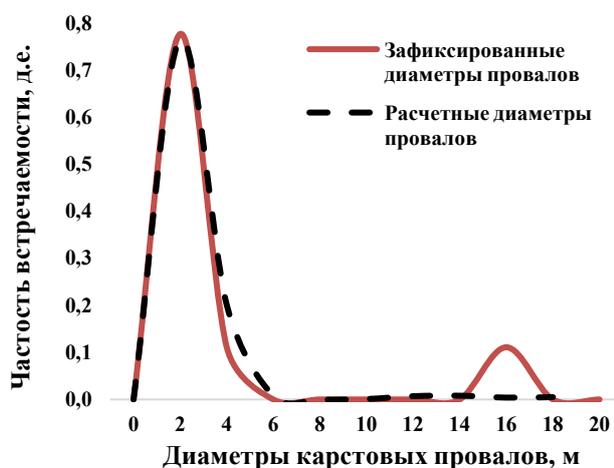
Далее на основе сформированной выборки производилось построение кривой распределения расчетных диаметров карстовых провалов и ее совмещение с кривой распределения диаметров фактически зафиксированных провалов (рис. 4).

Представленные графики напрямую указывают на правомерность применения расчетной методики, т.к. чем выше уровень сходимости кривых, тем выше прогнозная способность модели и, соответственно, достоверность полученного результата. Одна-

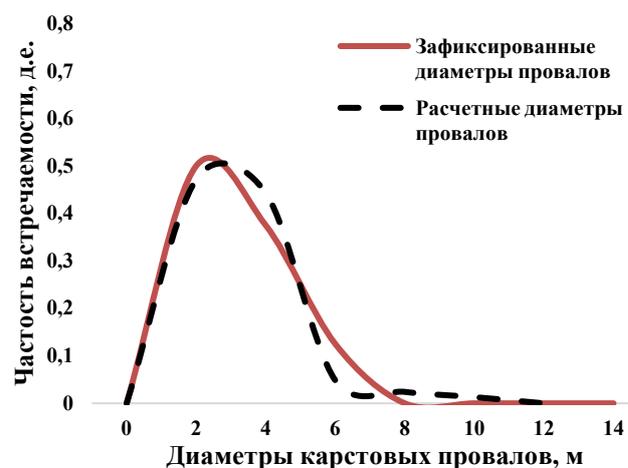
ко при рассмотрении кривых распределения для участков 1 и 3 (рис. 4.а и 4.в) отметим, что вторая мода распределения не соответствует кривой, зафиксированной в природе. В первую очередь это обосновано сложностью учета различных механизмов провалообразования в расчетной модели. Ввиду чего на участках графиков, где отсутствует корреляция между кривыми, достоверность полученных результатов носит скорее случайный характер.

По результатам единичных расчетов составлена сравнительная табл. 6, где для каждого из участков определена точность прогнозирования возможного диаметра провала, относительно фактически зафиксированного в природе (формула 3), а также сходимость кривых в точках нахождения значений расчетных диаметров на графике.

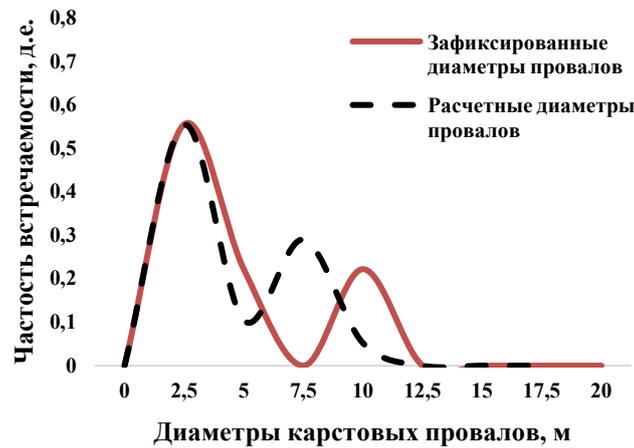
$$\text{Точность (\%)} = 100\% - \frac{\text{зафикс.} + \text{расч.}}{\text{расч.}} \times 100 \quad (3).$$



а) Участок 1 (тип геологического разреза IV)



б) Участок 2 (тип геологического разреза V)



в) Участок 3 (тип геологического разреза VII)

Рис. 4. Графики распределения диаметров расчетных и фактически зафиксированных карстовых провалов в пределах участков исследования

Таблица 6. Сравнительная таблица фактически зафиксированных и расчетных диаметров карстовых провалов

Тип геологического разреза	Номер буровой скважины	Расстояние до ближайшего карстового провала, м	Диаметр карстового провала, м		Точность прогнозирования, %	Степень сходимости кривых в точке вычисленного диаметра, %
			зафикс.	расч.		
IV	с-3724	10	14,5	11,1	76,6%	99,3%
V	с-1965	29	5,0	3,0	60,0%	93,2%
VII	с-2097	16	3,5	4,0	87,5%	88,2%

В данном случае точность прогнозирования представляет собой величину, описывающую то, насколько совпадают диаметры расчетного и зафиксированного в действительности карстового провала. В общем виде точность прогнозирования подчиняется тенденции роста отклонения с увеличением расстояния между скважиной и провалом. Однако стоит учесть, что утверждение о необходимости совпадения их размеров является лишь допущением, а сами размеры карстовых форм могут отличаться, в связи с чем точность прогнозирования является условной величиной.

Помимо точности прогнозирования, более важным параметром является степень сходимости кривых на графике в точке вычисленного диаметра. Данный показатель демонстрирует то, насколько корректно ведет себя прогнозная модель при вычислении таких значений. Как известно, в математиче-

ской статистике корреляция случайных величин считается высокой при ее значениях более 70%. В таких случаях мы можем судить о достоверности полученного результата. При значениях менее 70% следует произвести дополнительную калибровку модели, включающую в себя: повторную оценку параметров закарстованности массива, изменение диапазона возможного отклонения свойств покровных отложений от нормативных значений.

Заключение

Применение подобного подхода направлено на повышение достоверности выполняемых расчетов. В случае, если распределения расчетных и зафиксированных диаметров провалов имеют идентичный или близкий вид, а данные лабораторных исследований грунта не вызывают вопросов относительно

качества их выполнения, полученный результат окажется близким к истинному. Однако в случае, если значение степени сходимости кривых составляет менее 70%, можно заранее сделать вывод о невысоком уровне доверия к полученному значению расчетного диаметра карстового провала.

В целом, дифференциальная кривая отображает вероятность образования карстовых провалов с конкретными размерами. Очевидно, что наибольшей вероятностью образования отличаются провалы, диаметры которых попадают в пиковую зону дифференциальной кривой распределения зафиксированных поверхностных карстовых форм. Тогда как образования провалов с предельными значениями диаметров возможны лишь при наличии карстовых полостей критических размеров.

Дополнительно стоит отметить, что предлагаемый подход может быть применен и с другими расчетными методами вычисления прогнозного диаметра карстовых деформаций.

Библиографический список

- Аникеев А.В.* Аккумуляционная емкость растворимых пород как основной показатель устойчивости районов покрытого карста // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. Научный журнал. Вып. 5. Москва: Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева (РАН), 2019. С. 3–14.
- Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска // Москва: РУДН, 2017. 328 с.
- Богданов Е.Н., Богданов А.Е.* Механические свойства грунтов как причина неточных решений механики грунтов // Записки горного института Санкт-Петербурга, 2003. С. 131–136.
- Горбунова К.А., Андрейчук В.Н., Костарев В.П., Максимович Н.Г.* Карст и пещеры Пермской области. Пермь, 1992.
- Катаев В.Н.* Особенности углеводородного загрязнения сульфатно-карбонатных карстовых массивов // Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: сборник научных трудов (по материалам годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2–4 апреля 2019 г.) / под редакцией В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха, Е.В. Булдаковой, А.Д. Деменева, О.Н. Ереминой, В.Г. Заиканова, В.Н. Катаева, Ю.А. Мамаева, О.Ю. Мещеряковой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2019. Вып. 21. С. 309–314.
- Катаев В.Н., Кадебская О.И.* Геология и карст города Кунгура // Перм. гос. ун-т; ГИ УрО РАН. Пермь, 2010. 236с.
- 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. Кунгур) // Вестник Пермского университета. Научный журнал. Вып. 3 Геология. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 2009. С. 77–93.
- Толмачев В.В.* Оценка рисков при строительстве в карстовых районах // Доклады и выступления на X научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций». (5 октября 2010 г., Москва, МЧС России). Москва: Центр «Антистихия», 2010. С. 282–290.
- Толмачев В.В., Леоненко М.В.* Стохастические методы прогноза карстовой опасности: мировой опыт, проблемы // Великие реки 2018. Труды научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума. В 3-х томах. Ответственный редактор А.А. Лапшин. 2018. С. 449–452.
- Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. 151 с.
- Щербаков С.В., Катаев В.Н.* К оценке морфометрических характеристик карстовых форм // Инженерная геология, 2013, № 1. С. 14–22.

Stochastic Consideration of Geotechnical Properties of Soils and Parameters of Karst Distribution in Deterministic Methods for Prediction of Karst Collapses

P.I. Bazhutin, V.N. Kataev, S.V. Shcherbakov

Perm State University, 15 Bukireva Str., Perm 614900, Russia

E-mail: pavel.bazhutin.96@mail.ru, kataev@psu.ru, greyv@mail.ru

This article discusses the problem of calculation of the morphometric parameters of possible karst forms by prediction deterministic methods. The forecast diameter of the karst collapse is the most important parameter for consider of structures in the karst areas, and modern requirements of the regulatory documentation indicate the mandatory use of design deterministic methods. Despite this, to date, there is no single approach capable of providing a true result in various geological conditions. The article proposes an author's approach that allows increasing the prediction accuracy, as well as to obtain a quantitative description of the reliability of the diameter of a possible karst collapse.

Keywords: *karst; karst collapse; forecast diameter; deterministic methods of forecast; deterministic approach*

Reference

- Anikeev A.V.* 2019. Akkumulyatsionnaya emkost rastvorimykh porod kak osnovnoy pokazatel ustoychivosti rayonov pokrytogo karsta [Accumulation capacity of soluble rocks as the main stability index in covered karst areas]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya.* 5:3–14. (in Russian)
- Anikeev A.V.* 2017. Provaly i voronki osedaniya v karstovykh rayonakh: mekhanizmy obrazovaniya, prognoz i otsenka riska [Collapse hazards and sinkholes in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment]. RUDN, Moskva, p. 328. (in Russian)
- Bogdanov E.N., Bogdanov A.E.* 2003. Mekhanicheskie svoystva gruntov kak prichina netochnykh resheniy mekhaniki gruntov [Mechanical properties of soils as a reason for inaccurate solutions of soil mechanics]. *Journal of Mining Institute*, pp. 131–136. (in Russian)
- Gorbunova K.A., Andreychuk V.N., Kostarev V.P., Maksimovich N.G.* 1992. Karst i peshchery Permskoy oblasti [Karst and caves of the Perm region]. Perm, PSU, p. 200. (in Russian)
- Kataev V.N.* 2019. Osobennosti uglevodorodnogo zagryazneniya sulfatno-karbonatnykh karstovykh massivov [Features of hydrocarbon pollution of sulfate-carbonate karst massifs]. *In: Sergeevskie chteniya.* 21:309–314. (in Russian)
- Kataev V.N., Kadebskaya O.I.* 2010. Geologiya i karst goroda Kungura [Geology and karst of Kungur city]. PGU, GI UrO RAN. Perm, p. 236. (in Russian)
- Kataev V.N., Scherbakov S.V., Zolotarev D.R., Likhaya O.M., Kovaleva T.G.* 2009. Vliyanie geologicheskogo stroeniya territorii i prostranstvennoe raspredelenie karstovykh form (na primere territorii g. Kungur) [The impact of territorial geological structure and areal development of karst forms]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya.* 3:77–93. (in Russian)
- Tolmachev V.V.* 2010. Otsenka riskov pri stroitelstve v karstovykh rayonakh [Risk assessment during construction in karst areas]. *Problemy prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy*, pp. 282–290. (in Russian)
- Tolmachev V.V., Leonenko M.V.* 2018. Stokhasticheskie metody prognoza karstovoy opasnosti: mirovoy opyt, problem [Stochastic methods of karst hazard prediction: world experience, problems]. *In: Velikie reki 2018*, pp. 449–452 (in Russian)
- Tolmachev V.V., Reuter F.* 1990. Inzhenernoe karstovedenie [Engineering karst studies]. Moskva, Nedra, p. 151 (in Russian)
- Shcherbakov S.V., Kataev V.N.* 2013. K otsenke morfometricheskikh parametrov karstovykh form [The assessment of morphometric parameters of karst forms]. *Inzhenernaya geologiya.* 1:14–22. (in Russian)