

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СВОЙСТВ ПОКРОВОВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОДНОРОДНОСТИ КАРСТОВОГО МАССИВА

Статья посвящена вопросам изучения перекрывающих отложений, в частности физико-механических свойств, слагающих их грунтов. На примере конкретного карстового массива проведена предварительная оценка его однородности посредством одномерного статистического анализа значений физико-механических свойств глинистых грунтов, перекрывающих карбонатные породы. Дана подробная характеристика изучаемого карстового массива. Показано изменение характера распределения свойств перекрывающих грунтов в зависимости от наличия или отсутствия элементов ослабления в толще карбонатов на участках массива относительно однородных в структурно-тектоническом, геоморфологическом и геологическом плане.

Ключевые слова: зона дробления, карстовая полость, покровная толща, физико-механические свойства

E.V. Drobinina, D.R. Zolotarev
LLC «Karst-Control and Bank Protection», Perm
Perm State University, alenadrobina@yandex.ru

APPLICABILITY OF ONE-DIMENSIONAL STATISTICAL ANALYSIS OF THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF THE OVERLYING SOIL FOR THE KARST MASSIVE UNIFORMITY PRE-ESTIMATE

The main aim of the article is the study of overlying soil, especially its geotechnical properties. The karst massive uniformity pre-estimate is carried out on the example of the specific karst massive by applying one-dimensional statistical analysis of the geotechnical properties of the clay soils overlying carbonate rocks. The studied massive is characterized in details. The alteration of the overlying soils properties distribution depending on the presence or absence of crushed zones and karst cavities in carbonates is shown for the areas, which are homogeneous in tectonic, geomorphological and geological circumstances.

Key words: crushed zone, karst cavity, overlying soil, geotechnical properties

Массив карстующихся пород – геосистема, стремящаяся к морфологическому, гидродинамическому и гидрохимическому балансу с меняющимися условиями. В случае дисбаланса происходит активизация экзогенных (в том числе карстовых, суффозионных, гравитационных) явлений или прекращение существования ряда из них [5].

Опасность присутствия элементов ослабления в карстовом массиве заключается, главным образом, в спонтанном обрушении грунтов в карстовую полость

вследствие потенциального увеличения в процессе растворения морфометрических параметров существующих полостных форм и дизъюнктивов до критических размеров. Наиболее верный способ оценки подземной закарстованности массива – прямые наблюдения по результатам карстологического бурения, однако, зачастую экономически целесообразная густота сети карстологических выработок недостаточна для достоверной оценки подземной закарстованности.

Недоступность непосредственного наблюдения за развитием карстового процесса на глубине определяет необходимость использования более или менее общих закономерностей его протекания, и в соответствии с этими закономерностями, осуществления оценки степени устойчивости закарстованных территорий [1].

Помимо общих закономерностей развития процесса карстообразования в растворимой толще массива, несомненно, следует учитывать и возникающие эффекты в покровной толще, о чем свидетельствуют, например, результаты исследования В.С. Крашенинникова и В.П. Хоменко [6,7]. Развитие полостей в растворимой толще происходит в течение периода достаточного для формирования в покровной толще грунтов некоторых признаков подготовки процесса провалообразования. Практика выявления этих признаков, несомненно, повышает объективность оценки карстовой опасности территории, особенно в случае отсутствия в ее пределах поверхностных форм карста.

Вопрос изучения перекрывающей толщи при условии присутствия элементов ослабления в карстовом массиве поднимается в работе В.М. Кутепова [8], в которой рассматривается проблема устойчивости сводовой части карстовой полости в зависимости от литологического строения перекрывающей толщи. Согласно В.М. Кутепову от физико-механических свойств и водопроницаемости пород, перекрывающих ослабленные зоны в массиве, наряду с такими свойствами как строение массива, степень закарстованности пород, гидрогеологические особенности зависит механизм формирования карстового провала, без понимания которого невозможны объективная оценка карстоопасности и назначение адекватного ей комплекса противокарстовых мероприятий.

Под ослабленными зонами здесь понимаются зоны древних и современных карстовых нарушений, представленные глыбами, щебнем, дресвой и мукой, пронизанные серией мелких карстовых полостей и трещин. В качестве заполнителя, как правило, выступают слабоуплотненные глинистые грунты, характеризующиеся повышенной сжимаемостью и аномальными значениями показателей физико-механических свойств [9]. В сущности, данное понятие характеризует участки карстового массива, отнесенные в авторском исследовании к элементам его ослабления.

Примечательно, что большинство авторов [2, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15] рассматривают влияние на физико-механические свойств грунтов перекрывающей толщи карстовых полостей именно критического диаметра, т.е. такого, при достижении которого покровная толща обрушится в полость вследствие превышения сдвигающими силами прочностных параметров грунтов. Однако наличие элементов ослабления в карстовом массиве, не достигших на опреде-

ленный момент времени критических размеров, не исключает вероятность провалообразования в будущем при развитии карстового процесса, что определяет интерес к изучению влияния на физико-механические параметры перекрывающей толщи полостей и дизъюнктивов любого размера.

В данной работе предлагается исследовать физико-механические свойства грунтов глинистой перекрывающей толщи. В отличие от несвязных грунтов, частицы которых могут перемещаться в карстовую полость—приемник как в воздушно-сухом, так и водонасыщенном состоянии независимо от интенсивности и направления фильтрации, водоупорные глинистые слои временно останавливают вертикальный рост области деформирования. Карстовая полость, сформированная в подошве глинистого водоупора при достижении критических размеров, приведет к изгибу пласта и его обрушению, которое, в ряде случаев, может достигнуть земной поверхности [2].

На основе анализа изменчивости физико-механических свойств на начальном этапе исследования карстового массива предлагается предварительно оценить его однородность: наличие в толще карстующихся пород элементов ослабления. В работе исследованы: плотность грунтов, коэффициент пористости, угол внутреннего трения и удельное сцепление.

В качестве исследуемого объекта выбрана часть территории Московской области на участке прохождения трассы высокоскоростной магистрали. В геоморфологическом отношении исследуемая территория представляет собой пологоволнистую равнину, пересеченную хорошо разработанной долиной реки Клязьмы и ее притоков. Приуроченность территории к аккумулятивному пологому склону долины р. Клязьмы, являющейся основной дреной на изучаемой территории, и придолинному участку междуречья, в зоне сочленения с террасами выраженному пологим склоном, может благоприятствовать развитию карстового процесса вследствие хорошего водообмена, особенно на участках неглубокого залегания карбонатов.

В геологическом строении приповерхностной части территории принимают участие породы четвертичной (Q), юрско-меловой (J_3-K_1) и каменноугольной (C_3) систем. С поверхности под четвертичными отложениями преимущественно залегают отложения терригенной сероцветной формации юрско-мелового возраста. Вместе с тем, в пределах данной территории бурением зафиксированы участки отсутствия коренного глинистого водоупора, где четвертичные отложения подстилаются каменноугольными карбонатными породами. Четвертичные отложения наиболее широко представлены песчано-глинистыми грунтами аллювиального и флювиогляциального генезиса, что обусловлено палеогеографическими обстановками в четвертичное время: несколькими оледенениями и сменяющими их эпохами межледниковья. Юрско-меловые образования сложены, главным образом, глинами, реже песками с прослоями супесей. Каменноугольные отложения представлены преимущественно закарстованными в верхней части толщи доломитами и известняками с подчиненными прослоями глин, песчаников и мергелей.

На исследуемой территории поверхностные карстопроявления в основном представлены карстовыми воронками (211 шт.) и понижениями (106 шт.). Диаметры карстовых воронок варьируют в пределах 10,0-15,0 м, глубина до 4,0-5,0 м, за исключением небольшого числа древних выположенных форм с диаметрами, достигающими 30-35 м и глубиной до 6,0 м. Данный факт объясняется геологическим строением территории: низкой скоростью растворения карбонатных пород с одновременной кольматацией трещин доломитовой мукой и вынесенным из перекрывающей толщи материалом, отсутствием известковых и карбонатных включений в юрских глинах, на большей части, служащих водопором, предотвращающим проникновение пресных вод в толщу карстующихся пород.

Подземная закарстованность в равной мере характерна как для доломитов, так и для известняков. Элементы ослабления карстового массива представлены карстовыми полостями различной формы и размеров, без заполнителя или с заполнителем, преимущественно песчаным при подчиненном значении дресвяно-щебенистого и глинистого материала. Незаполненные (140 шт.) карстовые полости вскрываются на глубинах от 4,5 м до 58,5 м, большая их часть приурочена к доломитам, вертикальная амплитуда варьирует от 0,1 м до 4,5 м, при среднем значении – 0,4 м. Заполненные полости (106 шт.) вскрыты на глубинах от 7,3 до 65,4 м, их вертикальная амплитуда варьирует от 0,1 до 5,4 м, при среднем значении 1,0 м.

Таким образом, для рассматриваемой территории характерно развитие малых по высоте незаполненных подземных пустот. Можно предположить, что такие полости также имеют незначительные радиусы и дискретное распространение по площади, крупных карстовых систем полости не формируют. Согласно А.В. Аникееву [3] на территории г. Москвы, расположенной восточнее изучаемого участка и характеризующейся аналогичными природными условиями, чаще встречаются не единичные крупные полости или широкие трещины, а зоны повышенной трещиноватости и пустотности.

Помимо карстовых полостей широкое развитие в массиве пород получили зоны дробления, количество которых на исследуемой территории достигает 2250. Это связано со структурно-тектоническим планом изучаемой территории: трасса проходит вдоль тектонически ослабленного участка – геологического разлома, ограничивающего с севера Подмосковную впадину, осложняющую Московскую синеклизу. В пространственном расположении зоны дробления совпадают с ареалами развития полостей, являясь индикаторами их наличия. Все зоны дробления на площадке изысканий представлены доломитами и известняками сильнотрещиноватыми, сильновыветрелыми, часто до рухлякового состояния. Вертикальная амплитуда зон дробления варьируют от 0,1 до 35,9 м при среднем значении 4,6 м. Зоны дробления развиты в интервале глубин от 2,0 до 105,1 м. В большинстве скважин первый от поверхности элемент ослабления зафиксирован бурением на глубинах до 2,5 м.

Принимая в расчет динамический характер развития карстового массива, а, следовательно, и грунтов перекрывающей толщи, несложно предположить, что

уловить изменения значений физико-механических свойств, связанные именно с влиянием элементов ослабления карстового массива на перекрывающую толщу, весьма сложно. Дополнительные трудности в проведении анализа могут возникнуть вследствие большой площади исследуемой территории, захватывающей участки разного геологического и геоморфологического строения, поэтому необходимо предварительное районирование территории. Такой подход к решению вопроса оценки влияния элементов ослабления на физико-механические свойства грунтов дисперсной перекрывающей толщи позволит исключить, в значительной мере, влияние других факторов.

Здесь предлагается предварительная оценка, которая может на начальном этапе исследования карстового массива быть полезной для обоснования дальнейших исследований его неоднородности, обусловленной наличием элементов ослабления в карстующихся породах. Проследим изменения свойств юрских глин в целом на территориях, характеризующейся схожим геологическим строением: наличием над карстующимися породами выдержанного глинистого водоупора мощностью 5-15 м без деления на квазиоднородные участки.

С целью выявления характера возможного влияния на перекрывающие грунты элементов ослабления применен одномерный статистический анализ. Задача статистического анализа состоит в том, чтобы по значениям изучаемого свойства в выборке сделать с определенной вероятностью заключение о значениях этого свойства во всей генеральной совокупности. Наиболее полной и исчерпывающей характеристикой генеральной совокупности служит закон или функция распределения, устанавливающие связь между значениями случайной величины и соответствующими им вероятностями. Закон распределения может быть выражен графически: в виде кривой распределения, или аналитически.

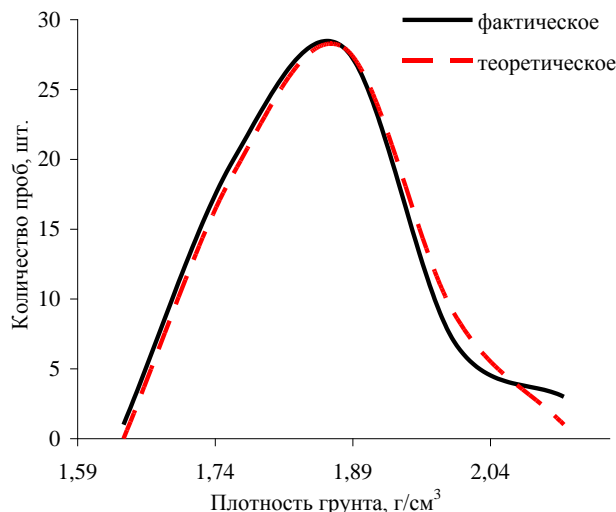
Ниже в качестве примера приводятся кривые распределения плотности грунта с описательной статистикой, полученной исходя из теоретического закона распределения, наиболее точно описывающего распределение, полученное по эмпирическим данным. На графиках приводятся тип распределения, среднее значение и среднеквадратичное отклонение. Перечисленные статистические параметры позволяют наметить диапазон наиболее характерных значений свойства для исследуемых условий (рис. 1).

Если посмотреть на кривые распределения значений исследуемых свойств нетрудно заметить, что в различных условиях статистические параметры (среднее значение и стандартное отклонение), описывающие распределение значений отличаются незначительно. То есть использование такого подхода нецелесообразно при исследовании влияния подземных карстовых форм на свойства перекрывающих грунтов, в отношении параметров, изменения которых под влиянием внешних факторов колеблются в пределах единиц, а для плотности и коэффициента пористости грунтов – десятых и сотых долей единицы.

Однако здесь следует обратить внимание на характер отклонения эмпирических кривых от теоретических. В условиях отсутствия элементов ослабления, наблюдается практически полная сходимость графиков, особенно по распределениям значений физических свойств. Для условий развития элементов ослаб-

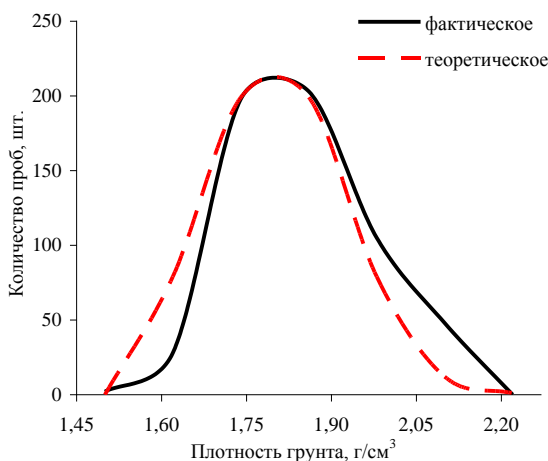
ления на контакте перекрывающих и карстующихся пород и в толще последних даже при большом количестве наблюдений сходимость графиков хуже, распределение часто приобретает слабо выраженную бимодальность.

Элементы ослабления отсутствуют



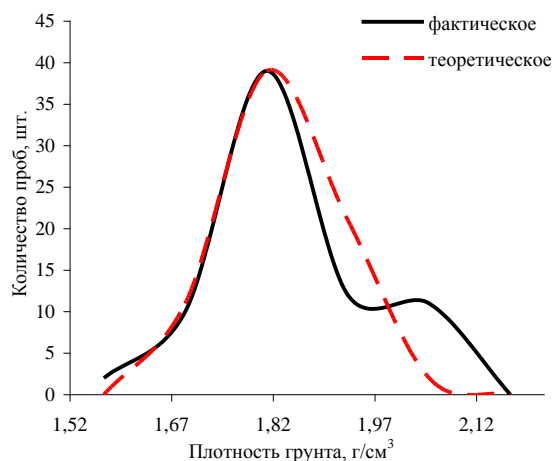
Среднее значение	1,79
Стандартное отклонение	0,09
Тип распределения	норм.

Элементы ослабления развиты на контакте карстующихся пород и перекрывающей толщи



Среднее значение	1,74
Стандартное отклонение	0,12
Тип распределения	норм.

Элементы ослабления развиты в карстующихся породах до глубины 5,0 м от кровли



Среднее значение	1,77
Стандартное отклонение	0,08
Тип распределения	норм.

Рис. 1. Типовые кривые распределения значений плотности юрских глин

Для большей надежности гипотеза о соответствии эмпирического распределения теоретическому для всех условий проверена с помощью критерия Колмогорова (критерия λ). Численно критерий λ равен максимальному отклонению эмпирических накопленных частот от теоретических. Графически критерий λ

соответствует максимальному расстоянию между эмпирической и теоретической кумулятивными кривыми. Для принятия решения о соответствии эмпирического распределения теоретическому рассчитанное значение λ_p сравнивают с теоретическим (критическим) λ_T для принятого уровня значимости α . Теоретическое λ_T не зависит от объема выборки и числа степеней свободы, а определяется только уровнем значимости, в частности, при $\alpha = 0,05$, $\lambda_T = 1,36$. Если $\lambda_p < \lambda_T$, то с вероятностью $p=1-\alpha$ нулевая гипотеза о том, что эмпирическое распределение не противоречит нормальному, принимается. Рассчитанные критерии λ_p представлены в таблице 1.

Таблица 1. Критерии Колмогорова для различных условий

Физико-механические свойства	Критерии Колмогорова λ_p для различных условий развития элементов ослабления:			Критический критерий λ_T
	отсутствуют	на контакте перекрывающих и карстующихся пород	в толще карстующихся пород до глубины 5,0 м	
Плотность грунта	0,4	1,2	1,3	1,36
Коэффициент пористости	0,3	1,3	0,4	
Угол внутреннего трения	1,0	1,3	1,2	
Удельное сцепление	0,3	0,5	0,6	

Таблица 1 подтверждает аналитически, то, что продемонстрировано на графиках. В условиях развития элементов ослабления на контакте с перекрывающей толщей или в толще карстующихся пород, критерий Колмогорова несколько выше. Иными словами, неоднородность в толще карстующихся пород, обусловленная развитием элементов ослабления, может найти выражение в неоднородности распределения свойств перекрывающих отложений. То есть над элементами ослабления значения свойств отложений подчиняются нормальному закону, но эмпирические кривые имеют большие отклонения от теоретических, чем в условиях относительной однородности толщи карстующихся пород.

Вывод. Таким образом, проведение детального анализа физико-механических свойств перекрывающих грунтов требует предварительного выделения квазиоднородных участков путем районирования не только по структурно-тектоническому и геологическому признаку, но и по геоморфологии. Однако на начальном этапе исследования для предварительной оценки неоднородности карстового массива, обусловленной наличием элементов ослабления, использование данного подхода вполне целесообразно. Следует отметить достоинство предложенного анализа: данные привлекаются из параллельно проводимых инженерно-геологических изысканий, без проведения специализированных исследований.

Библиографический список

1. *Толмачев В.В.* Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. №3. 1980. С. 98-107.
2. *Аникеев А.В.* Провалы в районах покрытого карста как результат массовой суффозии песков и разрушения глин // Карстоведение – XXI век: теоретическое и практическое значение: Материалы междунар. симпозиума. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2004. С. 216-220.
3. *Аникеев А.В.* Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. Москва: РУДН, 2017. 328 с.
4. *Архидьяконовских Ю.В.* Моделирование процессов суффозии и гидроразрыва гидросферы. Учебное пособие по спецкурсу. Пермь: Перм. ун-т, 1983. 88 с.
5. *Катаев В.Н.* Теория и методология структурно-тектонического анализа в карстоведении. Дис. ... д-ра геол.-минер.нау. Пермь, 1999. 451с. (на правах рукописи).
6. *Крашенинников В.С., Хоменко В.П.* Изучение покрывающей толщи, как один из важнейших компонентов инженерных изысканий в районах покрытого карста // Вестник МГСУ. № 5. 2011. С. 113-119.
7. *Крашенинников В.С., Хоменко В.П.* Покрытый карст: необходимые условия, причины и признаки подготовки провалообразования. Промышленное и гражданское строительство. № 11. 2013. С. 6-8.
8. *Кутепов В.М.* Оценка устойчивости закарстованных территорий методом анализа напряженного состояния массивов пород. Обзор и рекомендации. М.: ЦП НТГО, 1986. 69 с.
9. *Кутепов В.М., Березкина Г.М. и др.* Карстовые процессы и инженерно-геологические свойства глинистых пород // Инженерная геология. № 4. 1984. С. 91-103.
10. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
11. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Изучение массивов пород для прогноза карстовой опасности // Противокарстовая защита объектов строительства: Материалы всесоюзного научно-технического совещания. 4-7 сентября 1990 г./ под. ред. Г.А. Дружинина. Куйбышев, 1990. С. 11-16.
12. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 96 с.
13. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
14. *Хоменко В.П.* Карстово-обвальные провалы «простого» типа: полевые исследования // Инженерная геология. № 4. 2009а. С. 40-48.
15. *Хоменко В.П.* Карстово-обвальные провалы «сложного» типа: физическое моделирование // Инженерная геология. № 3. 2009б. С. 34-41.
16. *Дробинина Е.В., Ковалева Т.Г., Корякина А.В., Катаев В.Н.* Анализ локальной изменчивости физико-механических свойств покровной толщи как метод оценки карстоопасности (на примере с. Усть-Кишерть) // Вестник Пермского университета. Геология. 2017. Т. 16. № 3. С. 242-255.