

5. Магрицкий Д. В., Иванов А. А. Наводнения в дельте р.Кубани // Водные ресурсы. 2011. Т.38. № 4. С.387–406.

6. Матишов Г. Г., Чикин А. Л., Бердников С. В., Шевердяев И. В., Клеценков А. В., Кириллова Е. Э. Экстремальное затопление дельты Дона весной 2013 г.: хронология, условия формирования и последствия // Вестник ЮНЦ. Т. 10. № 1. 2014. С.17–24.

7. Пономаренко Е. П., Сорокина В. В., Бирюков П. А. Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование // Вестник ЮНЦ РАН. 2012. Т.8. № 1. С.28–37.

8. Сорокина В. В. Динамика терригенного осадконакопления в Азовском море во второй половине XX века / Азовское море в конце XX - начале XXI веков: геоморфология, осадконакопление, пелагические сообщества. Т. X / Отв. ред. Г. Г. Матишов. ММБИ КНЦ РАН. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 2008. С. 32–111.

9. Шнюков Е. Ф., Митин Л. И., Цемко В. П. Катастрофы в Черном море. Киев. Издательская фирма «Манускрипт». 1994. 296 с.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАРСТОВОЙ ОПАСНОСТИ И РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ КАРСТА

Щербаков С. В.

**ООО «ПКИБЗ» (г. Дзержинск), Пермский государственный
национальный исследовательский университет (г. Пермь)**

Проблематика оценки карстовой опасности при освоении закарстованных территорий, несмотря на более чем 50-летний срок изучения данного вопроса до сих пор относится к разряду задач, не получивших окончательного решения. Среди всего многообразия предложенных к настоящему времени подходов к оценке карстоопасности ни один из них не позволяет однозначно достоверно указать место, время и масштабы образующихся карстопроявлений. Сложность изучения и прогнозирования карста можно объяснить трудностью его обнаружения и необходимостью учета большого числа влияющих на него факторов, часто широкой их изменчивостью во времени.

Изучение опыта оценки карстоопасности, систематизированного с позиции отдельных показателей закарстованности с одной стороны и

природных условий развития карста с другой, а также их совместного комплексного анализа (интегральный подход), позволило сформировать целостное видение рассматриваемой проблемы. Очевидно, что наиболее полными по содержанию являются интегральные методики оценки карстоопасности, направленные на всестороннее изучение карстового процесса в пределах исследуемой части массива.

По нашему мнению, современная методика оценки опасности проявления карста при инженерно-хозяйственном освоении закарстованных территорий должна соответствовать следующим принципам [8]:

учитывать основные условия развития карстового процесса, выраженные через набор природообразующих показателей-факторов;

характеризоваться относительной простотой установления показателей природных условий, их инженерно-геологической направленностью и широкой применимостью в повседневной изыскательской практике;

базироваться на интегральном количественном подходе с применением вероятностно-статистического математического аппарата, позволяющего осуществлять оценки вероятности образования как поверхностных, так и подземных карстовых форм в пределах исследуемой территории, а также устанавливать их средние морфометрические параметры;

обладать универсальностью в отношении однозначности трактовки получаемых результатов независимо от территории и объекта исследования.

Такая методика разработана нами на основе массового статистического анализа ранее накопленных данных, как по карстовым проявлениям, так и по отдельным условиям и факторам развития карста.

Факторы (показатели) карстоопасности. Набор факторов, учитываемых при оценке карстоопасности территорий, зависит от характера решаемой задачи, масштаба исследований и особенностей механизма и динамики развития карста, а также от качества и объема имеющейся в распоряжении исследователя информации.

Используемые при оценке карстоопасности показатели природного строения и развития карста, по нашему мнению, должны удовлетворять следующим условиям: легко устанавливаться по материалам инженерных изысканий; однозначно трактоваться в независимости от метода или аппаратуры, используемой для их установления; носить универсальный характер вне зависимости от

территории исследования; иметь количественную форму выражения; отражать основные условия развития карста (ведущие факторы); группироваться в зависимости от особенностей природного строения карстового массива; количество показателей не должно превышать 3–5 в рамках отдельно взятой группы, но при этом в совокупности максимально точно отражать характер природных условий, описываемых данной группой; объективность оценки не должна существенно снижаться при не включении в анализ ряда показателей, не превышающего 50 % от их общего числа, в том числе показателей, составляющих целую группу.

Предлагаемый нами перечень состоит из 17 показателей, разделенных на 5 групп [6] (таблица 1).

Таблица 1

Показатели природного строения к оценке карстоопасности

<p>Структурно-тектонические показатели <i>St</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Линейная плотность линеаментов L_l, км/км² 2. Количество пересечений линеаментов M_l, шт./км² 3. Блочность B_l, км² 4. Удаленность от линеаментов R_l, м <p>Геологические показатели <i>G</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Мощность отложений покровной толщи (глубина залегания кровли карстующихся отложений) m_p, м 2. Мощность четвертичных отложений m_Q, м 3. Мощность неоген-четвертичных обвальнo-карстовых отложений m_{NQ}, м <p>Гидрогеологические показатели <i>Hg</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Глубина установления грунтовых вод H_Q, м 2. Глубина установления трещинно-карстовых вод H_k, м 3. Минерализация подземных вод M, г/дм³ 	<p>Геоморфологические показатели <i>Ge</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Уклон рельефа β, ° 2. Превышение над средним уровнем рек ΔH, м 3. Удаленность от речной сети U, м 4. Уклон водосбора $\tan \alpha$, д.е. <p>Инженерно-геологические показатели <i>Eg</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Модуль общей деформации грунтов покровной толщи E_0, МПа 2. Угол внутреннего трения грунтов покровной толщи φ, ° 3. Удельное сцепление грунтов покровной толщи c, кПа
--	---

Проявления карста. Комплексная оценка карстоопасности должна выстраиваться с одинаковым учетом как поверхностных, так и подземных карстовых форм [7]. Среди поверхностных форм карста в анализе принимают участие провальные и карстово-суффозионные карстовые воронки и понижения, для краткости изложения в дальнейшем именуемые провалами. Исследуются как древние провалы, точное время образования которых не установлено, так и молодые, сформированные в течение периода наблюдения за процессом провалообразования. Кроме того, в анализе участвуют первичные и повторные провалы. В результате первичных провалов образуются новые карстовые воронки, а повторные провалы вызывают последующее углубление и расширение этих воронок.

Подземные карстовые формы, участвующие в анализе, представлены карстовыми полостями и зонами дробления, установленными по данным буровых работ.

В качестве исследуемых параметров карстовых форм выступают их основные морфометрические характеристики. У поверхностных карстовых форм такими характеристиками являются диаметры d и глубины z провалов. В качестве диаметров сложных в горизонтальном сечении (плане) карстовых форм рассматриваются их средние величины. Рассматриваемыми морфометрическими параметрами подземных карстовых форм являются высоты h_p и/или мощности h_z вскрытых бурением карстовых полостей и/или зон дробления.

Территории исследования. Одним из обозначенных выше условий, которому должна удовлетворять методика комплексной количественной оценки карстоопасности, является ее универсальность, заключающаяся в возможности адаптации применительно к любым карстологическим условиям независимо от территории исследования. Успешное разрешение данного условия возможно в результате комплексного анализа природного строения и закарстованности одновременно в пределах как можно большего количества эталонных площадок, локализованных в различных природных обстановках развития карста. Одним из первых шагов в данном направлении может являться изучение карстологических условий и их сопоставление с показателями природного строения массива в пределах ряда территориальных единиц в рамках отдельно взятого региона. Похожую мысль высказывал *В. Н. Андрейчук* [1], говоря о том, что выявление региональных и общих закономерностей провального процесса и способов его выражения может быть использовано в качестве

вспомогательных, а иногда и основных критериев оценки устойчивости закарстованных территорий.

Пилотными при разработке методики послужили закарстованные массивы территорий Пермского края, локализованные в пределах г. Кунгур, пгт Полазна, территории энергокоридора трансрегионального газопровода высокого давления «Ямбург-Елец» на участке Красноясыльского полигона (близ пос. Красный Ясыл Ординского района), пос. Октябрьский. Эти территории приурочены к площадям развития карбонатно-сульфатного карста. Природные условия карстообразования в их пределах активно изучались на протяжении последних 50–60 лет, в результате чего был накоплен обширный фактический материал, сбор, переработка и систематизация которого частично осуществлены в ходе пятилетней (2006–2010 гг.) научно-исследовательской работы в рамках краевой программы «Мониторинг закарстованных территорий Пермской области».

Влияние показателей-факторов на закарстованность территорий. Оценка влияния показателей природного строения на активность развития карста и масштабы его проявления может быть осуществлена посредством их сопоставления с исследуемыми карстовыми формами и их морфометрическими параметрами.

Целью сопоставления карстовых форм и показателей природного строения является установление: 1) эмпирических и теоретических распределений карстовых форм по показателям природного строения; 2) распределений морфометрических параметров карстовых форм и их зависимости от значений исследуемых показателей природного строения. Для этого используются методы картографического и графического моделирования с последующей аналитической обработкой количественных данных.

С целью возможности разнопланового сопоставления и сравнения результатов, исследуемые показатели природного строения и морфометрические параметры карстовых форм приводятся к общему виду посредством их нормализации [10].

Оценка активности протекания карста устанавливается в результате изучения частных распределений отдельных карстовых форм и их общего распределения по значениям показателей природного строения. По формам эмпирических кривых общих распределений подбирается наиболее подходящее теоретическое распределение, характерное для данного анализируемого показателя. В анализе рассматриваются два основных теоретических закона распределения - нормальный и логарифмически нормальный. Более

подробно процедура анализа рассмотрена в ранее опубликованных работах [4], а параметры теоретических распределений (средние значения и среднеквадратические отклонения) карстовых форм по рассматриваемым показателям природного строения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры распределений карстовых форм, коэффициенты и виды прогнозных уравнений для различных показателей природного строения

Показатель	Прогноз активности развития карста				Прогноз размеров проявлений карста		
	Макс. знач.	Среднее знач. *	Станд. откл. *	Закон распределения	Коэффициенты прогнозного уравнения *		Характер зависимости *
					<i>a</i>	<i>b</i>	
L_l	14,7	-0,91	0,49	логнормальный	0,5092	-0,3081	экспоненциальная
M_l	70,7	-2,23	1,26	логнормальный	0,2495	-0,6664	степенная
B_l	2,9	-2,53	1,17	логнормальный	0,0116	1,6450	экспоненциальная
R_l	665,0	-2,12	1,09	логнормальный	0,0003	0,0049	линейная
m_p	80,7	-2,02	1,38	логнормальный	0,0049	0,0075	линейная
m_Q	36,6	-2,32	1,29	логнормальный	0,0105	0,1080	экспоненциальная
m_{NQ}	65,0	0,19	0,15	нормальный	0,0099	0,0984	экспоненциальная
H_Q	19,6	-1,37	0,62	логнормальный	0,3162	-0,2667	экспоненциальная
H_k	81,4	-1,39	0,96	логнормальный	0,0056	0,0067	линейная
M	21,2	-2,73	0,89	логнормальный	0,0384	0,8066	степенная
β	47,3	-3,57	0,98	логнормальный	0,4662	-0,8361	степенная
ΔH	114,7	0,52	0,18	нормальный	0,0059	0,0326	экспоненциальная

Показатель	Прогноз активности развития карста				Прогноз размеров проявлений карста		
	Макс. знач.	Среднее знач. *	Станд. откл. *	Закон распределения	Коэффициенты прогнозного уравнения *		Характер зависимости *
					<i>a</i>	<i>b</i>	
U	3028,7	-1,65	0,90	логнормальный	0,0003	0,0000	линейная
$\tan \alpha$	2,22	-3,34	0,74	логнормальный	0,0037	-1,2466	степенная
E_0	39,6	-0,98	0,37	логнормальный	0,5092	-0,3081	экспоненциальная
φ	38,4	-0,62	0,26	логнормальный	0,2495	-0,6664	степенная
c	58,5	0,38	0,15	нормальный	0,0116	1,6450	экспоненциальная

*Параметры теоретических распределений и прогнозных зависимостей приведены в индексной (нормализованной) форме.

Оценка размеров проявлений карста в инженерно-геологических целях осуществляется посредством изучения морфометрии карстовых форм.

В практике карстологического анализа давно доказано, что распределение диаметров карстовых провалов носит логарифмически нормальный характер [5]. Результаты исследований *К. А. Горбуновой* [2] и *Н. П. Торсуева* [3] показали, что логарифмически нормальный характер распределения прослеживается и в отношении глубин карстовых провалов.

В результате анализа большого объема информации по морфометрии полостей и зон дробления, развитых на территории Пермского края, и ее последующей статистической обработки было установлено, что им также присущ логнормальный характер распределения. В результате сопоставления распределений исследуемых морфометрических характеристик как поверхностных, так и подземных карстовых форм было выявлено их фактическое совпадение [5].

Прогнозирование морфометрических параметров карстопроявлений в зависимости от значений показателей природного строения осуществляется по специально разработанной методике [4], которая позволяет на основе установленного тренда подбирать вид и

форму прогнозных кривых. Извлечь информацию об имеющемся тренде позволяет операция осреднения значений морфометрических параметров карстовых форм в равных интервалах значений исследуемых показателей. Прогнозная кривая подбирается аналитическим методом в результате вычленения из общего облака точек как можно большего количества тех из них, которые в максимальной степени «ложатся» на выявленный тренд. Коэффициенты прогнозных уравнений, установленных в рамках исследуемых пилотных территорий, приведены в таблице 2.

Вероятностные параметры карстоопасности. Оценка вероятности образования карстовых форм по установленным теоретическим распределениям заключается в расчете интегральной функции распределения F , которая устанавливает частоту встречаемости карстовых форм в пределах определенного интервала значений исследуемого показателя природного строения:

$$F = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(x_i - x_n)^2}{2\sigma_x^2}} - \text{нормальный закон,} \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_a^b e^{-\frac{(\ln x_i - \ln x_n)^2}{2\sigma_{\ln x}^2}} - \text{логнормальный закон,} \quad (2)$$

где σ - среднеквадратическое отклонение показателя природного строения; x_n - среднее значение показателя; x_i - частные значения исследуемого показателя; a и b - пределы интегрирования.

Вероятностные оценки по интегральной функции распределения могут быть применены при исследованиях в пределах некоторой площади, в границах которой устанавливаются минимальное a и максимальное b значения показателя природного строения, являющиеся пределами интегрирования. В данном случае оцениваемой величиной будет интервальная вероятность Pab образования карстовых форм.

В целях районирования территории по степени карстоопасности в условиях недостатка информации наиболее удобным является расчет полной интервальной вероятности Pb образования карстовых форм, нижний предел интегрирования a при вычислении которой принимается равным 0, а верхний b - значению анализируемого показателя природного строения в исследуемой точке карстового массива. Расчетные формулы имеют следующий вид:

$$Pb = 2Fb - \text{при } Fb \leq 0,5 \quad (3)$$

$$Pb = 2(1 - Fb) - \text{при } Fb > 0,5 \quad (4)$$

Преимуществом использования полной интервальной вероятности является возможность ее расчета в любой конкретной точке исследуемой территории (например, по показателям, установленным в отдельной взятой скважине) без привязки к конкретной площади или исследуемому участку в целом. Однако следует учитывать, что величина Pb не является реальной вероятностной величиной. Она только в некоторой пропорции отражает активность и опасность развития карста в конкретных природных условиях.

Интегральная оценка карстоопасности. Вероятностные оценки карстоопасности (Pab , Pb) и прогнозные значения морфометрических характеристик карстовых форм в индексном выражении (I) (далее - параметры опасности X) рассчитываются для каждого показателя природного строения. Интегральная оценка этих характеристик устанавливается из частных оценок, полученных по отдельным показателям природного строения и сгруппированным в соответствующие группы в зависимости от генетической принадлежности показателей. Математически интегральный расчет записывается в следующем виде [11]:

$$X = a_{St} X_{St} + a_G X_G + a_{Hg} X_{Hg} + a_{Ge} X_{Ge} + a_{Eg} X_{Eg} , \quad (5)$$

где a - весовые коэффициенты, X - среднее групповое значение параметра опасности.

Применение весовых коэффициентов в интегральной модели позволяет устанавливать уровень значимости частных оценок по каждой из отдельных групп показателей. Один из возможных вариантов определения весовых коэффициентов приведен в работе *С. В. Щербакова* [9].

Список литературы

1. *Андрейчук В. Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
2. *Горбунова К. А.* Морфометрическая характеристика карбонатного карста // Карст Урала и Приуралья: матер. Всеуральского совещания, ноябрь, 1968 г. Пермь, 1968. С. 33–39.

3. *Торсуев Н. П.* Пространственно-временная организация карстовых систем. Казань: Изд-во «Отечество», 2007. 180 с.

4. *Щербаков С. В.* Методика изучения взаимосвязей между карстовыми формами и природными условиями территорий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. [Адрес в сети Интернет: www.science-education.ru/105-7232] (дата обращения: 23.10.2012).

5. *Щербаков С. В., Катаев В. Н.* К оценке морфометрических параметров карстовых форм // Инженерная геология. № 1. Москва: ПНИИИС, 2013. С. 56–64.

6. *Щербаков С. В.* К проблеме поиска универсальных показателей природного строения при оценке карстоопасности территорий // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Геонауки-2013: актуальные проблемы изучения недр». Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. Вып. 13. С. 156–162.

7. *Щербаков С. В.* Карстовые формы и их роль при оценке карстоопасности территорий // Малышевские чтения: Материалы Всероссийской научной конференции в 2-х т. Т. 1 / Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ/ИПК «Кириллица». Старый Оскол, 2013. С. 141–147.

8. *Щербаков С. В.* Методологические принципы оценки карстоопасности // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: статьи по материалы регион. науч.-практ. конф. / гл. ред. *Р. Г. Ибламинов*; Перм. гос. нац. иссл. ун-т. - Пермь, 2014. С. 96–99.

9. *Щербаков С. В.* Расчет весовых коэффициентов интегральной математической модели при инженерно-карстологических исследованиях // Инновации в современной геологической науке и практике: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Старооскольский филиал ФГБОУ ВПО МГРИ-РГГРУ. - Старый Оскол: Изд-во РОСА, 2014. С. 406–411.

10. *Щербаков С. В.* Нормализация данных при карстологических исследованиях // Наука, образование, общество: проблемы и перспективы развития: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 февраля 2014 г.: в 12 частях. Часть 10. М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2014. С. 161–162.

11. *Scherbakov S. V.* Modern approach to an assessment of karst hazard // Global View of Engineering Geology and the Environment: proceeding of the International symposium and 9th Asian Regional conference of IAEG, Beijing, China, 23–25 September 2013. CRS Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2013. P. 867–872.