

К ОЦЕНКЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАРСТОВЫХ ФОРМ TOWARDS ASSESSMENT OF MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF KARST FORMS

ЩЕРБАКОВ С.В.

Инженер научно-исследовательской части Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ), г. Пермь, greyv@mail.ru

КАТАЕВ В.Н.

Заведующий кафедрой динамической геологии и гидрогеологии ПГНИУ, д.г.-м.н., профессор, г. Пермь, kataev@psu.ru

SHCHERBAKOV S.V.

An engineer of the research sector of Perm State National Research University, Perm, greyv@mail.ru

KATAEV V.N.

The head of the department of dynamic geology and hydrogeology of Perm State National Research University, doctor of science (Geology and Mineralogy), professor, Perm, kataev@psu.ru

Ключевые слова:

карстовые формы; провал; воронка; полость; зона дробления; средний диаметр; вертикальная мощность (высота); индекс морфометрии; закон распределения

Key words:

karst forms; doline; sinkhole; cavern; breaking zone; average diameter; vertical thickness (height); morphometry index; distribution law

Аннотация

В статье рассматривается попытка обобщения обширного фактического материала по морфометрическим характеристикам карстовых форм, закартированных в пределах наиболее изученных территорий развития сульфатно-карбонатного карста в Пермском крае, с целью установления статистических закономерностей распределения морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм.

Abstract

The article deals with the attempt to summarize the extensive available factual material on morphometric characteristics of karst forms mapped in the most studied areas of development of sulfate-carbonate karst in the Perm region in order to determine the statistical distribution regularities of morphometric parameters of surface and underground karst forms.

Введение

В пределах многих регионов Российской Федерации, в т.ч. в Пермском крае, ведется активное хозяйственное освоение закарстованных территорий. Строительство и эксплуатация зданий и сооружений различного назначения на участках развития карста всегда сопряжены с определенными рисками возникновения катастрофических ситуаций. Возникновение таких ситуаций определяется возможностью обрушения грунтовых масс в подземные пустоты и, как следствие, образованием провалов на земной поверхности.

Применяемые в практике инженерно-геологических исследований методы прогноза возникновения опасных ситуаций в пределах закарстованных территорий сводятся к получению двух основных характеристик — вероятности возникновения провала в данном месте и оценки его возможных размеров. Например, действующими нормативными документами [10] при районировании закарстованных территорий по степени устойчивости наряду с качественными показателями регламентировано применение двух количественных величин, в зависимости от значений которых территории приписывается та или иная категория устойчивости. Этими величинами являются интенсивность провалообразования и средний диаметр провалов.

Помимо нормативного подхода к оценке устойчивости закарстованных территорий в отечественном и зарубежном опыте инженерного карстоведения имеются многочисленные альтернативные методики проведения такой оценки [1, 4–6, 9, 11, 29]. Большинство авторских методик ориентировано на предсказание расположения участков возможного провалообразования, но при этом вопрос о параметрах возможных провалов, как правило, остается на втором плане.

Кроме того, большинство методов оценки карстоопасности сводится главным образом к анализу плотности распределения поверхностных форм карста, чаще по результатам картирования и описания карстовых воронок с последующей их статистической обработкой. В то же время изучение строения карстового массива и развитых в его толще подземных карстовых форм зачастую ограничивается лишь определением их качественных характеристик.

В связи с вышеизложенным в данной работе рассматривается попытка обобщения обширного фактического материала по морфометрическим характеристикам карстовых форм, закартированных в пределах наиболее изученных территорий развития сульфатно-карбонатного карста в Пермском крае. Целью является установление статистических закономерностей распределения морфометрических па-



раметров как поверхностных, так и подземных карстовых форм с их последующей генерализацией. Пилотными в данном исследовании служат территории г. Кунгура, пгт Полазны, энергокоридора трансрегионального газопровода высокого давления «Ямбург — Елец» на участке Красноясыльского полигона близ п. Красный Ясыл Ординского района, п. Октябрьский (рис. 1).

Статистическая характеристика карстовых форм

При анализе были использованы параметры воронок и провалов, полученные в результате карстологических съемок, а также характеристики карстовых полостей и зон дробления, вскрытых в результате буровых работ. Обоснование включения в карстологический анализ зон дробления было выполнено авторами ранее [19]. За исходные данные для анализа были приняты основные морфометрические характеристики карстовых форм: *средний диаметр d и глубина z воронок и провалов, высота (мощность) h полостей и зон дробления*, вскрытых бурением. Некоторые основные статистические характеристики исследуемых морфометрических параметров карстовых форм приведены в табл. 1, 2.

В практике карстологического анализа давно доказано, что распределение диаметров карстовых провалов носит логарифмически-нормальный характер [3, 8, 11]. При этом в зависимости от возраста провалов кривая логнормального распределения постепенно отклоняется в сторону больших значений

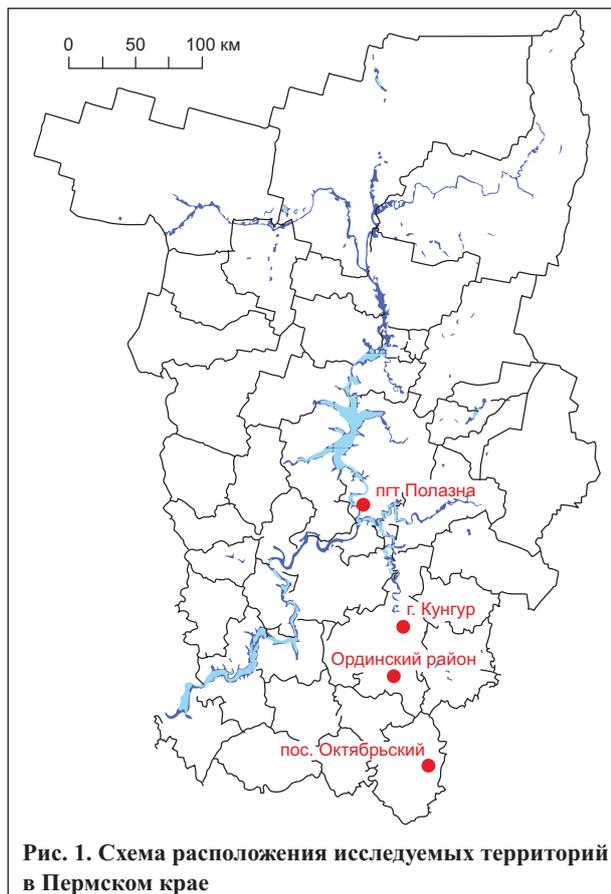


Рис. 1. Схема расположения исследуемых территорий в Пермском крае

[5, 7, 8, 12], однако характер этого отклонения в большинстве случаев оказывается незначительным.

Таблица 1

Статистическая характеристика средних морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления				
Территория исследования	Количество карстовых форм, шт.	Диаметр поверхностных, высота (мощность) подземных карстовых форм, м		
		мин.	макс.	средн.
<i>Карстовые провалы и воронки</i>				
г. Кунгур	854	0,1	35,7	8,7
пгт Полазна	535	0,5	100,0	8,8
Ординский р-н	1906	0,4	85,0	10,3
п. Октябрьский	89	1,0	90,0	14,4
ОБЩЕЕ*	3384	0,1	100,0	10,6
<i>Карстовые полости</i>				
г. Кунгур	509	0,1	17,8	2,2
пгт Полазна	146	0,2	18,0	2,6
Ординский район	352	0,1	9,5	1,4
пос. Октябрьский	40	0,1	9,0	1,2
ОБЩЕЕ	1047	0,1	18,0	1,9
<i>Зоны дробления</i>				
г. Кунгур	386	0,1	13,8	3,4
пгт Полазна	82	0,5	21,0	4,4
Ординский район	408	0,1	28,0	3,4
пос. Октябрьский	221	0,1	31,5	2,9
ОБЩЕЕ	1097	0,1	31,5	3,5

* В строках «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям.

Таблица 2

Статистическая характеристика карстовых провалов и воронок по их глубине				
Территория исследования	Количество карстовых форм, шт.	Глубина провалов и воронок, м		
		мин.	макс.	средн.
г. Кунгур	412	0,1	13,0	1,5
пгт Полазна	209	0,2	35,0	3,6
Ординский район	1861	0,1	20,0	2,8
п. Октябрьский	76	0,2	10,0	2,4
ОБЩЕЕ*	2558	0,1	35,0	2,6

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям.

Выбор пилотных территорий в дополнение к перечисленным критериям определялся еще и возможностью определения связи между возрастом поверхностных карстовых форм и их средними диаметрами с использованием результатов ранее проведенных исследований. Так, в пределах г. Кунгура и пгт Полазны за последние 50 лет неоднократно фиксировались случаи образования провалов, велись их описание и привязка. На участке газопровода в пределах территории Ординского района мониторинг образования новых провальных деформаций ведется Пермским государственным национальным исследовательским университетом и ОАО «Пермгипроводхоз» лишь с 1998 г. и носит в большей степени инициативный характер. Большая же часть карстовых воронок была закартирована на этой территории в 1980-х — начале 1990-х гг. На территории пос. Октябрьского мониторинг новых провальных деформаций не осуществлялся, хотя и проводились точечные карстологические съемки с выявлением карстовых воронок. По приведенным в табл. 1 данным хорошо прослеживается возрастание средних диаметров поверхностных карстовых форм, закартированных в пределах Ординского района и пос. Октябрьского.

Результаты исследований К.А. Горбуновой [3] и Н.П. Торсуева [13, 14] показали, что логарифмически-нормальный характер распределения прослеживается и в отношении глубин карстовых провалов. Близость средней глубины карстовых форм к минимальным значениям характерна для провалов и воронок всех исследуемых районов (см. табл. 2). Этими же авторами впервые была отмечена прямая

корреляционная связь между диаметрами и глубиной воронок.

Для поверхностных карстовых форм, развитых в пределах исследуемых территорий, также наблюдается прямая корреляция между их средними диаметрами и глубиной. Причем в большинстве случаев эта связь носит тесный характер, и лишь на территории г. Кунгура корреляционная зависимость выражена слабо.

После обработки первичной генеральной совокупности данных и исключения из нее наиболее отклоняющихся от общего тренда пар значений средних диаметров и глубин для всех исследуемых территорий были получены весьма тесные зависимости между этими параметрами. В таблице 3 приведены регрессионные уравнения, которые не только рекомендуются использовать как прогнозные в рамках рассматриваемых территорий, но и с определенной долей погрешности допускается применять при исследованиях в других карстовых районах Пермского края, характеризующихся схожим геологическим строением.

Выявление особенностей распределения основных морфометрических параметров поверхностных карстовых форм, таких как провалы и воронки, на сегодняшний день является практически обычным элементом карстологического анализа. Однако следует заметить, что особенности распределения параметров подземных карстовых форм в практике карстологического анализа применяются редко. Большой объем информации по морфометрии полостей и зон дробления, полученный авторами в процессе выполнения комплексной работы «Мониторинг закарстованных территорий Пермской обла-

Таблица 3

Зависимость глубины провалов от их средних диаметров					
Территория исследования	Генеральная совокупность		Выборочная совокупность		Прогнозное уравнение
	Кол-во пар значений, шт.	Коэффициент корреляции, д.е.	Кол-во пар значений, шт.	Коэффициент корреляции, д.е.	
г. Кунгур	412	0,35	295	0,78	$z = 0,2955d$
пгт Полазна	209	0,79	166	0,96	$z = 0,3547d$
Ординский р-н	1861	0,65	1633	0,85	$z = 0,2891d$
п. Октябрьский	76	0,64	60	0,88	$z = 0,2803d$
ОБЩЕЕ*	2558	0,68	1968	0,92	$z = 0,3107d$

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям.



сти» в 2006–2010 гг. [7] и его последующая статистическая обработка позволили установить логнормальный характер распределения вертикальных параметров (мощностей) полостей и зон дробления (см. табл. 2). Распределения диаметров и глубины провалов, вертикальных размеров полостей и зон дробления носят один и тот же характер. Средние значения этих морфометрических характеристик наиболее близки к их минимальным величинам. При наличии достаточно большого количества данных по исследуемым морфометрическим параметрам карстовых форм их распределения весьма точно соответствуют логарифмически-нормальному закону.

Изучение взаимосвязей между морфометрией поверхностных и подземных карстовых форм

В связи с отмеченной общностью распределений исследуемых морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм закономерно возникает вопрос о наличии взаимосвязей между этими характеристиками. Заметим, что он уже неоднократно поднимался раньше. Так, например, на прямой характер зависимости диаметров провалов от высоты подземных полостей указывали В.Н. Андрейчук [2], В.В. Толмачев и Ф. Ройтер [12], однако все эти наблюдения оставались лишь на качественном уровне.

Следует признать, что проследить взаимосвязь между средними диаметрами поверхностных и высотами (мощностями) подземных карстовых форм, а затем представить ее в количественной форме достаточно сложно. Эту задачу практически невозможно решить стандартными статистическими методами поиска корреляционных зависимостей, что обуславливается сложностью строения закарстованных массивов, а также технической ограниченностью применяемых полевых методов исследования.

В настоящее время наиболее достоверные сведения о наличии подземных карстовых пустот и зон дробления коренных пород и их морфометрии можно получить только по данным изучения карстового массива прямыми методами, основными из которых являются непосредственные наблюдения в естественных подземных пустотах (спелеологический метод) и бурение. Среди косвенных методов наиболее эффективны геофизические, рекомендуемые к применению в практике инженерно-геологических изысканий в карстовых районах. Однако интерпретация их результатов в сложных геологических условиях часто бывает неоднозначной. Материалы геофизических исследований требуют обязательного сопоставления с данными бурения. Их эффективность при проведении карстологических работ в значительной степени определяется глубиной исследования.

Ввиду невозможности равномерного площадного изучения подземного пространства и, как следствие, установления мощности полостей и зон дробления во всех точках массива невозможно осуществлять и непосредственное сопоставление этих форм с провалами, происходящими на поверхности. Современ-

ными методами исследований устанавливается лишь случайное дискретное расположение карстовых форм в пространстве. В таких условиях оценка зависимостей между их морфометрией должна осуществляться комплексированием нескольких подходов. В данной работе использованы следующие процедуры анализа:

- 1) сопоставление кривых распределений основных морфометрических параметров карстовых форм;
- 2) оценка площадного распределения равных интервалов их значений;
- 3) картографическое сопоставление площадей с общими интервалами изменчивости этих параметров.

Сопоставление распределений морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм друг с другом осуществляется путем приведения их к общему виду. Для этого каждое частное значение рассматриваемой характеристики делится на ее территориальный максимум (максимальное значение в пределах всей исследуемой территории). В результате исследователь получает возможность использования *индексных оценок морфометрии карстовых форм и зон дробления*:

$$I_{di} = d_i / \max d, I_{zi} = z_i / \max z,$$

$$I_{hpi} = h_{pi} / \max h_p, I_{hzi} = h_{zi} / \max h_z$$

где $I_{di}, I_{zi}, I_{hpi}, I_{hzi}$ — индексные оценки i -х значений показателей d_i, z_i, h_{pi}, h_{zi} (соответственно диаметра воронки или провала, глубины воронки или провала, высоты полости, мощности зоны дробления, м), д.е.

Преимущество использования индексных оценок заключается в том, что в результате такой операции новые значения каждого из показателей изменяются в одинаковых пределах — от 0 до 1 — и появляется возможность сравнивать разноразмерные показатели друг с другом. При этом, чтобы получить истинное значение характеристики, достаточно выполнить обратную операцию — умножить ее индексное значение на территориальный максимум.

Данные, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что средние индексные оценки исследуемых морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления хотя и близки, но не совпадают друг с другом. Данная особенность касается параметров не только поверхностных и подземных карстовых форм в рамках одной территориальной единицы, но и однотипных карстовых форм в пределах различных территорий. Однако в результате обобщения (осреднения) индексных оценок по всем исследуемым районам все морфометрические характеристики, за исключением глубины, становятся практически одинаковыми.

Дифференциальные кривые распределений, построенные по индексным оценкам средних диаметров, глубин и мощностей карстовых форм, в целом отражают их логнормальный характер. Лишь в случае мощностей зон дробления дифференциальные кривые их распределений несколько отклоняются от логнормального закона и стремятся к экспоненциальному виду.

Примечательным является практическое совпадение друг с другом эмпирических кривых, полученных для различных районов исследования. Данное обстоятельство позволило перейти к использованию *обобщенных осредненных эмпирических дифференциальных кривых* распределений индексов морфометрии карстовых форм в пределах всех исследуемых территориальных единиц с минимальными потерями в точности прогнозов. По ним были подобраны теоретические кривые. Так, обобщенные распределения средних диаметров и глубин провалов, а также высот полостей полностью соответствуют логнормальному закону. Распределение значений обобщенных

мощностей зон дробления в целом соответствует логнормальному виду, но тем не менее наилучшим образом описывается экспоненциальным законом (рис. 2, 3).

Сопоставление обобщенных кривых распределений различных морфометрических параметров, выраженных в индексной форме, свидетельствует об их практической идентичности. Это позволяет вместо набора кривых для разных параметров использовать одну, в интегрированной форме отражающую каждое из распределений. Это интегрированное распределение можно получить путем общего осреднения всех отдельных случаев для каждого параметра. При этом теоретическая кривая логнор-

Таблица 4

Сравнение средних индексных значений морфометрических параметров карстовых форм и зон дробления				
Территория исследования	Средние индексы морфометрии, д.е.			
	провалы и воронки		высота полостей	мощность зон дробления
	глубина	высота		
г. Кунгур	0,12	0,24	0,12	0,25
пгт Полазна	0,01	0,01	0,14	0,21
Ординский р-н	0,14	0,12	0,15	0,12
п. Октябрьский	0,24	0,16	0,13	0,09
ОБЩЕЕ*	0,07	0,11	0,11	0,11

* В строке «ОБЩЕЕ» дана интегральная характеристика рассматриваемых статистических параметров по всем исследуемым территориям

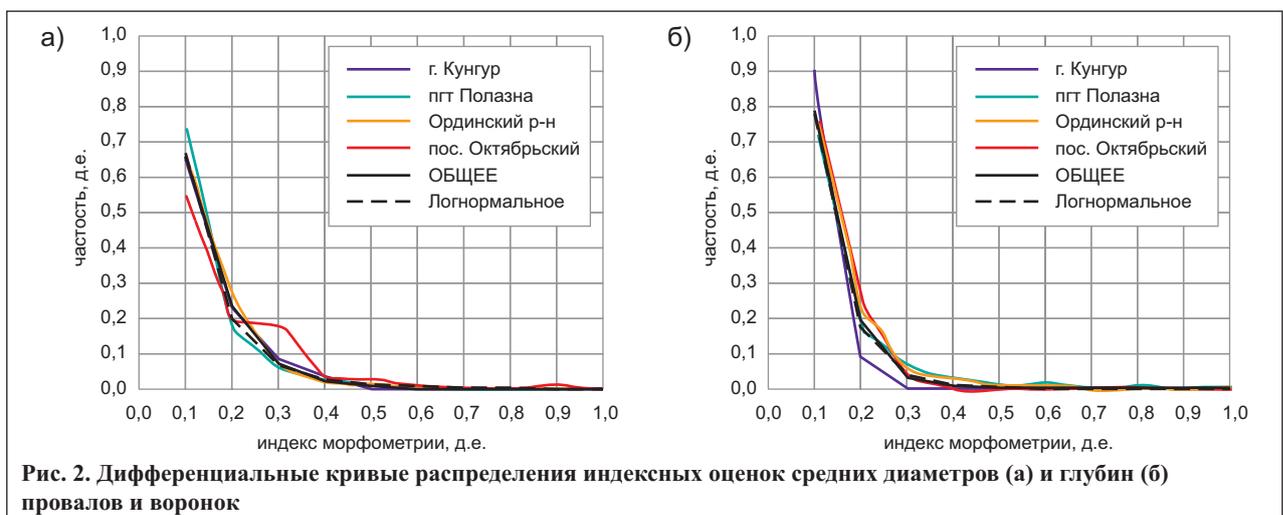


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения индексных оценок средних диаметров (а) и глубин (б) провалов и воронок

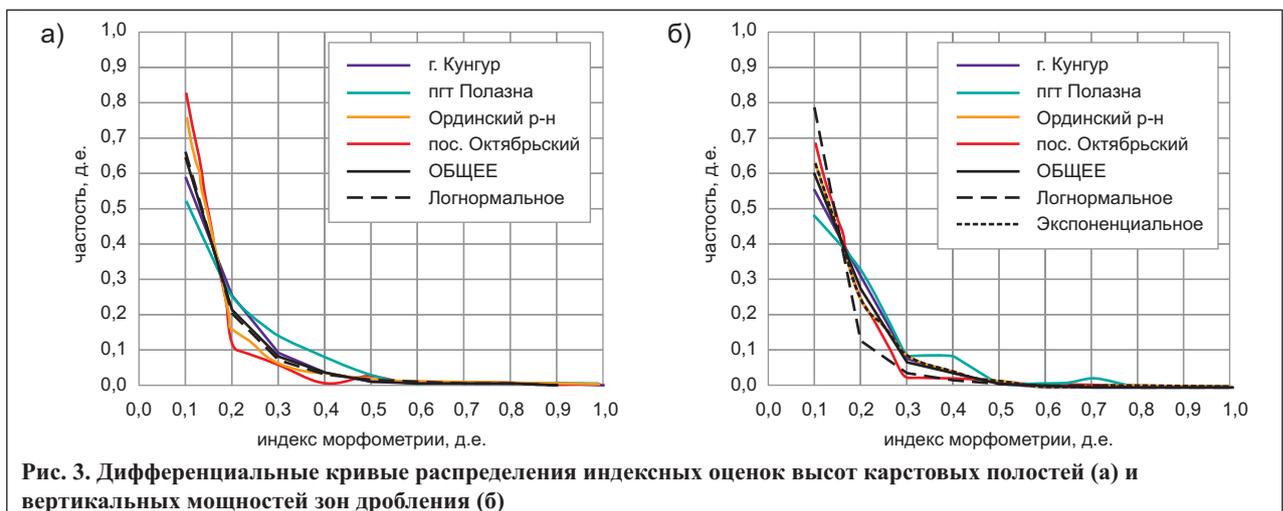
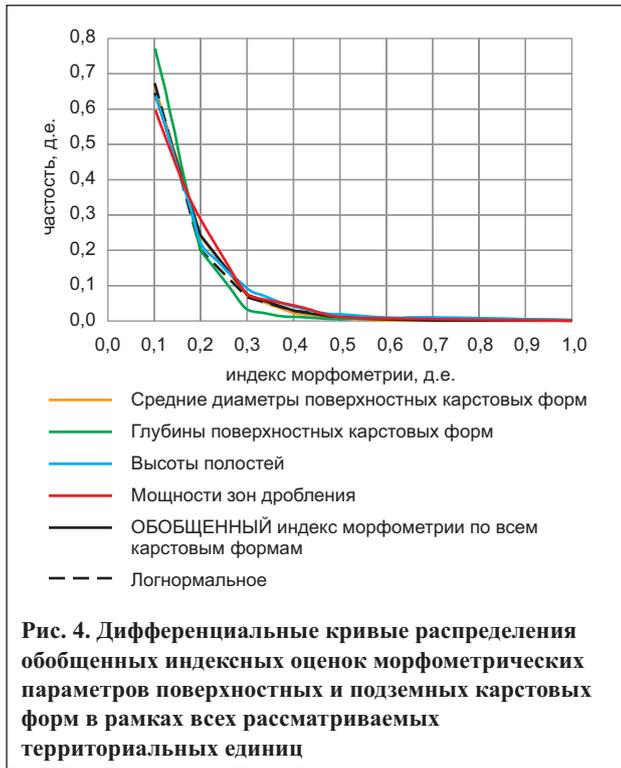


Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения индексных оценок высот карстовых полостей (а) и вертикальных мощностей зон дробления (б)



мального распределения средних диаметров провалов и воронок, выраженных в индексной форме, наилучшим образом соответствует обобщенной интегрированной кривой (рис. 4).

Совпадение индексных оценок различных морфометрических параметров между собой позволяет ввести самостоятельный показатель — *общий индекс морфометрии I*, характеризующий распределения как средних диаметров и глубин провалов и воронок, так и вертикальных размеров полостей и зон дроблений.

Однако совпадение распределений морфометрических характеристик поверхностных и подземных карстовых форм, хотя и является прямым индикатором их взаимозависимости, отнюдь не дает гарантий того, что между ними имеются тесные корреляционные связи. Подтверждением взаимосвязи между морфометрией поверхностных и подземных карстовых форм может служить анализ их площадного развития в рамках ореолов, характеризующихся определенными значениями индексов морфометрии, а также картографическое сопоставление площадей их распространения.

Данные, приведенные в табл. 5, свидетельствуют о том, что в площадном отношении в пределах всех исследуемых территорий наиболее развиты карстовые формы с относительно небольшими диаметрами и высотами (менее 0,2 в индексном выражении). С увеличением средних размеров провалов, полостей и зон дробления площади их пространственного развития заметно сокращаются. Так, на долю относительно крупных карстовых форм с индексом морфометрии, превышающим 0,5, приходится менее 10% исследуемых площадей. Такая тенденция в одинаковой мере свойственна как поверхностным, так и подземным карстовым формам.

В связи с этим, а также с логнормальным характером распределения морфометрических парамет-

Таблица 5

Площади распространения карстовых форм и зон дробления, характеризующихся соответствующими интервалами значений индексов морфометрии

Интервальные значения индексов морфометрии, д.е.	Площади распространения карстовых форм и зон дробления, %																			
	г. Кунгур				пгт Полазна				Ординский район				пос. Октябрьский				Все рассматриваемые территории			
	про-валы и во-ронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и во-ронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и во-ронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и во-ронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и во-ронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ
<0,1	15,4	15,7	5,4	36,6	0,6	2,9	1,3	4,8	0,5	0,7	1,2	2,3	0,9	0,8	3,0	4,7	17,4	20,1	10,9	48,4
0,1-0,2	5,6	7,3	7,1	20,0	0,8	2,8	2,0	5,6	0,4	0,6	0,6	1,6	0,9	2,1	3,0	6,0	7,7	12,8	12,7	33,3
0,2-0,3	3,7	1,3	8,3	13,3	1,3	0,5	1,4	3,2	0,4	0,2	0,3	0,8	1,7	0,5	0,8	3,0	7,0	2,5	10,8	20,4
0,3-0,4	4,2	0,8	5,2	10,2	1,0	0,0	1,2	2,2	0,4	0,1	0,0	0,5	1,4	0,1	0,5	2,0	7,0	0,9	6,9	14,9
0,4-0,5	2,1	0,5	2,3	4,9	0,9	0,0	0,2	1,1	0,2	0,0	0,0	0,3	1,1	0	0,1	1,2	4,3	0,6	2,6	7,5
0,5-0,6	1,1	0,2	1,9	3,1	0,7	0,0	0,1	0,8	0,1	0,0	0,0	0,1	0,7	0,0	0,0	0,7	2,6	0,2	2,0	4,8
0,6-0,7	0,7	0,2	0,7	1,6	0,6	0,0	0,0	0,6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,4	1,8	0,2	0,7	2,7
0,7-0,8	0,3	0,2	0,3	0,8	0,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,3	1,1	0,2	0,3	1,6
0,8-0,9	0,1	0,0	0,1	0,3	0,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,7	0,0	0,2	0,9
0,9-1,0	0,1	0,0	5,4	5,5	0,7	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	1,0	0,0	5,4	6,4

Таблица 6

Нормативные категории устойчивости по средним диаметрам провалов и соответствующие им средние высоты полостей и мощности зон дробления			
Категория устойчивости	Параметры карстовых форм		
	провалов, воронок	полостей	зон дробления
А	>20,0	>3,6	>6,3
Б	20,0–10,0	3,6–1,8	6,3–3,2
В	10,0–3,0	1,8–0,5	3,2–1,0
Г	<3,0	<0,5	<1,0

ров поверхностных и подземных карстовых форм становится очевидным наличие определенной зависимости между однопорядковыми значениями этих параметров и долями площади, которую занимают соответствующие формы на исследуемой территории.

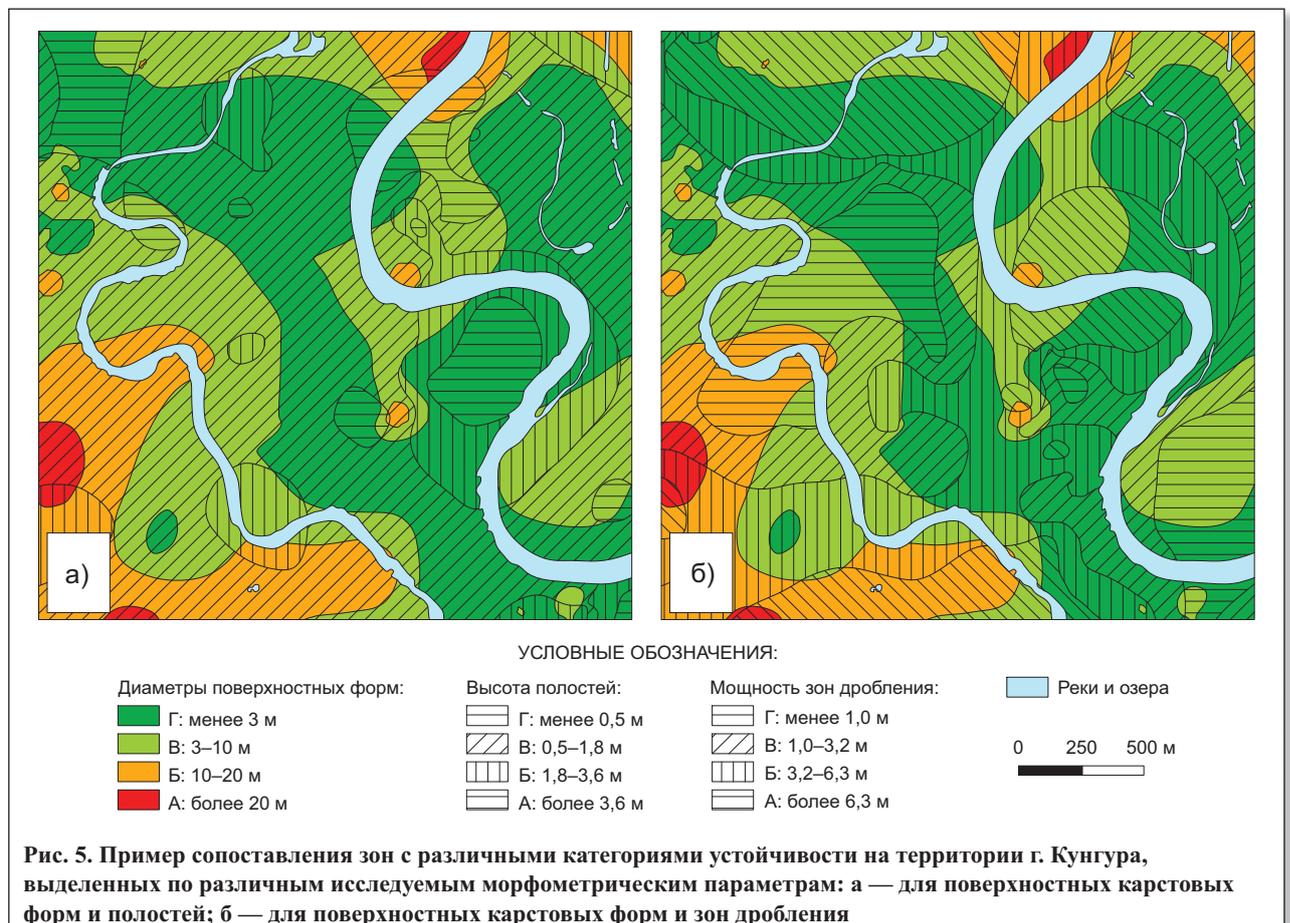
В соответствии с действующими нормативными документами [10, 15–18] закарстованные территории подразделяются на четыре категории по средним диаметрам поверхностных карстовых форм. Заметим, что граничные значения между этими параметрами, соответствующими различным категориям устойчивости, в данных документах заданы с учетом логнормального характера распределения диаметров, что выражается в увеличении их значений для каждой последующей категории. С учетом фактического совпадения распределений индексных оценок морфометрических

Таблица 7

Принципы сопоставления зон с различными категориями устойчивости, выделенных по средним диаметрам поверхностных и высотам подземных карстовых форм и зон дробления		
Уровень совпадения категорий устойчивости	Различие категорий устойчивости	Пример (см. рис. 5)
Плохое	«диаметральное»	А-Г-Б, Г-А-В
Нормальное	«на два порядка»	А-В-Б, Б-Г-В
Хорошее	«на один порядок»	Б-В-Б, А-Б-А
Отличное	отсутствует	А-А-А, Г-Г-Г

характеристик поверхностных и подземных карстовых форм, а также распределений площадей их развития, характеризующихся одинаковыми значениями индексных оценок, были получены аналогичные граничные значения для высот полостей и мощностей зон дробления путем умножения обобщенных индексных оценок на их территориальные максимумы (табл. 6).

Построенные по данным табл. 6 цифровые картографические модели изменчивости морфометрических характеристик карстовых форм и зон дробления, наложенные друг на друга, позволяют осуществлять их визуальное и аналитическое сравнение (рис. 5). В последнем случае сравнение основывается на автоматизированном подсчете площадей пересечения зон с различными категориями устойчивости, выделенных по средним диаметрам



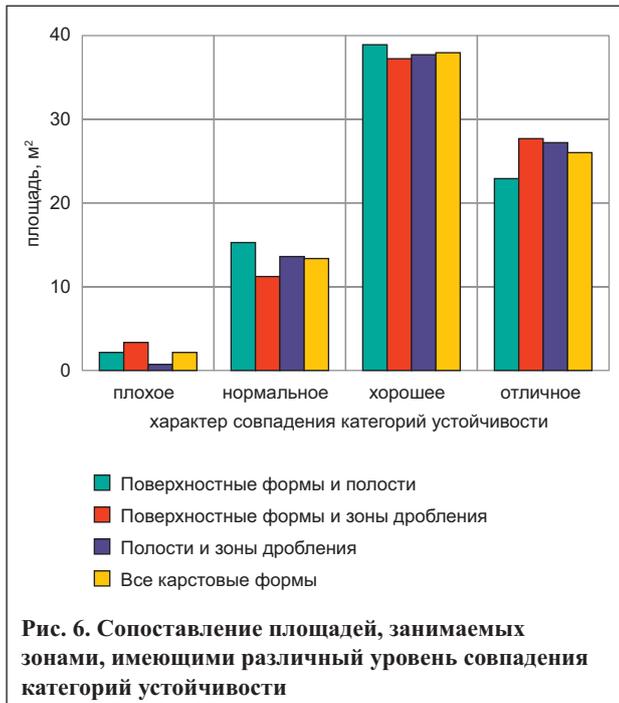


Рис. 6. Сопоставление площадей, занимаемых зонами, имеющими различный уровень совпадения категорий устойчивости

провалов и воронок, высотам полостей и зон дробления. Принципы сопоставления зон с различными категориями устойчивости по различным карстовым формам приведены в табл. 7. Общая доля «хороших» и «отличных» совпадений в площадном выражении значительно превосходит долю «плохих» и «нормальных» и составляет 70–80% (рис. 6).

Прогнозирование морфометрических параметров карстовых форм

Общность распределений и фактическое совпадение площадей распространения подземных и поверхностных карстовых форм с близкими морфометрическими параметрами позволяют сделать вывод о тесной взаимосвязи между их средними диаметрами и высотами. В связи с этим становится возможным осуществлять прогнозирование рассматриваемых морфометрических параметров одних карстовых форм по другим, отталкиваясь от их индексных оценок. Например, при диаметре карстового провала 6,0 м вероятная средняя высота обрушившейся полости и средняя вертикальная мощность возможной зоны дробления составят соответственно 1,1 и 1,9 м. С увеличением среднего диаметра до 15,0 м параметры рассматриваемых подземных карстовых форм будут равны соответственно 2,7 и 4,7 м.

Приведенные соотношения высот полостей и диаметров провалов хорошо согласуются с результатами исследований В.Н. Андрейчука [2] в районе пещеры Золушка в Крыму и в пределах массива Ледяная гора в г. Кунгуре. Общая последовательность данных вычислений заключается в делении известной величины среднего диаметра провала на его территориальный максимум, в результате чего получается индексная оценка этого параметра. Затем производится умножение индексного значения на территориальные максимумы морфометрических характеристик подземных карстовых форм и опреде-

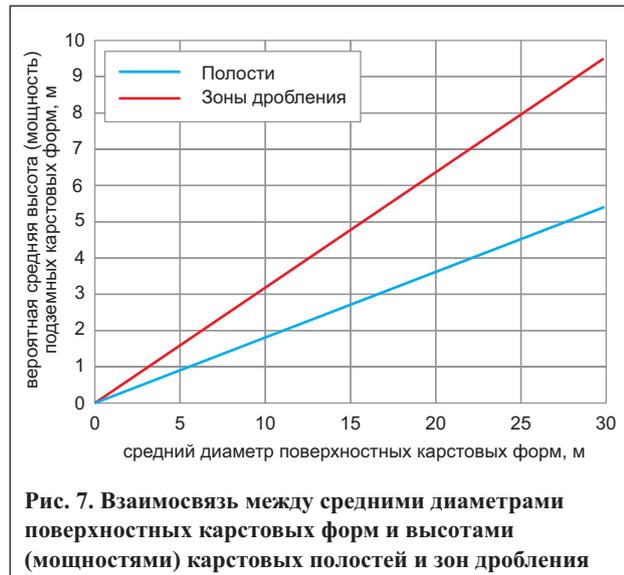


Рис. 7. Взаимосвязь между средними диаметрами поверхностных карстовых форм и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления

ляются их вероятные значения. Рекомендуемые параметры для осуществления прогноза приведены в табл. 8, а на рис. 7 представлены прогнозные прямые, построенные по табличным данным. Заметим, что таким образом возможно делать и обратные прогнозы — определять средние диаметры провалов по известным значениям высот полостей или мощностей раздробленных зон.

Заключение

Следует понимать, что установленная в результате исследований зависимость не является универсальной. Она лишь выражает принципиальный характер взаимосвязи между исследуемыми размерами поверхностных и подземных карстовых форм. Их высота в данном случае выступает в роли ключевого фактора. Именно этот параметр оказывает наиболее сильное влияние и во многом предопределяет вероятные размеры вновь образующихся провалов на поверхности земли.

Однако в природе нередки случаи, когда фиксируются значительные отклонения от установленной взаимосвязи. Согласно рис. 6 в пределах исследуемых территорий такие отклонения («плохое» и «нормальное» совпадения категорий устойчивости) наблюдались в 20% случаев. Это во многом предопределяется действием целого ряда «общих» факторов, таких как гипсометрическое положение полости (зоны дробления), свойства карстующихся пород и грунтов перекрывающей толщи, их мощность и характер залегания, особенности уложенного режима и химизма подземных вод, а также локальный структурный план территории.

Подводя итог, следует еще раз отметить генеральный характер зависимости между средними диаметрами провалов и высотами (мощностями) карстовых полостей и зон дробления в пределах рассматриваемых территорий. Расширение географии исследования с привлечением большего количества сведений о природном строении закарстованных территорий, по-видимому, позволит внести некоторые коррективы, но принципиальный характер выявленной взаимосвязи останется прежним. С учетом этого полу-

Таблица 8

Рекомендуемые параметры для предварительной оценки средних диаметров поверхностных и высот подземных карстовых форм и зон дробления на территории Пермского края			
Карстовые формы	Макс. значение диаметра (высоты) карстовой формы, м	Параметры осредненного логнормального распределения для всех морфометрических характеристик карстовых форм и зон дробления	
		среднее значение	среднеквадр. отклонение
Провалы и воронки	100,0	-2,74	1,02
Полости	18,0		
Зоны дробления	31,5		

ченные результаты могут быть использованы при исследованиях закарстованных территорий в рамках всего Пермского края. В практических целях применение полученных результатов может быть оправданным при изысканиях в таких районах на предпроектных стадиях строительства. Изыскания на стадии разработки проекта и рабочей документации требуют дополнительной корректировки получаемых сведений о морфометрии карстовых форм с привлечением как можно большего количества

данных о влиянии второстепенных факторов на изучаемые параметры.

Исследование, представленное в данной статье, было выполнено в рамках международного научно-хозяйственного освоения и оценки уязвимости подземных вод закарстованных территорий», финансируемого Министерством образования Пермского края. ↻

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адерхолд Г.* Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий / под ред. Е.В. Копосова; пер. с нем. В.В. Толмачева. Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2010. 109 с.
2. *Андрейчук В.Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Прут, 1999. 52 с.
3. *Горбунова К.А.* Морфометрическая характеристика карбонатного карста // Материалы Всеуральского совещания «Карст Урала и Приуралья». Пермь, 1968. С. 33–39.
4. *Дублянская Г.Н., Дублянский В.Н.* Картографирование, районирование и инженерно-геологическая оценка закарстованных территорий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1992. 143 с.
5. *Ерофеев Е.А., Катаев В.Н.* Применение вероятностно-статистических методов оценки карстовой опасности в условиях техногенного воздействия на закарстованные территории // Инженерная геология. 2010. № 4. С. 34–46.
6. *Зиангиров Р.С., Миронов Н.А., Пендин В.В.* Применение многомерного корреляционно-регрессионного анализа для оценки и прогноза устойчивости закарстованной территории // Инженерная геология. 1986. № 3. С. 55–64.
7. *Катаев В.Н.* Опыт организации карстомониторинга (на примере закарстованных территорий Пермского края) // Материалы семинара по проблемам инженерного карстования. Дзержинск: Изд-во СРО НП «ИГИС», 2012. С. 59–71.
8. *Костарев В.П.* Провалы Кунгурско-Иренского междуречья // Тезисы докладов Юбилейной конференции «Карстовые провалы», г. Кунгур, 28–29 сентября, 1994 г. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. С. 60–63.
9. Методические рекомендации по прогнозу карстопровальной опасности с учетом временного фактора / Н.А. Блоцкий, Н.Н. Ковшиков. Черкасы: ОНИИТЭХИМ, 1989. 35 с.
10. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II: Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. М.: Госстрой России, 2000.
11. *Толмачев В.В.* Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий // Инженерная геология. 1980. № 3. С. 98–107.
12. *Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. 151 с.
13. *Торсуев Н.П., Трофимов А.М.* Зависимость диаметра карстовых воронок от глубины и ее геоморфологический смысл // Географический сборник. Вып. 4. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1969. С. 12–18.
14. *Торсуев Н.П.* Пространственно-временная организация карстовых систем. Казань: Отечество, 2007. 180 с.
15. ТСН 302-50-95 РБ. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях. Уфа: Госстрой Республики Башкортостан, 1996. 44 с.
16. ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород: Администрация Нижегородской области, 1999. 72 с.
17. ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области. Пермь: Администрация Пермской области, 2005.
18. ТСН 31-11-2005 Пк. Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Пермского края. Пермь: Администрация губернатора Пермского края, 2005.
19. *Щербаков С.В.* Анализ подземной закарстованности на территории Полазненского полуострова // Материалы 1-й Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире». Пермь: Изд-во Пермского гос. ун-та, 2010. Т. 2. С. 43–46.
20. *Щербаков С.В., Катаев В.Н.* Интегральная оценка карстоопасности урбанизированных территорий (на примере г. Кунгура) // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2011. Т. 153. Кн. 1. С. 203–224.