



# 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, greyvr@mail.ru

### КАТАЕВ В.Н.

Зав. 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, greyvr@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

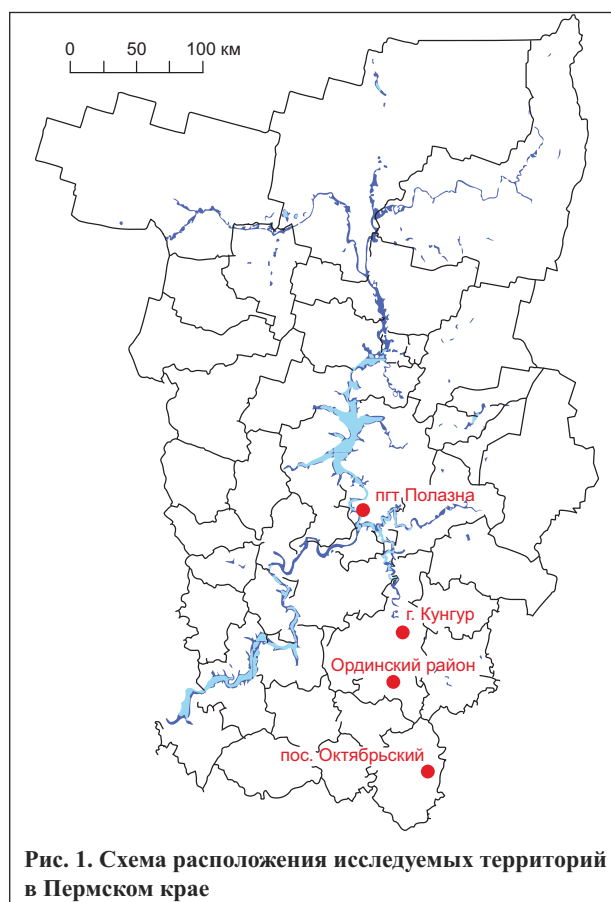


Рис. 1. Схема расположения исследуемых территорий в Пермском крае

[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 «Пермгипрорудхоз» 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 допускаются 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

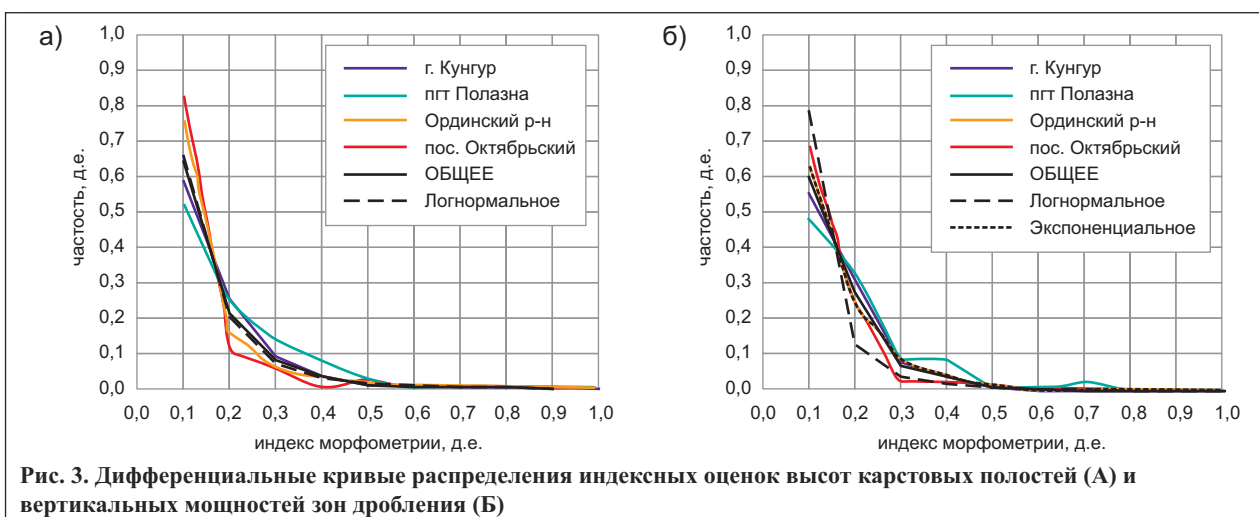
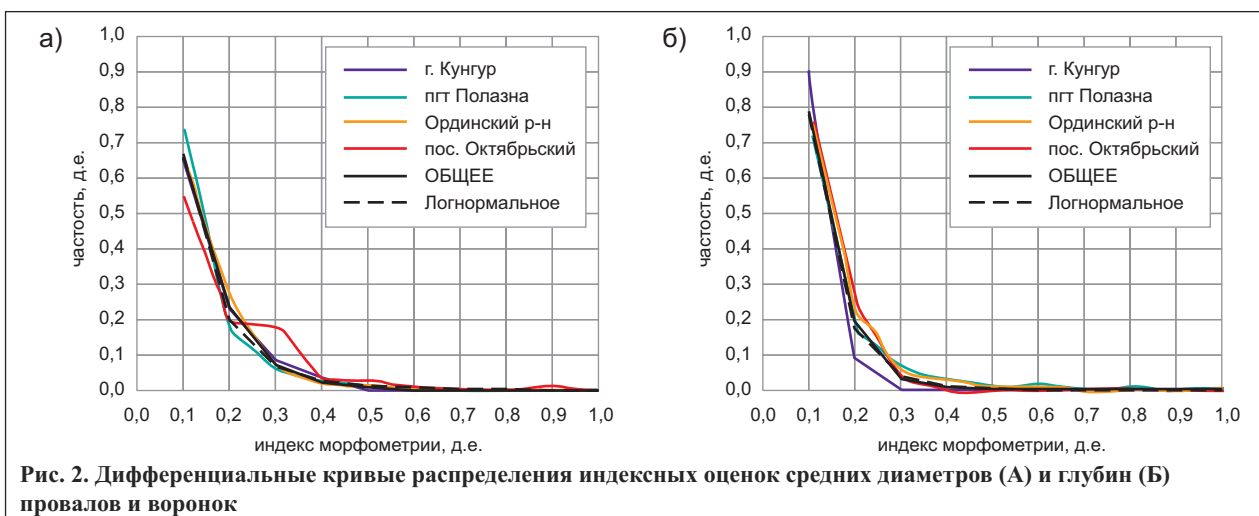
мощностей зон дробления в целом соответствует логнормальному виду, но тем не менее наилучшим образом описывается экспоненциальным законом (рис. 2, 3).

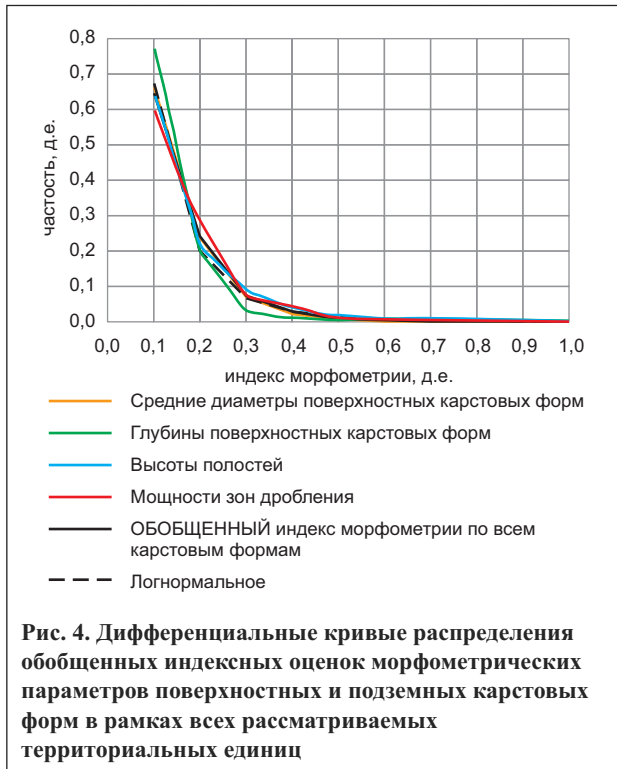
Сопоставление обобщенных кривых распределений различных морфометрических параметров, выраженных в индексной форме, свидетельствует об их практической идентичности. Это позволяет вместо набора кривых для разных параметров использовать одну, в интегрированной форме отражающую каждое из распределений. Это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

Таблица 4

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. 4. Дифференциальные кривые распределения обобщенных индексных оценок морфометрических параметров поверхностных и подземных карстовых форм в рамках всех рассматриваемых территориальных единиц**

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

Интервалы значений индексной морфометрии, д.е.	Площади распространения карстовых форм и зон дробления, %																			
	г. Кунгур				штг. Полазна				Ординский район				пос. Октябрьский				Все рассматриваемые территории			
	про-валы и воронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и воронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и воронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и воронки	поло-сти	зоны дроб-ления	ВСЕ	про-валы и воронки	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.

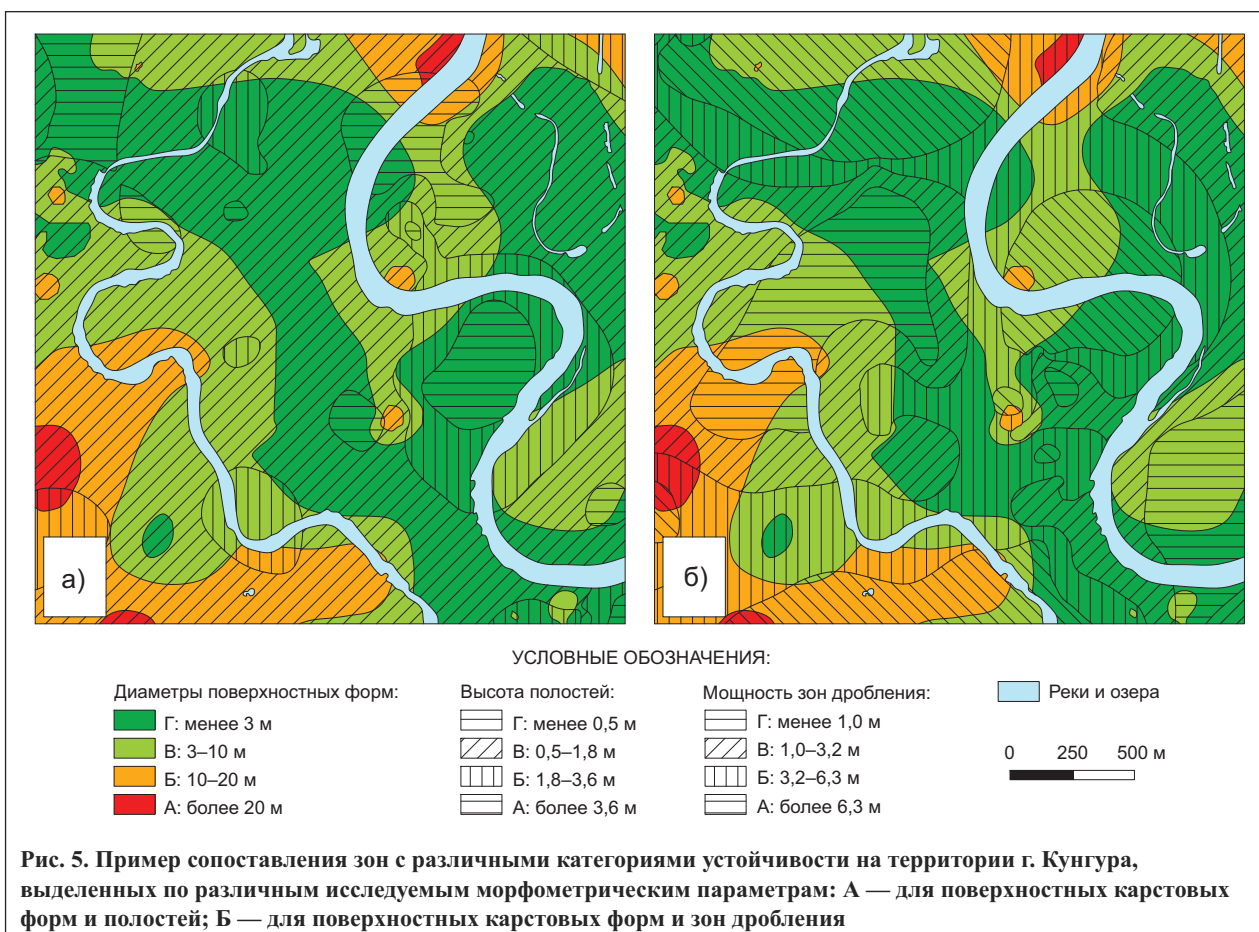
В соответствии с действующими нормативными документами [10, 15–18] закарстованные территории подразделяются на четыре категории по средним диаметрам поверхностных карстовых форм. Заметим, что граничные значения между этими параметрами, соответствующими различным категориям устойчивости, в данных документах 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

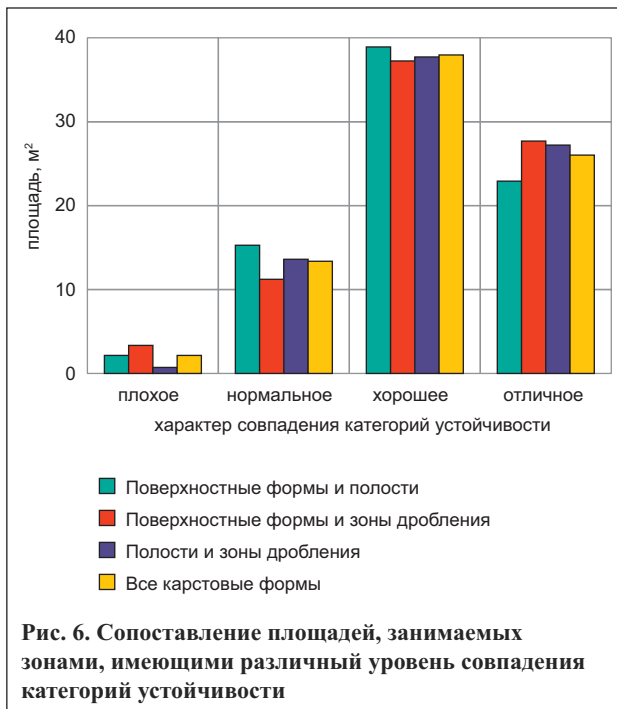
Таблица 7

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





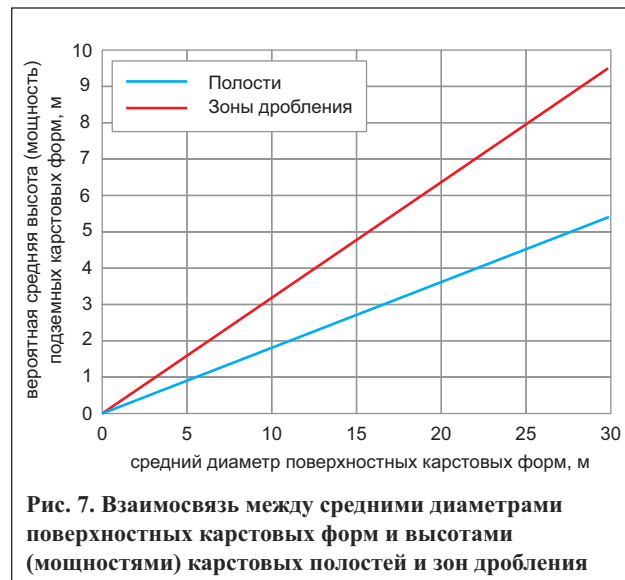
**Рис. 6. Сопоставление площадей, занимаемых зонами, имеющими различный уровень совпадения категорий устойчивости**

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 уровневого 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 нормального распределения для всеморфометрических 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 научного проекта «Развитие методологии риск-анализа 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. Черкассы: 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.