

## ПЛОТНОСТЬ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК И УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Количество карстовых воронок, приходящихся на  $1 \text{ км}^2$ , называется плотностью карстовых воронок. Плотность зависит от многих факторов: состава карстующейся породы, характера и мощности покровных отложений, тектоники и трещиноватости, длительности карстообразования, стадии развития карста, размера воронок, климата, в частности, количества и характера выпадения осадков, температуры, рельефа и других. Влияние геоморфологических условий на плотность карстовых воронок изучено Л. В. Голубевой [2], влияние углов наклона поверхности – Д. С. Соколовым [13], покровных отложений – А. Ф. Якушовой [15], литологического состава карстующихся пород – Л. Г. Резниковой [12].

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что плотность карстовых воронок изменяется в широких пределах: от 0,02 до 248 на  $1 \text{ км}^2$ . Это позволяет подразделить карстовые области или поля на 6 классов плотности, которые нами выделены по десятичной системе (табл. 2).

Закарстованность поверхности отдельных территорий более точно характеризует коэффициент, предложенный Л. В. Голубевой [1]. К сожалению, его пока еще очень редко вычисляют, и поэтому в литературе имеется мало данных.

В Кишертско-Суксунском карстовом районе [10] на Ключевском участке для четырех карстовых полей К. А. Горбунова [3] определила плотность карстовых воронок и коэффициент закарстованности (табл. 3).

З. А. Макеев [4] предлагает определять устойчивость закарстованных территорий по количеству карстовых воронок (форм), возникающих в год на площади в  $1 \text{ км}^2$ . Он различает 5 категорий устойчивости: I. 5–10 и более, II. 1–5, III. 1–0,05, IV. 0,05–0,02, V. Менее 0,02. К первой категории отнесены наиболее неустойчивые участки.

На основе динамики годового прироста плотности провальных карстовых воронок автор предлагает классификацию устойчивости закарстованных территорий в районах гражданского и промышленного строительства, которая дана в табл. 4.

На IV карстовом поле Ключевского участка на площади  $0,37 \text{ км}^2$  за 6 лет (1953–1958) установлено появление 5 новых провальных карстовых воронок. Здесь  $N=2,25$  и  $T=0,43$ , т. е. карстовое поле весьма неустойчивое и относится к 4 классу устойчивости.

Предлагаемой классификацией устойчивости закарстованных территорий при гражданском и промышленном строительстве можно пользоваться при наличии провальных карстовых воронок. Они обычны для карста гипса, развитого в осадочном чехле платформ и краевых прогибов [4]. В этих районах все имеющиеся карстовые воронки можно считать провальными. Применение указанной классификации требует знания генезиса карстовых воронок и наличия наблюдений над появлением карстовых воронок во времени.

Таблица 1

Плотность карстовых воронок

Район	Карстующиеся породы		Площадь, $\text{км}^2$	Количество воронок	Плотность на $1 \text{ км}^2$	Автор подсчета
	возраст	состав				
Пермская область	Pz	Известняки, гипсы	30000	200000	7	Г. А. Максимович, 1958 [10]
Кентукки, США	Pz	Известняки	23310	60000–70000	2,5–3	В. Р. Джилсон, 1924 [20]
Эстония	O, S <sub>1</sub>	Известняки	25000	500–600	0,02–0,024	Г. А. Максимович, Ю. И. Хейнсалу 1959 [11]
Силурийское плато	S <sub>1</sub>	»	696	1779	2,5	А. Ф. Якушева, 1948 [15]
Уфимский амфитеатр (средняя часть)	S, D, C <sub>1</sub>	»	43,5	501	11,5	Д. С. Соколов, 1948 [13]
Моравия	D	»	100	302	3	Г. А. Максимович, 1959 [6]
Уфимское плато (бывший заповедник Предуралья)	P <sub>1</sub>	»	65	700	11	Л. В. Голубева, 1953 [2]
Кунгурский район	P <sub>1</sub>	Гипсы	65	1156	18	»
Ординский район	P <sub>1</sub>	»	30	7459	248	»
Южнословацкий карст – окрестности Силиц	T	Известняки	–	–	80	С. Хабера, 1957 [14]
Блак-Мейан, Вар, Франция*	J <sub>2</sub>	»	3,6	354	98	Г. Меннесие, 1959 [23]
Крым, Яйлы: Айпетринская	J <sub>3</sub>	»	145	3900	27	Б. Н. Иванов
Чатырдаг	J <sub>3</sub>	»	40	1162	29	И. В. Леончева
Демерджи	J <sub>3</sub>	»	25	462	19	А. Г. Штернов
Пуи, Румыния	Cg, 3	»	40	253	7	Г. Герман, 1934 [19]

личное сообщение

\* Карстовые поля

Таблица 2

Классификация карстовых территорий по степени плотности форм

Класс	Степень плотности	Плотность карстовых воронок	Примеры
1	Весьма значительная	>100	Ординский участок Кунгурско-Иренского карстового района
2	Значительная	100–10	Крымская карстовая обл. Южнословацкая карстовая обл. район Силиц
3	Небольшая	10–1	Пермская обл. Кентукки (США) Моравская карстовая обл.
4	Малая	1–0,1	
5	Незначительная	0,1–0,01	Эстонская карстовая обл.
6	Ничтожная	<0,01	Кольский полуостров, карстовые понижения в метаморфизованных докембрийских известняках и доломитах

Таблица 3

Карстовое поле	Площадь поля, км <sup>2</sup>	Количество карстовых воронок	Плотность карстовых воронок	Коэффициент закарстованности площади
I	1,24	164	132	
II	2,84	101	35	–
III	1,12	111	99	4,8
IV	0,37	143	381	29
	5,57	519	93,5	–

Таблица 4

Класс устойчивости	Количество карстовых воронок, возникающих в год на площади 1 км <sup>2</sup> , <i>N</i>	Количество лет, в течение которых возникает 1 воронка на 1 км <sup>2</sup> , <i>T</i>
Устойчивые	<0,01	>100
Слабо устойчивые	0,01–0,1	100–10
Неустойчивые	0,1–1	10–1
Весьма неустойчивые	1–10	1–0,1
Катастрофические	>10	<0,1

Как нами ранее было показано [8, 9, 21, 22], кроме собственно провальных воронок, имеется и другие типы карста, которые приведены в табл. 5. В табл. 6 приведено распределение карстовых воронок по гидродинамическим зонам.

Таблица 5

**Схема классификации карста по обнаженности и характеру покровных отложений  
(Г. А. Максимович, 1960)**

Покровные отложения	При региональном развитии	На небольших участках	Примеры
Отсутствуют	Средиземноморский тип карста	Голый карст	Горный Крым, Динарские горы
Незначительный почвенный покров задернованный	Кавказский тип карста	Задернованный карст	Западный Кавказ
Элювий карстующихся пород	Среднеевропейский тип карста	Покрытый или подэлювиальный карст	Уфимское плато
Аллювий в речных долинах	Камский тип карста	Перекрытый или подаллювиальный карст	Карст долин в бассейне р. Камы
Осадочные некарстующиеся породы	Русский тип карста	Закрытый карст	Карстовые районы Русской равнины
Базальт и другие изверженные породы	Среднеатласский тип карста	Подвулканический карст	Средний Атлас в районе г. Азру

Карстовые воронки, образующиеся в верхней части зоны вертикальной нисходящей циркуляции лавы за счет расширения коррозией и эрозией трещин и понор, мало опасны. Пустоты здесь образуются в верхней части карстующихся пород под покровными отложениями, которые могут в них просесть и даже провалиться. Покровные отложения перемещаются также за счет суффозии и оползней. Однако все это приповерхностные процессы. Перед возведением промышленных и гражданских зданий необходима детальная разведка выбранного участка с производством бурения и электроразведки. С целью предотвращения разрушения зданий при просадке и провалах производится предварительное обрушение покровных отложений. В некоторых случаях целесообразна цементация карстовых трещин и понор. Институт геологии в Польше успешно провел такие работы в районе Ченстохова на территории строительства завода Работы по укреплению основания путем цементации составили вместе с инженерно-геологическими исследованиями 1,5 % стоимости строящегося предприятия [17].

Сложнее обстоит дело с собственно провальными явлениями, обусловленными обрушением кровли сравнительно неглубоко залегающих карстовых каналов современной или подвешенной зоны горизонтальной циркуляции (табл. 6). Такие провалы образуются при движении карстовых вод на глубине менее 100 м. При производстве геофизических исследований необходимо изучать наличие карстовых полостей до глубины 100–150 м. Данные электроразведки необходимо проверить бурением на выявленные геофизикой полости. Если в районе площадки намеченного гражданского или промышленного строительства по геофизическим данным имеются полости более, чем на 100 м ниже кровли карстующихся известняков, доломитов, гипсов и ангидритов, то образование провальных воронок почти исключено. На участках, где будет установлено наличие современной зоны горизонтальной циркуляции на глубине 50–60 м, можно считать, что большинство карстовых воронок имеет провальное происхождение. Это надо проверить разбуриванием одной-двух имеющихся на участке наиболее значительных карстовых воронок. Геологический разрез покажет их происхождение. Подобные исследования обязательны в карстовых районах, где время возникновения и происхождение воронок нельзя установить на поверхности.

Участки карбонатного или гипсового карста, для которых будет установлено провальное происхождение карстовых воронок и наличие зоны горизонтальной циркуляции на глубине 50–100 м, по большей части непригодны для гражданского и промышленного строительства. Если по каким-либо соображениям приходится здесь строить, то, пользуясь данными геофизических исследований и бурения, надо располагать здания на наименее закарстованных участках. Находящиеся неглубоко от поверхности полости необходимо заполнить цементным раствором или раствором с наполнителем.

При детальных исследованиях возможен расчет сводов подземных карстовых пустот по С. В. Альбову [1].

В районах интенсивного соляного карста возведение гражданских и промышленных сооружений при наличии карстовых полостей, находящихся на небольшой глубине, нежелательно. Это связано с чрезвычайно

быстрым развитием карстовых форм в каменной соли и возможностью значительных обрушений.

Предложенная классификация устойчивости закарстованных территорий, где проектируется гражданское или промышленное строительство, основана на динамике годового прироста плотности провальных карстовых воронок и применима в районах развития карста известняков и гипсов там, где имеются такие наблюдения. При наличии коррозионных и других карстовых типов воронок, указанных в табл. 6, необходимо детальное изучение геологических условий.

Таблица 6

Генетические типы карстовых воронок (Г. А. Максимович, 1952, 1960)

Гидродинамические зоны карста	Типы карста	Участки карста	Генетические типы карстовых воронок					
			Коррозионные			Коррозионно-эрозионные		
Верхняя часть зоны вертикальной нисходящей циркуляции (азрации)	Средиземно-морский	Голого	Образуются из понор за счет растворяющей (и механической) деятельности вод нисходящих атмосферных осадков			Образуются в долинах из понор за счет расширения растворением и эрозией водами поверхностных потоков.		
	Русский, средне-европейский	Закрытого, перекрытого или подальювиального и подлювиального	Коррозионно-просадочные Образуются путем постепенного проседания покровных отложений по мере роста воронки в карстующихся породах	Коррозионно-провальные Образуются путем обрушения покровных образований в подземную карстовую воронку, находящуюся непосредственно под покровом	Коррозионно-сульфатные Образуются путем поверхностного и подземного вымывания и выноса материала покровных отложений через понору или трещину в карстующихся породах	Коррозионно-эрозионные Образуются при наличии покровных образований, так же как и в средиземноморском типе карста, причем размываются не только карстующиеся породы, но и покровные образования	Коррозионно-оползневые Представляют разновидность коррозионно-сульфатных и других типов воронок. В воронках наблюдаются оползни и обвалы покровных образований	Полигенетические Воронки смешанного происхождения, в формировании которых принимают участие, кроме коррозии, еще несколько факторов
Подзона подвешенных вод	Средиземно-морский, средне-европейский	Голого, закрытого, перекрытого или подальювиального	Провальные воронки. В пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции местами имеются водоносные подвешенные карстовые каналы, сохранившиеся участки древней зоны горизонтальной циркуляции. Обрушение сводов, состоящих из карстующихся пород, а также покрывающих их некарстующихся отложений, приводит к образованию провальных воронок. В начальной стадии стенки их отвесны, а на дне наблюдаются обломки карстующихся (и покрывающих) отложений					
Зона горизонтальной циркуляции (и переходная)	Средиземно-морский	Голого	Провальные воронки. Образование горизонтальных (и наклонных) пустот, расширение их и виде гротов. Обрушение сводов гротов, состоящих из карстующихся пород, и образование провальных воронок. В начальной стадии стенки их отвесны, на дне обломки карстующихся пород					
	Русский, камский, средне-европейский	Закрытого, перекрытого или подальювиального и подлювиального	Провальные воронки. Образуются так же, как и при средиземноморском типе карста. Отличие в том, что карстующиеся породы перекрыты более молодыми (русский тип), речными (камский), элювиальными (средиземноморский тип) некарстующимися отложениями. Они обрушаются вместе с карстующимися породами. При неглубоком залегании подземных вод возможно образование карстовых озер					
Зона сифонной циркуляции	Средиземно-морский, русский, камский	Голого, закрытого, перекрытого или подальювиального	Коррозионные воронки восходящих источников. В местах выхода каналов восходящих карстовых источников, в зоне сифонной циркуляции, растворяющим и механическим действием воды образуются карстовые воронки. При медленном движении воды обломочные частицы не уносятся, и восходящий источник может фильтроваться сквозь отложения на дне карстового озера					
Зона подолонного (подруслового) стока	Камский	Перекрытый, или подальювиальный	Коррозионно-эрозионные воронки. Воронки в местах поглощения речных вод подолонными (подрусловыми) карстовыми полостями и обратного выхода на поверхность					

#### ЛИТЕРАТУРА

- Альбов С. В. Объяснение провалов и просадок поверхности теорией горного давления (на примере карста низовьев левобережья реки Оки). Карстведение, вып. 4, Пермь, 1948.
- Голубева Л. В. О плотности карстовых воронок в различных геоморфологических условиях. ДАН СССР, т. 90, № 1, 1953.
- Горбунова К. А. К характеристике Ключевского участка Кишертско-Суксунского карстового района. Учен. зап. Пермского ун-та, т. XIV, вып. 1, 1959.
- Макеев З. А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей. Карстведение, вып. 4, Пермь, 1948.
- Максимович Г. А. Генетические типы карстовых образований. ДАН СССР, т. 90, № 6, 1953.
- Максимович Г. А. Основные типы гидродинамических профилей областей карста карбонатных и сульфатных отложений. АН СССР, т. 112, № 3, 1957.
- Максимович Г. А. Опыт районирования карста Чехословакии. Учен. зап. Пермского ун-та, т. XIV, в. 1, 1959.
- Максимович Г. А., Голубева Л. В. Генетические типы карстовых воронок. ДАН СССР, т. 87, № 4, 1952.
- Максимович Г. А., Голубева Л. В. Генетическая классификация карстовых воронок. Учен. зап. Пермского ун-та, т. IX, вып. 1, 1955.
- Максимович Г. А., Горбунова К. А. Карст Пермской области. Пермь, 1958.
- Максимович Г. А., Хейнсалю Ю. И. Новый тип гидродинамического профиля в Эстонской карстовой области. Изв. АН Эстонской ССР, сер. технич. и физико-математич. наук, т. VIII, № 3, 1959.
- Резникова Л. Г. Верньоюрскі ваньки Карбіяїли, та характер їх закарстування. Геол. журн., т. 19, № 2, 1959.
- Соколов Д. С. Влияние крутизны поверхности на распределение карстовых воронок. Природа, № 1, 1948.
- Хабера С. Карстовые явления в Чехословакии. Изв. Веес. геогр. об-ва т. 89, № 4, 1957.
- Якушева А. Ф. О защитной роли покровных образований в карстовые процессах. Тр. лабор. гидрогеол. проблем, т. 3, 1948.
- Якушова А. Ф. Карст палеозойских карбонатных пород на Русской равнине. Уч. зап. МГУ, в. 136, 1949.
- Bazynski J. Cementacja skrasowialego podloza budowlanego Przegl. geol., v. 12, 1955.
- Bazynski J., Kiihn A. Geologiczno-inzynierskie znaczenie lejow krasowych na przykladzie obszaru czestochowskiego. Przegl. geol. г. VI, № 7, Warszawa, 1958.
- Gherman I. Contributii la cunoasterea regiunii carstice de la NE de Pui. Revista Muz. geol.-min. universit. din Cluj. v. V, № 1, 1933-1934.
- Jillson W. R. American Karst country. Pan-American Geologist, v. 42, 1924.
- Maksimovici G. A., Golubeva L. V. Tipurile genetice de palnii carstice. An. Rom. Sov. ser. geol.-geogr., v. 7, № 4, 1953.
- Maksimovitch G. A., Goloubeva L. V. Types genetiques d'enton iiors karstiques. Rev. geomorphol. dynam., v. 5, № 1, 1954.
- Menessier G. La zone karstique de Blaque-Meyanne entre Bargemon et Broves (Var.). An. de Speleologie. t. 14, № 1-2, 1959.

## ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Г. А. МАКСИМОВИЧ

ПЛОТНОСТЬ КАРСТОВЫХ ВОРОНОК И УСТОЙЧИВОСТЬ  
ЗАКАРСТОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Количество карстовых воронок, приходящихся на  $1 \text{ км}^2$ , называется плотностью карстовых воронок. Плотность зависит от многих факторов: состава карстующейся породы, характера и мощности покровных отложений, тектоники и трещиноватости, длительности карстообразования, стадии развития карста, размера воронок, климата, в частности количества и характера выпадания осадков, температуры, рельефа и других. Влияние геоморфологических условий на плотность карстовых воронок изучено Л. В. Голубевой [2], влияние углов наклона поверхности — Д. С. Соколовым [13], покровных отложений — А. Ф. Якушовой [15], литологического состава карстующихся пород — Л. Г. Резниковой [12].

Приведенные в табл. 1 данные показывают, что плотность карстовых воронок изменяется в широких пределах: от 0,02 до 248 на  $1 \text{ км}^2$ . Это позволяет подразделить карстовые области или поля на 6 классов плотности, которые нами выделены по десятичной системе (табл. 2).

Закарстованность поверхности отдельных территорий более точно характеризует коэффициент, предложенный Л. В. Голубевой [1]. К сожалению, его пока еще очень редко вычисляют, и поэтому в литературе имеется мало данных.

В Кишертско-Суксунском карстовом районе [10] на Ключевском участке для четырех карстовых полей К. А. Горбунова [3] определила плотность карстовых воронок и коэффициент закарстованности (табл. 3).

З. А. Макеев [4] предлагает определять устойчивость закарстованных территорий по количеству карстовых воронок (форм), возникающих в год на площади в  $1 \text{ км}^2$ . Он различает 5 категорий устойчивости: I. 5—10 и более, II. 1—5, III. 1—0,05, IV. 0,05—0,02, V. Менее 0,02. К первой категории отнесены наиболее неустойчивые участки.

На основе динамики годового прироста плотности провальных карстовых воронок автор предлагает классификацию устойчивости закарстованных территорий в районах гражданского и промышленного строительства, которая дана в табл. 4.

На IV карстовом поле Ключевского участка на площади  $0,37 \text{ км}^2$  за 6 лет (1953—1958) установлено появление 5 новых провальных карстовых воронок. Здесь  $N=2,25$  и  $T=0,43$ , т. е. карстовое поле весьма неустойчивое и относится к 4 классу устойчивости.

Предлагаемой классификацией устойчивости закарстованных территорий при гражданском и промышленном строительстве можно поль-

Таблица 1

## Плотность карстовых воронок

Район	Карстующиеся породы		Площадь, км <sup>2</sup>	Количество воронок	Плотность на 1 км <sup>2</sup>	Автор подсчета
	возраст	состав				
Пермская область	Pz	Известняки, гипсы	30000	200000	7	Г. А. Максимович, 1958 [10]
Кентукки, США	Pz	Известняки	23310	60000—70000	2,5—3	В. Р. Джилсон, 1924 [20]
Эстония	0, S <sub>1</sub>	Известняки	25000	500—600	0,02—0,024	Г. А. Максимович, Ю. И. Хейнсагу, 1959 [11]
Сидурийское плато	S <sub>1</sub>	"	696	1779	2,5	А. Ф. Якушова, 1948 [15]
Уфимский амфитеатр (средняя часть)	S, D, C <sub>1</sub>	"	43,5	501	11,5	Д. С. Соколов, 1948 [13]
Моравия	D	"	100	302	3	Г. А. Максимович, 1959 [6]
Уфимское плато (бывший заводской Предуралье)	P <sub>1</sub>	"	65	700	11	Л. В. Голубева, 1953 [2]
Кунгурский район	P <sub>1</sub>	Гипсы	65	1156	18	"
Ординский район	P <sub>1</sub>	"	30	7459	248	"
Южнославяцкий карст — окрестности Сили	T	Известняки	—	—	80	С. Хабера, 1957 [14]
Блак-Мейан, Вар, Франция*	J <sub>2</sub>	"	3,6	354	98	Г. Меннесне, 1959 [23]
Крым, Яйлы: Айпетринская	J <sub>3</sub>	"	145	3900	27	Б. Н. Иванов
Чагырдаг	J <sub>3</sub>	"	40	1162	29	Н. В. Леончева
Демерджи	J <sub>3</sub>	"	25	462	19	А. Г. Штернов
Пуи, Румыния	Cg, z	"	40	283	7	Г. Герман, 1934 [19]

личное сообщение

Таблица 2

## Классификация карстовых территорий по степени плотности форм

Класс	Степень плотности	Плотность карстовых воронок	Примеры
1	Весьма значительная	>100	Ординский участок Кунгурско-Иренского карстового района Крымская карстовая обл. Южнословацкая карстовая обл., район Силиц Пермская обл. Кентукки (США) Моравская карстовая обл.  Эстонская карстовая обл. Кольский полуостров, карстовые понижения в метаморфизованных докембрийских известняках и доломитах
2	Значительная	100—10	
3	Небольшая	10—1	
4	Малая	1—0,1	
5	Незначительная	0,1—0,01	
6	Ничтожная	<0,01	

Таблица 3

Карстовое поле	Площадь поля, км <sup>2</sup>	Количество карстовых воронок	Плотность карстовых воронок	Коэффициент закарстованности площади
I	1,24	164	132	—
II	2,84	101	35	—
III	1,12	111	99	4,8
IV	0,37	143	381	29
	5,57	519	93,5	—

Таблица 4

Класс устойчивости	Количество карстовых воронок, возникающих в год на площади 1 км <sup>2</sup> , N	Количество лет, в течение которых возникает 1 воронка на 1 км <sup>2</sup> , T
Устойчивые	<0,01	>100
Слабо устойчивые	0,01—0,1	100—10
Неустойчивые	0,1—1	10—1
Весьма неустойчивые	1—10	1—0,1
Катастрофические	>10	<0,1

зываются при наличии провальных карстовых воронок. Они обычны для карста гипса, развитого в осадочном чехле платформ и краевых прогибов [4]. В этих районах все имеющиеся карстовые воронки можно считать провальными. Применение указанной классификации требует знания генезиса карстовых воронок и наличия наблюдений над появлением карстовых воронок во времени.

Как нами ранее было показано [8, 9, 21, 22], кроме собственно провальных воронок, имеются и другие типы карста, которые приведены в табл. 5. В табл. 6 приведено распределение карстовых воронок по гидродинамическим зонам.

Таблица 5

Схема классификации карста по обнаженности и характеру покровных отложений  
(Г. А. Максимович, 1960)

Покровные отложения	При региональном развитии	На небольших участках	Примеры
Отсутствуют	Средиземноморский тип карста	Гольй карст	Горный Крым, Динарские горы
Незначительный почвенный покров задернованный	Кавказский тип карста	Задернованный карст	Западный Кавказ
Элювий карстующихся пород	Среднеевропейский тип карста	Покрытый или подэлювиальный карст	Уфимское плато
Аллювий в речных долинах	Камский тип карста	Перекрытый или подаллювиальный карст	Карст долин в бассейне р. Камы
Осадочные некарстующиеся породы	Русский тип карста	Закрытый карст	Карстовые районы Русской равнины
Базальт и другие изверженные породы	Среднеатласский тип карста	Подвулканический карст	Средний Атлас в районе г. Азру

Карстовые воронки, образующиеся в верхней части зоны вертикальной нисходящей циркуляции лавы за счет расширения коррозией и эрозией трещин и понор, мало опасны. Пустоты здесь образуются в верхней части карстующихся пород под покровными отложениями, которые могут в них просесть и даже провалиться. Покровные отложения перемещаются также за счет суффозии и оползней. Однако все это приповерхностные процессы. Перед возведением промышленных и гражданских зданий необходима детальная разведка выбранного участка с производством бурения и электроразведки. С целью предотвращения разрушения зданий при просадке и провалах производится предварительное обрушение покровных отложений. В некоторых случаях целесообразна цементация карстовых трещин и понор. Институт геологии в Польше успешно провел такие работы в районе Ченстохова на территории строительства завода. Работы по укреплению основания путем цементации составили вместе с инженерно-геологическими исследованиями 1,5% стоимости строящегося предприятия [17].

Сложнее обстоит дело с собственно провальными явлениями, обусловленными обрушением кровли сравнительно неглубоко залегающих карстовых каналов современной или подвешенной зоны горизонтальной циркуляции (табл. 6). Такие провалы образуются при движении карстовых вод на глубине менее 100 м. При производстве геофизических исследований необходимо изучать наличие карстовых полостей до глубины 100—150 м. Данные электроразведки необходимо проверить бурением на выявленные геофизикой полости. Если в районе площадки намеченного гражданского или промышленного строительства по геофизическим данным имеются полости более, чем на 100 м ниже кровли карстующихся известняков, доломитов, гипсов и ангидритов, то образование провальных воронок почти исключено. На участках, где будет установлено наличие современной зоны горизонтальной циркуляции на глубине 50—60 м, можно считать, что большинство карстовых воронок имеет провальное происхождение. Это надо проверить разбуриванием

Генетические типы карстовых воронок  
(Г. А. Максимова, 1952, 1960)

Гидродинамические зоны карста	Типы карста	Участки карста	Генетические типы карстовых воронок		
			Коррозионные	Коррозионно-эрозионные	Коррозионно-эрозионные
Верхняя часть зон вертикальной нисходящей циркуляции (аэрации)	Средне-морской	Голого	Образуются из понор за счет растворяющей (и механической) деятельности вод нисходящих атмосферных осадков	Образуются в долинах из понор за счет расширения растворением и эрозией водами поверхностных потоков.	
	Русский, европейский	Закрытого, перекрытого или подалювийного	Коррозионно-проходочные	Коррозионно-проходочные	Коррозионно-эрозионные
Подзона подвешенных вод	Средне-морской, европейский	Голого, закрытого, перекрытого или подалювийного	Образуются путем постепенного проседания покровных отложений по мере роста воронок в карстующихся породах	Образуются путем обрушения покровных образований в подземную карстовую воронку, находящуюся непосредственно под покровом	Образуются при наличии покровных образований, так же как и в среднеморском типе карста, причем размываются не только карстующиеся породы, но и покровные образования
			Образуются путем поверхностного и подземного вымывания и выноса материала покровных отложений или трещину в карстующихся породах	Представляют разнообразность каррозионно-эрозионных, коррозивно-эрозионно-суффозионных и других типов воронок. В еще несколько факторов	Воронки смешанного происхождения, в формировании которых принимают участие, кроме коррозии, еще несколько факторов

Провальные воронки. В пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции местами имеются водоносные подвешенные карстовые каналы, сохраняющие участки древней зоны горизонтальной циркуляции. Обрушение сводов, состоящих из карстующихся пород, а также покрывающих их некарстующихся отложений, приводит к образованию провальных воронок. В начальной стадии стенки их отвесны, а на дне наблюдаются обломки карстующихся (и покрывающих) отложений



Зона горизонтальной циркуляции (и переходная)	Средне-морской	Голого	<p>Провальные воронки. Образование горизонтальных (и наклонных) пустот, расширение их в виде гротов. Обрушение сводов гротов, состоящих из карстующихся пород, и образование провальных воронок. В начальной стадии стенки их отвесны, на дне обломки карстующихся пород</p>
	Русский, камский, средний-европейский	Закрытого, перекрытого или по-дальнов-альдов-ального	<p>Провальные воронки. Образуются так же, как и при срединноморском типе карста. Отличие в том, что карстующиеся породы перекрыты более молодыми (русский тип), речными (камский), элювиальными (средне-европейский тип) некарстующимися отложениями. Они образуются вместе с карстующимися породами. При неглубоком залегании подземных вод возможно образование карстовых озер</p>
Зона сифонной циркуляции	Средне-морской, русский, камский	Голого, закрытого, перекрытого или по-дальнов-ального	<p>Коррозионные воронки восходящих источников. В местах выхода каналов восходящих карстовых источников, в зоне сифонной циркуляции, растворяющим и механическим действием воды образуются карстовые воронки. При медленном движении воды обломочные частицы не уносятся, и восходящий источник может фильтроваться сквозь отложения на дне карстового озера</p>
Зона подлинного (подруслового) стока	Камский	Перекрытый, или по-дальнов-альный	<p>Коррозионно-эрозийные воронки. Воронки в местах поглощения речных вод подлинными (подрусловыми) карстовыми полостями и обратного выхода на поверхность</p>

одной—двух имеющихся на участке наиболее значительных карстовых воронок. Геологический разрез покажет их происхождение. Подобные исследования обязательны в карстовых районах, где время возникновения и происхождение воронок нельзя установить на поверхности.

Участки карбонатного или гипсового карста, для которых будет установлено провальное происхождение карстовых воронок и наличие зоны горизонтальной циркуляции на глубине 50—100 м, по большей части непригодны для гражданского и промышленного строительства. Если по каким-либо соображениям приходится здесь строить, то, пользуясь данными геофизических исследований и бурения, надо располагать здания на наименее закарстованных участках. Находящиеся неглубоко от поверхности полости необходимо заполнить цементным раствором или раствором с наполнителем.

При детальном исследовании возможен расчет сводов подземных карстовых пустот по С. В. Альбову [1].

В районах интенсивного соляного карста возведение гражданских и промышленных сооружений при наличии карстовых полостей, находящихся на небольшой глубине, нежелательно. Это связано с чрезвычайно быстрым развитием карстовых форм в каменной соли и возможностью значительных обрушений.

Предложенная классификация устойчивости закарстованных территорий, где проектируется гражданское или промышленное строительство, основана на динамике годового прироста плотности провальных карстовых воронок и применима в районах развития карста известняков и гипсов там, где имеются такие наблюдения. При наличии коррозионных и других карстовых типов воронок, указанных в табл. 6, необходимо детальное изучение геологических условий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альбов С. В. Объяснение провалов и просадок поверхности теорией горного давления (на примере карста низовьев левобережья реки Оки). Карстование, вып. 4, Пермь, 1948.
2. Голубева Л. В. О плотности карстовых воронок в различных геоморфологических условиях. ДАН СССР, т. 90, № 1, 1953.
3. Горбунова К. А. К характеристике Ключевского участка Кишертско-Суксунского карстового района. Учен. зап. Пермского ун-та, т. XIV, вып. 1, 1959.
4. Макеев З. А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей. Карстование, вып. 4, Пермь, 1948.
5. Максимович Г. А. Генетические типы карстовых образований. ДАН СССР, т. 90, № 6, 1953.
6. Максимович Г. А. Основные типы гидродинамических профилей областей карста карбонатных и сульфатных отложений. АН СССР, т. 112, № 3, 1957.
7. Максимович Г. А. Опыт районирования карста Чехословакии. Учен. зап. Пермского ун-та, т. XIV, в 1, 1959.
8. Максимович Г. А., Голубева Л. В. Генетические типы карстовых воронок. ДАН СССР, т. 87, № 4, 1952.
9. Максимович Г. А., Голубева Л. В. Генетическая классификация карстовых воронок. Учен. зап. Пермского ун-та, т. IX, вып. 1, 1955.
10. Максимович Г. А., Горбунова К. А. Карст Пермской области. Пермь, 1958.
11. Максимович Г. А., Хейнсалу Ю. И. Новый тип гидродинамического профиля в Эстонской карстовой области. Изв. АН Эстонской ССР, сер. технич. и физико-математич. наук, т. VIII, № 3, 1959.
12. Резникова Л. Г. Верньоюрскі ваньки Карбіяйли, та характер їх закарстування. Геол. журн., т. 19, № 2, 1959.
13. Соколов Д. С. Влияние крутизны поверхности на распределение карстовых воронок. Природа, № 1, 1948.

14. Хабера С. Карстовые явления в Чехословакии. Изв. Всес. геогр. об-ва т. 89, № 4, 1957.
15. Якушова А. Ф. О защитной роли покровных образований в карстовых процессах. Тр. лабор. гидрогеол. проблем, т. 3, 1948.
16. Якушова А. Ф. Карст палеозойских карбонатных пород на Русской равнине. Уч. зап. МГУ, в. 136, 1949.
17. Bazynski J. Cementacja skrasowialego podloza budowlanego. Przegl. geol., № 12, 1955.
18. Bazynski J., Kühn A. Geologiczno-inzynierskie znaczenie lejow krasowych na przykladzie obszaru czestochowskiego. Przegl. geol. r. VI, № 7, Warszawa, 1958.
19. Gherman I. Contributii la cunoasterea regiunii carstice de la NE de Pui. Revista Muz. geol.-min. universit. din Cluj. v. V, № 1, 1933—1934.
20. Jillson W. R. American Karst country. Pan-American Geologist. v. 42, 1924.
21. Maksimovici G. A., Golubeva L. V. Tipurile genetice de pâlnii carstice. An. Rom. Sov. ser. geol.-geogr., v. 7, № 4, 1953.
22. Maksimovitch G. A., Goloubeva L. V. Types génétiques d'entonnoirs karstiques. Rev. géomorphol. dynam., v. 5, № 1, 1954.
23. Mennessier G. La zone karstique de Blaque-Meyanne entre Bargemon et Broves (Var.). An. de Spéléologie, t. 14, № 1—2, 1959.

Пермский университет им. А. М. Горького