

INGENIEURGEOLOGIE DES KARSTES

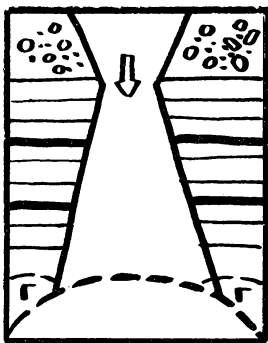
Von V. V. Tolmatshev und F. Reuter



AKADEMIE – VERLAG, BERLIN

В. В. Толмачев Ф. Ройтер

ИНЖЕНЕРНОЕ КАРСТОВЕДЕНИЕ



МОСКВА "НЕДРА" 1990

ББК 26.3

Т 52

УДК 624.131.29 + 699.8:551.448

Рецензент д-р геол.-минер. наук *Л.А. Молоков*

Толмачев В.В., Ройтер Ф.

Т 52 **Инженерное карстование.** – М.: Недра, 1990. – 151 с.: ил.
ISBN 5-247-01508-8

Работа является совместным трудом специалистов из СССР и ГДР, в ней приведены результаты исследований карста, связанных со строительством инженерных сооружений. Дан анализ основных тенденций в освоении закарстованных территорий в СССР и ГДР. Основное внимание уделено методике прогнозирования развития карста – формированию карстовых полостей, провалов и оседаний для различных инженерно-геологических условий. Рассмотрен опыт организации противокарстовой защиты.

Для специалистов-практиков в области инженерной геологии, горного дела и строительства.

Т $\frac{1804090000 - 177}{043 (01) - 90}$ 124-90

ББК 26.3

ISBN 5-247-01508-8

©Издательство "Недра", 1990

© Akademie – Verlag, 1990 .

Проблема освоения закарстованных территорий актуальна для многих стран мира. В связи с этим в настоящее время в индустриально развитых странах ведутся целенаправленные исследования этой проблемы с различных точек зрения: инженерно-геологической, горно-геологической, гидротехнической, инженерно-строительной, экономической, экологической и даже юридической. Поэтому не случайно, что в этих странах постепенно сформировалось инженерное карстоведение как прикладная наука, объединяющая карстоведение с инженерными науками в области строительства, гидротехники и горного дела. Сравнительный анализ результатов исследований в области инженерного карстоведения в разных странах показал, что наиболее принципиально значимые в теоретическом и практическом отношении результаты достигнуты специалистами ГДР и Советского Союза. К сожалению, до настоящего времени исследования в этих странах велись изолированно друг от друга.

Однако народнохозяйственные интересы, особенно в области строительства в карстовых районах, постоянно требуют обмена опытом и объединения усилий в исследованиях. Так, специалисты ГДР заинтересованы в изучении опыта советских исследователей по прогнозу параметров карстовых провалов в условиях карбонатного и сульфатного типов карста. У советских инженеров большой интерес вызывают работы, ведущиеся в ГДР по прогнозу оседаний в условиях сульфатного и хлоридного карста.

Как в Советском Союзе, так и в ГДР существуют различные направления в инженерном карстоведении. Это в определенной мере затрудняет творческие связи между специалистами наших стран. В восьмидесятых годах наметились контакты между исследователями Дзержинской карстовой лаборатории Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС) и кафедрой инженерной геологии Фрайбергской горной академии ГДР. Их взаимный интерес друг к другу основывается на опыте инженерно-геологического обоснования строительства на закарстованных территориях.

В результате творческого содружества специалистов СССР и ГДР были подготовлены настоящая работа (в СССР) и "Инженерная геология карста" (в ГДР).

Обе работы имеют одну структуру, но несколько отличаются по акцентам на различные проблемы инженерного карстоведения. Так, в немецком издании большее внимание уделяется вопросам инженерной геологии карста на месторождениях полезных ископаемых, а в

советском – инженерно-геологическому обоснованию строительства в карстовых районах. Следует заметить, что вопросы, связанные с гидротехническим строительством в карстовых районах, в книге лишь упоминаются, так как достаточно подробно изложены в работах А.Г. Лыкошина и Л.А. Молокова.

Кроме того, в настоящей книге несколько фрагментарно изложены технология и организация изысканий, проектирование противокарстовых мероприятий, анализ практики оценки карстоопасности, которые достаточно широко освещены в нормативно-методических документах и в работе [36].

При подготовке книги возникло немало трудностей, связанных с неоднозначностью терминов и понятий, принятых в СССР и ГДР. Поэтому первая глава специально посвящена терминологическим вопросам.

Авторами впервые сделана попытка проследить путь развития инженерного карстоведения как прикладной науки в СССР и ГДР, а также в других странах. На этой основе выявлены основные потребности инженерной практики и перспективные направления исследований. Наибольшее внимание уделено инженерно-геологическому прогнозу карстовых процессов для целей строительства (см. гл. 5) с использованием традиционных инженерно-геологических, математических и экспериментальных методов.

В немецкой карстоведческой и инженерно-геологической литературе имеется много оригинальных публикаций, чрезвычайно интересных для советских специалистов.

К подготовке отдельных разделов книги авторы привлекли своих коллег. С советской стороны в подготовке книги принял участие В.П. Хоменко (вопросы моделирования карстовых деформаций), а с немецкой стороны – д-р Х. Молек и д-р Г. Судерлау (особенности инженерных изысканий в карстовых районах, противокарстовая защита).

Авторы считают своим долгом выразить признательность В.Б. Соркиной и Е.Н. Виноградовой за помощь в работе.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО КАРСТОВЕДЕНИЯ

Вопросы терминологии для отраслей знаний, которые развиваются на стыке разных дисциплин, всегда достаточно сложны. Это относится и к инженерному карстоведению, развивающемуся на стыке карстоведения и комплекса наук, обслуживающих строительство. Результаты исследований в области инженерного карстоведения непосредственно используются в практике инженерно-геологических изысканий, проектирования, строительства, эксплуатации различных сооружений и в горном деле. В связи с этим выработка единой терминологии и основных понятий при освоении закарстованных территорий имеет большое практическое значение.

На становление понятий инженерного карстоведения и выработку соответствующих им терминов оказало влияние собственно карстоведение, имеющее определенные устоявшиеся традиции развития преимущественно как естественно-географической науки. Одно из ее направлений, спелеология, привлекает людей различных профессий. Поэтому многие термины впервые были образованы любителями спелеологии, т.е. неспециалистами в узком смысле этого слова. Часто эти термины носят образный характер и, несмотря на это, становятся традиционными. Пример тому – понятие "карст", происходящее от названия плато в Словении (СФРЮ), на котором ярко выражены отрицательные формы рельефа, обусловленные процессом растворения горных пород.

Для обеспечения преемственности развития науки мы должны уважать такого рода понятия и термины, хотя относиться к некоторым из них с должной осторожностью.

В связи с тем, что многие проявления карста сходны с проявлениями, встречающимися в горном деле (обрушения, оседания, подземные полости), некоторые термины и понятия в карстоведении были заимствованы из горного дела.

Однако, как показала практика освоения закарстованных территорий, неоднозначность и нестрогость трактовки некоторых терминов нередко приводит к существенным ошибкам при изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений и, в конечном счете, к значительным экономическим потерям. Именно поэтому инженерное карстоведение требует переосмысливания традиционных понятий и терминов карстоведения и введения новых. По нашему мнению, это целесообразно делать с позиций единой геотехнической системы, условно названной нами "карст – сооружение".

Кроме того, как уже указывалось выше, в настоящее время инженерное карстование наиболее успешно развивается в Советском Союзе и ГДР. И хотя пути его развития в этих странах несколько различны, в последние годы возрос взаимный интерес специалистов к методикам решения задач инженерного карстования, используемых в ГДР и СССР. Естественно, что в этом случае возникает потребность выработки более или менее однозначных понятий, позволяющих специалистам с большей эффективностью использовать результаты исследований и опыт освоения закарстованных территорий в обеих странах.

Ниже приведены основные понятия инженерного карстования. В других главах книги при необходимости также даются специальные пояснения к отдельным понятиям и терминам, особенно к тем, которые неоднозначно трактуются в немецкой и советской литературе по инженерному карстованию. Прежде всего остановимся на определении понятия "карст" и его классификации.

Карст представляет собой совокупность природных и техногенных процессов и явлений, обусловленных в той или иной мере растворением скальных горных пород, в результате которых возможны изменения структуры и состояния горных пород, образование полостей и связанные с ними деформации оснований сооружений и земной поверхности (провалы, оседания и т.п.).

Карстование – карстовый процесс, приуроченный непосредственно к толще растворимых (карстующихся) пород (собственно процесс растворения).

Закарстованные породы (грунты) – растворимые породы, в которых имеются полости, расширенные растворением трещины, каверны, разрушенные зоны и т.д.

По литологии карстующихся пород карст подразделяется на следующие типы: 1) карбонатный (в известняках, доломитах, мелу, обломочных породах с карбонатным цементом); 2) сульфатный (в гипсах, ангидритах); 3) хлоридный, галоидный, или соляной (в каменной и калийной солях).

Возможны промежуточные типы карста (сульфатно-карбонатный, сульфатно-соляной) или их подтипы (гипсо-ангидритовый, известняково-гипсовый, мергельно-меловой и т.д.).

В природных условиях растворимости (концентрации насыщения в воде) карбонатов, сульфатов и хлоридов находятся примерно в пропорции $1:10^2:10^4$. По степени растворимости, согласно ГОСТ 25100–82, карбонатные породы относятся к труднорастворимым, сульфатные – к среднерастворимым и хлоридные – к легкорастворимым. В соответствии с этим синонимами карбонатного, сульфатного и хлоридного типов карста являются следующие типы карста: в труднорастворимых породах; в среднерастворимых породах; в легкорастворимых породах.

В некоторых работах карст по степени растворимости предлагается разделять на два типа: в труднорастворимых породах (карбонатный, сульфатно-карбонатный, сульфатный); в легкорастворимых породах (хлоридный). Такая типизация с практической точки зрения (например, с позиций оценки скорости развития карстовых полостей за срок эксплуатации сооружений) для некоторых частных случаев может быть целесообразной. Однако следует иметь в виду, что несоответствие ее ГОСТу 25100–82 может приводить, если не сделано специальных оговорок, к недоразумениям:

Тот или иной комплекс карстовых процессов и явлений, в значительной мере определяющих условия освоения закарстованных территорий, обуславливается, в первую очередь, характером растворения массива карстующихся пород. С этой точки зрения целесообразно выделить по крайней мере три вида растворения, каждый из которых у карстоведов ГДР имеет свой термин: 1) растворение поверхности карстующихся пород (наиболее характерно для хлоридных пород) – аблэзунг; 2) выборочное растворение по отдельным трещинам с образованием полостей (характерно для сульфатных и карбонатных пород) – ауслэзунг; 3) объемное растворение толщи массива в совокупности с подземной эрозией (характерно для карбонатных и в меньшей мере сульфатных пород) – суброзия.

Разумеется, об этих трех видах растворения можно говорить лишь как о преобладающих тенденциях на данных площадях и в определенный промежуток времени.

При растворении поверхности соляных пород нередко образуется горизонтальная поверхность, называемая "соляным зеркалом", а в результате бокового растворения – "склон соляной залежи". Это термины (по-немецки, соответственно – "зальцшигел" и "зальцханг"), предложенные в начале века немецким геологом Э. Фулдой, широко распространены в карстологической литературе ГДР.

Однако термин "соляное зеркало" не следует понимать в строгом смысле слова. Так, известный немецкий геолог Э. Хойнингем-Хойне доказал (путем бурения скважин) наличие скобкообразных (бороздчатых) углублений на поверхности соляного зеркала.

В практике иногда в качестве синонима растворения нередко употребляется термин "выщелачивание", под которым правильнее было бы понимать процесс селективного растворения и удаления элементов горной породы без полного ее растворения.

В зависимости от наличия или отсутствия над карстующейся толщей других пород карст подразделяется на два типа: 1) открытый (голый) (карстующиеся породы выходят на дневную поверхность или задернованы); 2) покрытый (над карстующимися породами залегают некарстующиеся дисперсные грунты). Покрытый карст может развиваться в условиях, когда покровная толща сложена практически

водонепроницаемыми грунтами или переслаиванием водопроницаемых и водонепроницаемых грунтов.

Если в первом случае деформации в покровной толще над карстовыми формами могут происходить лишь под действием сил тяжести, то во втором – как под действием сил тяжести, так и под действием гидростатических и гидродинамических сил (происходят так называемые карстово-суффозионные деформации).

Следует заметить, что термин "карстово-суффозионные деформации" (процессы) во многих отечественных публикациях носит в определенной мере условный характер, обозначающий в обобщенном виде особенности деформаций водонасыщенных грунтов над карстовыми формами. Таким образом, карстово-суффозионные процессы неправомерно рассматривать как синонимы "карстовых" и "суффозионных" процессов. В зарубежной инженерно-геологической литературе термин "карстово-суффозионные процессы" применяется редко.

Некоторые авторы выделяют еще один тип карста, развивающийся в условиях, когда карстующиеся породы залегают под покровом нерастворимых скальных и дисперсных пород. Ф. Ройтер и Х. Молек этот тип карста называют глубинным, Н.А. Гвоздецкий – бронированным, Г.А. Максимович – подвулканическим.

В настоящее время не совсем однозначно трактуются такие понятия, как "карстовая полость", "провал", "карстоопасность" и т.д.

В дальнейшем мы будем придерживаться следующих определений.

Карстопроявления – аномальные изменения в толще горных пород или на поверхности земли, образовавшиеся под действием карстовых процессов. При этом карстопроявления, выраженные в пространстве в виде геометрических тел, называются карстовыми формами.

Карстовая полость – свободное от горных пород пространство в карстующейся или вышележащей толще, образовавшееся вследствие растворения горных пород и сопутствующих ему процессов: обрушения, эрозии, суффозии. Подземные карстовые полости – потенциальные источники обрушений и оседаний. При этом оседания, как правило, происходят над пластовыми и двухмерными полостями.

Карстовые деформации – деформации толщи горных пород, образующиеся в результате действия гравитационных, гидростатических и гидродинамических сил, возникающих вследствие наличия и развития карстовых форм (полостей, трещиноватых и ослабленных зон и т.д.). Совокупность последовательных во времени и пространстве процессов сдвижения горных пород вследствие развития тех или иных карстовых форм называется механизмом карстовых деформаций.

Специально следует оговориться относительно термина "долина" (имеющего хорватское происхождение), обозначающего карстовые

впадины различного происхождения и разнообразной формы. Этот термин широко распространен среди геологов многих стран (СФРЮ, ПНР и др.). Однако в связи с тем, что в русском языке долиной называют удлиненные отрицательные формы рельефа, образовавшиеся преимущественно в результате эрозионной деятельности рек, этот термин для обозначения отрицательных карстовых форм рельефа не нашел распространения в Советском Союзе.

Карстовый провал – быстрая деформация земной поверхности (основания сооружения) с нарушением сплошности грунтов вследствие обрушения горных пород над карстовыми полостями. В советской инженерно-геологической литературе нередко для обозначения уже образовавшегося карстового провала употребляется термин “карстовая воронка”, указывающий лишь на форму провала по вертикали, близкую к конусу или усеченному конусу. Авторы считают этот термин неудачным и рекомендуют воздержаться от его употребления, если отсутствует необходимость подчеркнуть соответствующую форму карстового провала.

Карстовое оседание – относительно медленная деформация земной поверхности (основания сооружения) без разрыва сплошности грунтов, связанная, как правило, с интенсивным растворением поверхности или объемным растворением толщи карстующихся пород, прогибом пород над системой карстовых полостей, суффозионным выносом частиц грунта в нижерасположенные системы трещин и полостей.

Локальное карстовое оседание (проседание) – относительно быстрая деформация земной поверхности (основания сооружения) без разрыва сплошности, обусловленная сдвижением грунтов над локальными ослабленными зонами и полостями, расположенными в покровной толще.

Коррозионная воронка – воронкообразное углубление на поверхности карстующихся пород (в условиях открытого карста), образовавшееся вследствие локального растворения породы при преимущественно нисходящем движении воды по трещинам.

По аналогии с процессами оседаний на подрабатываемых территориях проявления карстовых оседаний на земной поверхности называют мульдами оседаний. Последние, в зависимости от формы, некоторыми инженерами-геологами разделяются на ванны и котлы (котловины) оседания, соответствующие овальной и круглой формам мульды в плане.

Такие понятия, как карры, карстовые желоба, поноры, поля и некоторые другие, имеющие с инженерно-геологической точки зрения значительно меньшее значение, чем другие карстопроявления, мы не будем специально переосмысливать с позиций вышеуказанной системы “карст – сооружение”. В отношении их будем придерживаться

принятого в карстоведении и спелеологии соответствующего этим терминам содержания.

Карстоопасность – характер и степень воздействий карстовых деформаций на грунтовую толщу и сооружения, которые могут привести к затруднению освоения закарстованных территорий.

Противокарстовые мероприятия (противокарстовая защита) – специальные инженерные мероприятия, направленные на предотвращение или уменьшение экономического или социального ущерба от вредного влияния карстового процесса.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО КАРСТОВЕДЕНИЯ

2.1. Становление и развитие инженерного карстоведения как науки в СССР

Анализ основополагающих публикаций

Прошло около 100 лет с момента первой отечественной публикации по условиям строительства в карстоопасных районах. Имеются многочисленные публикации по отдельным вопросам инженерного карстоведения. Нами условно выделено десять основных направлений, по которым развивалось отечественное инженерное карстоведение: 1) общие принципы освоения закарстованных территорий, задачи инженерного карстоведения; 2) геологические и гидрогеологические условия развития карста; 3) методы изысканий для целей строительства; 4) изучение закономерностей растворения карстующихся пород; 5) изучение механизма карстовых деформаций; 6) оценка карстовой опасности; 7) региональное инженерное карстоведение; 8) анализ влияния на развитие карста техногенных воздействий; 9) изучение свойств карстующихся пород; 10) исследования в области противокарстовой защиты.

Кратко рассмотрим развитие исследований во времени.

Первые публикации в области инженерного карстоведения относятся к 1897–1898 гг. Это были статьи Д.Л. Иванова, посвященные проблеме проектирования железных дорог в карстовых районах.

Мнение инженеров и геологов тех лет в отношении проектирования железных дорог в карстовых районах нельзя считать оптимистичным. Д.Л. Иванов приводит характерный вывод специальной комиссии, созданной при Министерстве путей сообщения, о том, что карс-

товые деформации неотразимо влекут за собой такие разрушения, противостоять которым невозможно, как невозможно и предусмотреть их появление в области земляного полотна. Однако работы русских инженеров, опубликованные в 1905–1916 гг., содержат некоторые рекомендации по инженерной оценке, проектированию и эксплуатации закарстованных участков железных дорог. В 1905 г. была составлена инструкция по наблюдению за карстовыми провалами на местности вблизи железной дороги в районе г. Нижнего Новгорода (ныне г. Горький). Такое внимание инженеров путей сообщения тех лет к этим вопросам было вызвано большими масштабами железнодорожного строительства в конце XIX – начале XX вв. на закарстованных территориях Поволжья, Предуралья и Урала.

Принципы инженерно-геологического изучения карста были сформулированы в трудах Ф.П. Саваренского в 1933–1935 гг. Эти принципы определялись прежде всего необходимостью выявления региональных закономерностей развития карстового процесса главным образом в связи с задачами гидротехнического строительства.

Необходимость решения инженерно-геологических задач при проектировании сооружений заставила исследователей и практиков находить закономерности карстового процесса. Примером тому могут служить работы Н.М. Кухарева (1935–1937 гг.) по вопросам инженерно-геологических изысканий при проектировании различных сооружений в карстовых районах. В этих работах Н.М. Кухарев конкретизировал основные условия развития карста.

Методика экспериментального изучения параметров растворения карбонатных и сульфатных пород впервые была изложена Ф.Ф. Лаптевым в 1939 г.

Мощным стимулом исследований в области инженерного карстоведения явилась карстовая конференция 1947 г., на которой Г.А. Максимович впервые дал понятие инженерного (прикладного) карстоведения: "Инженерное карстоведение включает особенности возведения инженерных сооружений в карстовых областях и связанные с этим исследования".

И.В. Попов (1950) достаточно конкретно определил круг проблем, стоящих перед исследователями в области инженерного карстоведения, и указал на один из возможных путей их решения. Этот путь состоит в определении размеров, времени возникновения и скорости развития карста, которое должно основываться на тщательном изучении и оценке относительной роли каждого из факторов карстообразования на каждом участке изучаемой местности. Решение каждой из названных задач может составить целую теорию. Именно этому и были посвящены дальнейшие исследования в области инженерного карстоведения.

В 1948 г. была опубликована небольшая, но принципиально важ-

ная статья З.А. Макеева по вопросу инженерно-геологической оценки закарстованных территорий. Появление этой работы определялось потребностями инженерно-строительной практики освоения закарстованных территорий, которую не удовлетворяло только геологическое объяснение общих условий развития карста в том или ином регионе. Требовалось определить, какую опасность представляют карстовые процессы для строительства и каковы должны быть его условия.

Карстовую опасность З.А. Макеев предложил характеризовать частотой (интенсивностью) образования провалов, разделив все территории на 5 категорий. Это основывалось на определенном здравом смысле: чем чаще происходят провалы, тем карстовая опасность больше (разумеется, при прочих равных условиях, в частности, при равенстве диаметров провалов). Однако принципиальной (на первый взгляд, незначительной) ошибкой было то, что несмотря на относительность оценки карстовой опасности и даже ее условность, названия категорий имели претензию на абсолютную оценку карстовой опасности с точки зрения строительства (территории "явно непригодные", "малопригодные" и т.д.). Следует отметить, что З.А. Макеев весьма осторожно говорит о предложенной им классификации устойчивости закарстованных территорий, называя ее примером. Однако в дальнейшем другие исследователи стали обосновывать положения этой классификации, усовершенствовать ее, доводить до норматива, и в конечном счете, до абсурда. С этой точки зрения, несмотря на простоту классификации и кажущуюся практичность, статья З.А. Макеева (не по вине автора) оказала отрицательное воздействие на развитие отечественного инженерного карстоведения.

В 1953 г. Г.М. Шахунянец на основе детерминированных моделей впервые сделал попытку количественно описать в рамках единой системы механизмы развития карстовой полости и образования провала в основании сооружений. Решение Г.М. Шахунянца (по выходу провала на поверхность – круглоцилиндрическая модель) оказалось весьма перспективным; на его основе в дальнейшем появился целый ряд интересных решений, имеющих большое практическое значение.

В период 1947–1957 гг. начали успешно развиваться исследования в области изучения процессов растворения при движении воды по трещинам. К ним прежде всего следует отнести экспериментальные исследования В.Г. Науменко (1954) и теоретические работы М.П. Семенова (1957).

В 1950 г. была опубликована монография Н.А. Гвоздецкого "Карст", а в 1954 г. она вышла вторым изданием. Монография имела сугубо географическую направленность. Для специалистов народного хозяйства она имела определенное методологическое значение с точки зрения общего понимания природы карста.

Период 1957–1967 гг. характеризуется прежде всего тем, что наметилось расширение исследований практически по всем выделенным нами основным направлениям развития отечественного инженерного карстоведения.

Первой монографией в области инженерной геологии карста следует считать книгу Н.В. Родионова "Инженерно-геологические исследования в карстовых районах при устройстве малых водоемов, гражданском и промышленном строительстве" (1958). В работе обобщен опыт инженерно-геологических изысканий тех лет. В то же время книга отразила имевший место существенный отрыв научных исследований от практики инженерных изысканий и, особенно, от практики проектирования.

Большое методическое и особенно практическое значение имели работы Н.В. Родионова по составлению карт распространения карстующихся пород. В 1960 г. была опубликована карта закарстованных пород и карстовых явлений европейской части СССР, Урала и Кавказа (масштаб 1:2 500 000), которая до настоящего времени является уникальной.

В 1960 г. в монографии, посвященной инженерно-геологическим условиям строительства в карстовом районе г. Дзержинска, И.В. Попов и Ф.П. Саваренский впервые сформулировали общие требования к противокарстовой защите.

1. Конструкции зданий и сооружений должны обеспечить безопасность жизни людей, исключив возможность катастроф.

2. Мероприятия должны быть экономически целесообразными.

Было также выдвинуто положение о том, что расчеты мероприятий могут осуществляться на основании данных о вероятности поражения карстом площади за один год и данных о вероятном размере провалов. Хотя это положение в то время не было обеспечено методически, можно считать, что был сделан первый шаг в создании теории вероятностной оценки карстоопасности.

Соображения о вероятностном характере образования карстовых провалов и о возможности использования этого положения в практике были выдвинуты Ф.П. Саваренским в 1962–1967 гг. Он впервые предложил строить эмпирические кривые распределения диаметров провалов.

Книга Д.С. Соколова "Основные условия развития карста" (1962) до сих пор имеет принципиальное значение для исследователей, занимающихся вопросами прогноза карстовых процессов. В ней даны достаточно четкие представления о природе растворимости горных пород, сформулированы общие закономерности развития карста и его связи с особенностями геологической истории, разработана классификация главнейших карстовых форм.

В 1963 г. была опубликована работа Г.А. Максимовича "Основы карстоведения". В ней, с инженерно-геологической точки зрения, наиболее интересными, хотя и спорными, являются разделы, посвященные генезису карстовых оценок и оценке карстовой опасности.

В период 1957–1967 гг. были заметно интенсифицированы исследования в области противокарстовой защиты железнодорожных сооружений. Одна из первых работ этого направления – статья Г.Г. Скворцова "Вопросы инженерно-геологического изучения и оценки карста в основании железнодорожных сооружений", опубликованная в 1962 г. в сборнике "Специальные вопросы карстоведения". В статье давалась логически обоснованная классификация противокарстовых мероприятий на железных дорогах. В сборнике были помещены и другие статьи по инженерно-геологическому обоснованию строительства в карстовых районах.

Достаточно мощным стимулом в развитии исследований в области инженерного карстоведения явилось научно-техническое совещание "Проектирование, строительство и эксплуатация земляного полотна в карстовых районах", состоявшееся в 1965 г. в г. Горьком. Материалы совещания были опубликованы в специальном сборнике под таким же названием. По итогам совещания Г.М. Шахунянец выдвинул ряд положений, имеющих принципиальное значение не только для проектирования и эксплуатации железных дорог в карстовых районах, но и в целом для инженерно-строительного освоения закарстованных территорий.

Период 1967–1977 гг. характеризуется тем, что в это время было опубликовано большое число монографий, в которых в той или иной мере затрагивались различные аспекты инженерного карстоведения.

Книга А.Г. Лыкошина "Карст и гидротехническое строительство" (1968) имела большое значение не только для гидротехнического, но и в определенной мере и для других видов строительства, в частности, благодаря разделу, посвященному исследованиям в области изучения несущей способности карстующихся пород.

В Пермском Государственном университете развивается одно из направлений инженерного карстоведения, связанное с прогнозом развития карста на берегах водохранилищ. Из работ этого направления наиболее капитальна монография И.А. Печеркина.

В книге Г.В. Короткевича "Соляной карст" (1970) впервые изложены принципы проектирования гидрогеологических методов борьбы с растворением карстующихся соляных пород.

Еще одно подтверждение того, что методика изучения карста должна определяться конкретной народнохозяйственной задачей, – монография М.С. Газизова "Карст и его влияние на горные работы" (1971). В книге убедительно показано, как карстовые процессы затрудняют проходку выработок, осложняют технологию добычи полезных

ископаемых, вызывают трудно прогнозируемые водопритоки, требуют применения индивидуальной крепи и т.д. Хотя книга написана не применительно к строительным задачам, она может быть полезной при решении вопросов строительства подземных сооружений, в частности тоннелей и метрополитенов.

Книга Н.А. Гвоздецкого "Проблема изучения карста и практика" (1972), написанная для географов в популярной форме, не оказала заметного влияния на исследования в области инженерного карстоведения. Однако она ценна тем, что поднимает вопросы комплексного использования знаний о карсте для различных аспектов человеческой деятельности (водоснабжение, добыча полезных ископаемых, туризм и т.п.), которые следует учитывать при строительном освоении карстовых районов.

Книгу Н.М. Кухарева "Инженерно-геологические изыскания в области развития карста в целях строительства" (1975) можно рассматривать как изложение многолетнего опыта изыскателя-практика. Она написана в отрыве от исследований, выполненных в период, предшествующий выходу книги, и это снизило ее ценность. Очевидно, по этой причине книга не вызвала должного интереса у специалистов.

Этой же теме посвящена работа В.С. Лукина и Ю.А. Ежова [15]. В ней обобщен 25-летний опыт исследований карстовых процессов и изысканий в карстовом районе г. Кунгура. Большое внимание авторы уделили таким вопросам, как механизм карстовых провалов, районирование территории для целей строительства, влияние техногенной деятельности на развитие карста. Несмотря на спорность некоторых положений, они представляют значительный интерес в связи с тем, что большинство из них основывается на фактическом материале.

Десятилетие 1977–1987 гг. явилось весьма плодотворным в инженерном карстоведении почти по всем выделенным направлениям. Наиболее интересные исследования были проведены в области оценки карстовой опасности, механизма карстовых деформаций, закономерностей растворения карста и, особенно, в области противокарстовой защиты.

Статьи В.И. Мартина [17] и В.П. Костарева [10] посвящены проблеме оценки карстовой опасности в условиях ограниченного объема прямой информации, необходимой для такой оценки. Предлагается использовать ряд косвенных параметров. Именно такая ситуация очень часто встречается во многих карстовых районах. Хотя вопрос оценки карстовой опасности в работе до конца не решен (с точки зрения формальной логики), постановка этого вопроса и попытка его решения заслуживают самого серьезного внимания.

В 1980 г. была опубликована обобщающая статья [33] о вероятностном подходе при оценке карстоопасности территорий и проектировании противокарстовой защиты. В статье доказано, что в настоящее

время вероятностный подход наиболее приемлем как при изысканиях, так и при проектировании сооружений в карстовых районах на всех стадиях проектирования. Мало того, величина вероятности (надежности), непосредственно используемая при решении задач при изысканиях, проектировании и эксплуатации сооружений в карстовых районах, служит объединяющим понятием для всех стадий проектирования, с помощью которого становится реально возможным применение системного подхода к рассмотрению геотехнической системы карст – сооружение.

В рассматриваемый период 1977–1987 гг. были опубликованы фундаментальные статьи А.В. Лёхова по математическому моделированию растворения (массотдачи) при движении воды в массиве карстующихся пород [12–14]. Основываясь на термодинамических принципах, автор составил уравнения материального баланса для описания процесса растворения. Хотя эти работы не доведены в полной мере до уровня, обеспечивающего возможность прогноза процесса растворения при решении задач строительства, они при дальнейшем их развитии могут быть серьезным аппаратом прогноза карстового процесса.

Период 1977–1987 гг. характеризуется большим числом публикаций в области механизма карстовых деформаций. Отметим те из них, которые непосредственным образом влияют на методы изысканий, оценки карстовой опасности, выбора способов противокарстовой защиты.

Статья В.П. Хоменко и Р.С. Зиангирова [39] посвящена экспериментальному изучению закономерностей формирования локальных карстовых деформаций в водонасыщенных песках. Показано, что деформации этих грунтов над карстовыми полостями могут происходить в виде фильтрационного сдвижения, гравитационного обрушения и вязкопластичного истечения, в том числе вследствие разжижения.

Большое значение для понимания механизма карстовых деформаций имеет анализ формирования напряженного состояния массивов горных пород, в том числе при искусственном изменении гидрогеологических условий. Наиболее обстоятельно эти вопросы рассмотрены в статьях [11], [1] и [9].

Достаточно плодотворным оказалось направление исследований механизма провала, развиваемое О.Б. Нещеткиным, которое основывается на тщательном изучении наблюдаемых в природе некоторых характерных черт провалов (трещины, уступы, углубления, характер смещения слоев грунта и т.д.) и на проведении специальных экспериментов в лабораторных условиях [23].

Принципиальное значение для прогнозов параметров карстовых провалов имеет методика определения диаметров провалов с учетом

нагрузки от сооружения и глубины заложения фундаментов, разработанная Г.М. Троицким [29], [37].

В 1977–1987 гг. было опубликовано большое число результатов исследований в области противокарстовой защиты.

В монографии Н.С. Метельюка [20] изложены положения по расчету конструкций на воздействие карстовых деформаций. Несмотря на то, что в книге в недостаточной мере учтена специфика карстовых деформаций (механизм формирования, стохастический характер проявления), эта работа имела заметное научно-методическое значение.

Принципиальное значение для теории и практики противокарстовой защиты имеет статья [32]. В ней приведена наиболее полная классификация противокарстовых мероприятий, сформулированы основные принципы их проектирования и в общем виде сферы их применения. Статья Т.А. Маликовой и М.С. Вайнштейна [16] – одна из первых работ в области расчета конструкций противокарстовой защиты с использованием современных ЭВМ.

В работе [35] дан ответ на решение одного из важнейших вопросов инженерной практики освоения закарстованных территорий – определение параметра противокарстовой защиты, который можно непосредственно использовать в инженерных и экономических расчетах. Этот параметр (расчетный пролет провала), являясь эмергентным параметром системы карст – сооружение, объективно и однозначно отражает как стохастический характер карстового процесса, так и различные особенности сооружения. Изложенные в работе [35] принципы могут быть с успехом использованы при решении и других задач практики.

В 1977–1987 гг. были опубликованы статьи, в которых сделаны попытки осветить положение в инженерном карстоведении в целом и наметить пути его развития [3], [25], [27].

В восьмидесятых годах было опубликовано несколько монографий, в которых в той или иной мере затрагиваются вопросы инженерного карстоведения.

В книге Л.А. Молокова [22] основное внимание уделено вопросам прогноза карстово-суффозионных процессов для целей гидротехнического строительства. Тем не менее в книге приведено много материала, который можно использовать при прогнозе карстового процесса применительно к другим видам строительства. В частности, заслуживают внимания вопросы, связанные с "оживлением" карста за счет выноса заполнителя из карстовых полостей и трещин, а также с оценкой несущей способности карстующихся пород в массиве.

Работа В.П. Хоменко [38] посвящена механизму карстово-суффозионных деформаций и их прогнозу. В ней приведены данные специальных экспериментальных исследований механизма карстово-суффозионных деформаций и показаны их основные закономер-

ности, позволяющие делать прогнозы, в том числе с учетом техногенных воздействий.

В монографии [8] изложены вопросы изучения инженерно-геологических особенностей элювия карбонатных пород. В действующих СНиП характеристики этих грунтов не нормируются. Поэтому рассматриваемая работа имеет большое практическое значение.

В книге А.И. Печёркина [26] приведены природные условия карстования сульфатных пород. С инженерно-геологических позиций сделана попытка типизировать карстовые полости. На примере одного из карстовых районов предложены способы геолого-карстологического районирования. Однако автор непосредственно не связывает принципы такого районирования с задачами проектной практики.

В монографии [36] впервые приводится весь комплекс основных вопросов, связанных со строительством в карстовых районах. Эти вопросы рассмотрены с позиций единой системы карст – сооружение.

В книге критически проанализированы различные приемы и принципы освоения закарстованных территорий и доказано, что только совместный учет природных, инженерных и экономических аспектов на формализованной основе позволяет получить принципиально новые решения, могущие удовлетворять инженерную практику строительного освоения закарстованных территорий.

Вопросы освоения закарстованных территорий в нормативных и методических документах

В настоящее время отсутствует специальный СНиП по особенностям проектирования зданий и сооружений в карстовых районах. Однако различные аспекты изысканий и проектирования в условиях карста кратко излагаются во многих СНиПах, как правило, в виде отдельных пунктов. В 1986 г. впервые введен в действие специальный раздел по особенностям проектирования оснований и фундаментов на закарстованных территориях (дополнение к СНиП 2.02.01–83). С 1988 г. введены в действие СНиП 1.02.07–87 "Инженерные изыскания для строительства", в которых сформулированы основные требования к инженерно-геодезическим и инженерно-геологическим изысканиям в карстовых районах.

Следует заметить, что подготовка специальных разделов по особенностям проведения изысканий и проектирования в карстовых районах стала проводиться лишь в последнее время. Это объясняется тем, что именно к этому времени были проведены целенаправленные исследования и получены соответствующие результаты по ряду принципиальных вопросов строительства в карстовых районах, которые позволили зафиксировать их в качестве строительных правовых норм.

В дополнении к СНиП 2.02.01–83 в краткой форме сформулированы принципы проектирования оснований и фундаментов на территориях, где возможны образования карстовых провалов и оседаний. В данном СНиПе нашел отражение системный подход к проблеме, при котором расчетные параметры карстовых деформаций определяются (с использованием аналитических или вероятностно-статистических методов) с учетом показателей карстового процесса и особенностей сооружений.

В СНиП 1.02.07–87 определен перечень необходимых видов инженерно-геодезических и инженерно-геологических работ применительно к различным стадиям проектирования строительных объектов. Закарстованные территории, где возможны карстовые провалы, должны быть районированы по двум параметрам: интенсивности образования провалов (5 категорий: I–V) и их средним диаметрам (4 категории: А, Б, В, Г).

Эти требования заставят изыскателей проводить специальные работы по количественному прогнозу карстопроявлений. Названные параметры позволяют в большинстве случаев достаточно объективно оценивать степень карстоопасности сооружений и определять параметры, характер и объем противокарстовой защиты и, как следствие, степень сложности застройки территории.

Отсутствие вербальных (словесных) характеристик категорий по степени пригодности территории для строительства (например, мало-пригодных, непригодных и т.д.) заставляют изыскателей и проектировщиков решать эти вопросы совместно с учетом инженерно-геологических изысканий и особенностей проектируемых объектов.

В качестве недостатков СНиП 1.02.07–87 следует назвать следующие:

не прослеживается идея о том, что инженерные изыскания – составной элемент системы изыскания – проектирование – строительство – эксплуатация;

отсутствуют требования по принципам районирования закарстованных территорий при невозможности определения указанных выше параметров карстовых провалов, а также принципы районирования территорий, где основная опасность карста заключается в образовании оседаний земной поверхности или других карстопроявлений;

не обеспечена достаточная увязка с требованиями СНиП 2.01.02–83.

Различные аспекты проектирования на закарстованных территориях отражаются в некоторых других действующих СНиП. К сожалению, здесь дело обстоит крайне неблагоприятно.

Основные недостатки этих СНиП заключаются в использовании неправильной терминологии, неучете различных аспектов карстоопасности применительно к тем или иным сооружениям, крайне слабом использовании современных результатов исследований инженерного

карстведения. Это относится к таким существующим СНиПам как "Строительная климатология и геофизика", "Нагрузки и воздействия", "Железные дороги", "Автомобильные дороги", "Магистральные трубопроводы", "Генеральные планы промышленных предприятий".

В ряде СНиП (таких, как "Основания гидротехнических сооружений", "Плотины бетонные и железобетонные", "Свайные фундаменты") указывается, что в карстовых районах проектирование должно производиться с учетом дополнительных требований и технических условий. В условиях же отсутствия таких официальных документов по этим видам сооружений деятельность инженеров-проектировщиков нередко крайне затруднена.

Во многих главах СНиП особенности проектирования в карстовых районах вообще не отражены. К сожалению, это не сделано даже в тех СНиПах, где учет карста при проектировании требует особого подхода (СНиП "Метрополитены", "Тоннели железнодорожных и автодорожных", "Мосты и трубы", "Сооружения мелиоративных систем", "Аэродромы", "Водоснабжение. Наружные сети и сооружения", "Промышленный транспорт"). Даже СНиП "Планировка и застройка городов, поселков и сельских населенных пунктов" не предусматривает дополнительных требований по особенностям проектирования. Но именно на стадии планировки (генплан, проект детальной планировки и т.п.) должны быть решены принципиальные вопросы освоения закарстованной территории.

СНиП в общем виде ставят перед специалистами вопросы, требующие конкретного решения при изысканиях и проектировании. По сути дела, некоторые требования СНиП представляют собой своеобразные задания исследователям и инженерам-практикам. Так, требование СНиП 2.02.01-83 о том, что основания сооружений должны проектироваться на основе технико-экономического сравнения вариантов проектных решений, со всей остротой поставило вопрос о разработке методики технико-экономического сравнения вариантов противокарстовой защиты. Требования этих СНиП о том, что нагрузки и воздействия на основания должны устанавливаться исходя из рассмотрения совместной работы сооружения и основания, выдвигают сложную задачу прогноза параметров карстовых провалов под подошвой фундамента.

Специфичность и многоаспектность вопросов строительства в карстовых районах, решение которых возможно лишь при определенной специальной подготовке практических работников, потребовало создания ряда методических документов (рекомендаций) по различным аспектам инженерного карстведения. Такого рода документы, как известно, не являются нормативными, а представляют собой изложения результатов исследований или обобщения передового опыта в форме, доступной для их использования в практике.

К настоящему времени подготовлено около двадцати таких документов, в том числе носящих региональный и ведомственный характер.

Основными из них являются следующие.

Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР (ПНИИИС, 1967).

Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР (ПНИИИС, ДонПромстройНИИпроект, 1967).

Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях (НИИОСП, 1985).

Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов (Моспроект-1, Мосгоргеотрест, 1984).

Методические рекомендации по проектированию фундаментов зданий и сооружений в карстовых районах (НИИСК, 1986).

Рекомендации по изучению карста геофизическими методами (ПНИИИС, 1986).

Рекомендации по использованию инженерно-геологической информации при выборе способов противокарстовой защиты (ПНИИИС, 1987).

Специально прокомментлируем лишь "Рекомендации" ПНИИИС 1967 г., как оказавшие большое, но не однозначное влияние на практику освоения закарстованных территорий. Они достаточно полно отразили результаты исследований в области инженерного карстоведения, проводившихся в тот период главным образом в ПНИИИСе. "Рекомендации" имели принципиальное значение для практики освоения закарстованных территорий. Они в определенной мере регламентировали все этапы освоения закарстованных территорий (изыскания – оценка карстовой опасности, противокарстовая защита) и значительно облегчили специалистам процесс проектирования. Однако уровень исследований тех лет не позволил объективно, на формализованной основе, связать все эти этапы в рамках единой системы.

Стремление дать стандартные практические рекомендации по проектированию сооружений привело к тому, что сложные вопросы по обеспечению необходимой надежности и экономичности проектных решений были изложены сугубо упрощенно и необоснованно категорично (хотя и с элементами здравого смысла) применительно к так называемым категориям устойчивости, зависящим лишь от интенсивности образования провалов. Такой подход оказался удобным для многих специалистов, не утруждавших себя необходимостью изучения карстового процесса с учетом конкретных инженерных задач, инженерно-геологической обстановки и сравнения вариантов принимаемых

решений на основе технико-экономических расчетов. Чаще всего проектировщики требовали от изыскателей в качестве итога инженерно-геологических работ только названий категорий устойчивости, которые выдавались в большинстве случаев субъективно. Такое положение стало традиционным. Мало того, за 20 лет действия "Рекомендаций" на них было воспитано поколение специалистов, с трудом воспринимающих в настоящее время другие подходы, особенно в части оценки карстовой опасности и обоснования противокарстовой защиты.

Таким образом, можно сделать следующий вывод. "Рекомендации" ПНИИС имели и до настоящего времени имеют (особенно в части методики проведения инженерно-геологических изысканий) большое значение для практики. Однако догматичность изложения проблем по оценке карстовой опасности и обоснованию противокарстовой защиты в сочетании с недостатками практики проектирования привели к тому, что они стали тормозом к использованию других подходов к освоению закарстованных территорий, в большей степени отвечающим современным требованиям проектирования.

2.2. Основные тенденции развития инженерного карстоведения в ГДР

Следует заметить, что понятие инженерного карстоведения как ветви инженерной геологии, изучающей условия освоения закарстованных территорий, в ГДР не принято. Здесь обычно говорят об инженерно-геологическом аспекте карстоведения. Эти различия в понятиях не столь существенны, для того, чтобы говорить о тенденциях развития инженерного карстоведения в нашем понимании. Можно выделить два этапа в развитии инженерного карстоведения в ГДР, временную границу которых можно примерно датировать серединой сороковых годов.

На первом этапе преобладали исследования преимущественно сугубо географической, геологической и спелеологической направленности. На втором этапе характер исследований во все возрастающем масштабе менялся в связи с необходимостью решения инженерных задач, связанных главным образом со строительством и горным делом.

Одной из первых в области инженерной геологии карста является работа В. Бизе (1931), в которой была предпринята попытка описать механизм возникновения полостей за счет локального растворения горных пород. В 20–30-х гг. появилось большое число работ по регионально-геологическим условиям формирования закарстованности соляных пород по некоторым районам. При этом наиболее интересные данные получены по району Мансфельдерской мульды. В первую

очередь здесь следует назвать работы сотрудников школы проф. Й. Вайгеля (1934–1938). К этому же времени относится деятельность проф. Э. Фульды, который исследовал процессы растворения в соляных шахтах Тюрингии при их затоплении и связанные с ними процессы провалообразования. Над инженерно-геологическими аспектами карстоведения применительно к соляному и сульфатно-соляному карсту в 30–40-е годы успешно работал Х. Вебер, который впервые обосновал понятия так называемых регулярного и иррегулярного выщелачивания.

В 1941 г. Х. Крамер провел обобщение географических и спелеологических знаний о карсте с попыткой ориентации их на решение инженерно-геологических задач. Он один из первых успешно привлек к объяснению характера карстовых деформаций некоторые закономерности деформаций горных пород над горными выработками.

Второй этап развития инженерного карстоведения определялся задачами массового строительства в послевоенный период и связан прежде всего с именем Ф. Каммерера, которого можно считать основателем Галленской инженерно-геологической школы карстоведения. Наиболее известной работой Ф. Каммерера была статья, посвященная механизму карстовых провалов и принципам проектирования конструктивной противокарстовой защиты (1962).

Работы Ф. Каммерера были продолжены К. Бренделем и другими его сотрудниками Галленской школы.

Ценный вклад в развитие карстоведения внесли геологи, работающие на калийных шахтах юго-западных округов ГДР. Основные научно-практические задачи, стоящие перед ними, связаны с водопритоками в шахты, вызывающими интенсивное растворение.

Интенсивные исследования проблем инженерной геологии карста в настоящее время ведутся в Фрайбергской горной академии ГДР. Результаты этих исследований опубликованы. Книга Ф. Ройтера и Х. Молека [45] – первая в мире монография, где различные аспекты инженерного карстоведения рассматриваются в комплексе. В Фрайбергской горной академии также впервые было создано специальное учебное пособие по инженерной геологии карста [44].

К направлениям исследований этой академии тесно примыкают работы Г. Судерлау, М. Пенцеля и других авторов в области механизма карстовых деформаций. Большой интерес представляют исследования Й. Кленгеля, К. Зензе, Г. Шмидта и других ученых в области противокарстовой защиты.

В ГДР впервые созданы стандарты по вопросам изысканий и проектирования в карстовых районах.

2.3. Особенности инженерного карстоведения в других странах

Проблема строительного освоения закарстованных территорий, как уже указывалось выше, актуальна для многих стран. Это находит свое выражение в периодическом проведении международных симпозиумов по различным аспектам инженерного карстоведения.

Симпозиум МАИГ, состоявшийся в 1973 г. в г. Ганновере (ФРГ) – наиболее крупный и представительный международный симпозиум, на котором затрагивались важнейшие аспекты инженерного карстования.

На симпозиуме наиболее полно были представлены результаты исследований, а также опыт изысканий и проектирования в карстовых районах, в основном европейских стран. При этом большинство докладов было сделано специалистами ФРГ и Франции. К сожалению, в работе симпозиума не принимали участие специалисты СССР и ГДР, которые имели в то время наиболее существенные достижения по большинству рассмотренных на симпозиуме вопросов.

Отличительной особенностью симпозиума было то, что на нем преобладали доклады по конкретным объектам проектирования. Это оказалось характерным и для других симпозиумов. Большинство докладов, представленных на Стамбульском симпозиуме 1981 г., было посвящено вопросам строительства гидротехнических сооружений на закарстованных породах. Большой интерес представляли материалы по физико-механическим характеристикам карстующихся пород.

На международном симпозиуме по прикладному карстоведению, состоявшемуся в 1984 г. в г. Льеже (Бельгия), большое внимание было уделено обнаружению карстовых полостей геофизическими методами, главным образом, микрогравиметрическими и сейсмическими. Однако непосредственным вопросам строительства в карстовых районах на симпозиуме было уделено мало внимания.

Конференция 1984 г. в г. Орландо (США) – первое американское совещание по проблеме карстовых деформаций. Она была организована Научно-исследовательским институтом карстовых провалов при Центральном университете шт. Флорида. Конференция привлекла внимание специалистов ряда других стран, в первую очередь таких, как КНР и ЮАР. Характерным для совещания было то, что на нем рассматривался комплекс проблем инженерного карстования: механизм формирования карстовых деформаций, геофизические методы фиксации карстопроявлений, оценка карстовой опасности, противокарстовая защита, экономические, экологические и юридические аспекты освоения закарстованных территорий. Примерно этим же вопросам была посвящена конференция 1987 г., проведенная в г. Орландо.

Рассмотрим особенности и уровень развития инженерного карстования в различных странах.

ФРГ. Как и для ГДР, проблема изучения карста в ФРГ – одна из важнейших проблем инженерной геологии. Подтверждение этого – проведение Международного симпозиума по проблемам инженерного карстования в г. Ганновере (1973 г.), на котором примерно одна треть всех докладов сделана специалистами ФРГ.

Инженерно-геологические условия строительства в карстовых районах ФРГ во многом аналогичны условиям, существующим в ГДР. Однако тенденция развития исследований проблем инженерной геологии карста в этих странах несколько отличается. В ФРГ в большей мере в этих исследованиях преобладает чисто геологический аспект; исследования ведутся преимущественно в связи с сугубо конкретными объектами строительства и горного дела. Публикаций результатов инженерно-геологических исследований общенаучного характера сравнительно немного.

В ФРГ уделяется много внимания проблеме обнаружения карстовых полостей геофизическими методами, в частности, микрогравиметрическими и сейсмическими.

США. Проблемы инженерного карстования в США начали интенсивно исследоваться в последнее время после ряда катастрофических разрушений сооружений. В 1981 г. при Центральном университете шт. Флорида в г. Орlando был организован Научно-исследовательский институт карстовых провалов. Анализ публикаций исследователей этого института и других американских специалистов позволяет сделать следующие выводы.

1. Основное внимание в научных исследованиях уделяется проблемам строительства в условиях покрытого карбонатного карста, при этом основная опасность связывается с возможностью образования карстовых провалов.

2. В инженерно-геологических исследованиях наметилась достаточно четкая тенденция изучения процессов, происходящих в покровной толще над карстующимися породами (механизм карстовых деформаций); мало уделяется внимания процессу растворения карстующихся пород.

3. В инженерных изысканиях большое значение придается инженерно-геологической съемке, выявлению статистических закономерностей карстопоявлений, геофизическим (сейсмическим, электромагнитным) методам обнаружения аномалий как в карстующихся породах, так и в покровной толще.

4. Многие американские специалисты пришли к выводу, что решения по противокарстовой защите должны приниматься в условиях большей или меньшей неопределенности. Очевидно поэтому в США стали развиваться вероятностные методы оценки карстовой опасности

[49]. В. Саломон и И. Квинлан рассматривают юридические аспекты проблемы с учетом практики страхования [49, 50].

5. Некоторые американские инженеры считают, что противокарстовая защита должна быть комплексной [49] и обязательно реализуемой на стадии эксплуатации [50].

ЮАР. Проблема строительства на закарстованных территориях особенно остро стоит для наиболее развитых в промышленном отношении районов страны – Трансвааль, Йоганнесбург и др.

Особенности строительства в карстовых районах ЮАР – следующие:

карстующиеся породы представлены доломитами, залегающими на глубинах от 0 до 20 м;

карстоопасность заключается в образовании провалов, неравномерных осадков и постепенных локальных оседаний (проседаний);

опасность возникновения карстовых провалов возрастает в районе горнодобывающих предприятий, где существуют значительные техногенные изменения гидрогеологических условий;

специалисты ЮАР добились значительных успехов в деле проектирования специальных фундаментов и оснований, особенно в условиях относительно неглубокого залегания карстующихся пород (Ф.М. Вагнер, П.В. Дэй) [49];

в области научных инженерно-геологических исследований наибольшее внимание уделяется вопросам механизма карстовых провалов (Д. Дженнингс, 1966), а в последнее время также оценке карстовой опасности [50].

Франция. Инженерно-геологическими условиями, с которыми приходится сталкиваться инженерам при строительстве на закарстованных территориях, – следующие:

в большинстве случаев карстующиеся породы представлены сульфатными, карбонатными и меловыми породами, залегающими на глубинах от 10 до 50 м;

на развитие карста в некоторых районах (гг. Париж, Ницца) оказывают значительное влияние техногенные факторы.

Французские специалисты занимают ведущее положение по созданию специальной геофизической аппаратуры для локализации подземных полостей (электромагнитные, микрогравиметрические и сейсмические методы). Несмотря на то, что основная доля исследований по инженерному карстоведению связана с проектированием конкретных сооружений, во Франции имеются оригинальные разработки по районированию закарстованных урбанизированных территорий и оценке карстовой опасности (М. Тульмон, Б. Пупелло) [41, 48].

Большое внимание французские исследователи уделяют изучению физико-механических характеристик карстующихся пород. В связи с этим следует отметить, что Лабораторией мостов и дорог Франции

опубликован специальный сборник статей по исследованию меловых пород как оснований сооружений [43].

Из противокарстовых мероприятий во Франции наибольшее внимание уделяется мероприятиям геотехнического характера, в частности, заполнению карстовых полостей.

Великобритания. Основная специфика проектирования сооружений в карстовых районах на Британских островах заключается в том, что карстующиеся породы представлены карбонатными, главным образом меловыми породами, которые залегают на сравнительно небольших глубинах (до 20 м). Основная опасность карста здесь заключается в пространственном и временном изменении несущей способности карбонатных пород как оснований сооружений, а также в возможности образования провалов.

Наибольший интерес представляют результаты исследований англичан по физико-механическим характеристикам карбонатных пород с учетом различной степени выщелачивания (В.Р. Дирман, Ф.Г. Белл) [41], а также прочностным характеристикам гипса, ангидрита и каменной соли в их монолитном залегании.

ПНР. Для значительной части территории страны характерно наличие покрытого карбонатного и сульфатного типов карста, которые проявляются в виде оседаний и провалов. Большой интерес представляют работы Е. Лишковского [48] в области механизма карстовых деформаций и оценки карстовой опасности.

Турция. Особенность освоения закарстованных территорий в Турции заключается в том, что карстующиеся породы (гипсы, ангидриты и известняки) залегают неглубоко или непосредственно выходят на поверхность. Турецкие специалисты большое внимание уделяют исследованиям несущей способности гипсов, ангидритов и известняков как оснований сооружений, а также технологическим параметрам устройства оснований в таких породах.

КНР. Проблема строительства в КНР чрезвычайно актуальна: карстовые районы занимают 1/5 территории страны. Для промышленного, гражданского и транспортного, особенно железнодорожного строительства, наибольшие трудности представляют участки карбонатного покрытого карста. Несмотря на большие потребности практики, исследования в области инженерного карстования лишь развешиваются, в основном по выявлению региональных закономерностей развития карста и его типизации. Характерно, что китайские специалисты в последнее время участвуют почти во всех международных и национальных конференциях по инженерному карстоведению.

2.4. Характеристика инженерного карстоведения как прикладной науки и перспективы дальнейшего его развития

Как показал анализ публикаций по проблемам строительного освоения закарстованных территорий, инженерное карстоведение в СССР и ГДР, а также во Франции и ФРГ наиболее интенсивно развивалось в последние 15–20 лет. Интенсификация исследований в последние годы наметилась и в ряде других стран. При этом, помимо инженерно-геологического направления работ, наметилась вполне определенная тенденция развития исследований инженерного, экономического и экологического характера.

Охарактеризуем инженерное карстоведение в целом как прикладную науку. Объект исследования инженерного карстоведения представляет собой природно-техническую систему, условно названную нами как карст – сооружение.

В свою очередь, инженерное карстоведение, как прикладную науку, следует рассматривать в качестве элемента системы наука – инженерия – производство. В соответствии с этим в инженерном карстоведении существует тенденция развития трех видов исследований: 1) мало отличающихся по своему характеру от "чистой" науки; 2) направленных на получение отдельных моделей и методов, которые могут быть использованы непосредственно при решении определенного типа инженерных задач; 3) направленных на получение результатов при решении задач, возникающих при проектировании конкретных объектов.

Инженерное карстоведение формировалось двумя путями. На первом этапе произошло относительное, во многом формальное, отпочкование инженерного карстоведения от общего карстоведения на основе практического использования результатов. Сами же подходы исследований общего и инженерного карстоведения на первом этапе практически не отличались, ибо во всех случаях предметом исследований был лишь естественный карстовый процесс. На втором этапе (с середины шестидесятих годов по настоящее время) происходит постепенное оформление ранее не связанных между собой знаний (карстоведение, инженерная геология, теория сооружений, механика грунтов, экономика, строительная механика, городское строительство, эксплуатация сооружений и т.п.) в единую теоретическую систему.

В настоящее время инженерное карстоведение представляет собой достаточно самостоятельную дисциплину, которую нельзя рассматривать как приложение естественно-научной дисциплины – карстоведения. В инженерном карстоведении сформировался собственный подход к изучению карста, связанный с необходимостью учитывать те или иные особенности различных инженерных задач (вид, срок служ-

бы и степень ответственности, сроки проектирования, экономические и экологические последствия, способы возведения и эксплуатации объектов и т.п.).

Исследования в области инженерного карстоведения нельзя считать законченными, если они не доведены до расчетных схем, методических рекомендаций и программ расчетов на ЭВМ и их апробации при конкретном проектировании. Это в значительной мере накладывает отпечаток на диалектику развития инженерного карстоведения. С одной стороны, необходимо в расчетах учесть всю сложность системы карст – сооружение, ее отдельных подсистем, элементов и их взаимосвязей, используя для этого достаточно сложные математические методы и понятия. С другой стороны, практическое использование расчетов требует их упрощения, что ведет к необходимости замены более сложных закономерностей более простыми. Примером могут служить методы оценки карстоопасности. Суть существующих противоречий в этом вопросе заключается в различных подходах к оценке этой эквивалентности.

Инженерное карстоведение оперирует параметрами трех видов: 1) природными (вид карстовых деформаций, диаметр провалов и т.д.); 2) техническими (срок службы сооружений, нагрузка на основание и т.д.); 3) системными, связывающими и координирующими две первые группы параметров (степень карстоопасности, расчетный пролет провала в основании сооружений и т.д.).

Инженерное карстоведение, как наука, обретает новые потенции по мере овладения именно системными параметрами, когда объективные природные закономерности могут использоваться в технике (в нашем случае – строительстве).

В качестве новых задач, решение которых диктуется практикой освоения закарстованных территорий, необходимо назвать следующие:

1) количественный прогноз параметров карстового процесса с учетом различных техногенных воздействий, в том числе предполагаемых, имеющих стохастический характер;

2) количественную оценку карстовой опасности по ряду косвенных признаков в условиях недостаточности прямой объективной информации о карстовых деформациях и с учетом характера инженерной задачи;

3) разработку моделей техногенного карстового процесса, вызванного водопритоками в соляные шахты и соответствующих мер борьбы;

4) создание методологии карстомониторинга на территориях городов и крупных промышленных предприятий;

5) разработку эффективных способов локализации подземных

карстовых форм, прогноз развития и количественную оценку их опасности;

б) количественную оценку эффективности всех видов противокарстовой защиты;

в) налаживание действенных организационных форм сотрудничества (коопераций) инженеров-геологов, инженеров-строителей (проектировщиков, технологов и эксплуатационников) и горных инженеров, которые обеспечили бы эффективность освоения закарстованных территорий.

ГЛАВА 3

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КАРСТА

3.1. Природные закономерности карстования

Для выявления закономерностей карстового процесса и его региональных особенностей прежде всего необходимо знать основные природные условия развития процесса растворения горных пород. Характерно, что в Советском Союзе эти условия впервые были определены специалистами в области инженерной геологии. Еще в начале 30-х годов Ф.П. Саваренский и Н.М. Кухарев выделили четыре основных условия развития карста (с точки зрения растворения горных пород), связанных с наличием: растворимых пород, их водопроницаемости (трещиноватости), движущихся вод и растворяющей способности этих вод.

В дальнейшем эти условия были теоретически обоснованы Д.С. Соколовым, который акцентировал внимание на том, что отсутствие любого из четырех условий (в пространстве или во времени) исключает возможность развития карста.

Несмотря на кажущуюся очевидность названных условий, интерпретация их в практике инженерно-геологических изысканий нередко ведет к принципиальным ошибкам. Одна из таких характерных ошибок заключается в том, что степень карстоопасности некоторые специалисты полностью связывают с процессом растворения, а кардинальными противокарстовыми мероприятиями считают предохранение пород от растворения (независимо от литологии карстующихся пород). Во многих случаях такого рода мероприятия не только экономически нецелесообразны, но и принципиально неверны и даже противоречат здравому смыслу.

В связи с этим здесь следует сделать следующие оговорки.

1. Судя по упомянутым выше работам Ф.П. Саваренского, Н.М. Кухарева и Д.С. Соколова, под понятием "карст" имеется в виду лишь процесс растворения пород (карстование), а не совокупность определенных процессов и явлений, как это предполагает инженерно-геологическая трактовка понятия "карст" (см. гл. 1). Имеются примеры, когда процесс растворения горных пород на данном участке и в рассматриваемый промежуток времени отсутствует, однако карстовые деформации дневной поверхности (оснований сооружений) возможны как результат проявлений карстовых форм, образовавшихся ранее (в историко-геологическом прошлом).

2. Второе условие развития карста (водопроницаемость карстующихся пород) отражает лишь частный, хотя и наиболее распространенный, случай карстования, когда растворение в той или иной мере захватывает толщу рассматриваемых пород. Однако в ряде случаев (особенно, когда карстующимися породами являются пластичные породы, например каменная соль) растворением затронута преимущественно поверхность карстующихся пород, следствием которого, например, является оседание земной поверхности. Водопроницаемостью карстующихся пород в первую очередь определяется их трещиноватость как тектонического, так и нетектонического характера. Особенно благоприятные условия для карстования пород существуют в местах пересечений трещин. Это наиболее характерно для карбонатных и сульфатных пород. Для соляных пород, обладающих значительной пластичностью, наиболее характерно растворение поверхности этих пород. В результате такого растворения формируется более или менее горизонтальная поверхность (соляное зеркало). Таким образом в качестве второго условия развития карстования следовало бы назвать контакт вод с растворимыми породами (по трещинам или по поверхности).

На первых этапах развития инженерного карстоведения основное внимание уделялось выявлению особенностей развития карста в различных природных условиях с точки зрения процесса растворения. Результаты этих исследований отражены в работе Д.С. Соколова "Основные условия развития карста" (1962), в которой наибольшее внимание уделено исследованиям по растворимости карстующихся пород (табл. 3.1). По данным Ф. Ройтера и В. Кокерта (1971) присутствие в растворе Na^+ и Cl^- может увеличить растворимость гипса в 4–5 раз (рис. 3.1). При смешивании растворов неодинаковой концентрации растворимость известняка увеличивается (табл. 3.2).

Для практического использования выявленных закономерностей В.П. Зверев [6] разработал методику определения степени агрессивности подземных вод по отношению к основным карстующимся поро-

Основные результаты исследований по растворимости карстующихся пород

Факторы, влияющие на растворимость	Выявленные закономерности, практические выводы	Автор методики исследования, год публикации
<i>Природа кристаллических веществ</i>		
Энергия кристаллических решеток (работа, требуемая для разрушения связей, существующих в решетке, и удаления входящих в ее состав ионов, взаимодействием которых можно пренебречь)	Растворимость пород в воде обратно пропорциональна энергии кристаллических решеток NaCl, CaSO ₄ , CaCO ₃ и равна соответственно 320; 2,1; 0,015 г/л при температуре 25 °С	К.Б. Яцимирский, 1951; Д.С. Соколов, 1962
Способность солей к образованию кристаллогидратов	Способность солей к образованию кристаллогидратов прямо пропорциональна растворимости	А.С. Поваренных, 1958
Растворимость различных граней кристаллов	Растворимость отдельных граней кристаллов неодинакова: выпуклые элементы поверхности кристаллов имеют большую растворимость, чем плоские, а плоские – большую, чем вогнутые. С этим связано явление самозалечивания трещин в кристаллах	Г.Г. Леммлейн, 1954
Размер частиц кристаллического вещества	Растворение тем больше, чем меньше размеры зерен. Это – одна из причин крайней неравномерности распределения закарстованности в карбонатных породах	Г.И. Теодорович, 1949
Влияние примесей	В карстующихся породах могут быть примеси: а) тормозящие процесс растворения (вещества, менее раст-	А.Б. Здановский, 1946

	воримые по сравнению с данной солью, глинистые примеси, битуминозные вещества)*»; б) ускоряющие процесс растворения (вещества, более растворимые по сравнению с данной солью)	А. Бёгли, 1978
Температура минералов	С увеличением температуры минералов растворимость их увеличивается	Д.П. Григорьев, 1956
Давление в минералах	Если минеральный скелет испытывает большее давление, чем заключенные в порах и трещинах водные растворы, то растворимость минералов повышается	Д.С. Коржинский, 1953
	Особенно интенсивным это влияние будет в зонах анизотропности горных пород (в зонах разрывных нарушений, трещиноватых зон). Растворимость минералов увеличивается в зонах опорного давления в породах вокруг карстовой полости	Н.А. Огильви, 1956
<i>Природа водных растворов</i>		
Углекислота в водных растворах	В природных водах благодаря постоянному растворению углекислого газа CO_2 всегда присутствует углекислота с образованием в воде ионов H^+ и HCO_3^- . Повышение температуры существенно снижает растворимость CO_2 в чистой воде, повышение давления повышает растворимость CO_2 . Растворимость CO_2 снижается по мере роста концентрации солевых растворов	Д.С. Соколов, 1962 Н.М. Страхов, 1951
	Растворимость CaCO_3 прямо пропорциональна квадрату содержания агрессивной углекислоты. Карбонатная агрессивность вод, содержащих углекислоту, увеличивается при их смешивании. Углекислота в водных растворах практически не влияет на растворимость сульфатных и хлоридных пород	Ф.Ф. Лаптев, 1939

Факторы, влияющие на растворимость	Выявленные закономерности, практические выводы	Автор методики исследования, год публикации
Отдельные соли в растворах	Растворимость солей в растворах солей, не имеющих общего иона с твердой фазой, с ростом их концентрации сначала существенно увеличивается, а затем медленно уменьшается. При этом с увеличением общей минерализации раствора роль углекислоты в повышении растворимости карбонатов снижается. Растворы солей, имеющих общий ион с твердой фазой, как правило, снижают растворимость. Растворимость карстующихся пород в растворах сложного состава определяется совокупным и неоднозначным воздействием всех находящихся в растворе ионов	Э.Б. Штернина и Е.В. Фролова, 1949 Н.М. Страхов, 1951
Температура	С повышением температуры водных растворов растворимость пород увеличивается	А. Бёгли, 1964
Наличие в растворах серной, азотной и соляной кислот	С увеличением pH растворимость увеличивается	Д.С. Соколов, 1962

*По данным А. Бёгли (1978), при наличии в известняке глины или кремнезема соответственно от 15 до 20 или от 10 до 30 % возможно образование лишь небольших отрицательных форм (каверн, карров), а при содержании их более 20 или 30 % карстование породы практически не происходит.

Таблица 3.2

Дополнительная растворимость известняка вследствие смешивания двух водных растворов CaCO_3 различной концентрации при 17 °С (по А. Бёгли, 1964)

Исходные концентрации CaCO_3 в растворах, мг/л		Дополнительное количество известняка (мг/л) способное раствориться при соотношениях смешиваемых растворов				
Раствор 1	Раствор 2	9:1	3:1	1:1	1:3	1:9
10	120	0,8	1,7	2,5	2,1	1,0
10	240	5,5	11,9	16,0	11,6	5,4
10	320	12,1	25,6	31,7	21,7	9,4
10	400	22,3	44,9	51,5	33,3	14,7
80	120	0,2		—	—	—
80	240	3,4	—	—	—	—
80	320	8,5	—	—	—	—
80	400	16,6	—	—	—	—

дам, позволяющую учесть некоторые факторы, влияющие на растворимость пород.

Растворимость пород – лишь один из параметров, определяющих процесс растворения карстующихся пород, который, как и вся гетерогенная реакция, складывается из трех отдельных процессов [6, 7]: 1) поступление растворителя (природных вод) к поверхности карстующихся пород; 2) собственно растворение и фазовый переход; 3) удаление растворенных в воде продуктов реакции от поверхности.

Скорость растворения зависит от скорости наиболее медленно идущего процесса. Согласно диффузионно-кинетической теории, процесс растворения описывается уравнением

$$\frac{dq}{dt} = KA_1(c_n - c),$$

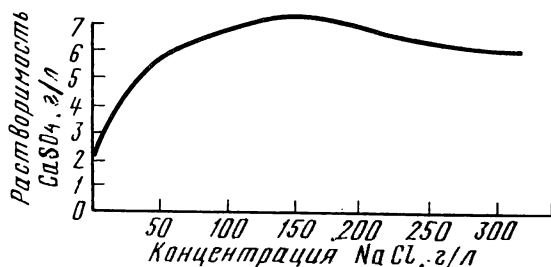


Рис. 3.1. Зависимость растворимости CaSO_4 от концентрации NaCl (по Э.Б. Штерниной и Е.В. Фроловой)

где q – количество вещества, перешедшего в раствор за время t ; K – коэффициент скорости растворения; A_1 – поверхность растворения; c_n – предельное насыщение; c – концентрация раствора.

Константу скорости растворения можно определить по формуле $K = 1/\gamma + 1/\beta$, где γ и β – коэффициенты межфазового и диффузионного процессов растворения.

В зависимости от соотношений коэффициентов γ и β возможны три типа процесса растворения (табл. 3.3).

Растворению карбонатных пород в природных водах, всегда содержащих CO_2 , предшествует химическая реакция: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Перед растворением ангидрита происходит его гидратация (кинетический межфазовый тип растворения): $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Этот процесс сопровождается набуханием (выражением, например, отслоением породы на стенках полостей).

Отличительные признаки диффузионного растворения – зависимость скорости растворения от скорости направления движения растворителя и слабая зависимость растворимости от температуры растворителя.

Как указывает В.П. Зверев [6], к отличительным особенностям недиффузионного растворения можно отнести постоянство скоростей растворения при различных скоростях движения растворителя, очень малые абсолютные значения коэффициента скорости растворения и быстрое его увеличение с повышением температуры растворителя.

Н.Н. Веригин нашел следующие теоретические зависимости, характеризующие диффузионное растворение в сечении трещины на расстоянии x от входного отверстия (для случая ламинарного движения):

$$d_x = d_0 + 2 \frac{K}{\rho} (c_n - c_x) t \exp\left(-2 \frac{K}{Q} x\right); \quad (3.1)$$

$$c_x = c_n - (c_n - c_0) \exp\left(-2 \frac{K}{Q} x\right); \quad (3.2)$$

Таблица 3.3

Характер растворения карстующихся пород

Соотношение γ и β	Тип процесса растворения	Карстующиеся породы
$\gamma \gg \beta$	Диффузионный	Гипс, галит
$\gamma \ll \beta$	Кинетический	Ангидрит
$\gamma \approx \beta$	Смешанный (диффузионно-кинетический)	Известняк

$$v_d = 2 \frac{K}{\rho} (c_n - c_x), \quad (3.3)$$

где d_x и d_0 – раскрытия трещин на расстоянии x от входного отверстия и первоначальное; ρ – плотность карстующейся породы; c_x и c_0 – концентрации раствора на расстоянии x от входного отверстия и начальная; t – время; Q – расход воды через трещины; v_d – скорость раскрытия трещин.

Коэффициент скорости растворения K представляет собой функцию многих параметров, важнейшие из которых: скорость движения воды v , коэффициент диффузии D , вязкость жидкости ν . В свою очередь D и ν зависят от температуры растворителя. Если рассматривать условия растворения данной породы при определенной температуре подземных вод, то можно считать, что коэффициент скорости растворения определяется прежде всего скоростью движения растворителя. Исследованиями многих авторов (например, А.Б. Здановского, П.А. Кулле) показано, что коэффициент скорости растворения уменьшается с уменьшением скорости движения растворителя. При наличии упрощающих предположений, В.В. Толмачев нашел экспериментальные зависимости между безразмерными критериями и коэффициентом скорости растворения и скоростью движения воды по трещинам

$$M = aRe^{-b} \text{ (при } Pr = \text{const)}; \quad (3.4)$$

$$M = K/v; Re = vd/\nu; Pr = \nu/D,$$

где M , Re и Pr – критерии Маргулиса, Рейнольдса и Прандтля; a и b – константы; v – скорость движения воды по трещинам.

Уравнения (3.1) – (3.3) были получены в предположении, что раскрытие трещины d_0 в начальный момент времени (до начала фильтрации) по всей ее длине одинаково и расход воды не меняется во времени. Хотя эти условия далеко не всегда соответствуют природным, зависимости (3.1) – (3.4) позволяют понять некоторые закономерности растворения трещиноватых горных пород в условиях ламинарного потока:

- 1) раскрытие трещины по направлению движения воды уменьшается по закону, близкому к экспоненте;
- 2) скорость растворения каждого сечения трещины имеет тенденцию к постепенному затуханию.

В.Г. Науменко показал, что на скорость растворения карстующихся пород влияет взаимное положение поверхности растворения (стенок трещины) и растворителя, а также шероховатость стенок трещин и турбулентность потока.

А.В. Лёхов [12, 13, 14] разработал концепцию физико-химического механизма карстового процесса (растворения) в карстующихся (в

основном, карбонатных) породах, развитую на основе постепенного перехода от процессов растворения элемента стенки трещины через динамику растворения единичных трещин и совокупности трещин до уровня массива. Модель каждого высокого уровня включает параметры, синтезированные из результатов реализации моделей более низкого уровня (табл. 3.4).

Исследования на уровне трещины показали высокую скорость насыщения подземной воды растворяющейся породой, равновесие же наступает на первых сантиметрах пути фильтрации практически во всем природном диапазоне скоростей фильтрации, за исключением мест сосредоточения потоков подземных вод.

Одним из первых, кто попытался теоретически решить вопрос развития карстового процесса в совокупности трещин при постоянстве суммарного расхода воды в карстующемся массиве, был А.В. Лёхов [14]. Этот вопрос важен для определения направленности процесса карстования с позиций саморазвития системы путем свободного перераспределения расхода между трещинами. Вследствие растворения происходит перераспределение расхода пропорционально раскрытию трещин. Это в определенной мере объясняет появление крупных каналов и полостей именно при больших расходах.

Существует следующая тенденция: средневзвешенное значение раскрытия трещин и дисперсия постоянно увеличиваются. Причем дисперсия при больших расходах возрастает быстрее, чем при меньших расходах. Приращение же среднего раскрытия при больших расходах происходит за счет приращения ширины больших трещин (нормальный закон распределения раскрытия трещин при больших расходах имеет тенденцию превращения в логарифмически нормальный закон).

Сопоставив результаты математического моделирования с натурными данными, А.В. Лёхов выявил структуру тонкой зоны повышенной закарстованности в виде сети трещин с развитыми входными участками (сети каналов) с шагом 10–30 м, наложенной на более частую сеть трещин со слабо развитыми входными участками с шагом 0,1–0,3 м.

Несмотря на различие закономерностей растворения различных карстующихся пород, формы растворения в этих породах во многих случаях достаточно близки между собой, что обеспечивает широкую сравнимость карстовых форм в различных растворимых породах и климатических зонах. Климатические зоны следует рассматривать не только в пространственном (применительно к предложенному времени), но и во временном (историко-геологическом) аспектах. Это показано в работах немецких исследователей Ф. Ройтера (1962), Г. Янковского (1964), Л. Айсмана (1985) и других на примере закарстованных территорий Средней Европы. Некоторые авторы предполагают, что

Таблица 3.4

Уровни исследований растворения карстующихся пород (по А.В. Лёхову)

Уровень исследований	Объект исследований	Основные характеристики			Основные уравнения
		течения	массообмена	массопереноса	
Микроуровень	Элемент трещины	Местный коэффициент сопротивления движению воды	Характер и константы скорости реакции, сорбции	Местная сред- немассовая скорость потока, коэффициент молекулярной диффузии	$\frac{dc}{dt} = K(c_n - c)^r \frac{F}{V}$
Мезоуровень	Трещина, каверна	Коэффициент сопротивления, проницаемость	Коэффициент скорости растворения, коэффициент массообмена	Скорость потока, действующий коэффициент диффузии, исправленный за счет сложного характера поверхности растворения	$q \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial (bc_b)}{\partial t} = \alpha (c_n - c_b)^r = \rho \partial b / \partial t$ (для одномерной модели)
Макроуровень	Элемент карстового массива	Проницаемость	Коэффициент массообмена элемента массива	Скорость фильтрации, коэффициент гидродинами-	Комплекс уравнений: 1) баланса массы растворенного вещества с учетом конвективного и дисперсного переноса по зоне повышенной закарстованности, обмена вещества с ог-

Продолжение табл. 3.4

Уровень исследований	Объект исследований	Основные характеристики			Основные уравнения
		течения	массообмена	массопереноса	

ческой дисперсии раничивающими зону толщами путем конвекции и диффузии, процессов физико-химического обмена с твердой фазой;
2) уравнения геомиграции в разделяющих толщах с учетом обмена массой между трещинами и блоками

Примечание. r – формальный порядок реакции; F – площадь поверхности растворения; V – объем растворителя; t – время; c_b – средняя концентрация по потоку; q – единичный расход потока; b – раскрытие щели (половина расстояния между стенками); α – коэффициент массоотдачи (в природном диапазоне параметров для известняков $\alpha = K$); x – текущая координата по оси трещины.

процессы карстования происходили сразу в послеседиментационный период или даже в процессе седиментации способных к растворению пород.

Для карстовых районов Средней Европы главная фаза карстования приходилась, по мнению Ф. Ройтера, на палеогеновый и неогеновый периоды.

Доказательством этого являются прогибы в юго-восточном Гарцфорленде палеогенонеогенового возраста (Г. Янковский, 1964), Гейзельская среднеэоценовая котловина, карстовые формы в месторождениях гипса в районе Франкенхаузена (Ф. Ройтер, 1962). При разработке бурого угля в шахтах в районе Лейпцига получены достоверные сведения о том, что фиксируемые карстовые формы имеют эоценовый или олигоценовый возраст (Л. Айсманн, 1985).

Четвертичный период также характеризуется фазами интенсивного растворения. Это показано на основе анализа пылицы в отложениях, заполняющих древние провалы на севере ФРГ (И. Нидермайер, 1973). К. Элленберг (1982) установил, что оседания в карстовом районе Верра (ГДР) вызваны растворением карстующихся пород в основном в раннем и позднем плейстоцене.

В голоценовый период наблюдается отчетливое увеличение закарстованности в атлантическую, суббореальную и субатлантическую климатические эпохи. Это доказал Г. Судерлау на примере происхождения оз. Зальцингензее в Мансфельдской мульде.

Таким образом, можно считать, что для закарстованных территорий Средней Европы основная часть имеющихся в настоящее время карстовых полостей формировалась в геологическом прошлом. Это однако не означает, что процесс образования провалов можно считать затухающим. Мало того, в условиях современных техногенных воздействий процесс провалообразования интенсифицируется. Указанные тенденции характерны для многих закарстованных районов Советского Союза (города Уфа, Москва, Дзержинск и др.).

Остановимся кратко на трещинной водопроницаемости горных пород, которая в значительной степени, как видно из изложенного, определяет условия карстования. Большое внимание этому вопросу уделил Д.С. Соколов. На основе анализа многочисленных исследований он сделал следующие выводы.

1. В формировании водопроницаемости горных пород тектонические трещины играют значительно большую роль по сравнению с трещинами литогенетическими; секущие тектонические трещины и разрывные нарушения обеспечивают возможность интенсивной циркуляции подземных вод на значительной глубине.

2. Литогенетические трещины в развитии карстового процесса в карбонатных породах играют более заметную роль, по сравнению с трещинами в сульфатных и хлоридных породах.

3. Тектонические трещины изгиба обуславливают слабое развитие трещинной водопроницаемости в отрицательных структурных элементах земной коры и широкое ее проявление в областях поднятий.

4. Внутрислойные тектонические трещины обладают ничтожным "первичным" раскрытием и не могут обеспечить возможность интенсивной циркуляции подземных вод.

Итак, даже из весьма краткого описания факторов, влияющих на карстование, видно, что развитие этого процесса в конкретных природных условиях может происходить весьма своеобразно.

Тем не менее Д.С. Соколову, Г.А. Максимовичу и А.Г. Лыкошину удалось сформулировать следующие общие закономерности развития карста.

1. Связь закарстованности с особенностями геологического строения и геологической историей района, определяющих унаследованный характер карстового процесса.

2. Ослабление закарстованности массива с глубиной вследствие снижения трещинной водопроницаемости, скоростей движения и растворяющей способности подземных вод.

3. Повышение закарстованности придолинных участков по сравнению с ядрами водораздельных массивов.

4. Усиление карстования по мере перехода от зон с сухим климатом к зонам субтропического и тропического климата.

5. Обусловленность интенсивности карстования и зональности его проявлений особенностями дренирования подземных вод.

Следует отметить один из важнейших инженерно-геологических аспектов процесса растворения различных карстующихся пород – изменение размеров карстовых полостей в результате растворения их стенок за расчетный срок службы сооружения $t_n = 50-200$ лет (рис. 3.2). В большинстве случаев именно при достижении полостью некоторого критического пролета b_c^k происходят обрушение кровли и образование провала.

А.Г. Лыкошин (1968) приводит сведения о скоростях растворения известняков и доломитов, полученные в натуре. Во всех случаях эта скорость колеблется от долей миллиметра до 3 мм в год. С учетом этого можно ориентировочно считать, что за срок службы инженерных сооружений (50–200 лет) расширение карстовых форм может составить от нескольких до первых десятков сантиметров. При расширении карстовой полости за счет растворения такое увеличение ее размеров в большинстве случаев не приводит к обрушению кровли, т.е. в этом случае карст можно считать практически неразвивающимся. Поэтому за время, соизмеримое с расчетным сроком службы сооружений, образование новых карстовых полостей, которые могут представлять опасность для сооружений, можно считать практически невозможным, а изменяющиеся *in situ* карстовые полости тех или иных разме-

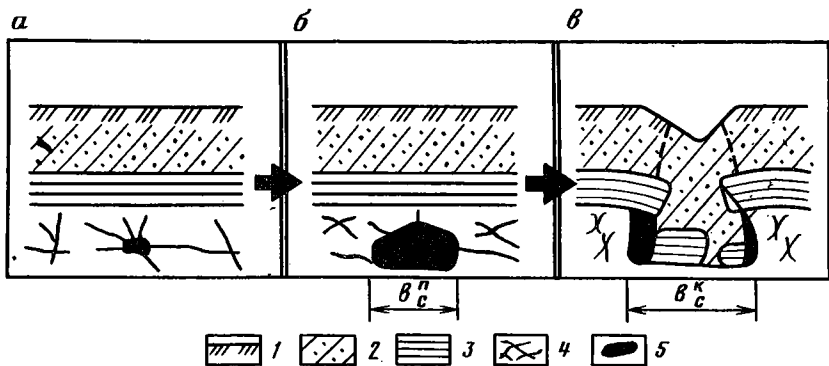


Рис. 3.2. Схематическое представление об опасности обнаруженных полостей в хлоридных (а-б), сульфатных (б-в) и карбонатных (в) породах:

а-в – полости (а – в момент зарождения, б – с номинальным пролетом b_c^n , обеспечивающим достижение критического пролета через время t , в – с критическим пролетом b_c^k , при котором происходит обрушение кровли).

1 – почвенно-растительный слой; 2-3 – рыхлые отложения покровной толщи; 4 – карстующиеся породы; 5 – полость

ров, сформировавшиеся за предшествующее геологическое время, практически неизменными за срок службы сооружений. В этом случае провал может произойти лишь при $b_c \approx b_c^k$. Могут быть и исключения, когда провал образуется при $b_c < b_c^k$.

В качестве первого исключения следует назвать ситуацию, когда деформации развиваются благодаря выносу водонасыщенных грунтов через трещины в кровле полости, сложенной карбонатными породами. Очевидно, что раскрытия трещины за счет растворения до нескольких сантиметров во многих случаях вполне достаточно для проникновения песков в полость. Второе исключение связано с тем, что обрушение кровли полости при $b_c < b_c^k$ может произойти из-за снижения несущей способности карстующейся породы кровли вследствие ее растворения по трещинам и порам. Нередко такая ситуация складывается в условиях мелового карста.

Для сульфатных пород приращение полости за счет растворения за срок службы сооружения можно оценить как $\Delta b_c = 10^{-1} \dots 10^0$ м, а для соляных пород $\Delta b_c = 10^0 \dots 10^1$ м.

На основании этого можно сделать вывод, что карстовые полости в сульфатных породах потенциально могут развиваться за счет растворения их стенок за срок службы сооружений t_n до критических размеров, если к началу эксплуатации сооружений они уже сформировались до определенных размеров b_c^n . Образование же новых полостей

с достижением ими критических размеров в сульфатных породах в отличие от соляных пород за срок t_n возможно лишь в исключительных случаях.

Таким образом, с точки зрения опасности полостей в карстующихся породах при их развитии (путем растворения стенок) за срок службы сооружений до некоторого критического размера b_c^k , при котором происходит деформация земной поверхности, выстраивается определенный, соответствующий литологическим типам карста (см. рис. 3.2).

3.2. Формы карстопроявлений

Для изучения карстовых форм и понимания закономерностей их происхождения в карбонатных породах полезным может оказаться изучение карстовых форм в условиях непокрытого (голого) карста. Весьма удачный в этом отношении пример – Динарский карст, развивающийся в известняках и доломитах, которые отличаются исключительной чистотой и многообразием карстовых форм. На рис. 3.3 представлены наиболее характерные поверхностные формы этого карста, которые во многом могут служить аналогом карстовых форм в растворимых породах и в условиях покрытого карста [45].

Другая типичная карстовая форма – “полье” – удлиненная карстовая форма значительных размеров с плоским дном и крутыми откосами (например, Ливанское поле в СФРЮ имеет длину 60 км и

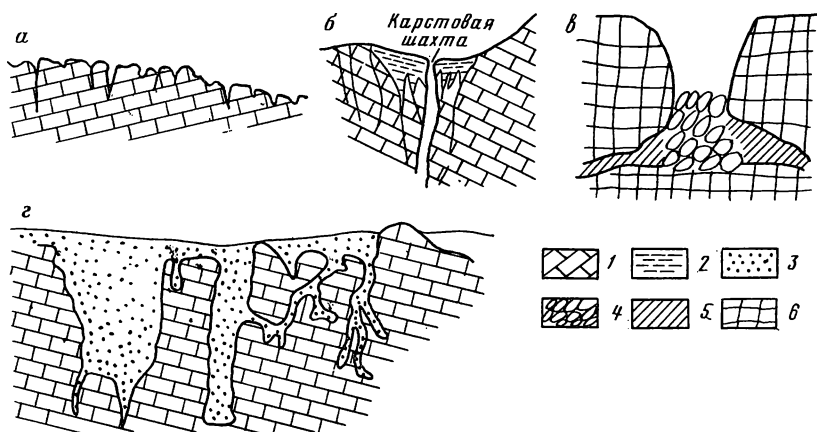


Рис. 3.3. Основные типы поверхностных форм покрытого карста:

а – карры; *б* – депрессия растворения; *в* – провал; *г* – “органические трубы”.

1–4 – породы (1 – карбонатные, 2, 3 – осадочные; 4 – разрушенные); 5 – карстовая полость; 6 – закарстованный грунт

ширину 10 км). Причиной их образования, наряду с растворением, могут быть, очевидно, и тектонические процессы. Дно польев часто покрыто водонепроницаемыми отложениями. Это позволяет в ряде стран эффективно их использовать для водного хозяйства.

Возможности изучать карстовые формы во всем их многообразии в условиях сульфатного голого карста в зонах гумидного климата значительно меньше, чем для карбонатного карста. Тем не менее с определенной долей приближения карстовые формы в карбонатных породах можно с инженерно-геологической точки зрения считать аналогами карстовых форм в сульфатных породах. Однако механизм образования карстовых форм в сульфатных породах, как правило, иной, если сульфатные и хлоридные породы залегают совместно. Такие условия характерны для закарстованных территорий центральной Европы.

Первые на этом обстоятельстве акцентировал внимание Х. Вебер, связывал его с двумя возможными особенностями растворения солей: 1) растворение пород идет в направлении от их выхода на поверхность в направлении падения слоев (регулярное растворение); 2) растворение пород происходит благодаря обводнению соляной толщи в местах разрывных нарушений (иррегулярное растворение).

Для указанных ситуаций он выделил три фазы карстования, которым на земной поверхности соответствуют определенные карстовые формы:

фаза 1 – растворение соли, образование подземных карстовых форм в виде "соляного зеркала" или "склона соляной залежи", а на поверхности земли – мульды оседания;

фаза 2 – гидратация ангидрита, как правило, без проявления на поверхности земли;

фаза 3 – растворение гипса и образование на поверхности земли провалов и оседаний.

Эти фазы при регулярном, в отличие от иррегулярного, карстовании, достаточно четко разграничиваются в пространстве и во времени.

Карстование сульфатов в гумидном климате ведет преимущественно к образованию полостей и реже к площадному растворению. Растворение стенок вертикальных трещин приводит к формированию полостей. В результате постепенного подхода свежей воды и образования вследствие растворения рассолов, полость принимает в первоначальный момент времени трапецеобразную форму.

На рис. 3.4 показаны стадии формирования карстовых полостей в сульфатных породах.

На рис. 3.5 схематически (в виде моделей) изображены поверхностные формы сульфатного карста. Подземные карстовые формы в сульфатных породах для голого и покрытого карста во многом идентичны. Механизмы их развития начинают в определенной мере отли-

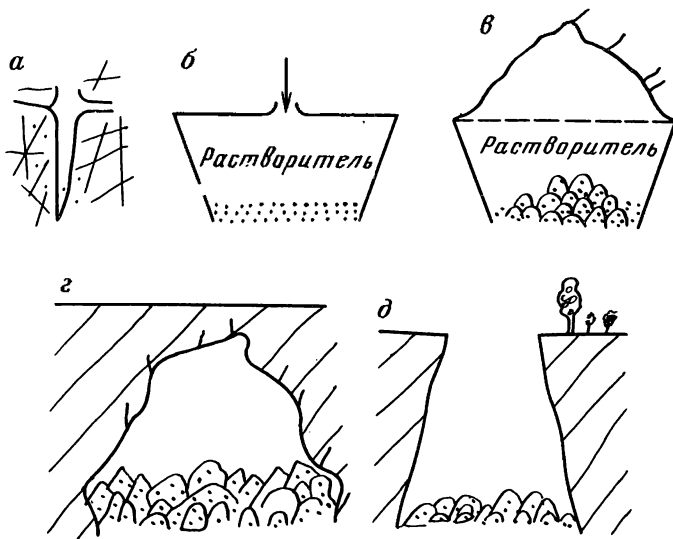


Рис. 3.4. Формирование полостей в сульфатных породах:

а – расширение трещины; б – расширение полости вследствие растворения ее стенок и эрозии; в – растворение стенок полости и обрушение кровли; г – преимущественное обрушение кровли с формированием свода; д – достижение сводом поверхности земли

чаются с момента, когда в условиях покрытого карста подземные формы частично или полностью заполняются вышележащей нерастворимой породой.

Параметры провальных форм отличаются большим разнообразием, определяемым многочисленными факторами (физико-механические характеристики, глубина залегания карстующихся пород, характер напластований, обводненность покровной толщи, структурно-тектонические особенности и т.д.). По этой причине о пространственно-временных параметрах провалов можно говорить лишь в вероятностно-статистическом смысле. Так, Д. Фантасни и К. Брендель (1972) для карстового района округа Галле (ГДР) установили, что 70,1 % всех провалов имеют диаметры до 2 м и лишь 9,5 % – более 4 м. Совершенно другая ситуация зафиксирована Ф.П. Саваренским (1962) в карстовом районе г. Дзержинска Горьковской области. Здесь на долю провалов диаметром до 2 м приходится лишь 12, а свыше 4 м – 70 %. В.В. Толмачев в 1968 г. доказал, что в общем случае диаметры карстовых провалов подчиняются логарифмически нормальному закону распределения, а для отдельных участков, квазиоднородных по влияющим на диаметр провала факторам – усеченному нормальному распределению.

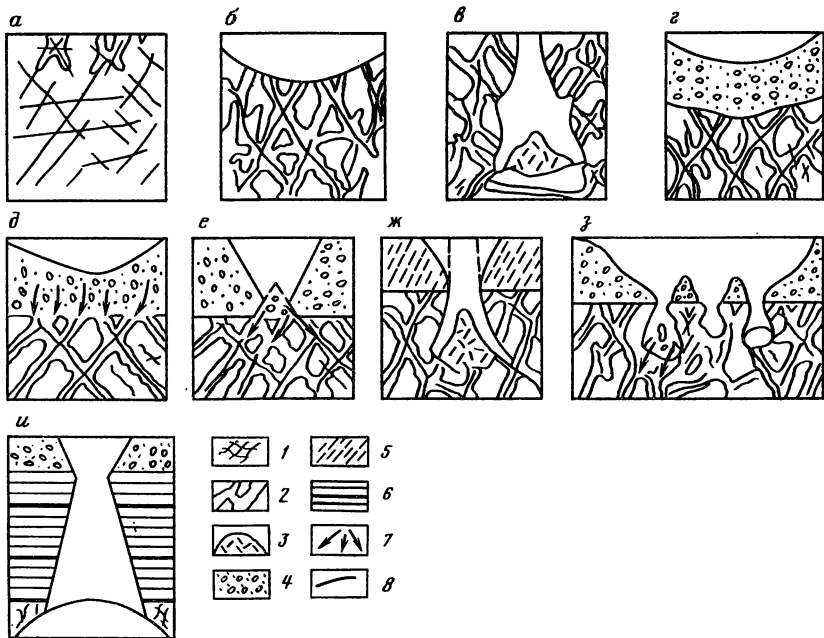


Рис. 3.5. Поверхностные формы сульфатного карста в условиях гумидного климата:

a–*в* – голый карст (*a* – малые карстовые формы – карры, *б* – незначительное оседание, возникшее вследствие постепенного уплотнения массива закарстованной трещиноватой зоны, *в* – провал в ранней стадии, т.е. до начала уположения стенок провала); *з*–*д* – покрытый карст (*з* – оседание покровной толщи, сложенной несвязными породами, в соответствии с моделями (*a*) и (*б*), *д* – оседание несвязных грунтов покровной толщи, происходящее из-за суффозии мелких фракций в закарстованные трещины нижележащих сульфатных пород); *e*–*ж* – провалы в несвязных (*e*) и связных (*ж*) рыхлых породах покровной толщи, образовавшиеся вследствие (*e* – внутренней эрозии и выноса материала в нижележащие трещины, *ж* – превышения несущей способности грунта на растяжение в своде карстовой полости или внутренней эрозии); *з* – крупный провал – обрушение покровной толщи в нескольких расположенных рядом полостях; *и* – глубокий карст – провал в скальных и покровных рыхлых породах, возникший из-за обрушения кровли полости в гипсах при достижении ею критического размера.
 1 – трещиноватые породы; 2 – закарстованная толща; 3–6 – породы (3 – обрушенные, 4 – несвязные, 5 – связные, 6 – скальные); 7 – направление суффозионных деформаций; 8 – свод полости

нию. Интенсивность же проявления провалов во времени [33] близка к распределению Пуассона.

Установление вышеуказанных статистических закономерностей позволяет делать вероятностные прогнозы пространственно-временных параметров провалов (см. гл. 5).

Д. Фантасни и К. Брендель (1972) на примере карстового района округа Галле (ГДР) показали, что существуют определенные статистические закономерности образования карстовых провалов в отдельные периоды года (рис. 3.6). То, что наибольшее число провалов приходится на март – апрель, авторы связывают с периодом размораживания грунта и снеготаяния.

В том случае, когда непосредственно на закарстованных трещиноватых гипсах залегают рыхлые породы, обладающие способностью к суффозии, возможны оседания поверхности и оснований сооружений. Примером может служить деформация основания церкви в районе г. Бад-Франкенхаузена (Ф. Ройтер, 1962).

Растворение хлоридных пород в гумидной климатической зоне всегда происходит в условиях покрытого карста и ведет, как правило, к образованию своеобразных плоских, больших по площади полостей (понижений поверхности хлоридных пород), которые проявляются на поверхности земли в виде оседаний.

Сведений о собственно полостях в хлоридных породах немного. Как указывает Г. Шпакелер (1957), при проходке шахт в соляных породах фиксировались карстовые полости высотой не более 0,5 м.

Г. Судерлау в 1977 г. на примере отдельных зон Мансфельдской мульды показал, что при отсутствии существенного влияния антропогенных факторов средняя скорость оседаний достигает 3 мм/год. Мульды оседания имеют круглую (котлы) или овальную (ванны) форму. Формы оседания часто накладываются друг на друга, так что их контуры принимают неправильные очертания.

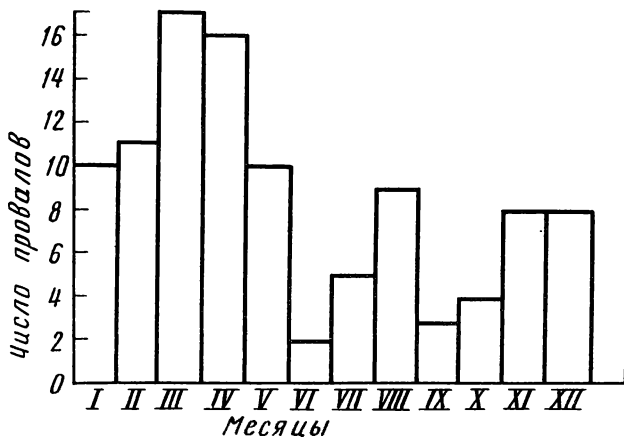


Рис. 3.6. Распределение числа провалов по месяцам в карстовом районе округа Галле за 10 лет (по Д. Фантасни, К. Бренделю)

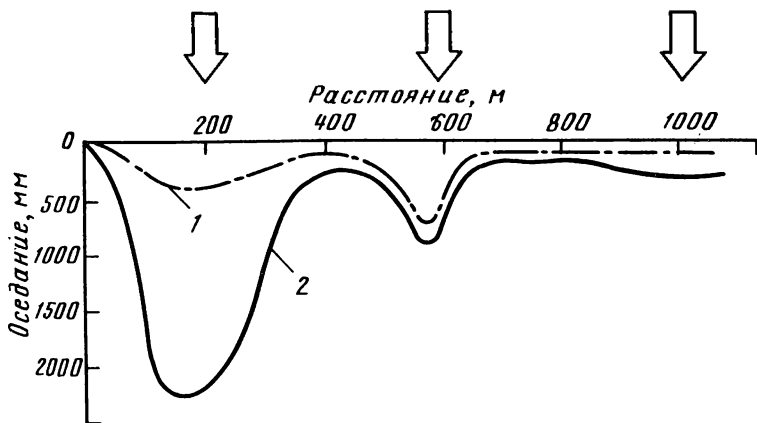


Рис. 3.7. Неравномерность оседания поверхности мульды во времени и в пространстве в районе пос. Эрдеборт (по Г. Судерлау, 1972): 1, 2 — положение поверхности после начала наблюдений (1 — через год, 2 — через 11 лет). Первоначальная поверхность совпадает с нулевой линией. Стрелками отмечены центры оседаний

Мульды карстовых оседаний характеризуются теми же параметрами сдвижения грунтов, которые установлены для сдвижений над горными выработками. Применительно к карстовым деформациям чрезвычайно важно знать положение зон растяжения и сжатия пород.

Отдельные зоны мульды оседания могут характеризоваться различными значениями скоростей и ускорений оседаний. Вследствие этого центры оседаний могут смещаться даже за относительно небольшой промежуток времени (рис. 3.7).

Неравномерные оседания поверхности можно объяснить различием не только в скорости растворения, но и в скорости реагирования покровных грунтов на потерю части их массы.

Х. Молек в 1976 г. обобщил многочисленные данные по поверхностным карстовым формам в условиях хлоридного карста ГДР и дал их классификацию (табл. 3.5).

В местах оседаний удалось установить тесную связь между формами обрушения и процессами оседаний, обусловленную своеобразным состоянием толщ. Следует также иметь в виду, что в зонах растягивающих напряжений происходит разупрочнение горных пород и, как следствие, возникают зоны повышенной инфильтрации. При наличии в толще пород под зонами растяжений полостей именно здесь наиболее вероятны провалы. Если внутри зоны растягивающих напряжений порода смещается блоками, то на земной поверхности возникают грабеноподобные обрушения.

Таблица 3.5

Характеристика поверхностных карстовых форм в условиях хлоридного карста

Вид процесса	Карстовые формы			Причины образования	Геометрические параметры
	Тип	Вид	Разновидность		
Естественный с частичным антропогенным влиянием	Оседание	Мульды	Ванны	Сплошной прогиб покровной толщи до дневной поверхности, происходящий во времени и в пространстве как равномерно, так и неравномерно	Приблизительно эллиптическая форма площадью до 10 км ²
			Котлы		
Обрушение	Формы на краях мульд оседания, связанные с растяжением пород	Трещины растяжения	Провалы	Превышение прочности пород на растяжение вследствие горизонтальных и вертикальных деформаций при оседании	Длина зоны трещин — до нескольких десятков метров, ширина — до нескольких метров
			Грабеноподобные обрушения		
					Длина до 100 км, ширина до 10 м
	Формы на краях крупных депрессий, связанных с растяжением пород	Трещины растяжения	Грабеноподобные формы обрушения	При продвижении растворения в еще нетронутую карстованием толщу и раскрытии трещин параллельно фронту растворения	Длина до нескольких километров, ширина до нескольких десятков метров
	Формы обрушения над тектонически сильно разрушенными покровными грунтами	Провалы	Концентрированные краевые трещины	Обрушение полосей в гипсах и каменной соли	Диаметры до 10 м

Продолжение табл. 3.5

Вид процесса	Карстовые формы			Причины образования	Геометрические параметры
	Тип	Вид	Разновидность		
Антропогенный	Оседание	Мульды	—	Обусловлены наличием шахт и их затоплением в каменной и калийной солях	Эллиптическая или неправильная форма с большим оседанием по вертикали
	Обрушение	Провалы		В зоне затопленных или заброшенных шахт калийной и каменной соли возникают обрушения земной поверхности	Возникновение провалов, характерных для естественных условий с последующим быстрым увеличением диаметров до 60 м

Многие исследователи, например Г. Майер (1970), П. Оляйкевич (1970) и другие, обратили внимание на то, что в этих зонах нередко возникают крупные провалы. Это связано, по мнению Х. Принца (1973), с обрушением крупных полостей в сульфатных породах в условиях сульфатно-соляного карста.

Во многих случаях карстовый процесс сопровождается рядом сопутствующих геодинамических процессов, которые необходимо учитывать при инженерно-геологических изысканиях. Так, в условиях активного карстования постоянно изменяются прочностные и деформационные свойства не только карстующихся пород, но и залегающих над ними покровных грунтов. Крутые склоны котловин оседаний бывают повреждены оползнями, особенно при повышении уровня грунтовых вод. Такие явления отмечены, например, в Миннабадской котловине (Мансфельдерская мульда). Предрасположенность к оползневым деформациям склонов карстовых котловин оседаний связана также с тем, что зоны растяжения мульды оседания приурочены к ее краевым частям. Для зон растяжения характерно образование трещин и грабеноподобных обрушений, что ведет в свою очередь к повышенному проникновению воды в грунт и, как следствие, к снижению угла внутреннего трения по поверхностям скольжения.

Характерный вторичный процесс карста — гидродинамическое воздействие подземных вод на частицы несвязных грунтов, сопро-

вождаемое их выносом (суффозия). При повышении гидравлических градиентов суффозия может переходить во внутреннюю эрозию, при которой происходит общий вынос остатка рыхлых грунтов, сопровождаемый, как правило, образованием провалов на поверхности земли. Эти явления особенно характерны для зон растяжения мульды оседания.

3.3. Закономерности (механизм) карстовых деформаций

Рассмотрим общие закономерности деформаций толщи горных пород над карстовыми формами, основанные на анализе многочисленных публикаций по механизму карстовых деформаций и результатов исследований сотрудников Дзержинской карстовой лаборатории [4, 18, 21, 23, 36, 38, 39].

Механизм карстовых деформаций зависит от большого числа как естественных, так и техногенных факторов. На него оказывают большое влияние региональные особенности, изменяющиеся как во времени (гидрогеологические условия), так и в пространстве (состав, трещиноватость, физико-механические характеристики пород) даже на сравнительно небольших по площади территориях.

Механизм развития карстовых полостей вследствие растворения и эрозии горных пород в настоящее время изучен крайне недостаточно. Однако он, по нашему мнению, существенным образом не влияет на механизм развития деформаций грунтов над карстовыми полостями.

Под критическим размером полости принимают ее ширину $2b^k$, при которой происходит частичное или полное обрушение ее кровли.

Характер деформаций кровли полости при достижении ею критической ширины $2b^k$ практически не зависит от глубины ее расположения H при $b^k < H$ (рис. 3.8) и определяется в основном состоянием и механическими характеристиками грунтов кровли. При этом обрушение грунтов над полостью происходит с образованием сводов. При небольшой мощности кровли это проявляется в образовании наклонных трещин (4) на приопорных участках, при достаточно большой мощности очертание сводов близко к параболе.

В скальных грунтах развиваются хрупкие деформации, в глинистых – пластические.

Выявлена следующая закономерность появления деформаций грунтов кровли полости: критический размах полости тем больше, чем больше мощность кровли m и расстояние между горизонтальными трещинами δ . При этом в глинистых грунтах эта закономерность проявляется значительно слабее, чем в скальных.

Вертикальная трещиноватость пород кровли полости существенно влияет на величину критического пролета. Поэтому прогноз устой-

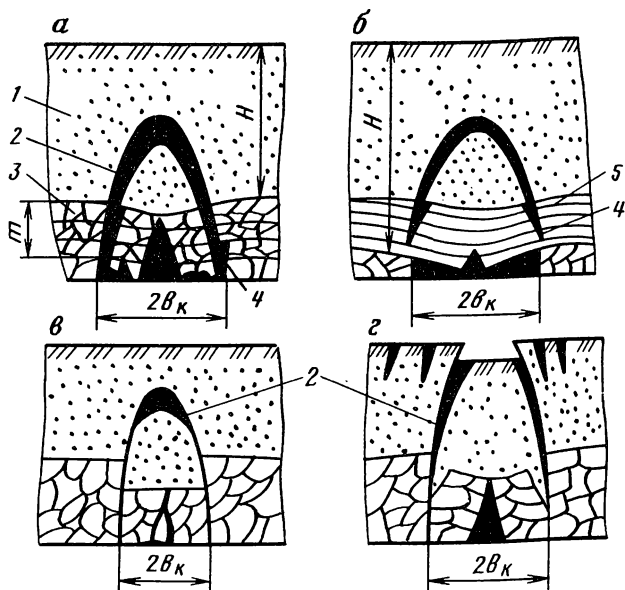


Рис. 3.8. Характер деформаций пород кровли полости:

а-б — кровля полости сложена грунтами (*а* — скальными, *б* — глинистыми), *в* — вывал отдельных блоков; *г* — обрушение консолей.

1 — песок; *2* — полость; *3* — скальный грунт; *4* — наклонная трещина; *5* — глинистый грунт

чивости кровли крайне затруднен без учета точного расположения вертикальных трещин в кровле полости.

Следует иметь в виду, что деформации пород кровли могут происходить в виде вывалов отдельных блоков или обрушения консолей (см. рис. 3.8, *в*, *г*). В большинстве случаев примерно в середине поперечного сечения полости имеется вертикальная трещина. Величина ее раскрытия и закольматированность определяют силу трения между блоками породы и характер обрушения кровли полости. При выходе карстовой полости (вследствие растворения, эрозии или обрушения непосредственной кровли) на контакт с неводонасыщенными нескальными грунтами, в последних образуются своды обрушения. В некоторых случаях они могут выйти на поверхность земли (см. рис. 3.8, *г*).

По мере дальнейшего расширения полости, в толще грунтов дискретно образовывается ряд последовательных сводов (первичный, вторичный, третичный и т.д.). При этом каждый последующий свод оказывается более крутым, чем предыдущий.

На очертания сводов в покровных нескальных грунтах оказывает влияние также характер образования (расширения) полости в их

основании. При очень быстром (мгновенном) расширении полости (обрушение кровли, выпадение отдельных блоков) своды в грунтах оказываются более крутыми, чем первичные, при медленном росте ширины полости.

Специфика деформаций водонасыщенных песчаных грунтов, перекрывающих подземные карстовые формы или сквозные нарушения сплошности региональных или локальных водоупоров, заключается в том, что на их развитие помимо поля гравитационных сил оказывает влияние поле гидродинамических сил.

В случае резкого изменения напряженного состояния водонасыщенного песчаного грунта, примыкающего к внезапно возникающей трещине в водоупорном слое, может начаться процесс разжижения песков.

Другая особенность водонасыщенного грунта заключается в том, что при определенных обстоятельствах он может вести себя как вязкопластичная масса и приобретать способность к истечению через отверстия и щели. В условиях развития карстовых деформаций это явление может наблюдаться при потере грунтом структурной прочности вследствие его разжижения или гидравлического разрушения подземным потоком.

В процессе обрушения грунтов в нижележащие полости на всех стадиях развития карстовых деформаций в грунтовой толще развивается процесс самоликвидации полостей за счет разрыхления обрушивающихся грунтов. Степень (коэффициент) разрыхления зависит от типа грунтов, степени их раздробленности и вертикального размера полости. При этом грунты с меньшей связностью и большей раздробленностью обладают меньшим коэффициентом разрыхления.

Карстовые деформации по характеру их проявления на земной поверхности можно разделить на провалы, локальные оседания (проседания) и оседания.

Возможны два пути формирования провалов – непосредственный выход свода на поверхность и образование круглоцилиндрического провала. В дальнейшем происходит оползание и уположение стенок провала с формированием воронки (почти одновременно с провалом или в течение более длительного времени). Время формирования воронки зависит от состояния и свойств грунтов, растительности и задернованности земной поверхности, диаметра и видимой глубины провала, геоморфологических и климатических условий, влияния нагрузки и других антропогенных воздействий.

Закономерности образования сводов, выходящих на земную поверхность, принципиально не отличаются от закономерностей сводообразования в покровных неводонасыщенных грунтах, описанных выше.

Образование же круглоцилиндрических провалов возможно при условии, когда мощность ненарушенного грунтового массива от пустоты до поверхности меньше мощности, при которой он выдерживает собственный вес и внешнюю нагрузку. Условие предельного равновесия в общем будет иметь вид:

$$(Q_0 + Q) - (c + F) = 0, \quad (3.5)$$

где Q_0 – нагрузка от сооружения, давящая с поверхности на цилиндр грунта весом Q ; c , F – соответственно силы сцепления и трения, возникающие по боковой поверхности цилиндра грунта.

Впервые уравнение (3.5) было применено к решению инженерной задачи оценки параметров карстоопасности для конкретных инженерно-геологических условий Г.М. Шахуняцем в 1953 г., а в настоящее время усовершенствовано Г.М. Троицким [29, 36].

Механизм проявлений подземных карстовых деформаций на поверхности земли в виде проседаний (локальных оседаний) в настоящее время изучен недостаточно. Продолжительность проседаний изменяется от нескольких дней до нескольких месяцев. Размеры проседаний в плане достигают нескольких десятков метров, глубины же их относительно небольшие (до 2 м).

Различают следующие механизмы образования проседаний.

1. При сравнительно неглубоком расположении полостей в карстующихся или покровных некарстующихся грунтах, имеющих относительно небольшой размер по вертикали свободного от заполнителя пространства h_n (рис. 3.9, а), или полостей разжижения (см. рис. 3.9, б), может происходить плавный прогиб всей толщи грунтов над полостями с образованием на земной поверхности проседаний (локальных оседаний) с достаточно крутыми склонами.

2. При образовании разуплотненной зоны на сравнительно небольшой глубине (например, за счет заполнения свода равновесия грунтом при его обрушении) происходит уплотнение грунта под действием собственного веса и веса вышележащих пород при разрушении свода, а также нагрузки от сооружения (см. рис. 3.9, в).

Оседания на относительно больших территориях могут быть вызваны разными причинами.

При перекрытии карстовых полостей пластичными грунтами последние могут плавно прогибаться. Если полости близко расположены друг от друга, то деформации прогиба сливаются с образованием на земной поверхности оседаний в виде мутьды (рис. 3.10, а).

При определенных градиентах нисходящей фильтрации может происходить суффозионный вынос из песчаного грунта частиц заполнителя, свободно лежащих в породах скелета, не сопровождающийся деформацией скелетной структуры грунта (суффозия). Вследствие

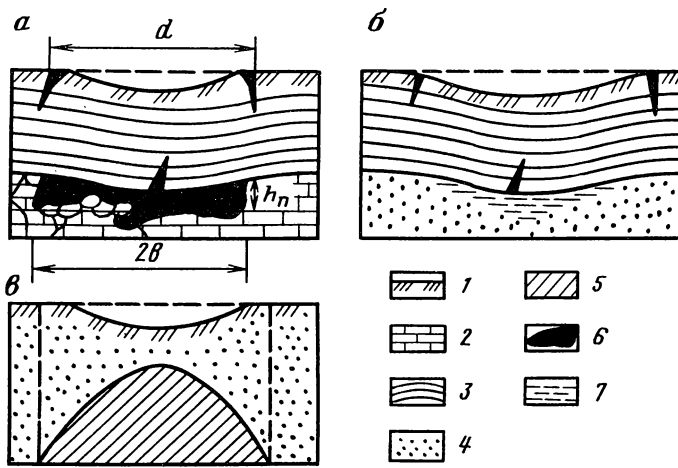


Рис. 3.9. Гипотетические механизмы локальных оседаний (проседаний) при наличии незаполненных карстовых полостей (а), полостей разжижения (б) и разуплотненной зоны (в): 1 — почвенно-растительный слой; 2 — карстующиеся породы; 3 — пластичные породы; 4 — песчаный грунт; 5 — разуплотненная зона; 6 — полость; 7 — зона разжижения

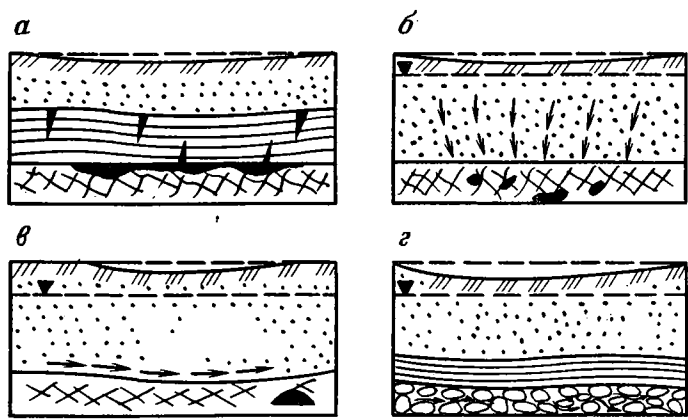


Рис. 3.10. Механизмы оседаний при расположении карстовых полостей на небольшом расстоянии друг от друга (а), наличии суффозии (б), растворении поверхности карстующихся пород (в) и объемном растворении толщи карстующихся пород (г). Стрелками показано направление движения подземных вод. Остальные условные обозначения см. на рис. 3.9

этого формируются разуплотненные зоны (см. рис. 3.10, б). При динамическом воздействии или действии статических нагрузок, в том числе веса грунта, происходит постепенное уплотнение грунтов в этих зонах с образованием на поверхности плавных постепенных оседаний. Такого рода деформации имеют тенденцию к затуханию при неизменяющихся гидрогеологических условиях и внешних воздействиях.

При интенсивном растворении поверхности карстующихся пород может происходить неравномерное по площади снижение уровня этой поверхности, ведущее к прогибу всей толщи горных пород над этим снижением (см. рис. 3.10, в). Аналогичен процесс проседания и при объемном растворении толщи карстующихся пород (см. рис. 3.10, г). Оседания, вызванные поверхностным и объемным растворением пород, имеют практически непрерывающийся характер.

3.4. Влияние техногенных воздействий на развитие карстового процесса

Классификация техногенных воздействий

В практике освоения закарстованных территорий нередки случаи, когда карстовый процесс заметно активизируется или, наоборот, замедляется под воздействием техногенных факторов.

До недавнего времени в районах распространения растворимых пород горные и строительные работы, размещение промышленных объектов, выбор их технологий и т.п. производились, как правило, без учета техногенного воздействия на карстовый процесс. В результате в настоящее время приходится идти на значительные затраты, связанные с проведением специальных исследований, дополнительных изысканий и работ по ограничению техногенных воздействий на карст. Так в ГДР для районов разработки каменной и особенно калийной соли эта проблема чрезвычайно актуальна.

В конкретной инженерно-геологической и хозяйственной обстановке необходимо хотя бы качественно оценить конечные последствия техногенного воздействия на карст за расчетный срок службы сооружений или, при необходимости, за больший срок, на участке техногенного воздействия и за его пределами. Однако с точки зрения прогноза, а также проектирования противокарстовой защиты, направленной на уменьшение влияния хозяйственной деятельности на карстовый процесс, прежде всего важно знать характер непосредственных последствий от того или иного техногенного воздействия. Эти последствия могут быть сгруппированы следующим образом:

А. Повышение скорости растворения карстующихся пород.

В. Повышение скорости подземной эрозии, в первую очередь,

выноса заполнителя из карстовых полостей.

С. Разрушение кровли полостей.

Д. Развитие процессов суффозии.

Е. Возникновение разжижения водонасыщенных грунтов.

Техногенные воздействия могут различаться по характеру, площади и времени воздействия. По этим признакам целесообразно следующее их деление:

I. По характеру воздействия.

Передача нагрузок от сооружений:

- 1) увеличение статических напряжений в грунте;
- 2) уменьшение статических напряжений в грунте;
- 3) передача динамических воздействий.

Изменение гидрогеологических условий:

- 1) повышение уровня надкарстовых вод;
- 2) понижение уровня надкарстовых вод;
- 3) повышение пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод;
- 4) понижение пьезометрического уровня трещинно-карстовых вод;
- 5) изменение скоростей движения подземных вод;
- 6) изменение агрессивности трещинно-карстовых вод за счет

изменения их химического состава и температуры.

II. По площади воздействия:

1) в пределах района, города (несколько квадратных километров);

2) в пределах микрорайона, промпредприятия (несколько или десятки гектаров);

3) в пределах отдельного сооружения (несколько сотен квадратных метров, несколько гектаров).

III. По времени воздействия:

1) практически постоянные (соизмеримые со сроком службы сооружения);

2) долговременные (продолжительностью до нескольких лет);

3) краткосрочные (продолжительностью от нескольких дней до одного года).

Один и тот же вид хозяйственной деятельности может по-разному влиять на карст, т.е. иметь различные непосредственные последствия. В самом общем виде принципиально возможный характер влияния различных видов хозяйственной деятельности на активизацию карста (с точки зрения непосредственных последствий) приведен в табл. 3.6.

Применительно к конкретным инженерно-геологическим и хозяйственным условиям целесообразно составлять аналогичные таблицы с целью обоснования (хотя бы на качественном уровне) прогнозов и выработки требований к изысканиям, проектированию, технологии строительства и, что особенно важно, эксплуатации сооружений.

Следует заметить, что к настоящему времени общей теории прогноза влияния техногенных факторов на активизацию карстовых

Таблица 3.6

Возможные непосредственные последствия техногенных воздействий на активизацию карстовых процессов

Виды хозяйственной деятельности	Характеристика воздействий														
	I. Характер воздействия									II. Площадь воздействия			III. Время воздействия		
	Передача нагрузок от сооружений			Изменение гидрогеологических условий											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3
Эксплуатация зданий и сооружений	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	C	-	-
Эксплуатация водоводных сетей и связанные с ней утечки воды, в том числе химически загрязненной и с повышенной температурой	-	-	-	CD	-	-	-	AB	A	-	A-D	A	A	A	-
Эксплуатационные откачки надкарстовых вод	-	-	-	-	DE	-	-	-	-	-	DE	-	E	-	-
То же трещинно-карстовых вод	-	-	-	-	-	-	D	AB	-	AB	-	-	B	-	-
Горные работы с водоотливом	-	-	-	-	D	-	D	AB	-	AB	-	-	AB	-	-
Строительство и эксплуатация подземных сооружений с дренированием подземных вод	-	-	-	-	D	-	D	AB	-	-	-	ABD	AB	-	-

62 Продолжение табл. 3.6

Виды хозяйственной деятельности	Характеристика воздействий														
	I. Характер воздействия									II. Площадь воздействия			III. Время воздействия		
	Передача нагрузок от сооружений			Изменение гидрогеологических условий											
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	1	2	3	1	2	3
Осушение грунтов средствами технической мелиорации	-	-	-	-	DE	-	-	-	-	DE	-	-	E	-	-
Добыча соли подземным выщелачиванием	-	-	-	-	-	-	-	AB	AB	-	AB	-	AB	-	-
Эксплуатация искусственных водоемов и водотоков	C	DE	-	D	-	-	ABE	AB	A	-	A-E	-	A-E	-	-
Намыв искусственных террас, стройплощадок и т.д.	C	-	-	D	-	-	-	-	-	-	D	C	C	-	-
Орошение земель	-	-	-	C	-	-	-	AB	-	A-D	-	-	-	A-D	-
Устройство выемок, котлованов	-	D	-	D	-	-	-	AB	A	-	-	D	D	-	-

Эксплуатация машин'и механизмов с передачей динамических воздействий на основание	-	-	CE	-	-	-	-	-	-	-	E	C	CE	-	-
Взрывные работы	-	-	CE	-	-	-	-	-	-	-	CE	-	-	-	CC
Забивка или вибропогружение свай	CE	-	CE	-	-	-	-	-	-	-	-	CE	-	-	CE
Бурение скважин без их тампонажа	-	-	-	D	D	D	D	-	-	-	-	D	-	-	-
Тампонаж карстовых полостей, устройство противofильтрационных завес	-	-	-	-	-	-	-	AB	-	-	-	AB	AB	-	D

процессов на количественной основе не разработано. Создание ее – задача чрезвычайно трудная, необходимым условием решения которой является хорошее знание как природы карстового процесса, так и технологии и экономики современного производства. Последнее нужно подчеркнуть особо, поскольку нередко в проектно-изыскательской практике применяются рекомендации по ограничению хозяйственной деятельности, в той или иной мере влияющей на карст, не обоснованные ни в инженерно-геологическом, ни в экономическом отношении. Таким образом, в инженерном карстоведении возникают весьма специфические задачи по оптимальному управлению карстовым процессом в связи с хозяйственным освоением закарстованных территорий. Эти задачи могут успешно решаться только на основе системного подхода.

Механизм влияния техногенных воздействий на формирование карстовых провалов

Чувствительность закарстованной территории к техногенным воздействиям определяется в первую очередь гидрогеологическими условиями и глубиной залегания карстующихся пород.

Так, в районе г. Галле (ГДР) 80 % всех зарегистрированных с 1961 г. провалов приурочено к освоенным строительством участкам. Специально проведенные исследования показали, что это связано с неконтролируемыми утечками из водоводов, так как данная городская территория характеризовалась плохим состоянием подземных водопроводящих коммуникаций и неудовлетворительной работой водосток.

Провал диаметром более 100 м, который произошел в 1981 г. во Флориде (США), большинство американских специалистов связывают с техногенным понижением уровня подземных вод [49].

В.М. Кутепов [11] исследовал характер изменения напряженного состояния горных пород от действия гидростатического и гидродинамического давлений и степени водопроницаемости слоя и горной породы, разделяющей грунтовые и пластовые напорные подземные воды.

Анализ изменения напряженного состояния массивов пород при нарушении природных гидрогеологических условий позволил В.М. Кутепову установить следующие закономерности.

1. Уменьшение естественных напряжений происходит: в зоне аэрации при повышении уровня грунтовых вод; в толщах пород, содержащих межпластовые водоносные горизонты, при повышении напоров; в водоупорных толщах при снижении уровней грунтовых вод и осушении пород, содержащих напорные воды; в слабопроницаемых толщах при восходящей фильтрации воды.

2. Увеличение естественных напряжений происходит: в осушенной зоне при понижении уровней грунтовых вод; в толщах пород, содержащих межпластовые водоносные горизонты, при снижении напоров и осушении; в слабопроницаемых толщах при нисходящей фильтрации воды.

Большое значение имеет вывод В.М. Кутепова о том, что на прочность пород оказывает влияние переменное напряженное состояние, возникающее вследствие периодического многократного колебания уровней подземных вод. Многократность воздействия переменных нагрузок вызывает в этих толщах понижение прочности. По нашему мнению, названный выше "эффект усталости" пород (по аналогии с термином "усталость строительных конструкций") в большей мере сказывается на прочности скальных пород, обладающих упругими свойствами.

В.М. Кутепов не рассматривает вопрос определения давления на кровлю карстовых полостей. Как известно, при достаточно большой их глубине залегания от поверхности земли, давление на кровлю полости определяется не весом всего столба породы над полостью, а весом породы в объеме некоторого свода равновесия, зависящего от прочностных характеристик массива пород над полостью и размеров полости в плане. Это обстоятельство следует иметь в виду при учете влияния техногенного изменения гидрогеологических условий на устойчивость кровли полости.

В этом случае карстовый провал проявляется на поверхности земли при выполнении условия равновесия (3.5), в котором вес столба грунта Q для водонасыщенного слоя должен определяться с учетом взвешивающего действия воды и массы воды в объеме пор. Силы сцепления c и трения F для водонасыщенного слоя грунта – с учетом пониженных значений удельного сцепления, коэффициента внутреннего трения грунтов под водой и соответственно повышенного коэффициента бокового отпора грунта.

Без знания конкретной инженерно-геологической обстановки нельзя однозначно говорить о той или иной тенденции при изменении уровня подземных вод. Эту тенденцию можно установить лишь на основе выявления механизма карстовых деформаций в конкретных природных условиях. Для примера рассмотрим, как влияет изменение уровня грунтовых вод на механизм образования провалов обвального и обвально-суффозионного типов при расположении карстовых полостей на небольшой глубине применительно к условиям, показанным на рис. 3.11 и 3.12.

В случае провалов обвального типа, когда водопроницаемый слой представлен несущими грунтами (см. рис. 3.11, а, з), снижение уровня грунтовых вод ведет к уменьшению давления на потолочину (кровлю) полости ($\sigma_t < \sigma_n$) и повышению прочности пород водопрони-

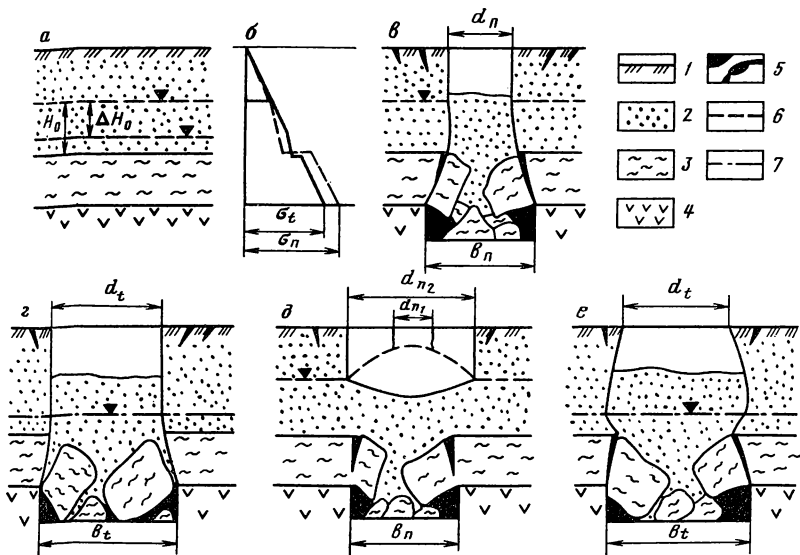


Рис. 3.11. Влияние понижения уровня грунтовых вод на механизм обвальных и обвально-суффозионных карстовых провалов:

а — геологический разрез; *б* — эпюра вертикальных напряжений; возможный механизм образования обвальных (*в, з*) и обвально-суффозионных (*д, е*) провалов.

1 — почвенно-растительный слой; 2 — песчаный грунт; 3–4 — породы (3 — водоупорные, 4 — карстующиеся); 5 — полость; 6, 7 — уровни грунтовых вод (6 — первоначальный, 7 — сниженный).

σ_n и σ_t — давления на кровлю полости до и после снижения уровня грунтовых вод

цаемой кровли за счет увеличения значений c и φ осушенной толщи. Это приводит к тому, что обрушение кровли полости и образование провала происходят при большей ширине полости, чем до снижения уровня ($b_t > b_n$). Таким образом, в этом случае интенсивность провалов (при прочих равных условиях) уменьшается, а диаметр их увеличивается.

Несколько иная ситуация возникает при так называемых обвально-суффозионных провалах, когда после обрушения кровли начинается сдвигание грунта под действием как гравитационных, так и гидродинамических сил (рис. 3.11, *д, е*). Здесь, как и в первом случае, $b_t > b_n$, однако диаметр провала после снижения уровня d_t может быть как больше ($d_t > d_n$), так и меньше ($d_t < d_n$) диаметра провала до снижения уровня d_n .

При провалах обвального типа повышение уровня грунтовых вод (см. рис. 3.12, *в, з*) ведет к увеличению давления на кровлю полости ($\sigma_t > \sigma_n$) и снижению прочности пород водопроницаемой кровли за

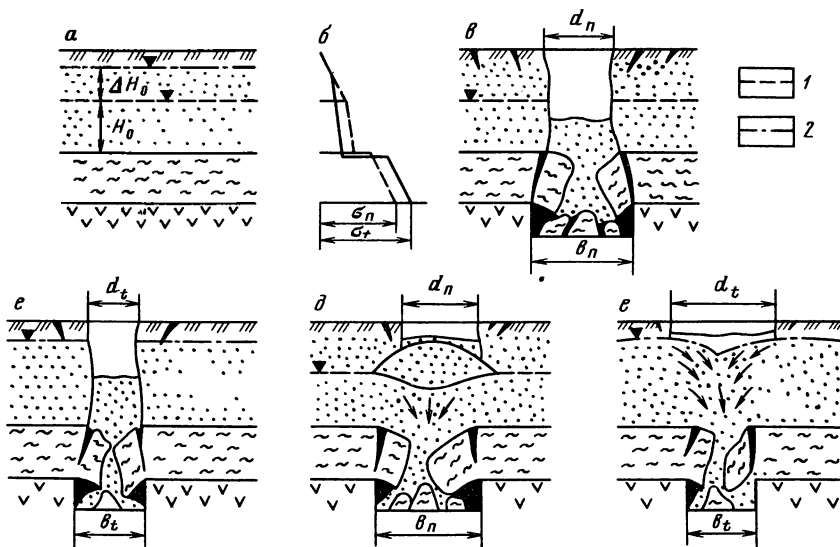


Рис. 3.12. Влияние повышения уровня грунтовых вод на механизм обвальных и обвальнo-суффозионных карстовых провалов:
 1–2 – уровни грунтовых вод (1 – первоначальный, 2 – после повышения).
 Остальные условные обозначения см. на рис. 3.11

счет уменьшения значений s и φ обводненной толщи. В этом случае для образования провала требуется меньший предельный пролет полости ($b_t < b_n$), чем до повышения уровня грунтовых вод. Таким образом, при повышении уровня грунтовых вод существует тенденция увеличения интенсивности провалов при одновременном уменьшении их диаметров. В случае обвальнo-суффозионных провалов (см. рис. 3.12, e) эта тенденция проявляется в меньшей степени за счет того, что возникающая на уровне зеркала грунтовых вод промежуточная полость по мере приближения к поверхности увеличивается в плане и уменьшается по вертикали.

При провалах карстово-суффозионного типа искусственное изменение в любом направлении напора трещинно-карстовых (межпластовых) вод может привести к активизации провалов (рис. 3.13).

При наличии водонасыщенного слоя снижение напора трещинно-карстовых вод может привести к фильтрационным деформациям грунтов с проникновением их в полость через трещины или другие локальные нарушения (см. рис. 3.13, a).

При повышении напора H_t и наличии локальных нарушений в водоупоре возможно возникновение ползучего разжижения.

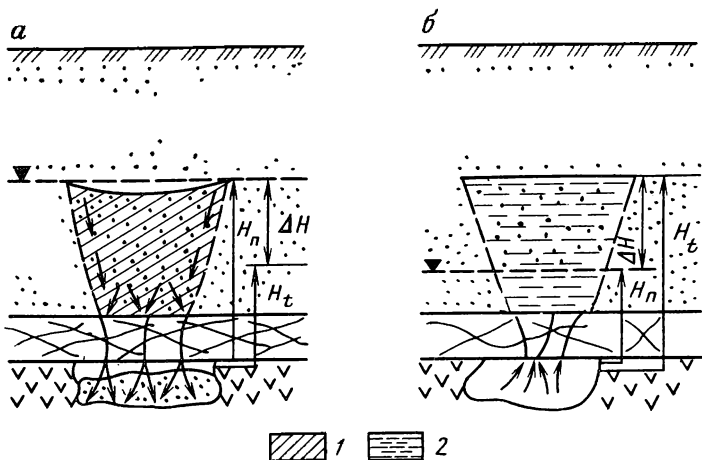


Рис. 3.13. Влияние понижения (а) и повышения (б) напора трещинно-карстовых вод на механизм карстово-суффозионных провалов.

1–2 – зоны (1 – фильтрационного сдвижения, 2 – ползучего разжижения)

Увеличение скоростей движения подземных вод может привести к определенной интенсификации роста карстовых полостей в результате растворения стенок полости и эрозии заполнителя полостей. При этом, поскольку скорость растворения карбонатных пород подземными водами крайне мала, ведущим процессом в расширении полости является эрозия – размыв и вынос заполнителя из полостей. В сульфатных породах следует учитывать оба процесса, однако основной – эрозия. В соляных породах процесс растворения может выйти на первый план.

При учете нагрузок от сооружений следует иметь в виду, что дополнительные давления существенно уменьшаются с глубиной. При равномерно распределенной нагрузке p_0 уже на глубине $6b$ (b – ширина фундамента) давление от сооружения составляет лишь $0,1p_0$. Поэтому можно считать, что снижение несущей способности пород кровли полости реально лишь при залегании полости в активной зоне основания.

Тенденции изменения диаметров провалов в этом случае, как показал Г.М. Троицкий [36], различны для песчаных и глинистых грунтов.

Таким образом, на основе анализа механизма карстовых провалов в связи с техногенным воздействием можно в каждой конкретной

инженерно-геологической ситуации качественно или количественно (в том числе с использованием экспериментальных методов) оценить тенденцию изменения частоты возможных провалов и их диаметров и принять соответствующее инженерное решение.

Примеры влияния горных работ на активизацию карстовых процессов

Естественные карстовые оседания и провалы интенсифицируются при проведении горных работ в результате технологических мероприятий, направленных на изменение гидрогеологических условий. Такие горные работы, как разработка калийной и каменной солей и других полезных ископаемых, а также проходка тоннелей нередко воздействуют непосредственно на растворимые породы. При этом перед инженерами-геологами и горными инженерами возникают проблемы обеспечения безопасности ведения горных работ в карстовых районах и прогноза параметров возможных карстовых деформаций.

Ф. Ройтером в 1962 г. были исследованы причины активизации оседаний и провалов у г. Шперенберга в районе открытой разработки гипса, осуществляемой с 1921 г. Карстовыми деформациями были повреждены дороги и несколько зданий. Причина этих явлений – интенсивная работа насосных установок по осушению гипсовой толщи. Ненадежная изоляция и неудовлетворительная работа дренажных сооружений тоннелей, проложенных в гипсах верхнего триаса в районе г. Вюртемберга, привели к таким же результатам (К. Брудер, 1977). Специальные расчеты В. Юнга и К. Либиша (1966) показали, что благодаря искусственной циркуляции подземных вод (утечки из прудов-отстойников, откачки из штолен) в районе Мансфельдерского горно-обогатительного комбината за время его эксплуатации (с 1880 по 1964 гг.) в толще соляных отложений образовались пустотные пространства с суммарным объемом 98 млн. м³, которые стали непосредственной причиной интенсивных оседаний. Для этого же района Г. Сударлау (1977) на основании сопоставления естественной скорости оседания (определенной через скорость седиментации в Голдцене) с существующей скоростью оседания пришел к выводу о 18...600-кратном ускорении оседаний под действием техногенных факторов. Доказательством значительного техногенного влияния на карстовые оседания вполне определенно говорит тот установленный факт, что после осуществления специальных мероприятий в 1976 г. по целенаправленному регулированию гидрогеологических условий скорость оседаний снизилась в несколько раз (табл. 3.7).

В 1962 г. в ЮАР в районе эксплуатации шахт произошел крупный провал диаметром 61 м и глубиной около 43 м, приведший к разру-

Таблица 3.7

Развитие оседаний в районе г. Айслебена до и после проведения водозащитных мероприятий (Мансфельдерская мульда)

Номер наблюдательного участка мульды	Общее оседание за 20-летний период наблюдений, мм	Максимальная скорость оседания, мм/год	Средняя скорость оседания, мм/год	
			до проведения водозащитных мероприятий	после проведения водозащитных мероприятий
1	1241	370	226	25
2	5245	730	272	64
3	2809	500	147	13
4	2382	410	125	42
5	1757	807	146	21

Таблица 3.8

Сведения об образовании провалов на поверхности земли над калийными и соляными шахтами в ГДР

Название шахты	Диаметр провала в момент его образования, м	Глубина, с которой произошел провал, м	Интервал времени с момента затопления шахты до образования провала, годы	Автор, год издания
Штассфурт	140	40	18	Э. Мимитц, 1972
Вестрегельм	25-27	132	16	То же
Хадмерслебен	50	40	1	- " -
Бернбург	15; 100; 4-10	65; 40; 10	6-9	Б. Пельцель и др., 1972
Ратмансдорф	35	26	26	Э. Мимитц, 1972

шению сооружений и многочисленным жертвам. Д. Дженнингс (1966) считает, что причиной провала послужили многолетние откачки подземных вод из доломитов.

Опасность карста для шахт добычи каменной и калийной солей заключается также в прорывах трещинно-карстовых вод в горные выработки. В большинстве случаев такие прорывы ведут не только к горно-технологическим затруднениям, но и к образованию карстовых деформаций на поверхности земли. Имеются весьма интересные сведения о разности дат затоплений соляных шахт и образования провалов на поверхности земли (табл. 3.8).

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В КАРСТОВЫХ РАЙОНАХ

4.1. Основные требования строительного проектирования к изысканиям в карстовых районах

При планировании изысканий следует иметь в виду следующие обстоятельства.

1. Характер и степень опасности карста для различного типа объектов в различных природных условиях неодинаковы.

2. Во многих случаях в развитии карста большую роль играет вид хозяйственной деятельности, которую необходимо в процессе изысканий прогнозировать как во времени, так и в пространстве.

3. Проявление карста во времени и в пространстве имеет стохастический характер.

4. Для большинства сооружений наиболее опасны локальные (дискретные) проявления карста (прежде всего провалы) в их основании, необходимое условие возникновения которых – наличие в толще пород полостей.

5. В настоящее время отсутствуют надежные способы локализации карстовых полостей, при этом сложность локализации возрастает с глубиной залегания полостей и уменьшением их размеров в плане. Поэтому во многих случаях инженерные изыскания ставят задачу косвенного выявления зон, где наиболее вероятно наличие карстовых полостей. Таковыми могут быть зоны структурных нарушений (рис. 4.1).

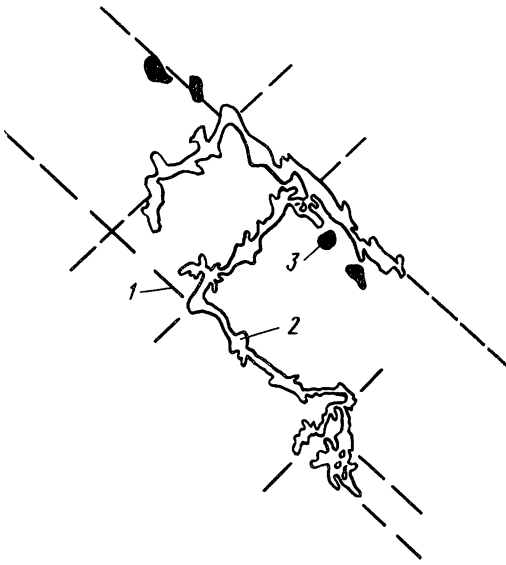
6. В ряде случаев бурение скважин может активизировать развитие карста, особенно в части развития карстово-суффозионных процессов.

7. Объем, характер и качество изысканий непосредственным образом определяет вид и объемы противокарстовой защиты. При этом стоимость изысканий, как правило, меньше стоимости противокарстовой защиты на несколько порядков. Однако приведенная стоимость изысканий с учетом эффекта отдаленности затрат вполне может быть сопоставима со стоимостью противокарстовой защиты. Таким образом, изыскания "на карст" должны проводиться как можно в более короткие сроки.

8. Процессы изыскания и проектирования должны в ходе выполнения работ взаимно влиять друг на друга.

9. Те или иные особенности проектируемых объектов (конструктивные особенности сооружений, экономические, социальные и экологические последствия от их повреждения и т.д.) необходимо непре-

Рис. 4.1. Обусловленность пространственного расположения линий структурных нарушений (1), карстовых полостей (2) и провалов (3)



менно, но по-разному учитывать при изысканиях для различных стадий проектирования.

10. Изыскания в карстовых районах во многих случаях имеют научно-исследовательский характер.

В настоящее время в СССР действует нормативный документ в области изысканий для строительства (СНиП 1.02.07–87), в котором впервые достаточно подробно сформулированы требования к отдельным видам изыскательских работ на закарстованных территориях. Следует отметить, что технология проведения этих работ изложена в "Рекомендациях по инженерно-геологическим изысканиям и оценке территорий для промышленного и гражданского строительства в карстовых районах СССР" (М., 1967), составленных под руководством Ф.П. Саваренского.

Некоторые специфические особенности организации изысканий в карстовых районах с точки зрения их оптимизации в рамках геотехнической системы карст – сооружение изложены в работе [34].

В СССР большинство методических разработок в области изысканий в карстовых районах выполнено применительно к условиям сульфатного и карбонатного типов карста и для случая, когда основная опасность определяется карстовыми провалами.

В ГДР в условиях сульфатного и соляного типов карста при интенсивном техногенном воздействии на геологическую среду, вызванном

в основном горными работами, опасность карста связывают не только с внезапными провалами, но и с постепенными оседаниями земной поверхности. Отсюда вытекает определенная специфика организации и технологии изысканий, излагаемая ниже.

4.2. Основные виды изысканий в карстовых районах

Изыскания в карстовых районах требуют учета особенностей природных условий, характера и степени техногенных воздействий и особенностей проектируемых объектов. Поэтому разработать единый алгоритм проведения изысканий для различных условий в принципе не представляется возможным.

В табл. 4.1 приведен перечень основных видов работ, как максимальная программа, которая должна корректироваться в соответствии с конкретными условиями.

4.3. Особенности изысканий для промышленного и гражданского строительства

Взаимодействие сооружений и оснований в районах карстовых оседаний

Особенностью промышленного и гражданского строительства в карстовых районах ГДР является то, что оно ведется в условиях хлоридного, хлоридно-сульфатного (Мансфельдерская мульда, Штассфуртская и Амерслебенская седловины) и сульфатного типов карста (Тюрингия). При этом, как правило, используются типовые конструктивные схемы сооружений из сборных элементов, не учитывающих особенности работы оснований в карстовых районах. Между тем на территории, где возможны карстовые оседания, фундаменты подвергаются дополнительным горизонтальным воздействиям благодаря трению по подошве и давлению на вертикальные поверхности фундамента. Ф. Каммерер (1962) показал, что в районах интенсивных карстовых оседаний давление грунта на фундаменты в 10–20 раз больше активного давления грунта на фундамент в обычных условиях. Кроме того, вертикальные смещения оснований вследствие оседаний в сооружениях с неподатливой конструктивной схемой вызывают потерю контакта фундамента с основанием. Таким образом, сооружения, расположенные в зоне интенсивных оседаний, подвержены достаточно сложным воздействиям, прогноз которых должен быть обеспечен инженерными изысканиями.

Основные виды работ при изысканиях в карстовых районах (по Г. Судерлау)

Методы изысканий	Критерии метода (предмет изучения)	Выходная информация	Оценка метода, проблемные вопросы
I. Оценка существующих материалов			
Изучение литературных и фондовых источников	Основные сведения о карсте и инженерно-геологических условиях	Состояние изученности природной обстановки	Ограниченность сведений о современной активности карстового процесса
Изучение топографических карт		Характер изменения рельефа во времени	
II. Разработка инженерно-геологической модели карста			
	Интенсивность процесса распространения, вид ожидаемых деформаций и т.д.	Определяется в процессе разработки	
III. Исследование местности			
Анализ рельефа (инженерно-геологическое картирование, дешифрирование аэрофотоснимков)	Геоморфологические формы рельефа	Распространение поверхностных карстовых форм и вторичных производных от карстовых процессов (суффозия, оползание склонов карстовых форм и т.д.)	Наиболее объективная информация о процессе. Разграничение карстовых форм и форм, образовавшихся вследствие вторичных процессов
Анализ растений-грунтоиндикаторов	Содержание определенных солей в грунтах	Выход соляных источников	Ограниченное применение на застроенных территориях и сельскохозяйственных угодиях
Карстологический анализ рельефа	Размеры и форма карстовых деформаций. Плотность и ин-	Оценка степени опасности карстовых процессов под воз-	Получение исходной информации сопряжено со значитель-

	тенсивность образования карстовых провалов	действием естественных и техногенных факторов	ными затратами. Необходимость получения информации от населения
IV. Проходка разведочных выработок			
Проходка шурфов	Локальные аномалии залегания грунтов вблизи земной поверхности	Возраст и интенсивность процессов оседания и провалообразования, картирование погрешенных и засыпанных провалов, зон растяжения мульд оседания	Глубина проходки ограничена
Бурение скважин	Аномалии залегания пород, залегающих над карстующимися. Степень сохранности и ослабления слоев. Процент выхода керна. Потеря промывочной жидкости. Скорость бурения	Ход процессов оседания. Напряженное состояние покровной толщи. Наличие полостей или зон растяжения. Химанализ грунтовых вод	Широко распространенный метод. Возможности его ограничены с экономической точки зрения и трудностью получения количественных показателей
Зондирование грунтов	Способность к погружению в грунт зондов	Зоны повышенной и пониженной плотности покровных грунтов. Полости в покровной толще	Метод прост. Глубины исследований ограничены
Графическая (картографическая) интерпретация результатов шурфования, бурения и зондирования	Свойства горных пород и подземных вод, вид карстопроявлений и характер процесса	Закономерности протекания процесса и формы карстопроявления в толще пород	Интерпретация результатов проходки горных выработок должна проводиться с привлечением другой информации. Объективность интерпретации зависит от глубины проходки и расстояний между выработками

Методы изысканий	Критерии метода (предмет изучения)	Выходная информация	Оценка метода, проблемные вопросы
V. Гидрогеологические исследования			
Стандартные исследования	Мощности водоносных слоев, направленность движения, наличие отдельных или взаимосвязанных горизонтов и т.д.	Условия формирования и движения трещинно-карстовых вод	Необходимы для оценки активности процессов карстования
Специальные исследования	Химический состав подземных вод; пути движения воды в карстующихся породах; места доступа вод к соляной толще	Интенсивность карстования, условия прорыва вод в соляные шахты	Необходимы для оценки активности процессов карстования. Ограниченность применения по экономическим соображениям
VI. Геофизические исследования			
Аномалия физических параметров	Наличие или отсутствие полостей и трещиноватых зон	Эффективность исследований повышается при комплексировании различных методов. Эффективность локализации полостей снижается с глубиной расположения полостей	
VII. Геодезические исследования			
Нивелирование	Изменение высот точек наблюдения	Прогноз процессов оседания во времени	Метод позволяет получить точную количественную характеристику процесса оседания

Плановые (линейные) измерения	Изменение горизонтальных расстояний между точками измерений на участках растяжения – сжатия мульды оседания	Выделение зон растяжения и сжатия в пределах мульды оседания	Метод позволяет выявить зоны растяжений, являющиеся зоной повышенной потенциальной опасности с точки зрения образования провалов. Применение метода требует определенных затрат, поэтому он целесообразен в местах активных оседаний
Измерение наклонов	Установление наклонов сооружений	Наблюдения за сооружениями и оценка их степени безопасности	Применяется для оценки опасности карстовых деформаций при эксплуатации зданий в местах оседаний
Анализ состояния гипсовых и стеклянных марок, установленных в конструкциях сооружений	Ширина раскрытия трещин, размер сдвига	То же	Совершенствование качественных и количественных способов интерпретации
Анализ деформаций сооружений	Картирование деформаций сооружений (трещинообразование, наклоны и т.д.)	Выявление причин деформаций и аварий сооружений. Определение принципов выбора мероприятий по обеспечению безопасности сооружений	Сложность анализа заключается в учете конструктивных особенностей сооружений, вида оснований и фундаментов, сроков эксплуатации зданий и т.п. Требуется разработка методики анализа поврежденных линейных объектов (трубопроводов, линий электропередач и т.д.)
VIII. Специальные структурно-геологические и геохимические исследования	Характер сдвижений и обрушений рыхлых и скальных пород	Выявление вариантов типов сдвижений и обрушений пород с учетом конкретных геологических и физико-механических характеристик	Метод предполагает проведение всех вышеперечисленных видов работ

В районах оседаний должны проводиться специальные геодезические измерения оседаний земной поверхности и деформаций зданий и их геологическая интерпретация. На рис. 4.2 показан пример результатов геодезических измерений вдоль улицы, расположенной в зоне оседания. Здания на этой улице непосредственно стыкуются между собой. При такой застройке многие повреждения возникают благодаря возможностям передачи сил от одного здания к другому. Результаты геодезических измерений позволили выявить характер дополнительных воздействий на здания. Это дало возможность запланировать мероприятия по обеспечению надежности зданий.

Для анализа деформаций зданий и земной поверхности в зоне оседаний в ГДР часто применяют фотограмметрическую съемку. Этот метод позволяет получать более подробную картину деформаций и более точную форму мульды оседания (Г. Судерлау и др., 1982).

Специальное картирование повреждений зданий и сооружений с их геологической и инженерно-строительной интерпретацией – важный метод исследования в карстовых районах. Существуют различные

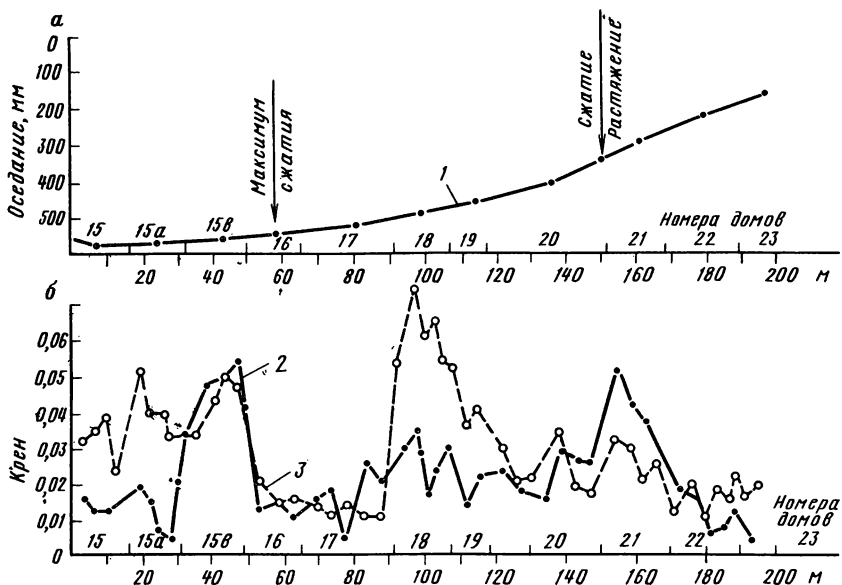


Рис. 4.2. Результаты инструментальных наблюдений за оседаниями основания (а) и кренами (б) конструкций зданий в одном из районов г. Айслебена: 1 – суммарное оседание основания с августа по декабрь 1975 г.; 2–3 – крены конструкций зданий (2 – горизонтальных, 3 – вертикальных)

методики такого картирования (А. Томас, 1964; Г. Судерлау, 1967; Р. Щене, 1968; К. Брендель, 1972). Однако во многих случаях значительной тесноты между интенсивностью карстовых деформаций и повреждениями сооружений не отмечается. Это связано с различиями в конструкциях сооружений, условиями обводнения оснований и т.п.

Геофизические методы – неотъемлемая часть инженерных изысканий, особенно на предпроектной стадии, когда производится выбор участка строительства, а также при разработке мероприятий по недопущению аварий эксплуатируемых сооружений.

Положительные результаты применения комплекса геофизических методов при изучении глубокого карста получены Б. Пельцелем (1982), Ф. Вайдерманом (1980), Д. Эндельманом (1982), Ф. Кюном (1983) и др. Большое значение имеют геофизические измерения в скважинах, особенно те из них, по которым непосредственно можно судить о закарстованности (гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, кавернометрия, нейтронный гамма-каротаж).

4.4. Особенности изысканий для линейных (транспортных) сооружений

Под линейными сооружениями понимаются такие сооружения как: автомобильные и железные дороги, трубопроводы, линии электропередач. Как правило, при проектировании линейных сооружений приходится иметь дело с большим разнообразием инженерно-геологических условий, и, как следствие, с разнообразным характером карстовых воздействий на сооружения.

Карстовые оседания оказывают существенное воздействие как на подземные, так и уложенные на поверхности трубопроводы.

Опасность карстовых провалов для подземных трубопроводов значительно больше, чем для проходящих по поверхности. При проектировании каналов наибольший интерес для изыскателей представляет степень водопроницаемости грунтов, залегающих над карстующимися породами. Для опор воздушных линий электропередач наибольшую опасность представляют провалы. Сложный комплекс проблем возникает при проектировании мостовых сооружений. Принципы изысканий при проектировании мостов, железных и автомобильных дорог в условиях покрытого карста изложены в работах В.В. Толмачева, В.В. Савина и др.

Наряду с обычными методами изысканий при проектировании и эксплуатации линейных сооружений применяются следующие методы изысканий:

геофизические (преимущественно сейсмика, гравиметрия, геотермия) для фиксации дислоцированных зон, местоположения полостей;

интерпретация аэрофотоснимков (в сочетании с другими инженерно-геологическими методами) с целью оптимального трассирования; по выявлению зон растяжения – зондирование грунтов сварными легкими зондами в сочетании с геодезическими измерениями (А. Штоль и др., 1976).

4.5. Особенности проведения изысканий в карстовых районах при проведении горных работ

Часть горнодобывающих предприятий ГДР (добыча медистых сланцев, каменной и калийной солей, бурого угля) расположена в карстовых районах. В связи с этим возникают серьезные проблемы по обеспечению безопасности ведения горных работ, надежности наземных сооружений, выбору рациональных технологий, особенно связанных с нарушением гидрогеологического режима.

Таблица 4.2

Специфические методы инженерно-геологических изысканий в закарстованных районах добычи полезных ископаемых

Вид горной выработки	Метод изысканий	Решаемая задача
Шахты по добыче каменной соли и медистых сланцев	Геофизические исследования:	
	способ геоэлектрических потенциалов	Изучение процессов растворения в продуктивных горизонтах
	акустическое межскважинное просвечивание	Оценка закарстованности, пустотности и прочности растворимых пород
	гидрохимические исследования (анализ трития, углерода C^{14})	Моделирование подземных потоков и карстования
Шахты по добыче бурого угля	Геохимические методы (ртутная металлотрия)	Фиксация зон обрушения на глубине
Открытая комбинированная разработка бурого угля и соли	Изотопогидрогеологические исследования	Определение возраста подземных вод
	Геоботанические исследования	Картирование гидродинамических активных тектонических зон

Продолжение табл. 4.2

Вид горной выработки	Метод изысканий	Решаемая задача
	Дешифрирование аэрофотоснимков, измерение сдвижений земной поверхности	Определение деформаций земной поверхности
Открытая разработка известняков, гипса и ангидрита	Геофизические методы (сейсмика, электроразведка)	Оценка пустотности пород

Серьезную опасность представляют собой внезапные прорывы карстовых вод в горные выработки. Особенно тяжелыми были последствия прорыва подземных вод в шахты медистых сланцев в районе Мансфельдерской мульды, который имел место в конце XIX в. (К. Брендель и др., 1970). Этот прорыв вод сопровождался интенсивными неравномерными оседаниями, провалами и горными ударами.

Подсчитано, что в районе Мансфельдерской мульды вследствие техногенных воздействий (примерно за 90 лет горных работ) растворено около 98 млн. т каменной соли (226 млн. м³), что вызвало оседание земной поверхности, соответствующее примерно 75 млн. т растворенной породы (В. Юнг, 1966; Г. Судерлау, 1972 и др.).

Остро стоит проблема возможной дестабилизации заброшенных, а также затопленных горных выработок.

Затопление шахты в районе Штрассфурта в 1884 г. привело к образованию оседания поверхности в 1930 г. на 4,3 м. Хотя в последующие годы интенсивность оседаний ослабла, но тем не менее составила значительную величину (~ 25 мм/год). В ряде случаев затопление соляных шахт приводило к провалам. Так, в районе Штрассфурта после затопления шахты образовалось три крупных провала диаметром около 100 м. Было подсчитано, что в результате затопления было растворено около 700 тыс. м³ каменной соли.

Вид изысканий зависит не только от инженерно-геологической и гидрогеологической обстановки, но и от вида добываемых полезных ископаемых (табл. 4.2).

5.1. Специфика прогнозирования карста

Прогнозирование карстовых процессов должно основываться на полном понимании геологических условий карстования, генезиса и особенностей залегания отдельных слоев грунта, знании законов растворения, механики грунтов и скальных пород.

Необходимо иметь в виду, что карстовый процесс зависит от множества природных и техногенных факторов в различном их сочетании и по-разному влияющем на интенсивность растворения, механизм и параметры карстовых деформаций.

Нередко карстовые провалы представляют собой результаты карстового процесса, происходившего в отдаленные во времени геологические эпохи. В качестве примера можно назвать известные гигантские провалы в районе г. Гессена (ФРГ). Активное карстование в этом районе приходилось на атлантический климатический период (более 5 тыс. лет до н.э.). Кстати, эти провалы примечательны также и тем, что их образование (размеры, глубина расположения полостей – более 800 м от поверхности земли) нельзя объяснить с помощью схем, составленных лишь на основе традиционной геомеханики.

5.2. Прогнозирование скорости растворения пород

Геологические аспекты

С инженерно-геологической точки зрения, особенно при решении задач гражданского и транспортного строительства, прогноз скорости растворения особенно важен для соляных и сульфатных пород.

Следует иметь в виду, что для сульфатных пород скорость растворения гипса больше скорости растворения ангидрита в 2–4 раза, которая в свою очередь больше скорости превращения ангидрита в гипс. По К. Присснитцу, скорость превращения ангидрита в гипс составляет 1/4 мм в месяц.

При прогнозировании следует принимать во внимание следующие данные:

- а) ионный состав грунтовых вод;
- б) скорость движения воды и характер течения (турбулентное, ламинарное);

в) структурно-геологические условия (трещиноватость, сбросы, пористость, раскрытие трещин) в карстующихся породах, их кровле и подошве;

г) характер возможных механических воздействий на растворимые породы, заполнитель трещин.

При прогнозе растворения следует учитывать, что такие породы, как известняк, гипс и ангидрит – достаточно хрупкие и реагируют на конфигурацию тектонических напряжений путем образования трещин. В противоположность им соляные породы реагируют на напряжения пластическими деформациями, как правило, без обрушений. Отсюда следуют особенности форм растворения в различных карстующихся породах.

Полостям растворения в карбонатных породах сопутствуют трещиноватые зоны. Скорость расширения полостей можно рассматривать лишь в геологическом масштабе времени: формы растворения поверхности карстующихся пород представлены в основном коррозийными воронками.

В сульфатных породах образование полостей также непосредственно связано со структурно-тектоническими элементами. При сульфатно-соляном карсте растворимость сульфатных пород при определенном содержании ионов в подземных водах легкорастворимых солей примерно в четыре раза выше, чем растворимость их в пресной воде. На формирование очертаний полостей в большей мере, чем в карбонатных породах, оказывает влияние эрозионный процесс.

Нерастворимые остатки в гипсах, а также проникшие в их толщу покровные грунты (например, вследствие провалов) могут на длительное время прервать растворение гипсов. При этом периоды застоя могут быть длительнее периодов растворения.

Кровля полостей, сформировавшихся в карбонатных и сульфатных породах, при определенных условиях обрушается, что приводит к образованию локальных деформаций покровной толщи пород, которые могут проявляться на поверхности земли в виде провалов.

Соляные породы, как правило, нетрещиноваты или слаботрещиноваты. Вследствие этого происходит преимущественное растворение поверхности карстующихся пород. Значительная скорость выноса растворимой породы приводит к интенсивным оседаниям.

Указанные формы карстования следует рассматривать лишь как типичные для тех или иных пород, но это не означает, что они не могут иметь в других породах. Например, для сульфатно-карбонатного карста района г. Дзержинска преобладающие виды карстовых деформаций земной поверхности – провалы, связанные с обрушением пород в полости, расположенные в толще сульфатных и карбонатных пород. Однако для участков этой территории характерны постоянные оседания земной поверхности, связанные, очевидно, с поверхностным и

объемным растворением сульфатных пород и (или) суффозионными процессами в вышележащей песчаной толще.

Интенсивность процесса карстования и соответствующая ей плотность карстовых форм зависят от свойств подземных вод как растворителя (скорость и характер движения, химический состав, механические взвеси и т.д.). Эти свойства подземных вод при оценке закарстованности, особенно для карбонатных и сульфатных пород, следует рассматривать в геолого-историческом аспекте. При этом необходимо обратить внимание на то, что растворение носит избирательный характер, т.е. идет не равномерно по всем имеющимся трещинам, а по определенной гидродинамической связанной системе трещин (Ф. Ройтер, Г. Майер, 1974). При этом расстояния между трещинами больше размеров элементарных блоков, ограниченных трещинами. Теоретически эти закономерности были доказаны с термогидродинамических позиций А.В. Лёховым (см. гл. 2). Это же подтверждается всеми известными натурными данными: карстовые полости никогда не образуют широко распространенные по площади пространства и разделены целиками (Ф. Ройтер, В. Кокерт, Х. Молек, 1981).

Х. Кэмпе показал, что развитие карстовой полости необходимо прогнозировать лишь при учете не только растворения, но и обрушения пород и эрозии.

Теоретико-расчетные методы и физическое моделирование

В Советском Союзе при решении инженерно-геологических задач для промышленного, гражданского и транспортного строительства (в отличие от задач для гидротехнического строительства) вопросы оценки скорости растворения карстующихся пород ставятся сравнительно редко. Это связано со следующими обстоятельствами.

Преобладающие типы карста в СССР – карст в труднорастворимых (90 %) и среднерастворимых (9,3 %) породах. В этих породах, как показано выше, собственно процесс растворения за срок службы сооружений в подавляющем большинстве случаев не является определяющим для оценки карстовой опасности.

Основные трудности строительного освоения закарстованных территорий связаны с тем, что карстующиеся породы залегают на такой глубине, которая не позволяет с достаточной точностью определять не только основные исходные параметры процесса растворения, но и наличие или отсутствие карстовых полостей и их генеральные размеры.

Очевидно, в силу этих причин в настоящее время не созданы эффективные прикладные методики определения скоростей растворения карстующихся пород. Имеющиеся теоретические разработки

В.П. Зверева и А.В. Лехова по определению скоростей растворения карстующихся пород скорее всего направлены на понимание сложнейшего механизма карстования и не преследуют в настоящее время создания прикладных методик.

Тем не менее, имеется ряд расчетных и экспериментальных способов, позволяющих приблизительно оценить скорость растворения карстующихся пород. Рассмотрим некоторые из них.

Толщину слоя карстующейся породы, выносимой подземными водами, А.Е. Орадовская предлагает оценивать по формуле

$$\Delta l = 1 / \left[\frac{1}{\rho} (c_n - c_0) \sqrt{\frac{Dv}{\pi x}} \Delta t \right],$$

где ρ – плотность карстующейся породы; $c_n - c_0$ – дефицит насыщения соответствующей солью подземных вод, циркулирующих на контакте с растворимой горной породой; D – коэффициент диффузии; v – действительная скорость движения подземных вод; x – расстояние от растворяемой поверхности до точки, для которой проводится определение дефицита насыщения подземных вод.

Толщину слоя трещиноватой карстующейся породы со средним раскрытием d_0 и степенью трещиноватости ϵ^* , выносимой подземными водами путем растворения за время Δt , ориентировочно можно оценить как

$$\Delta l = v_l (\Delta t - \Delta t_1),$$

где v_l – средняя скорость уменьшения толщины слоя за счет растворения стенок трещины после смыкания их стенок (рис. 5.1) через время Δt_1 .

Среднюю скорость уменьшения толщины слоя определяют по формуле

$$v_l = \frac{l_n K (c_n - c_0) \epsilon}{d_0 \rho}, \quad (5.1)$$

где l_n – длина пути насыщения, определяемая с заданной степенью насыщения по формулам Н.Н.Веригина (3.2); K – коэффициент скорости растворения, зависящий (при прочих равных условиях) от расхода подземных вод; Δt_1 определяется с использованием решения Н.Н. Веригина (3.1):

$$\Delta t_1 = \frac{d_0}{2\epsilon \frac{K}{\rho} (c_n - c_0)}.$$

*Под степенью трещиноватости здесь понимается отношение объема трещин к объему породы.

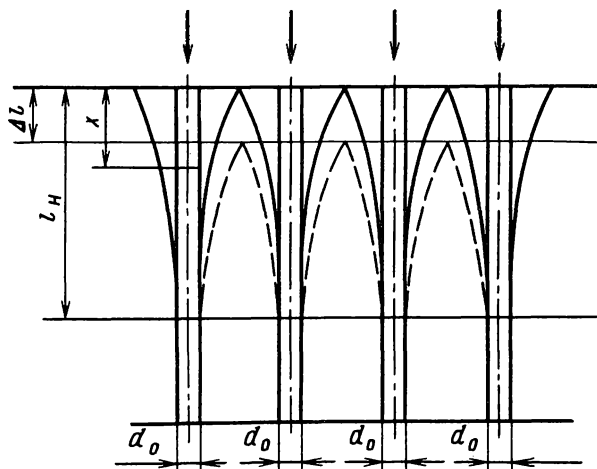


Рис. 5.1. Расчетная схема уменьшения толщины слоя карстующейся породы за счет растворения стенок трещины

Значение коэффициента скорости растворения определяют экспериментальным путем с использованием теории подобия. Критерии подобия находятся методами теории размерностей на основе дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости и конвективной диффузии, которые (при ряде упрощающих допущений) имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_w \frac{dv_x}{dt} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \rho_w v_x \frac{\partial v_x}{\partial x}; \\ \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v_0 \frac{d_0 \partial c \partial c}{K c_a \partial t \partial x}, \end{cases} \quad (5.2)$$

где ρ_w – плотность жидкости; v_x – проекция скорости движения воды на ось x (вдоль трещины); μ – динамическая вязкость жидкости, $\mu = \nu \rho_w$; ν – кинематическая вязкость; t – время; D – коэффициент диффузии; c – концентрация соли в воде, $c_a = c_H - c_0$.

Решение системы (2.5) произведем, используя данные эксперимента с применением теории подобия. Тогда система (5.2) будет иметь вид $M = \psi(Re, Pr)$, которую можно представить как степенную зависимость

$$M = A Re^n Pr^m, \quad (5.3)$$

где A, n, m – некоторые постоянные, определяемые экспериментально; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

При движении воды по щели за линейный размер в формуле критерия Рейнольдса, как показал Г.М. Ломизе (1951), следует принимать d – поперечный размер щели: $Re = vd/\nu$. При постоянстве расхода Q на единицу ширины трещины $Re = Q/\nu$; $Pr = \nu/D$.

Значения кинематической вязкости воды ν и коэффициентов диффузии D в зависимости от температуры воды приведены в табл. 5.1.

Критерий Маргулиса

$$M = K/\nu, \quad (5.4)$$

или при постоянстве расхода на единицу ширины трещины $M = Kd/Q$.

Коэффициент скорости растворения для каждого экспериментального образца может быть определен по формуле

$$K = \frac{\Delta d \rho}{\Delta t (c_H - c_x)},$$

где Δd – толщина растворимого слоя породы при движении воды за время Δt ; c_x – концентрация воды на расстоянии x от входа в щель.

Результаты экспериментов по определению коэффициента скорости растворения при фильтрации воды по трещинам могут быть обобщены на подобные явления с помощью выражения (5.2), если существует: 1) геометрическое подобие систем; 2) подобие входа жидкости в модель (начальное условие); 3) равенство численных значений определяющих критериев подобия (M , Re , Pr).

Если вид растворимой породы и температура воды в эксперименте совпадают с видом породы и температурой подземных вод в природных условиях, т.е. если $\nu = \text{const}$, $D = \text{const}$ и $Pr = \text{const}$, то выражение (5.2) можно представить в виде

$$M = ARe^n. \quad (5.5)$$

Эксперимент заключался в пропуске постоянного расхода воды через искусственно созданные в гипсе трещины. Количество растворившегося вещества эпизодически определялось через концентрацию раствора, которая фиксировалась электрометрическим способом.

Таблица 5.1

Параметры ν и D в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$D \cdot 10^{10}, \text{ м}^2/\text{с}$
7	1,45	3,5
10	1,30	3,8
20	1,01	5,0

По результатам измерений определяли коэффициент скорости растворения K , а также критерий Рейнольдса Re и Прандтля Pr . На рис. 5.2 в логарифмической форме представлена зависимость (5.5) при различных значениях чисел Re , соответствующих температуре воды $t = 10, 14, 18$ и 20 °С. Таким образом, зная скорость движения воды по трещинам, среднее их раскрытие и температуру t , можно по эмпирической формуле (5.5) вычислить значение критерия M , а затем по формуле (5.4) коэффициент скорости растворения K .

Длину пути насыщения l_n в формуле (5.1) можно оценить, зная осредненный коэффициент скорости растворения, используя решение Н.Н. Веригина (3.2) при $s_{ж} = 0,95s_n$, когда воду можно считать практически неагрессивной.

С.К. Верткова [2] экспериментально изучала растворение калийной соли при затоплении выработок месторождений. Результаты исследований, полученные в критериальной форме, могут быть использованы (при ограничивающих условиях, учитывающих особенности карстовых полостей) при прогнозе развития карстовых полостей.

Было рассмотрено два случая растворения стенок затопленной выработки: 1) без движения воды (модель свободной конвекции); 2) при движении воды (модель принудительной конвекции).

Для первого случая получена зависимость между безразмерными параметрами

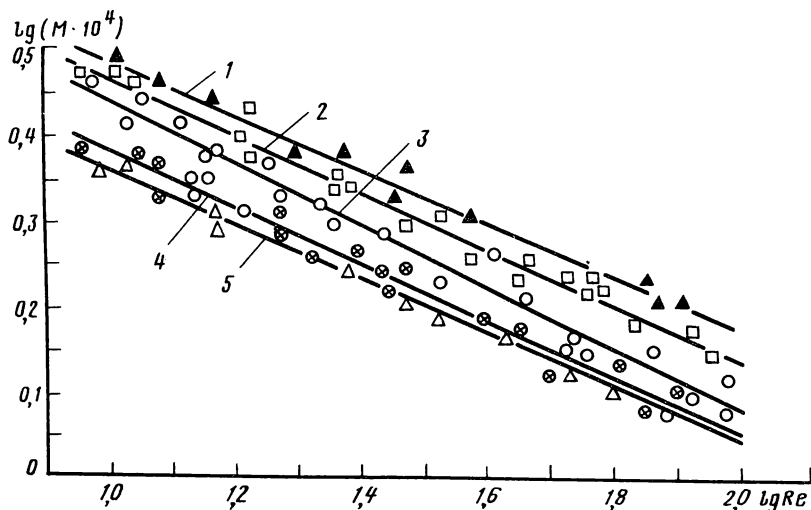


Рис. 5.2. Экспериментальные зависимости между критериями подобия Маргулиса и Рейнольдса при движении воды по трещине:

1 — $(0,85 \pm 0,37) \lg Re$ при $Pr = 1850$; 2 — $(0,87 \pm 0,40) \lg Re$ при $Pr = 2020$; 3 — $(0,87 \pm 0,42) \lg Re$ при $Pr = 2190$; 4 — $(0,77 \pm 0,40) \lg Re$ при $Pr = 2720$; 5 — $(0,73 \pm 0,39) \lg Re$ при $Pr = 3470$

$$Nu = A (Pr Ar Fo)^{-m}, \quad (5.6)$$

где Nu , Pr , Ar , Fo – критерии подобия соответственно Нуссельта, Прандтля, Архимеда и Фурье.

$$Nu = \frac{Kl}{D}; \quad Ar = \frac{gl^3}{v^2} \frac{\Delta\rho_w}{\rho_w}; \quad Fo = \frac{Dt}{l^2},$$

l – линейный размер; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность растворителя; t – время.

Для второго случая зависимость между безразмерными параметрами имеет вид

$$St = A (Pr Ho Fr \frac{\Delta\rho}{\rho})^m, \quad (5.7)$$

где St , Ho , Fr – критерии подобия соответственно Стентона, гомохронности, Фруда.

Эти критерии вычисляют по следующим формулам:

$$St = \beta/v, \quad Ho = \frac{vt}{l}, \quad Fr = \frac{v^2}{gl},$$

где β – коэффициент массоотдачи, который для рассматриваемого случая находят по соотношению:

$$\beta = - \frac{\lg \frac{c_n - c}{c} Hbv}{0,43 (2H + b) l}.$$

В формулах (5.6) и (5.7) параметры A и m определяют экспериментально.

5.3. Прогноз карстовых провалов

Инженерно-геологические классификации карстопроявлений

Как показали анализ проектов зданий и сооружений, расположенных на закарстованных территориях, и обсуждение вопросов обеспечения проектов противокарстовой защиты исходной инженерно-геологической информацией с изыскателями и проектировщиками, у

многих из них бытует несколько упрощенное представление о механизме карстовых деформаций. В большинстве случаев (даже для таких ответственных объектов, как атомные электростанции, большие мосты и т.п.) проектировщики, как заказчики, не требуют от изыскателей выявления механизма карстовых деформаций. Многие специалисты в области проектирования конструкций в своих расчетных схемах принимают во внимание лишь образование ослабления по подошве фундамента без учета очертаний его и нижележащих форм, а также без учета развития их во времени. Такое положение нередко приводит к серьезным ошибкам в проектировании.

Карстопроявления делятся на подземные и поверхностные. Первые из них представляют непосредственную опасность для сооружений, лишь когда они попадают в активную зону основания. Ниже речь пойдет о поверхностных карстопроявлениях, непосредственно воздействующих на фундаменты мелкого заложения.

Поверхностные карстопроявления разделим на три вида: провалы, проседания (локальные оседания) и оседания. Карстовые провалы и оседания существенно различаются как по механизму их образования, так и по характеру воздействия на фундамент. Локальные оседания представляют собой промежуточную форму: с учетом одних обстоятельств они ближе к провалам, а с учетом других – к оседаниям. Это хорошо видно из табл. 5.2, в которой поверхностные карстопроявления объединены в различных комбинациях в четыре группы по следующим признакам: 1) по характеру граничной зоны карстопроявления на поверхности земли или в основании сооружения; 2) наиболее вероятному наличию или отсутствию контакта подошвы фундамента с грунтом в зоне деформации; 3) относительным размерам в плане; 4) длительности развития карстопроявлений в основании сооружений.

Сложность защиты сооружений от карстовых провалов в значительной мере зависит от их глубины. Поэтому с практической точки зрения (с учетом опыта проектирования на подрабатываемых территориях) есть смысл делить провальные формы на собственно провалы (видимая глубина $S_{obs} \geq 0,25$ м) и карстовые просадки ($S_{obs} < 0,25$ м).

Целесообразным формальным критерием отличия проседания и оседания (также с учетом опыта проектирования сооружений на подрабатываемых территориях) может быть значение радиуса кривизны деформируемой поверхности

$$R_s = \frac{b_s}{2i_s},$$

где b_s и i_s – значения ширины и наклона бортов мульды, прогнозируемые за период срока службы сооружения.

Таблица 5.2

Характеристика поверхностных карстопроявлений для целей проектирования оснований и фундаментов

Вид поверхностных карстопроявлений	Характер граничной зоны карстопроявления на поверхности земли или в основании сооружения		Характер и размер проявления в плане		Характер взаимодействия подошвы фундамента с грунтом в зоне карстопроявления		Длительность развития карстопроявлений в основании сооружений		
	с нарушением сплошности грунта	без нарушения сплошности грунта	локальные (метры – десятки метров)	площадные (десятки – тысячи метров)	отсутствие контакта по подошве фундамента	наличие контакта по подошве фундамента	Кратковременные деформации (минуты – дни)	Долговременные деформации (месяцы)	Длительные (годы)
Провалы	+		+	–	+	–	+	–	–
Локальные оседания (проседания)	–	+	+	+	+	+	+	+	+
Оседания	–	+	–	+	–	+	–	–	+

При оседаниях $R_s \geq 1$ км, при проседаниях $R_s < 1$ км.

Карстовые провалы по механизму их образования классифицируются следующим образом (табл. 5.3).

Помимо общих инженерно-геологических классификаций карстовых деформаций и карстопроявлений целесообразно создание на их основе специальных классификаций, которые можно было бы использовать при назначении тех или иных типов противокарстовых мероприятий и их проектировании. В работе [36] приведены классификация карстопроявлений для целей проектирования оснований и фундаментов и классификация поверхностных карстовых форм по их геометрическим параметрам для инженерно-планировочных целей.

Параметры карстовых провалов, подлежащие прогнозу, должны определяться характером инженерной задачи. При строительном освоении закарстованных территорий эти параметры имеют как временной, так и пространственный характер. Временной характер прогноза выражается в ответах на вопросы: когда может произойти провал на рассматриваемой территории или строительной площадке, какова вероятность образования провалов за заданный срок (например, за срок службы сооружения), какова скорость развития комплекса различных подземных и поверхностных карстовых форм и т.п.

Пространственный характер прогноза провалообразования выражается в ответах на следующие вопросы.

1. Если провал произойдет, то где это будет?

2. Какова вероятность образования провала на том или ином участке территории, при условии, если на этой территории произойдет провал?

3. Какие следует ожидать размеры провалов на поверхности земли или в основании сооружений?

4. Какова вероятность образования провалов диаметром не более заданного значения и т.п.

Сложность и точность прогнозов во многом зависит от инженерно-геологических условий, в том числе характера действующих и предполагаемых техногенных воздействий. Поэтому в настоящее время в одних случаях мы можем с достаточной для инженерных расчетов точностью ответить на вышестоящие вопросы, в других случаях – лишь частично.

Для прогноза провалообразования используют методы, основанные на детерминированных (теоретико-расчетные, экспериментальные) и стохастических (вероятностно-статистические, теоретико-вероятностные) моделях. Следует заметить, что стохастические модели, как это показано выше, в большей степени соответствуют природе карстового процесса (многочисленность природных и техногенных факторов, определяющих карстовый процесс и имеющих ярко выраженный случайный характер) и особенностям его познания (скрытость процес-

Таблица 5.3

Генетическая классификация карстовых провалов

Типы карстовых провалов	Основные условия образования	Основные процессы механизма карстового провала
Карстово-обваловые	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие карстовой полости 2. Достижение полостью критического пролета 3. Отсутствие постоянного или периодического водонасыщения нескальных грунтов в покровной толще 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обрушение непосредственной кровли карстовой полости (в частном случае, всей покрывающей толщи) 2. Последовательное (по мере развития полости) возникновение сводов равновесия с образованием в покрывающей толще промежуточных полостей или разуплотненных зон 3. Выход свода на поверхность или его разрушение 4. Уположение склонов провала до их стабильного состояния
Карстово-суффозионные	<ol style="list-style-type: none"> 4. Наличие полости или сильнотрещиноватой зоны 5. Наличие постоянного или периодического водонасыщения нескальных грунтов в покрывающей толще 6. Наличие гидравлической связи между грунтовыми и трещинно-карстовыми водами 7. Превышение напора грунтовых вод над напором трещинно-карстовых 	<ol style="list-style-type: none"> 5. Сдвигание водонасыщенных грунтов в полости и трещины под действием фильтрационных сил (суффозия) 6. Формирование разуплотненных зон и полостей в водонасыщенных грунтах 7. Разжижение песчаных грунтов и истечение их в полости и трещины 8. Последовательное образование сводов равновесия в толще над водонасыщенными грунтами 9. Выход свода на поверхность или его разрушение 10. Уположение склонов провала до их стабильного состояния
Карстово-суффозионно-обваловые (смешанные)	<ol style="list-style-type: none"> 8. Наличие карстовой полости 9. Достижение полостью критического пролета 10. Наличие постоянного или периодического водонасыщения нескальных грунтов в покрывающей толще 	<ol style="list-style-type: none"> 11. Обрушение непосредственной кровли карстовой полости (в частном случае, всей покрывающей толщи) 12. Последовательное, по мере развития полости, возникновение сводов равновесия с образованием в покрывающей толще промежуточных полостей или разуплотненных зон 13. Сдвигание водонасыщенных грунтов в полость под действием

Типы карстовых провалов	Основные условия образования	Основные процессы механизма карстового провала
		гравитационных и фильтрационных сил 14. Формирование разуплотненных зон и полостей в водонасыщенных грунтах 15. Разжижение песчаных грунтов и истечение их в полости и трещины 16. Последовательное образование сводов равновесия в толще над водонасыщенными грунтами 17. Выход свода на поверхность или его разрушение 18. Уположение склонов до их стабильного состояния

са от глаз исследователя, недостаточное развитие технических средств фиксации подземных карстовых форм, другие причины, заставляющие делать прогнозы в условиях большей или меньшей неопределенности).

Поэтому мы считаем, что теоретико-расчетные и экспериментальные методы должны так или иначе сочетаться с вероятностными методами, и в конечном счете их результаты должны носить вероятностный характер.

Прогнозирование провалообразования

На образование провалов оказывают влияние многочисленные факторы, изменяющиеся как в пространстве, так и во времени, т.е. прогнозирование карстовых провалов – чрезвычайно трудная задача.

В этих условиях крайне важно изучение условий провалообразования на опорных территориях, хорошо изученных как в геологическом, так и в карстологическом отношениях. К таким территориям в СССР можно отнести карстовый район г. Дзержинска Горьковской обл., а в ГДР – район Мансфельдерской мульды. В районе г. Дзержинска зафиксировано около 4000 провальных воронок (И.А. Саваренский, 1962), в том числе около 200 свежих провалов (для которых известен год образования), пробурено около 1000 скважин глубиной 50–70 м (с заглублением на 5–10 м в карстующиеся гипсы и известняки). Подробно геологические и гидрогеологические условия района изложены в работах И.А. Саваренского (1960, 1962) и многочисленных статьях по различным аспектам карста района.

Район Мансфельдерской мульды представляет собой уникальный полигон для изучения карстовых оседаний, провалов в условиях

хлоридного, сульфатного и хлоридно-сульфатного карста. В этом районе находятся многочисленные населенные пункты, транспортные коммуникации, промышленные и горные предприятия, под воздействием которых активность карстопроявлений усиливается в несколько раз. Именно поэтому район Мансфельдерской мульды привлекает пристальное внимание геологов уже около ста лет. Для изучения карста специальные геологические службы снабжают значительными средствами. Этот район должен представлять интерес и для советских инженеров-геологов. Поэтому указанные ниже конкретные закономерности формирования карстовых деформаций, выявленные немецкими исследователями, будут в основном базироваться на этом районе.

Рассмотрим различия в образовании провалов в условиях карбонатного и сульфатного, а также хлоридного карстов.

Провалы в условиях карбонатного и сульфатного карста. Как было показано выше, в карбонатных и сульфатных породах преобладающие подземные карстовые формы – полости, которые образуются в местах повышенной трещиноватости, обусловленной тектонико-структурными особенностями при избирательном процессе расширения отдельных трещин, последовательного обрушения вышележащих пород и эрозионной деятельности подземных вод. Таким образом, карстовую полость можно считать первоначальным источником обрушения земной поверхности. Полости имеют различную степень развития, как правило, представляют систему каналов, залов, сводов, лабиринтов и т.д. Эти отдельные элементы полости имеют свои стохастические закономерности обрушения.

Анализ образования провалов для ряда участков покрытого сульфатного карста показал, что имеются случаи, когда карстовая полость диаметром 5 м проявлялась на поверхности земли в виде провалов, "пробивая" 50-метровую толщу покровных, в основном, глинистых пород.

С точки зрения механики горных пород и грунтов такие провалы возможны лишь в том случае, если предположить, что покровная толща тектонически ослаблена.

Параметры карстовых провалов (диаметр, глубина, угол склонов, объем) меняются во времени. Инженеру-геологу очень важно по зафиксированным в момент проведения изысканий параметрам провалов сделать оценку их первоначальных размеров, которые необходимы прежде всего для обоснования конструктивной противокарстовой защиты. При этом диаметры провалов увеличиваются (за счет оползания склонов до устойчивого состояния и эрозионной деятельности дождевых и талых вод), а глубины провалов и углы склонов к горизонту соответственно этому уменьшаются.

В районе Мансфельдерской мульды специальное картирование карстовых провалов и обследование провалов ведется с 1921 г. Это

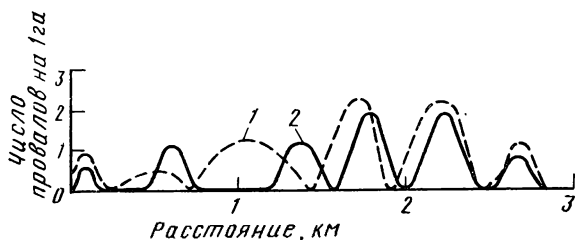


Рис. 5.3. Связь плотностей старых (1) и свежих (2) карстовых провалов

позволяет делать важные в практическом отношении выводы. Например, установлено, что провал с первоначальным диаметром 2 м сохраняется в естественных условиях по крайней мере более 57 лет (К. Улиг, 1980).

Наибольшая скорость изменения этих параметров происходит в первые годы после образования провалов. Так, в песчаных грунтах (карстовый район г. Дзержинска) через 12–13 лет после образования провала они приходят в относительно стабильное состояние (угол наклона провала близок к углу естественного откоса) [36]. Аналогичные тенденции установлены и для провалов, образовавшихся в районе Мансфельдерской мульды.

Ниже приведены изменения угла склона провалов α во времени:

Время, годы	7,5	10	12,5	17,5	35
α , градус	53,1	48,8	47,5	36,9	35

Относительно медленно происходит уменьшение объема провальной впадины, скорость которого определяется главным образом скоростью седиментации (для провалов Мансфельдерской мульды 0,5 мм/год). Выявленные для определенных природных условий закономерности изменения параметров провалов позволяют определять первоначальные их значения по измеренным в период изысканий [36]. При этом важно определять взаимосвязи между параметрами старых и свежих провалов. На рис. 5.3 графически показана связь плотностей (число провалов на 1 га) старых и свежих провалов в одном из районов Мансфельдерской мульды, которая позволяет проследить тенденции развития провального процесса. В работе [36] приведена методика анализа кривых распределения диаметров свежих и старых провалов. Эта зависимость имеет вид показательной функции

$$d_0 = ad_n^b,$$

где a и b — эмпирические коэффициенты (для карстового района г. Дзержинска ($a = 0,36$; $b = 0,8$)).

Д. Фантасни и К. Бренделю (1972) удалось выявить ряд статистических закономерностей в образовании провалов (см. рис. 3.6) в районе г. Галле (рис. 5.4, 5.5).

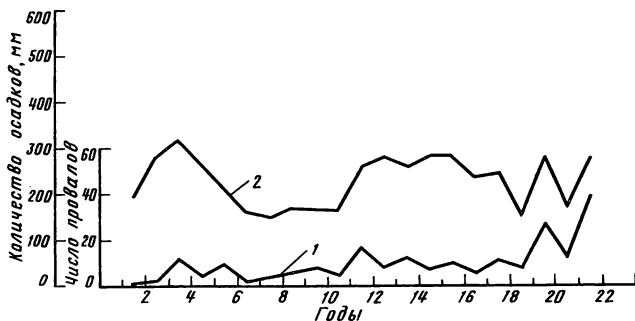


Рис. 5.4. Связь между числом провалов (1) и количеством осадков (2) (по Д. Фантасни и К. Бренделю)

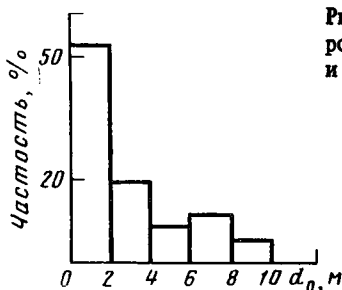


Рис. 5.5. Распределение первоначальных диаметров провалов в районе г. Галле (по Д. Фантасни и К. Бренделю)

Следует заметить, что подобный анализ проводился и для карстового района г. Дзержинска. При этом установлено, что существенных корреляций между интенсивностью образования провалов, с одной стороны, и количеством осадков по месяцам года, с другой стороны, не выявлено. Однако выявлены вполне определенные статистические закономерности диаметров провалов. Так, установлено, что распределение диаметров провалов близко к логарифмически нормальному, а на участках с фиксированным значением природных факторов, влияющих на диаметр провалов – к нормальному распределению [36].

Провалы в условиях хлоридного карста. Как уже указывалось, наиболее характерной формой карстопроявления на поверхности земли в условиях хлоридного карста является мульда оседания. Провалы здесь образуются реже, а диаметры их больше, чем в районах сульфатного карста.

Немецкие исследователи имеют большой опыт в изучении провалов в районах хлоридного карста, которые по происхождению подразделяются на три вида: 1) в зонах растяжения мульды оседания; 2) над карстовыми полостями, не связанные с мульдой оседания; 3) над

затопленными соляными шахтами (провалы вследствие техногенного карстования).

Наиболее характерны провалы в зонах растяжения мульды оседания. Они представляют собой элемент процесса оседания.

В зонах растяжения, приходящихся на краевые участки мульды, прочностные характеристики грунта ослаблены, здесь нередко появляются трещины. Помимо снижения прочности пород эти зоны благоприятны для усиленной инфильтрации воды, за счет чего здесь создаются благоприятные условия для растворения солей и, как следствие, для формирования подземных полостей, а также для суффозионных процессов. Для этих провалов характерно то, что среди них преоблада-

Таблица 5.4

Основные результаты исследований по теоретико-расчетным методам прогноза про-

Автор, страна, год публикаций	Инженерно-геологическая обстановка, расчетная схема	Гипотезы о закономерностях образо-
		Основные Карстопроявления в толще пород
С.В. Альбов, СССР, 1947	Карстовая полость перекрыта слоем глин и песчаной толщей (район г. Дзержинска)	Достижение полостью предельного пролета $2b_K$, при котором происходит обрушение слоя глин: $2b_K \approx a \sqrt{R_0 h_K / \gamma}$
Г.М. Шахуняц, СССР, 1953	Над карстовой полостью, расположенной на небольшой глубине, отсутствует водонасыщенная песчаная толща (см. рис. 5.6, а)	Последовательное формирование эллипсоидных сводов обрушения по мере расширения полости с продвижением полости вверх. Объем полового пространства определяется скоростью процессов растворения стенок полости и обрушенных пород, с одной стороны, и степенью разрыхления пород при обрушении, с другой
Ф. Каммерер, ГДР, 1962	Над карстующимися породами залегают связные грунты	Образование над полостью параболического свода радиусом $r = a(\sqrt{y} - \sqrt{y_0})$.

ют провалы больших диаметров. Как указывается в работе [45], все провалы, образовавшиеся в последние 40 лет в районе Мансфельдской мульды, имеют диаметр более 20 м. По данным М. Пенцеля (1980) из 12 провалов, образовавшихся в зоне оседаний, 11 были расположены в зоне растяжения мульды.

В. Юнг и К. Либиш (1966) считают, что причина образования крупных провалов в районах соляного карста — та, что в геологическом разрезе имеются прослойки с наличием в них больших полостей.

Теоретико-расчетные методы прогноза параметров предполагаемых провалов. Расчетные методы прогноза провалов, основанные на детерминистических моделях, разработаны главным образом для

валообразования

вания провалов, положенные в основу расчетов формулы

Выход провала на поверхность

Краткий комментарий

Обрушение кровли полости непосредственно ведет к образованию провала на поверхности земли

Таким образом может быть доказана лишь возможность образования провала диаметром более 30 м, что составляет 5 % от общего числа провалов в данном районе. Расчетные формулы не учитывают специфики карстовой полости. Способ может быть использован для сугубо приближенных оценок при провалах обвального типа

При достижении полостью определенной глубины h_0 происходит сдвигание цилиндра грунта

$$(Q_0 + Q - T = 0)$$

$$d_0 = \frac{2(2ch_0 + \gamma h_0^2 N \operatorname{tg} \varphi - 2ch_0 M \operatorname{tg} \varphi)}{\rho_0 + \gamma h_0}$$

Модель послужила основой для многих последующих разработок. Не учитывается влияние внешней нагрузки на увеличение силы трения при сдвигании столба грунта. Не учитывается изменение очертания свода по мере продвижения вверх и заполнения продуктами обрушения. Способ может быть использован для приближенных оценок возможности образования провалов и их первоначальных размеров

Провал грунта в полость происходит в виде круглоцилиндрического блока с диаметром $d_0 = 4R_c/\gamma$.

Не учитывается, что удельное сопротивление сдвиганию увеличивается по мере увеличения глубины

Автор, страна, год публикаций	Инженерно-геологическая обстановка, расчетная схема	Гипотезы о закономерностях образования
		Основные
	(см. рис. 5.6, б)	Карстопроявления в толще пород Внутри параболоида располагается разрыхленная порода
М.С. Газизов, СССР, 1968	Карстующиеся породы имеют ярко выраженную вертикальную трещиноватость. Многослойная покровная толща (см. рис. 5.6, в, з)	Несущая способность провала полости определяется через несущую способность непосредственной кровли и расположение в ней трещин: $h_k = a \frac{\gamma b^2}{R_p}; a = f(x)$
В.В. Толмачев, В.П. Хоменко, Е.Г. Карпов и др., СССР, 1973–1982	Карстовая полость залегает на относительно большой глубине, перекрыта водонасыщенными песчаными и связными грунтами (см. рис. 5.6, д)	Последовательное дискретное формирование сводов равновесия по мере расширения полости. Своды параболические, каждый последующий свод круче предыдущего. Промежуточная полость или ослабленная зона может сформироваться в покровной толще вследствие перемещения грунта под действием гидродинамических сил
Е. Лышковский, ПНР, 1973	Над карстовой полостью залегает неводонасыщенная толща связных грунтов	Провалу предшествует дискретный процесс образования промежуточных полостей в покровной толще. Устойчивость кровли полости в карстующейся породе изменяется во времени, вследствие изменения структурной прочности растворимой породы кровли. Размер промежуточной полости в покровных отложениях не зависит от размера полости в карстующихся породах
В.П. Огонюченко, СССР, 1979	Карстовая полость находится на небольшой глубине под многослойной толщей	—

вания провалов, положенные в основу расчетов. формулы	Краткий комментарий
Выход провала на поверхность	

Изменение формы и размеров провалов следует рассматривать из условия постоянства его объема. Очертание провальной формы описывается параболой (в безразмерной форме)

ны расположения полости. Способ может быть использован для приближенных оценок провалов обвального типа

Обрушение кровли полости ведет к обрушению вышележащей толщи. Одновременно с обрушением происходит сдвигание пород

В формулах не учитывается давление горных пород и подземных вод вышележащей толщи. Возможно применение в условиях неглубокого залегания карстовой полости

При достижении свода полости определенной глубины происходит провал (модель Г.М. Шахунянца)

Модель объясняет появление провалов различных диаметров в зависимости от условий формирования подземной полости

Провал происходит в виде смещения круглоцилиндрического блока. Для связных грунтов $0,50b \leq d_0 \leq 0,72b$, где b — радиус промежуточной полости

Размер промежуточной полости в покровной толще связан, хотя и неоднозначно, с размером или объемом полости в карстующихся породах

Провал происходит вследствие сдвигания круглоцилиндрического недеформируемого столба при достижении полостью пролета $2b = d_0$, $d_0 = f(h, k, p, c, \varphi, \gamma)$

Не учитывается возможность образования устойчивых сводов над полостью. Способ можно использовать для приближенной оценки опасности полости при небольшой глубине ее расположения

Автор, страна, год публикаций	Инженерно-геологическая обстановка, расчетная схема	Гипотезы о закономерностях образования
		Основные Карстопроявления в толще пород
М. Пенцель, ГДР, 1981	Карстовая полость залегает на небольшой глубине (см. рис. 5.6, е)	Образование сводов
С.И. Парфенов, СССР, 1981	Над карстующейся толщей залегает водонасыщенная толща песчаных грунтов	Образование зоны разжижения над трещинами. Разрушение песков над зоной разжижения, их смещение с разрыхлением. Возможность продвижения зоны разжижения вверх определяется соотношением скоростей вытекания пльвуна и обрушения с разрыхлением вышележащих пород. Формируется столб разжижения
В.В. Савин, И.Ж. Хусаинов, СССР, 1984	Над карстовой полостью залегают связанные неводонасыщенные грунты	—

Примечание. a — константа; R_p и R_c — расчетные сопротивления породы на разрыв вес столба грунта; T — сила сопротивления сдвигению столба грунта; r — радиус полости на

преимущественно для выхода провала на поверхность земли или под фундамент. Эти методы разрабатывались в основном исследователями СССР и ГДР (рис. 5.6; табл. 5.4).

В табл. 5.4 отражены лишь те работы, где речь идет об образовании собственно карстовых провалов (не приводятся результаты исследований механизма деформаций над горными выработками, сдвигения рыхлых материалов в бункерах и т.д.). Для большинства работ характерно то, что явления, происходящие в толще пород, и механизм выхода провала на поверхность земли рассматривались отдельно. При этом преимущественно этот механизм основывался на модели круглоцилиндрического сдвигения грунта.

Следует отметить еще одну тенденцию исследований, заключающуюся в том, что работ, связанных со спецификой механизма провалов в основании сооружений, крайне мало. Наиболее значимые из них

вания провалов, положенные в основу расчетов. формулы	Краткий комментарий
Выход провала на поверхность	

Сдвигание по круглоцилиндрической поверхности

—

$$h = \frac{b - 2c/\gamma}{\operatorname{tg}\varphi K}$$

—

Условия выхода провала непосредственно на поверхность земли не определены

Сдвигание грунта по круглоцилиндрической поверхности

Приблизительная оценка диаметра провала при небольшой глубине залегания полости

$$d_0 = \frac{4K \operatorname{tg}\varphi h}{\ln \left[1 + \frac{K \operatorname{tg}\varphi}{c} (\rho_0 + \gamma h) \right]}$$

и сдвиг; h_K — толщина кровли; N, M — параметры функции φ ; Q_0 — вес сооружения; Q — глубине y .

выполнены в последнее время специалистами в области механики грунтов и фундаментостроения.

Как известно, для наиболее рационального проектирования противокарстовых фундаментов необходимо иметь данные как по первоначальным параметрам провалов в основании сооружения (d_0 и S_{obs} — видимая глубина провала), так и по предельным их размерам, формирующимся под действием нагрузок от сооружений.

Методика Г.М. Троицкого решает эти задачи.

Определение первоначального диаметра карстового провала осуществляется из условия равновесия круглоцилиндрического столба грунта, зависающего над полостью определенного размера. Вес столба уравнивается суммарным трением и сцеплением, действующими по его боковой поверхности (рис. 5.7, а).

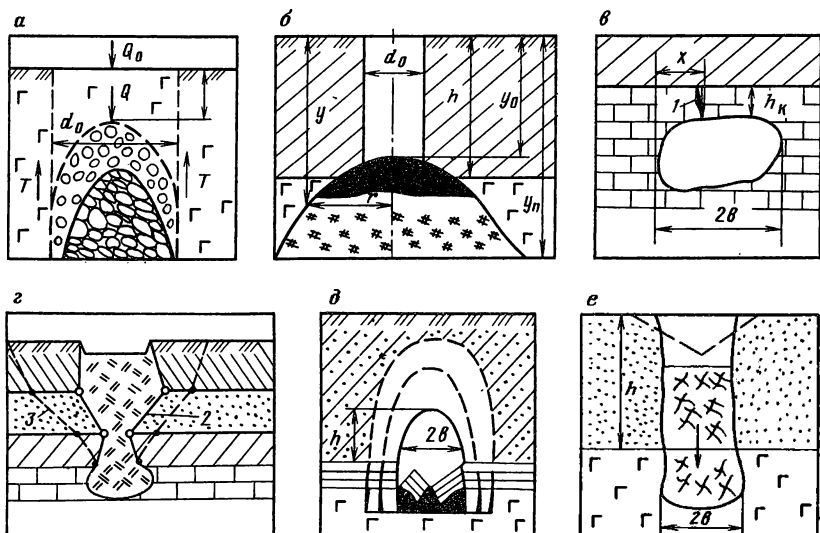


Рис. 5.6. Схемы образования провалов (к табл. 5.4):
 1 – трещины; 2–3 – линии (2 – обрушения, 3 – сдвигания)

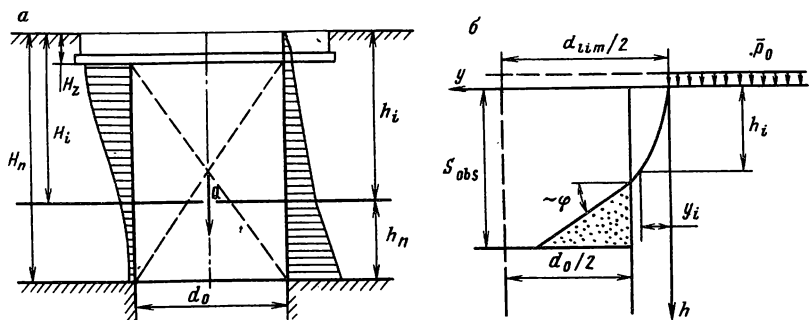


Рис. 5.7. Расчетные схемы для определения первоначального (а) и предельного (б) диаметров карстового провала в основании сооружения

В расчете учитывается равномерно распределенная нагрузка от одного или нескольких сооружений, расположенных в пределах зоны влияния, их форма и размеры в плане, глубина заложения фундаментов H_z , взаимное расположение сооружения и провала.

Первоначальный диаметр провала определяется по формуле

$$d_0 = \frac{4 \sum (c_j h_j + \Sigma \Delta f_i)}{q_i},$$

где h_j – толщина j -го слоя грунта с заданными значениями удельного сцепления c_j , угла внутреннего трения φ_j и плотность γ_j ; $\Delta f_i = (\alpha_i p_0 + \Sigma (\gamma_i \Delta h_i + \gamma_j \Delta h_j)) / (2K_j \operatorname{tg} \varphi_i \Delta H_j)$; $K_j = 1 - \sin \varphi_i$; $q_i = \alpha_j p_0 + \gamma_j \Delta h_j + \Sigma (\gamma_i \Delta h_i)$;

q_i – среднее давление под подошвой фундамента, вычисляемое с учетом природного давления в грунте; α – коэффициент распределения напряжений по глубине основания; p_0 – напряжение по подошве фундамента; i – номер слоя грунта, залегающего над слоем j .

Суммирование производится до глубины кровли H_n карстующихся пород или вторичных полостей (в покровной толще).

Предельный диаметр провала по подошве фундамента определяют по формуле (см. рис. 5.7, б)

$$d_{lim} = 2 \left\{ \frac{2y_i}{n} + \left[\left(\frac{\Sigma y_i}{n} \right)^2 - \frac{\Sigma y_i^2}{n} + \frac{d_0^2 S_{obs}}{4E \Delta h_i} \right]^{1/2} \right\}$$

где n – число рассчитываемых элементарных слоев грунта; S_{obs} – видимая глубина провала, принимаемая равной высоте полости, свободной от плотного заполнителя; Δh_i – толщина элементарных слоев грунта, которую рекомендуется принимать равной 0,1–0,25 м; y_i – ордината поверхности устойчивого склона борта провальной формы на глубине h_i , вычисляемая по формуле

$$y_i = \Sigma \left[\Delta h_i \left(\operatorname{tg} \varphi_i + \frac{c_i}{p_0 + \Sigma \gamma_i \Delta h_i} \right) \right].$$

При этом очертание устойчивого склона борта провальной воронки определяется в прямоугольной системе координат h – y с началом в произвольной точке на земной поверхности или под фундаментом сооружения.

Оба расчета рекомендуется выполнять на ЭВМ.

Физическое моделирование процессов провалообразования

В 1984 г. в СССР был разработан методический документ по использованию физического моделирования для изучения процессов провалообразования, отразивший опыт начального этапа проведения этих работ в Дзержинской карстовой лаборатории. Основная цель этого

этапа исследований – выявление основных закономерностей механизма провалообразования в отдельных элементах геологического разреза над карстовой полостью. Результаты исследований изложены в гл. 3, а также (более подробно) в работах [4, 21, 38].

В настоящее время в Дзержинской карстовой лаборатории начат второй этап экспериментальных исследований механизма провалообразования, основная цель которого – выявление закономерностей процессов сдвижения грунтов в многослойной толще и формирования провальных форм на поверхности земли. Были использованы стержневая модель и модели с использованием искусственных материалов (аналоговые модели). При этом лабораторное моделирование дополнялось специальными натурными обследованиями провалов [23, 36]. Ввиду того, что второй этап исследований в настоящее время не закончен, результаты его будут опубликованы позднее.

Из общей теории инженерно-геологического моделирования [30] хорошо известно, что максимальное соответствие физической модели геологического процесса его реальному прототипу достигается в ходе натурального эксперимента. Однако в силу сложности и недостаточной разработанности методики экспериментального воспроизведения карстового провалообразования в натуре в настоящее время для этой цели более доступен лабораторный эксперимент. В связи с недостаточной изученностью механизма карстового провалообразования его лабораторное моделирование лучше осуществлять на плоских экспериментальных установках с прозрачной стенкой, которые дают возможность прямого наблюдения и фиксации общей картины протекания имитируемых процессов. Объемные модели и соответствующие экспериментальные установки имеют ряд преимуществ перед плоскими в отношении более полного соответствия природным условиям. Однако практика лабораторного физического моделирования на плоских установках (в том числе при решении задач в горном деле) показывает, что оно вполне приемлемо с точки зрения точности эксперимента при всестороннем учете возникающих в ходе опыта специфических погрешностей.

Метод эквивалентных материалов, с помощью которого осуществляется моделирование карстово-обвального провалообразования, широко используется в горном деле. Он основан на применении в качестве материалов модели некоторых веществ, физико-механические свойства которых находятся в определенных соотношениях со свойствами имитируемых горных пород. Для скальных пород эти соотношения (критерии подобия) имеют вид:

$$(R_p)_M / \gamma_M L_M = (R_p)_N / \gamma_N L_N; \quad (5.8)$$

$$(R_c)_M / \gamma_M L_M = (R_c)_N / \gamma_N L_N, \quad (5.9)$$

где R_p – сопротивление одноосному растяжению материала модели и пород натуры; γ – плотность; L – линейный размер; R_c – сопротивление одноосному сжатию; индексы "M" и "N" относятся соответственно к модели и натуре.

Для глинистых пород используют следующие критерии подобия:

$$c_M/\gamma_M L_M = c_N/\gamma_N L_N; \quad (5.10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_M = \operatorname{tg} \varphi_N, \quad (5.11)$$

где c – удельное сцепление материалов; φ – угол внутреннего трения.

Для песчаных пород можно использовать только второй критерий подобия.

В случае, когда на модели воспроизводится многослойная толща горных пород, для всех слоев должно соблюдаться условие:

$$\gamma_M/\gamma_N = \operatorname{const}. \quad (5.12)$$

При моделировании на эквивалентных материалах фактор времени обычно не учитывается. Для приближенного расчета иногда используется формула

$$t_N \approx t_M \sqrt{L_N/L_M},$$

где t_M и t_N – время на модели и в натуре.

В СССР для лабораторного физического моделирования карсто-во-обвального провалообразования с помощью эквивалентных материалов разными исследователями использовалось экспериментальное оборудование разной конструкции [4, 18], имеющее, однако, и общие черты. В целом, любой плоский стенд, предназначенный для этих целей, представляет собой жесткую прямоугольную раму, состоящую из днища и торцевых стенок, на которой закреплены прозрачная передняя (как правило, съемная) и задняя (как правило, разборная) стенки. Внутренние поверхности передней, задней, торцевых стенок и днища образуют рабочую камеру, заполняемую эквивалентными материалами. Такая универсальная конструкция представлена на рис. 5.8.

Стенд может быть оснащен усиливающими элементами (например, ребрами жесткости), а также дополнительными устройствами, предназначенными для: 1) замера деформаций; 2) передачи нагрузки сверху; 3) имитации растущей или внезапно возникающей карстовой полости. Конструкция последнего устройства варьирует в очень широких пределах, вплоть до отсутствия этого устройства как такового, когда полость вручную вырезают в эквивалентном материале.

Согласно данным, приведенным в фундаментальной работе английского исследователя Б. Стимпсона (1970), в мире накоплен огромный опыт использования различных веществ в качестве эквивалент-

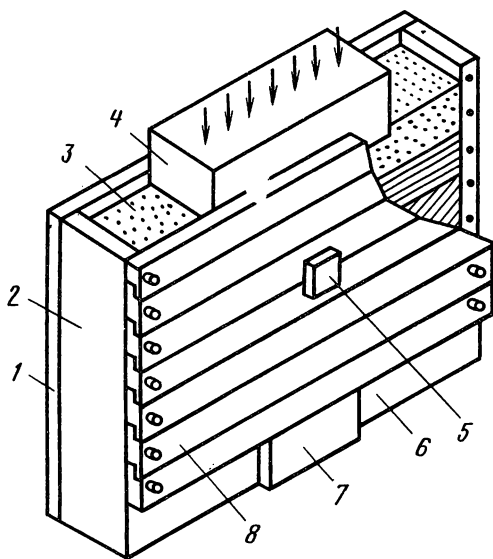


Рис. 5.8. Стенд для моделирования карстово-обвального провалообразования (вид сзади с частичным вырезом задней стенки):

1 — прозрачная передняя стенка; 2 — торцевая стенка; 3 — рабочая камера, заполненная материалами модели; 4 — устройство для передачи дополнительного давления сверху; 5 — устройство для замера деформаций модели; 6 — днище; 7 — устройство для имитации карстовой полости; 8 — съемная доска задней стенки

ных материалов. В СССР для моделирования карстово-обвального провалообразования в основном используются несцементированные и сцементированные зернистые материалы. При этом, в роли зернистых компонентов выступают песок, тальк, молотые слюды, сухие порошкообразные глины, опилки и т.п., а в роли цементирующих (вяжущих) веществ — гипс, негашеная известь, вещества типа парафина, различные клеи, масла, вода и т.п.

Эквивалентные материалы подбирают так, чтобы их свойства соответствовали необходимым критериям подобия с учетом выбранного масштаба моделирования, согласно формулам (5.8–5.12). Подбор свойств эквивалентного материала может осуществляться только тогда, когда он состоит из нескольких компонентов, причем в слово "компонент" в разных случаях вкладывается разный смысл. В то время как компонентом несцементированного зернистого материала является одно из составляющих его зернистых веществ, компонентом сцементированного целесообразно считать одно из зернистых веществ, смешанное с определенным количеством вяжущего (в зависимости от целей моделирования). В качестве эквивалентных материалов могут использоваться смеси, состоящие из двух и более компонентов, однако оптимальным следует считать трехкомпонентный состав [38].

Технология самого эксперимента и особенно его подготовки зависит не только от конструкции экспериментального оборудования, но и от того, какого рода смеси используются в качестве материалов модели. Это могут быть материалы: 1) типа бетона; 2) сцементирован-

ные вяжущими, твердеющими при охлаждении клеями; 3) цементированные вяжущими, твердеющими при комнатной температуре клеями; 4) цементированные нетвердеющими вяжущими клеями; 5) нецементированные или слабоувлажненные (цементированные водой) материалы. Обычно эквивалентные материалы первых трех типов применяются для имитации скальных и твердых глинистых, четвертого – пластичных глинистых, а пятого – песчаных и крупнообломочных пород. Эквивалентные материалы двух последних типов могут использоваться многократно.

В целом, применение метода эквивалентных материалов для физического моделирования процессов формирования карстово-обвальных провалов дает весьма обнадеживающие результаты. С его помощью можно осуществлять локальные прогнозы в пределах конкретных строительных площадок [18] и региональные прогнозы, учитывающие пространственные и временные изменения основных факторов провалообразования [38].

Моделирование карстово-суффозионного и смешанного провалообразования проводится с целью: 1) оценки опасности естественных и искусственных изменений гидрогеологической обстановки, способных привести к провалообразованию; 2) оценки эффективности противокарстовых мероприятий, направленных на изменение фильтрационно-гидродинамического режима подземных вод; 3) прогнозирования размеров карстово-суффозионных и смешанных провалов. Чаще всего в этих случаях речь идет об оценке карстовой опасности техногенного происхождения.

Метод физического гидрогеологического (лоткового) моделирования, предназначенный для лабораторной имитации карстово-суффозионного и смешанного провалообразования, издавна применяется в практической гидрогеологии [5]. В его основе лежит использование специальных гидравлических установок (грунтовых лотков), заполняемых водопроницаемыми зернистыми материалами и воспроизводящих в уменьшенном масштабе область фильтрации подземных вод. При этом фильтрационно-гидродинамические параметры модели и природы должны быть связаны между собой следующим соотношением:

$$\mu_M L_M / (t_M k_M) = \mu_N L_N / (t_N k_N),$$

где μ_M и μ_N – коэффициенты водоотдачи материала модели и пород природы; k_M и k_N – соответствующие коэффициенты фильтрации.

Если в качестве материала модели используются породы природы, фильтрующей жидкостью служит вода приблизительно той же температуры, что и в природных условиях, а в задачи эксперимента не входит учет фактора времени, основным условием моделирования остается геометрическое подобие модели натурному объекту.

Конструкции экспериментальных установок, предназначенных для лабораторного физического моделирования карстово-суффозионного и смешанного провалообразования, отличаются большим разнообразием (Ю.В. Архидьяконских, 1971; А.С. Девдариани, 1960; В.С. Лукин, 1964; В.В. Толмачев и др., 1982; Т. Ногуши и др., 1969; В.А. Хоменко, 1981).

Одна из этих установок представлена на рис. 5.9. Она представляет собой прямоугольный лоток и имеет прозрачную переднюю, заднюю и боковые стенки, дно и две вставные перфорированные перегородки, закрепленные в вертикальных пазах передней и задней стенок. Над дном смонтирована специальная водоупорная система с устройством, позволяющим создавать в ней сквозную поперечную щель за счет выпадения утяжеленной вставки.

Средние части передней и задней стенок, водоупорная система и перфорированные перегородки образуют рабочую камеру, заполняемую материалами модели. Крайние левые и правые части передней и

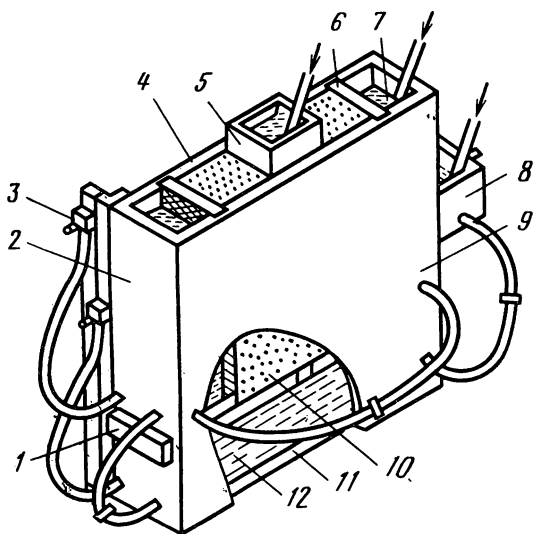


Рис. 5.9. Фильтрационная установка для моделирования карстово-суффозионного и смешанного провалообразования (вид сзади с частичным вырезом задней стенки):

1 — водоупорная система; 2 — боковая стенка; 3 — передвижной выпускной штуцер; 4 — прозрачная передняя стенка; 5 — устройство для имитации поступления воды извне; 6 — перфорированная перегородка; 7 — боковая камера, заполненная водой; 8 — передвижной напорный бак, заполненный водой; 9 — задняя стенка; 10 — рабочая камера, заполненная материалами модели; 11 — дно; 12 — нижняя камера, заполненная водой

задней стенок, верхние части боковых стенок, края водоупорной системы и перфорированные перегородки образуют две боковые водоприемные камеры, заполняемые фильтрующей жидкостью и связанные между собой резиновым шлангом. Правая боковая камера соединяется шлангами с выпускным штуцером и с нижней водопроницаемой камерой, образованной нижними частями передней, задней и боковых стенок, водоупорной системой и дном. Нижняя камера также заполняется фильтрующей жидкостью и соединяется шлангом со вторым выпускным штуцером и напорным баком, установленным на левой боковой стенке. Оба выпускных штуцера и напорный бак свободно перемещаются и фиксируются на вертикальных направляющих. Левая боковая камера и напорный бак оснащены системами подачи фильтрующей жидкости. Напорный бак имеет отдельный выпускной штуцер. Все соединительные шланги установки снабжены глухими зажимами.

В предлагаемом варианте экспериментальной установки, предназначенной для моделирования карстово-суффозионного и смешанного провалообразования, нижняя камера имитирует полость в карстующихся породах, заполненную водой с определенным пьезометрическим напором, а рабочая и боковые камеры – надкарстовый водоносный горизонт в вышележащих покрывающих дисперсных породах. Возникновение щели в водоупорной системе при совпадении отметок уровня воды в боковых камерах и напора в нижней можно интерпретировать двояко. С одной стороны, это можно рассматривать как выход полости на контакт с покрывающими породами при наличии в карстующихся и покрывающих породах единого водоносного горизонта. С другой – как появление сквозного нарушения в водоупоре, отделяющем надкарстовые воды от трещинно-карстовых.

В дальнейшем, если это необходимо, перемещением выпускных штуцеров и напорного бака можно промоделировать четыре различных ситуации, связанные с изменением уровня режима подземных вод: 1) снижение напора трещинно-карстовых вод при постоянном уровне надкарстовых; 2) подъем напора трещинно-карстовых вод при постоянном уровне надкарстовых; 3) снижение уровня надкарстовых вод при постоянном напоре трещинно-карстовых; 4) подъем уровня надкарстовых вод при постоянном напоре трещинно-карстовых. С помощью дополнительных устройств можно также имитировать поступление воды извне в покрывающие дисперсные породы при наличии или отсутствии в них постоянных водоносных горизонтов.

В последние годы были предприняты интересные попытки совместить на одной модели гравитационные и гидродинамические разрушения дисперсных пород, перекрывающих карстовые полости [1]. При этом использовались разные приемы. Один из наиболее интересных приемов – имитация фильтрационного разрушения водонасы-

ценных песчаных пород нисходящим подземным потоком и выноса их в нижележащие карстовые полости с помощью сухого сыпучего песка. Это открывает новые возможности на пути дальнейшего совершенствования методики лабораторного физического моделирования смешанного (карстово-суффозионно-обвального) провалообразования.

Несмотря на интересные результаты физического моделирования процесса провалообразования, к ним следует относиться достаточно осторожно с точки зрения прогноза конкретных параметров провалообразования, так как структурно-геологические условия и зависящие от них геомеханические и физические свойства грунтов при инженерных изысканиях трудноопределимы.

Экспериментальные исследования должны использоваться преимущественно для выявления качественно принципиальных закономерностей и эффектов, которые необходимо учитывать в расчетных схемах.

К численным параметрам карстовых провалов (диаметр, глубина и т.п.), полученным экспериментальным путем, следует, на наш взгляд, относиться как к сугубо ориентировочным.

Для анализа механизма провалообразования в карстовых районах интересно использовать опыт экспериментальных работ по изучению образования провалов над горными выработками, проводимых во Фрайбергской Горной Академии [42].

Ю. Фенк применял плоский стенд со стеклянной вертикальной стенкой, ширина которой позволяла фиксировать провал на поверхности в виде полуобъемного тела (с продольным разрезом по оси провала). Для моделирования деформаций слоев связных и несвязных грунтов в качестве эквивалентных материалов были использованы песчаный и глинистый материалы (рис. 5.10).

На основании экспериментальных исследований Ю. Фенк сделал следующие общие выводы: 1) вероятность возникновения провалов уменьшается с увеличением глубины полости и увеличением мощности вышележащих слоев, особенно связных пород; 2) при наличии водоупора снижение уровня грунтовых вод над водоупором повышает вероятность образования провала.

Применительно к конкретным геологическим условиям, воспроизводимым на модели, автор предложил формулы для определения параметров провалов:

$$P_B = \exp - [0,08 (H - 15) + 0,20M_k + 0,17 (\max M_b)];$$

$$t_B = 93,105 P_B^{0,07} - 69;$$

$$d = 4,04 \sqrt{V_B/H} \text{ (при } 5,4 \text{ м} \leq \max M_b \leq 18,5 \text{ м)};$$

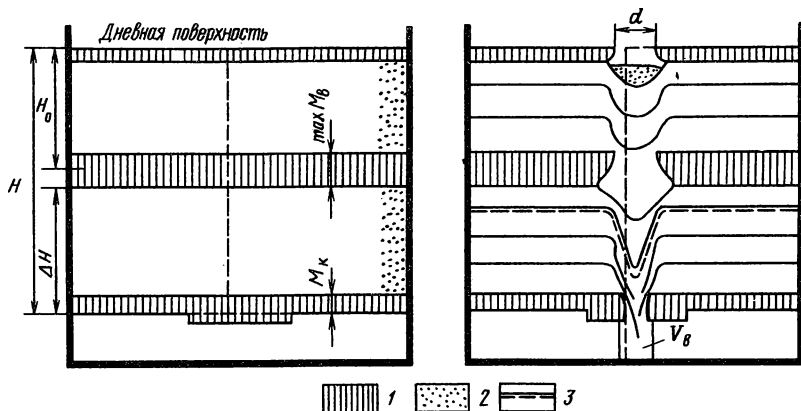


Рис. 5.10. Принципиальная картина механизма образования провала над подземной полостью, полученная на модели (по Ю. Фенку):

1, 2 – грунты (1 – связный, 2 – несвязный); 3 – маркирующий горизонт

$$d \approx 2,95 \sqrt{V_B/H \left(1 + \frac{\max M_b}{H}\right)} \quad (\text{при } \max M_b \leq 4,8 \text{ м}),$$

где P_B – условная вероятность проявления полости на поверхности земли в виде провала; t_B – время образования провала после обрушения кровли полости; V_B – объем первичной полости, приведшей к обрушению; M_k – мощность слоя, перекрывающего полость; $\max M_b$ – максимальная мощность связного грунта в покровной толще.

Вероятностно-статистические методы прогноза карстовых провалов

Основные закономерности. Прогноз параметров карстовых провалов с использованием методов теории вероятности и математической статистики во многих случаях наиболее объективен и эффективен, а при применении результатов прогноза в практике проектирования сооружений также и наиболее целесообразен. Это можно объяснить следующими причинами.

Как уже было показано выше, карстовый процесс вообще и образование карстовых провалов в частности определяются большим числом случайных факторов. В связи с этим параметры карстовых провалов (частота образования, объем, размеры и т.п.) имеют ярко выраженный стохастический характер.

Карстопроявления в виде провалов легко поддаются статистической обработке (дискретность образования, достаточно большой период сохранности на поверхности земли, близость формы провалов в плане к кругу, более или менее четкий контур). Провалы, как правило, образуются над карстовыми полостями, которые достигали определенных (критических) размеров и (или) объемов.

В настоящее время в практике инженерных изысканий сложилось такое положение, что во многих инженерно-геологических и производственных условиях карстовые полости не могут быть зафиксированы с достаточной надежностью. В этих случаях приходится вести проектирование в условиях той или иной неопределенности с использованием величины вероятности образования провалов, объективно характеризующих эту неопределенность.

Выражение карстовых воздействий на сооружения с помощью вероятностных характеристик находится в полном соответствии с действующими СНиП 2.02.01–83.

Некоторые параметры карстовых провалов можно определять методами математической статистики с использованием соответствующих данных по ранее происшедшим провалам (эпигнозические оценки).

Таким образом, прогнозу параметров карстовых провалов на заданный срок на данной территории непосредственно по эпигнозическим оценкам, должны предшествовать доказательства того, что факторы, влияющие на определенный параметр провала, в прогнозный и эпигнозный периоды можно считать квазиоднородными. Один из важных параметров карстовых провалов – показатель интенсивности образования провалов λ , впервые предложенный З.А. Макеевым:

$$\lambda = \frac{n}{At} \quad (5.13)$$

где n – число провалов, происшедших на площади A (км²) за время t лет.

Математическое ожидание величины λ должно оцениваться в зависимости от объема выборки и требуемой надежности получения информации [24]. Следует заметить, что в практике изысканий имеют место случаи, когда значение λ определяется без оценки надежности полученных результатов и доверительных интервалов вне зависимости от числа лет наблюдений. Это нередко приводит к ошибкам, ведущим, как правило, к существенной недооценке карстоопасности.

Площадь A в формуле (5.13) определяется заданными границами территории (города, промышленного предприятия и т.д.).

В настоящее время разработаны методы выделения границ территорий с целью дифференцированного определения значений λ на основе выявления:

а) квазиоднородных участков с использованием теории качественных признаков и теории информации [33];

б) закономерностей распределения провалов на поверхности земли с использованием теории точечных процессов, методов скользящего кружка, анализа расстояний удаленности и т.д.

Сущность и краткий анализ этих методов изложен в работах [33, 36].

В 1968 г. было установлено, что образование карстовых провалов во времени подчинено закону Пуассона [33]. В соответствии с этим применительно к единице площади территории вероятность образования в год X практически независимых между собой провалов равна

$$P(X) = \exp(-\lambda) \lambda^X / X!$$

Это положение подтверждается полевыми наблюдениями за образованием карстовых провалов в различных регионах. К такому же выводу сравнительно недавно пришли американские исследователи [49].

Характерная особенность распределения Пуассона заключается в том, что математическое ожидание MX и дисперсия σ^2 равны параметру распределения λ .

Это обстоятельство позволяет, имея карты основных, практически независимых между собой факторов, влияющих на интенсивность образования провалов, методом дисперсионного анализа определять показатель интенсивности провалов на любой площади исследуемой территории, характеризующейся определенным сочетанием значений природных факторов. Методика такого определения достаточно подробно изложена в работе [33].

Вероятность образования X провалов за время t на площади A с интенсивностью провалов λ :

$$P(X) = \exp(-\lambda At) \frac{(\lambda At)^X}{X!}.$$

Вероятность того, что на данной территории в заданное время не произойдет ни одного провала ($X = 0$), равна

$$P_0 = \exp(-\lambda At).$$

Эта величина носит название надежности.

Вероятность появления хотя бы одного провала на данной территории за время t составит

$$P = 1 - P_0.$$

В настоящее время вероятностно-статистические методы применяются также для прогноза диаметров провалов. Давно подмечено,

что диаметры карстовых провалов подчинены определенным статистическим закономерностям. Впервые эмпирические графики распределения (дифференциальные и интегральные кривые) были построены для карстового района г. Дзержинска в целом и для отдельных его участков в 1962 г. И.А. Саваренским. Вероятностно-статистические методы прогноза размеров карстовых провалов отражают объективные закономерности и соотношения, существующие на той или иной площади исследуемой территории. Перед изыскателями и проектировщиками стоит задача повышения степени объективности вероятностно-статистических методов при прогнозе размеров провалов применительно к отдельным участкам на исследуемой территории.

Целесообразно строить кривые распределения диаметров провалов в целом и кривые распределения диаметров относительно свежих провалов (рис. 5.11). Очевидно, большинство измеренных диаметров провалов, на основании которых строится кривая 2, находятся в интервале $d_{lim} < d_{var_2} < d_{st}$, а провалов, измеренных для кривой 1 – в интервале $d_0 \leq d_{var_1} \leq d_{lim}$. Здесь d_0 , d_{lim} , d_{st} – диаметры провалов соответственно первоначальных, с предельно устойчивыми и практически стабильными откосами. Ранее было показано [33], что распределения диаметров провалов на сравнительно больших территориях подчиняются логарифмически нормальному закону

$$p(d) = \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(\lg d - \overline{\lg d})^2}{2\sigma_1^2}\right). \quad (5.14)$$

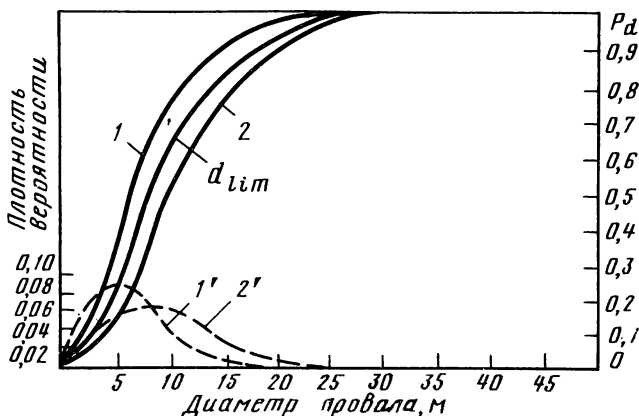


Рис. 5.11. Кривые распределения диаметров провалов.

Сплошной линией даны интегральные кривые (P_d), пунктирной – кривые плотности

Доказано также, что чем однороднее территория с точки зрения постоянства факторов, влияющих на диаметр карстовых провалов, тем в большей степени распределения диаметров приближаются к нормальному закону распределения:

$$p(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(d - \bar{d})^2}{2\sigma_2^2}\right). \quad (5.15)$$

При этом коэффициенты вариации V , характеризующие степень рассеивания данных вокруг средних, уменьшаются.

В формулах (5.14) и (5.15) $\lg d$ и d – значения математических ожиданий логарифмов диаметров и диаметров провалов, σ_1 и σ_2 – значения среднеквадратических отклонений соответственно логарифмов диаметров и диаметров. Характерным примером этого могут служить полигоны распределений диаметров провалов, построенных для территории в карстовом районе г. Дзержинска, где последовательно фиксировались значения природных факторов, влияющих на диаметр карстовых провалов (рис. 5.12).

Вид кривой распределения диаметров провалов в определенной мере отражает механизм образования карстовых провалов. Как известно, логнормальное распределение случайной величины x связано с "эффектом пропорциональности", когда дифференциальным элементом, представляющим изменение x , является не dx , а скорее dx/x [19]. Применительно к кривой распределения диаметров провалов этот эффект пропорциональности можно истолковать следующим образом.



Рис. 5.12. Полигоны распределения диаметров воронок на территориях с последовательной фиксацией значений природных факторов в карстовом районе г. Дзержинска:

1 – зафиксировано значение одного фактора ($V = 0,61$); 2 – двух факторов ($V = 0,50$); 3 – трех факторов ($V = 0,32$); 4 – четырех факторов ($V = 0,25$). V – коэффициент вариации

Исходя из механизма карстовых провалов, можно судить, что на размер на поверхности земли определяется прежде всего размером (объемом) карстовой полости в карстующихся породах. Из двух полостей разных размеров при проявлении их на поверхности земли в виде провалов, для большей полости вероятность образования провалов большего размера больше, чем для полости меньшего размера. Очевидно, именно по этой причине в рассмотренном примере на территориях, где природные факторы (глубина залегания карстующихся пород, особенность геологического разреза над карстующимися породами, толщина кровли карстующихся пород), которые в известной мере определяют размер полости, последовательно фиксировались, кривые распределения диаметров провалов приближались к нормальным кривым, а коэффициенты вариации уменьшались.

Ввиду того, что при построении кривой распределения диаметров относительно свежих провалов используются значения $d_0 \leq d_{var_1} \leq \leq d_{lim}$, а при построении подобной кривой для старых провалов $d_{var_2} \geq \geq d_{lim}$ представляется, на наш взгляд, целесообразным построение некоторой промежуточной кривой распределения диаметров провалов. Она в большей степени будет приближаться к распределению d_{lim} . Истинное положение кривой распределения d_{lim} зависит от соотношения скоростей развития провальной формы на различных стадиях ее развития. Вопрос о положении d_{lim} относительно d_{var_1} и d_{var_2} в статистическом аспекте требует постановки специальных исследований для конкретных закарстованных территорий.

Возможен подход, когда на территории имеется большое число провалов, и, следовательно, непосредственное определение для каждого провала значения d_{lim} вряд ли будет оправданным.

В этом случае можно предположить, что $d_{lim} \approx \frac{d_{var_1} + d_{var_2}}{2}$.

Величины d_{var_1} и d_{var_2} зависимы друг от друга: $d_{var_1} < d_{var_2}$. Для рассматриваемой закарстованной территории в целом они статически связаны между собой зависимостью $d_{var_2} = \eta d_{var_1}$, где η — эмпирический коэффициент, зависящий от d_{var_1} . Например, зависимость между d_{var_1} и d_{var_2} для карстового района г. Дзержинска имеет вид, показанный на рис. 5.13. Следовательно, имеются две зависимые случайные величины d_{var_1} и d_{lim} ($d_{var_1} < d_{lim}$), первая из которых имеет плотность распределения логнормального или нормального закона с ранее определенными параметрами, а вторая связана с нею функциональной монотонной зависимостью. Таким образом, для определения закона распределения второй случайной величины, т.е. d_{lim} , следует использовать формулу для закона распределения монотонной функции одного случайного аргумента.

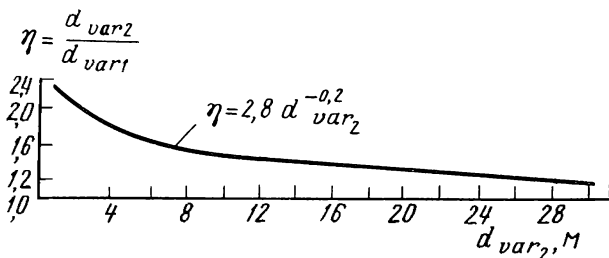


Рис. 5.13. Взаимосвязь диаметров молодых и старых провалов в одном из карстовых районов г. Дзержинска

Вид интегральной кривой распределения d_{lim} для рассматриваемого примера показан на рис. 5.11.

Знание распределения диаметров провалов d_{lim} позволяет более экономично назначать параметры проектирования конструктивной защиты зданий и сооружений. Знание вероятностных закономерностей провалообразования дает возможность решать целый комплекс инженерно-геологических, инженерных и экономических задач.

Одна из основных инженерно-геологических задач при строительстве в карстовых районах – оценка карстовой опасности и оценка параметров противокарстовой защиты. Подробное изложение способов оценки карстовой опасности с использованием вероятностно-статистических методов проведено в работе [36]. Поэтому здесь даются лишь принципиальные зависимости и краткие к ним пояснения.

За критерий карстоопасности территория для целей промышленного и гражданского строительства целесообразно принимать надежность территории, т.е. вероятность того, что территория площадью A за заданное время (например, за расчетное время эксплуатации сооружения t_n) не будет поражена карстовыми провалами диаметром, не превышающим некоторый размер d_r :

$$P_a = \exp[-\lambda A t_n (1 - P d_r)]. \quad (5.16)$$

Значение $P d_r$ определяют по интегральной кривой распределения диаметров провалов. В свою очередь d_r назначается в зависимости от вида сооружений и их конструктивных особенностей.

Зависимость (5.17) служит основой для определения надежности отдельных сооружений, комплекса застройки, линейных сооружений.

Использование вероятностных категорий в оценке карстоопасности позволяет преодолеть те противоречия, которые возникли в инженерном карстоведении в связи с существованием в практике как качественных, так и количественных методов оценки карстовой опасности. Как известно, во многих случаях исходная информация

отсутствует или недостаточна для формализованного определения вероятности поражения территории или сооружений карстовыми провалами. Инженерная же практика требует выражения карстоопасности числом, хотя бы ориентировочно. Здесь на помощь может прийти физиологический аспект категории вероятности, который, как известно, используется в теории экспертных оценок.

В этом случае вероятность карстовых деформаций оценивается группой специалистов-экспертов с учетом имеющейся разнообразной геологической, геофизической, карстологической и другого рода информации. При этом чем на большее число квазиоднородных элементов разделены изучаемые условия и чем корректней поставлен вопрос перед экспертами, тем объективнее будет назначено значение вероятности образования провалов при том или ином сочетании ученных факторов и условий. В практике специалисты нередко используют интуитивно этот прием, например, назначая так называемые категории устойчивости в отношении возможности образования карстовых провалов, хотя непосредственно и не используя при этом численного определения вероятности.

Таким образом, перед исследователями стоит проблема создания методики вероятностной оценки на основе теоретических разработок в области принятия решений и исследований карстового процесса.

Ценность выражения карстоопасности через вероятность заключается в том, что величина вероятности может быть использована непосредственно в инженерных и технико-экономических расчетах.

Оптимальный объем противокарстовых мероприятий может быть определен по минимуму средневероятных приведенных затрат:

$$M = I + C + (1 - P_0) UK_n,$$

где I – приведенная стоимость изыскательских и проектных работ (с учетом времени их проведения); C – стоимость противокарстовых мероприятий, увеличивающих надежность сооружений до P_0 ; U – ущерб от повреждения сооружений вследствие карстовых провалов; $K_n = 1/(1 + E_{н,п})^t$ – коэффициент приведения отдаленных во времени затрат; $E_{н,п}$ – норматив для приведения разновременных затрат.

Использование в практике изысканий и проектирования средневероятных приведенных затрат позволяет объективно подходить к планированию освоения закарстованных территорий на всех стадиях (технико-экономическое обоснование, сравнение вариантов, определение плотности и этажности застройки, выбор вида и объема изысканий на карст и противокарстовой защиты, назначение технологических и эксплуатационных ограничений).

По минимуму средневероятных приведенных затрат также целесообразно выбирать оптимальный вариант трассы линейных сооружений, проходящих по закарстованной территории.

При размещении на закарстованных территориях некоторых сооружений (железные дороги, здания повышенной этажности и т.д.) имеется определенный риск аварий и катастроф. В то же время требовать абсолютного исключения вредного влияния карста на сооружения во многих случаях нецелесообразно. Используя вероятностные методы, в принципе можно более обоснованно определять допустимый уровень надежности, с точки зрения обеспечения оптимальной безопасности людей. В настоящее время такие проблемы ставятся и решаются в строительной механике.

Вероятностные методы позволяют оценивать и степень опасности отдельных карстовых полостей. Критерием такой оценки может быть также надежность – вероятность того, что в течение заданного времени карстовая полость не проявится на поверхности земли в виде провала.

Точность этого прогноза может быть существенно повышена, если окажется возможным оценивать надежность полостей с учетом их размеров, условий развития и конкретного механизма провалообразования, определяемого на детерминированных моделях. Эта, на наш взгляд, исключительно сложная задача еще требует своего разрешения.

Очевидно, для ее решения целесообразно воспользоваться опытом исследователей в области горного дела [42].

Вероятностные методы эффективны как при изысканиях, так и при проектировании сооружений в карстовых районах. Одни и те же параметры вероятностной оценки в равной мере могут использоваться и инженерами-геологами, и инженерами-строителями, что чрезвычайно важно для их взаимопонимания.

Методология вероятностных методов такова, что они позволяют беспредельно уточнять точность прогнозов по мере учета разнообразных данных. Примером тому может быть, например, учет направленности провалообразования.

Математико-статистические методы анализа направленности провалообразования

Во Фрайбергской Горной Академии разработана методика вероятностно-статистического анализа образования карстовых провалов на основе статистики точечных процессов (Ф. Ройтер, Д. Стоян, П. Оляйкевич, 1981).

При этом карстовые провалы различных диаметров на поверхности земли представлялись в виде точек на плоскости, местоположение которых соответствовало центрам провалов. Расположение точек относительно друг к другу принималось случайным, т.е. независимым (в статистическом, но не в геологическом смысле).

Ориентацию провалов (рис. 5.14) предлагается характеризовать через плотность ориентации $O(\alpha, r_1, r_2)$, представляющей собой число точек в секторе с центром в точке x и с углом раствора α . . $\alpha + d\alpha$. При этом учитываются те точки, которые располагаются на некоторых расстояниях от r_1 до r_2 (содержательный смысл r_1 и r_2 см. ниже). Максимальные значения плотности ориентации указывают преобладающие направления образования провалов (рис. 5.15). Геологический анализ участков распределения провалов показал, что они хорошо коррелируются с основными направлениями трещиноватости в карстующихся породах.

Параметры модели поля провалов (рис. 5.16): минимально возможное расстояние между центрами провалов R_0, R_1 – радиус влияния провалов; параметр β , характеризующий степень взаимовлияния точек ($\beta > 0$ – характеризуют эффект "притяжения", $\beta < 0$ – отталкивание).

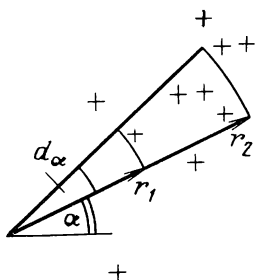


Рис. 5.14. Параметры плотности ориентации провалов

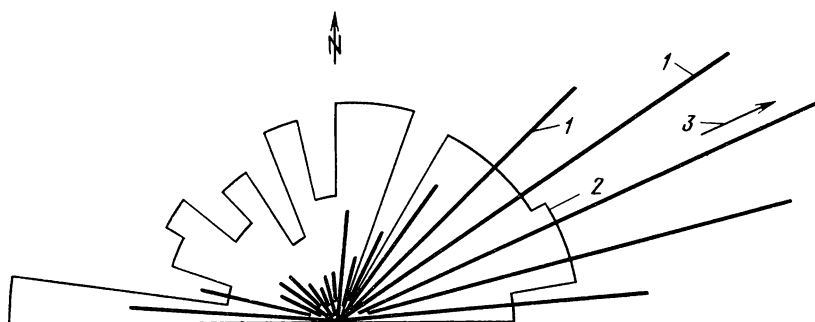


Рис. 5.15. Гистограммы распределения ориентации провалов:

1 – $r_1 = 0, r_2 = 500$ м; 2 – $r_2 = 125$ м; 3 – основное направление трещиноватости в карстующихся породах

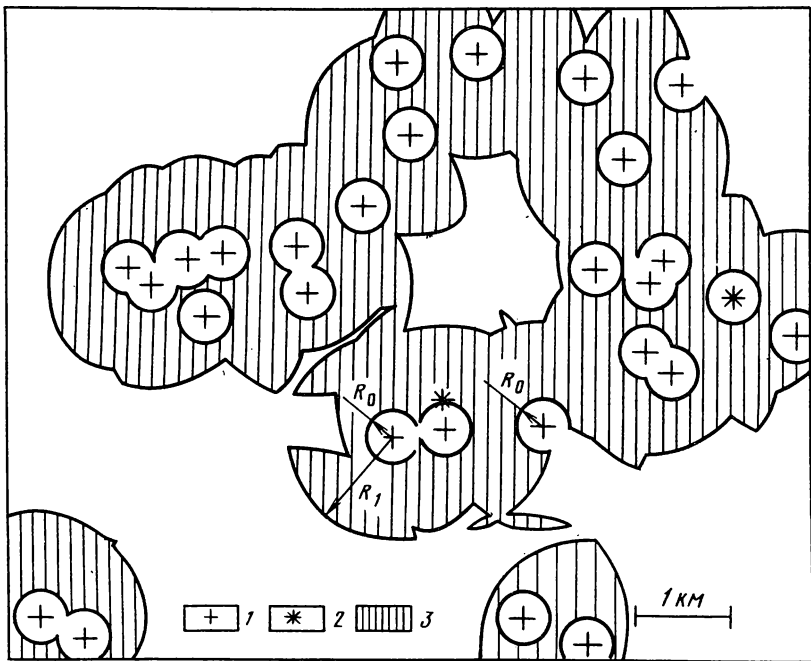


Рис. 5.16. Модель поля провалов:

1–2 – центры провалов (1 – старых, 2 – новых); 3 – поле карстовых провалов

Вероятность того, что при данных позициях точек x_1, \dots, x_n новая точка (провал) займет положение x_{n+1} , равна

$$P_{n+1} = \begin{cases} 0, & \text{если } l_s \leq R_0; \\ C, & \text{если } l_s > R_1; \\ C_{\text{exp}} (\beta N) & \text{в остальных случаях, где} \end{cases}$$

l_s – расстояние между рассматриваемыми точками; C – постоянная модели; N – число точек, расстояния до которых от $(n+1)$ – до провала находятся в пределах от R_0 до R_1 .

Параметры β , C , R_0 и R_1 определяются согласно специальной методике с учетом конкретной геологической ситуации.

5.4. Прогнозы карстовых оседаний

Карстовые оседания – это более или менее постоянные сдвигения горных пород на участках, где существует так называемый ”дефицит массы” (Ф. Ройтер, Х. Молек, Г. Судерлау и др.) – наличие полостей,

ослабленных вследствие суффозионных процессов зон в карстующихся или покровных породах.

Следует отметить, что закономерности оседаний над искусственными горными выработками изучены достаточно хорошо. Для оседаний же в карстовых районах, особенно в условиях суффозионных процессов, механизм их образования не имеет удовлетворительных решений.

Исследователи ГДР (Ф. Каммерер, 1962; Х. Бергер, 1968; К. Брендель, 1972) прежде всего выделяют оседания, связанные с такими процессами, как растворение поверхности карстующихся пород; растворение трещин в сульфатных породах ("пространственно-сеточная суброзия"); оползание грунта на склонах крупных провалов и котловин.

Однако в настоящее время дело до создания подробных общих моделей карстовых оседаний пока не дошло. Поэтому в каждом конкретном случае явление оседаний необходимо рассматривать с учетом конкретной геологической обстановки.

Основа прогноза карстовых оседаний – совместное картирование геолого-литологической ситуации и геоморфологических форм дневной поверхности с выделением типов мульд оседаний (ванно- или котлообразных). В связи с этим заслуживает внимания создание центральным Геологическим институтом ГДР атласа карт М 1:50000 и М 1:100000 для важных в народнохозяйственном отношении районов сульфатного и хлоридного карста. На картах обозначен характер опасности оседаний для строительных объектов.

Р. Шёне (1968) и К. Брендель (1972) создали методики анализа на основе фотоснимков трещин, образовавшихся на зданиях вследствие карстовых оседаний, которые позволяют делать выводы относительно интенсивности оседаний и степени их опасности для сооружений. А. Томас (1964) разработал способ построения векторного поля наклона горизонтальных конструкций сооружений с использованием простейших измерительных инструментов.

При достаточном числе точек наблюдения во времени и в пространстве оседания могут представляться в виде:

абсолютных значений оседаний по отдельным точкам измерений мульды оседаний;

наиболее характерных профилей оседаний;

диаграмм оседаний S во времени t (рис. 5.17, а), их скоростей dS/dt (рис. 5.17, б) и ускорений d^2S/dt^2 (рис. 5.17, в) отдельных точек;

изолиний равных оседаний и их скоростей, показанных на плане.

В теории оседаний над горными выработками хорошо оправдала себя модель К. Леманна. Как показали сопоставления оседаний в районах соляного карста и над горизонтальными горными выработками, во многом существует идентичность этих двух видов дефор-

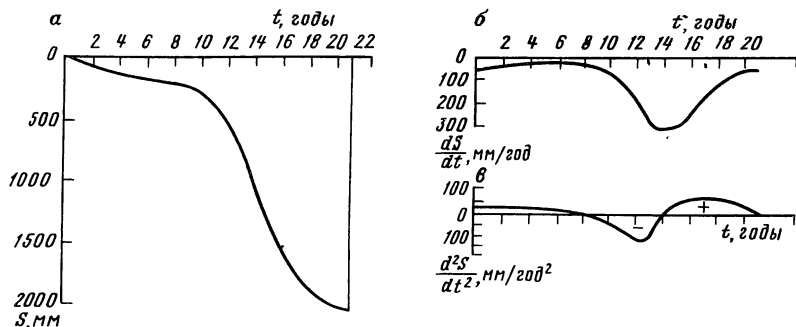


Рис. 5.17. Диаграммы параметров оседания центральной точки одной из мульд оседания в районе г. Эрдеборна (по Г. Судерлау, К. Бренделю, Ф. Каммереру, 1972)

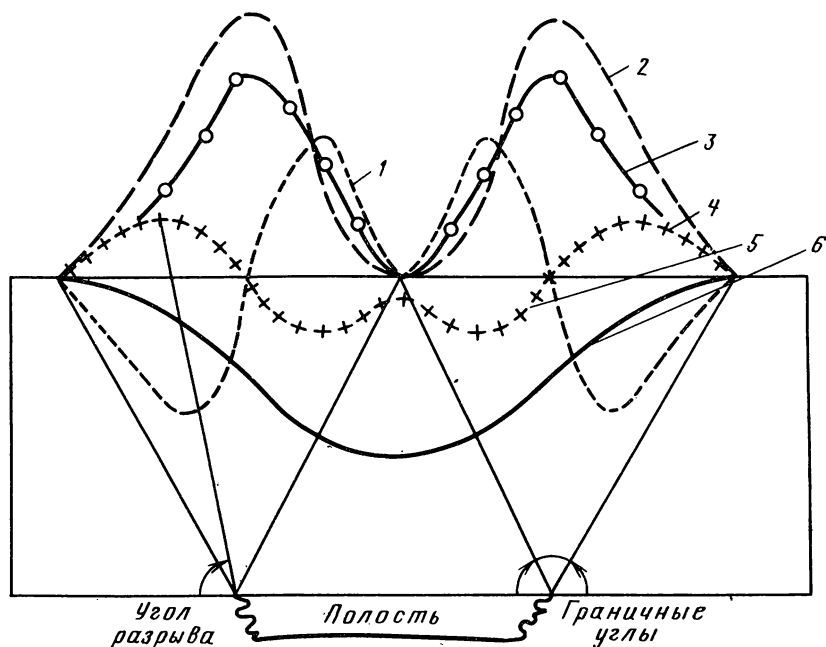


Рис. 5.18. Параметры мулды оседания над горизонтальными полостями больших пролетов и горизонтально расположенными плоскостями поверхностного растворения соляных пород:

1 — кривизна; 2 — горизонтальная составляющая; 3 — уклоны; 4 — растяжение; 5 — сжатие; 6 — оседание (вертикальная составляющая)

маций земной поверхности. Поэтому немецкими исследователями для прогноза карстовых оседаний над соляными породами была принята модель оседаний над искусственными выработками (рис. 5.18). Все параметры оседаний, показанные на рис. 5.18, важны для проектирования защитных мероприятий.

Наиболее опасные зоны в мульде оседания – краевые, которые испытывают растягивающие напряжения и связанные с ними деформации (трещины, резкие сдвигения и провалы).

ГЛАВА 6

ПРОТИВОКАРСТОВАЯ ЗАЩИТА

6.1. Специфика проектирования

Проектирование противокарстовой защиты должно носить системный характер, заключающийся в учете следующих обстоятельств:

- инженерно-геологические условия развития карста;

- стохастический или детерминированный характер карстопроявлений;

- вид и параметры карстовых деформаций;

- тип и конструктивные особенности проектируемых или эксплуатируемых сооружений;

- условия строительства и эксплуатации этих сооружений, особенно в области техногенных воздействий на условия развития карста;

- особенность и технология проведения изысканий в конкретных условиях проектирования;

- необходимость оптимальных условий защиты, с точки зрения экономии и допустимых уровней безопасности;

- экологические последствия от проведения противокарстовых мероприятий от повреждения сооружений карстовыми провалами.

Принцип такого проектирования условно назван нами как проектирование в рамках системы карст – сооружение. Реализация этого принципа при классификации противокарстовых мероприятий, назначении параметров противокарстовой защиты и оценки ее эффективности достаточно подробно изложены в работах [3, 32, 36]. В связи с этим ниже рассмотрены лишь отдельные вопросы, развивающие идею системного подхода при проектировании противокарстовой защиты в области характера воздействий различных карстопроявлений на различные сооружения. Кроме того, кратко освещается опыт специалистов ГДР в использовании этого подхода при проектировании противокарстовой защиты.

6.2. Характер воздействий и последствий карстовых деформаций на сооружения

Карстовые деформации при их образовании в основании сооружений могут по-разному воздействовать на работоспособность сооружения (системы). Используя терминологию теории надежности, назовем нарушения работоспособности сооружений отказами.

Воздействия карстовых деформаций на сооружения в процессе их эксплуатации по их характеру могут быть классифицированы согласно табл. 6.1 и 6.2.

Различные виды отказов могут вызывать различные последствия экономического и социального характера.

Целесообразна следующая классификация последствий отказов.

По масштабу экономических последствий.

А. Ущерб весьма значительный.

Б. Ущерб значительный.

В. Ущерб незначительный.

Таблица 6.1

Характер воздействия карстовых деформаций на сооружения

Вид отказа	Общая характеристика отказа	Разновидности отказов
I	Катастрофические разрушения и повреждения, приводящие к полному прекращению эксплуатации сооружения	1. Потеря общей устойчивости сооружения 2. Разрушение отдельных конструкций, не позволяющее эксплуатировать сооружение 3. Повреждение технологического оборудования, могущее привести к разрушению сооружения, недопустимому заражению местности вредными химическими, радиоактивными и др. веществами
II	Повреждения, приводящие к длительному прекращению эксплуатации сооружения	1. Недопустимый крен конструкций или сооружений 2. Работа конструкций в стадии, близкой к стадии разрушения 3. Достижение конструкциями размеров деформаций, создающих угрозу аварий или эксплуатации сооружений
III	Повреждения, приводящие к нарушению нормальной эксплуатации сооружений	1. Недопустимые деформации или разрушения отдельных элементов (конструкций) сооружений, требующие

Вид отказа	Общая характеристика отказа	Разновидности отказов
		уменьшения нагрузок, уменьшения скоростей движения и т.п. 2. Работа отдельных конструкций за пределами упругой стадии
IV	Повреждения, могущие (при определенных условиях) привести к временному затруднению нормальной эксплуатации или снижению долговечности сооружения	1. Образование недопустимого раскрытия трещин в железобетонных, бетонных и каменных конструкциях, не ведущих к снижению несущей способности 2. Недопустимые деформации, влекущие ограничение нормальной эксплуатации и поддающиеся исправлению в короткое время

Таблица 6.2

Возможные виды отказов в зависимости от видов карстовых деформаций в активной зоне оснований различных типов сооружений.

Тип сооружения	Провалы		Карстовые просадки	Локальные оседания	Неравномерные осадки в местах погребенных воронок, понижений кровли карстующихся пород и т.д.	Оседания
	малых размеров	больших размеров				
Каркасные здания на отдельно стоящих фундаментах	I/II	I/II	I/III	I/III	I/III	II/III
Каркасные здания с ленточными или плитными фундаментами (ростверками)	II/III	I/II	II/III	I/II	II/IV	II/III
Бескаркасные здания	II/III	I/II	II/III	II/IV	II/IV	III

Продолжение табл. 6.2

Тип сооружения	Провалы		Карстовые просадки	Локаль- ные осе- дания	Неравно- мерные осадки в местах по- ребенных воронок, понижений кровли карстующ- щихся по- род и т.д.	Оседания
	малых размеров	больших размеров				
Здания и сооруже- ния павильонного типа	I/II	I/II	I/III	I/III	II/IV	III
Здания и сооруже- ния башенного ти- па	I/II	I/II	I/II	I/II	I/II	I/III
Мостовые сооруже- ния						
Статически опреде- лимые	I/II	I/II	II/III	II/III	III/IV	III
Статически неопре- делимые	I	I	I/II	I/II	I/III	I/III
Железнодорожные пути:						
бесстыковые	I/II	I/II	I/II	I/II	II/III	I/II
стыковые	I/II	I/II	II/III	I/II	IV	III/IV
Автомобильные до- роги	I/II	I/II	II/III	II/III	III/IV	II/III
Магистральные тру- бопроводы	III/IV	II/III	IV	II/III	III	IV
Подземные сооруже- ния	I/III	I	II/IV	I	II/III	I/III

Примечания. I—IV — виды отказов. В числителе — пессимистический прогноз, в знаменателе — оптимистический прогноз

Таблица 6.3

**Прогнозируемый масштаб ущерба при условии карстовых деформаций
в основании сооружений**

Виды сооружений по их функциональному назначению	Вид отказа			
	I	II	III	IV
Здания и сооружения с производством или использованием высокотоксичных, взрывоопасных или радиоактивных веществ	1А	2Б	2В	3В
Основные здания и сооружения тепло- и гидроэлектростанций	2А	2А	3Б	3Б, В
Крытые спортивные сооружения с трибунами, крытые рынки, цирки и т.п.	1Б	3Б	3В	3В
Телебашни	1А	1Б	2В	3В
Мосты, путепроводы и тоннели на магистральных железных дорогах	1А	2Б	2Б	3В
Здания театров, кинотеатров, учебных заведений, больниц, вокзалов и т.п.	1Б	2Б	3В	3В
Высокие дымовые трубы	1А	3А	3Б	3В
Большие резервуары для нефти и нефтепродуктов	2А	2Б	3В	3В
Жилые, общественные и административные здания, кроме театров, кинотеатров, учебных заведений, больниц, вокзалов и т.д.	2Б	2В	3В	3В
Промышленные здания и сооружения, кроме сооружений с производством или использованием высокотоксичных, взрывоопасных или радиоактивных веществ, а также основных зданий и сооружений тепло- и гидроэлектростанций	2А	2Б	3В	3В
Железнодорожные пути и сооружения на перегонах магистральных дорог, метрополитены	1А	1А	3В	3В
Железнодорожные пути и сооружения на станциях, подъездные пути предприятий	2Б	2В	3В	3В
Тоннели, большие и средние мосты на автодорогах и в городах	2А	2А	3В	3В
Автомобильные дороги I и II категорий	2А	3Б	3В	3В
Автомобильные дороги III–V категорий	2Б	3В	3В	3В
Магистральные газо- и нефтепроводы	2Б	3Б	3В	3В
Взлетно-посадочные полосы аэродромов	1Б	3Б	3В	3В
Одноэтажные жилые дома	2В	2В	3В	3Б

Продолжение табл. 6.3

Виды сооружений по их функциональному назначению	Вид отказа			
	I	II	III	IV
Склады без процессов сортировки и упаковки	ЗВ	ЗВ	ЗВ	ЗВ
Здания и сооружения для хранения сельскохозяйственной продукции	ЗВ	ЗВ	ЗВ	ЗВ

По характеру неэкономических (социальных) последствий.

1. Угроза жизни большого числа людей. Угроза катастроф, которые могут иметь социально-политическое значение.

2. Угроза жизни людей в единичных случаях.

3. Угроза жизни людей практически исключена.

В зависимости от функционального назначения зданий и сооружений и предполагаемого вида отказа (см. табл. 6.1) можно прогнозировать вероятный масштаб ущерба при условии образования карстовых деформаций в основании сооружений (табл. 6.3).

Данные, приведенные в табл. 6.3, позволяют достаточно объективно назначать минимально допустимый уровень надежности в зависимости от прогнозируемых видов карстовых деформаций и особенностей проектируемых сооружений.

6.3. Влияние отдельных видов карстовых деформаций на выбор способов противокарстовой защиты

Коррозионные воронки, имеющие место в условиях открытого карста, не представляют непосредственной опасности для сооружений ввиду того, что их проявление на земной поверхности не является внезапным, скорость их развития (увеличение их размеров и формы) как в сульфатных, и особенно в карбонатных породах, крайне незначительна. Основная их опасность заключается в том, что они представляют собой место концентрации инфильтрующихся атмосферных вод в карстующиеся породы, в толще которых активизируются карстовые процессы. В связи с этим борьба с коррозионными воронками должна заключаться в тампонаже их водопроницаемым материалом на достаточно большом расстоянии от проектируемого объекта, обеспечивающем снижение растворяющей способности инфильтрующейся воды до допустимого уровня.

Следует иметь в виду, что при изысканиях коррозионные воронки, особенно на участках, где имеются и провальные воронки, иногда ошибочно принимают за провальные, и на основании этого принимает-

ся необоснованное решение о дорогостоящей противокарстовой защите сооружения. Возможна и другая ошибка, когда воронки провального типа принимаются за коррозионные, и на основании этого делается неправильный вывод о ненужности специальной защиты сооружения, что ведет к снижению надежности объекта.

Характерными особенностями *карстовых провалов*, которые необходимо учитывать при проектировании сооружений, являются следующие:

1. Большая скорость их проявления в основании сооружений или на поверхности земли (в большинстве случаев провалы образуются практически мгновенно).

2. В подавляющем большинстве случаев (в реальных условиях сложившейся практики инженерных изысканий) можно считать, что провалы возникают в условиях большей или меньшей неопределенности во времени за расчетный период срока службы сооружений и в пространстве относительно расположения сооружения в плане. В связи с этим наиболее целесообразными и объективными методами прогноза карстовой опасности являются вероятностные методы.

3. При образовании провала в основании сооружения отсутствует контакт по подошве фундамента за все время существования провала.

4. Размеры и формы карстовых провалов изменяются во времени. При этом скорость такого изменения наиболее существенна в первоначальный период времени после образования провала особенно под воздействием статических и динамических нагрузок от сооружений.

5. Диаметры карстовых провалов могут изменяться от нескольких метров до нескольких десятков метров (чрезвычайно редко – сотен метров), а глубины – до нескольких метров (редко – десятков метров).

6. В месте расположения провала на глубине существует зона ослабленных пород (столб сдвижения).

7. Вблизи свежих карстовых провалов может существовать зона ослабленных грунтов. Размер этой зоны в плане определяется механизмом карстовых провалов, глубиной провала, степенью выполаживания откосов провала (воронки), типом грунта. Следует отметить, что вопрос о зоне ослабления вокруг карстовых провалов в настоящее время изучен крайне недостаточно.

Особенностью воздействия карстовых провалов на сооружения является то, что размер провала в плане в основании сооружения l по-разному влияет на характер такого воздействия (типа отказа) и на масштаб его последствий (табл. 6.4).

Как указывалось выше, *карстовые просадки* представляют собой разновидность провалов при небольшой их видимой глубине S_{obs} (условно $S_{obs} \leq 0,25$ м).

Таблица 6.4

Влияние размера провала l на характер воздействия на сооружение и масштаб последствий

Характер влияния	Тип сооружений	Характер противокарстовой защиты
Тип отказа и масштаб его последствия зависят от размера провала l	Бескаркасные здания, каркасные здания с монолитными (сборно-монолитными) ленточными и плиточными фундаментами, трубопроводы со сплошным опиранием на грунт, линейные подземные сооружения	Направлена на уменьшение размера критического провала
Тип отказа и масштаб его последствия практически не зависят от размера провала (важен сам факт образования провала в основании сооружений)	Здания и сооружения башенного типа, мосты статически неопределимой схемы, высокоскоростные участки и участки бесстыкового пути на железных дорогах	Направлена на уменьшение вероятности образования провала в основании сооружения
Размер провала практически не влияет на тип отказа, но определяет масштаб последствий (главным образом – экономический ущерб)	Каркасные здания с отдельно стоящими фундаментами, здания павильонного типа, мосты статически определимой схемы, железнодорожные пути (кроме участков, названных в предыдущем пункте), автомобильные и городские дороги, взлетно-посадочные полосы аэродромов	Направлена на уменьшение вероятности образования провала в основании сооружения и уменьшение возможного экономического ущерба в части, связанной с размером провала

С учетом этого обстоятельства можно назвать следующие особенности карстовых просадок, которые следует учитывать при проектировании сооружений:

1. Просадки образуются практически мгновенно.
2. Почти всегда существует пространственная и временная неопределенность в отношении образования просадок в основании сооружения.
3. Ввиду небольшой глубины размеры просадок незначительно изменяются во времени.

4. В первоначальный момент возникновения просадки под подошвой фундамента отсутствует контакт по подошве фундамента. По мере деформации фундамента этот контакт может восстановиться.

5. В месте расположения просадки по глубине существует зона ослабленных пород (столб сдвижения).

Следует заметить, что воздействия карстовых просадок на сооружения по сравнению с воздействиями провалов значительно смягчены и определяются не только размерами в плане, но и их видимой глубиной. При этом для всех сооружений тип отказа и масштаб его последствия полностью зависят от значения (при одинаковых размерах в плане). Для таких сооружений, как трубопроводы, карстовые просадки в большинстве случаев не представляют опасности. Ввиду небольшой глубины этого вида карстовых деформаций, вероятностного характера их проявления в пространстве и во времени наиболее эффективным способом противокарстовой защиты в ряде случаев может быть выправка положения конструкций по высоте (поддомкрачивание, саморегулирование). Наибольший эффект от такого вида противокарстовой защиты может быть достигнут для каркасных зданий, зданий и сооружений башенного типа, мостов статически определимых систем и т.п.

Конструктивная защита зданий и сооружений от карстовых просадок в ряде случаев для бескаркасных зданий с устройством монолитных ленточных фундаментам значительно экономичнее, чем от карстовых провалов (при равенстве размеров в плане). Именно по этим практическим соображениям целесообразно делать прогнозы параметров провалов просадочного типа (интенсивность образования, размеры), выделяя их из соответствующих параметров собственно провалов.

Характерными особенностями *локальных карстовых оседаний (проседаний)*, которые необходимо учитывать при проектировании сооружений, являются следующие.

1. Значительно меньшая по сравнению с провалами скорость формирования, позволяющая осуществить своевременную эвакуационную работу.

2. Потеря контакта подошвы фундамента с грунтом происходит постепенно.

3. Размеры деформаций увеличиваются в течение относительно большого промежутка времени (дни – месяцы).

4. Как правило, диаметры проседаний сравнительно велики (несколько десятков метров), а глубины небольшие (до 2 м).

Противокарстовая защита таких сооружений, как бескаркасные здания, железнодорожные пути, автомобильные дороги, трубопроводы (кроме мероприятий по уменьшению вероятности образования карстовых деформаций), должна заключаться в обеспечении сохранности

сооружений путем поддомкрачивания конструкций, ликвидации проседания в процессе его развития и т.п.

Можно выделить следующие характерные особенности *оседаний*.

1. Механизм формирования оседания весьма разнообразен (прогиб всей толщи над карстующимися породами вследствие растворения поверхности карстующихся пород или прогибы непосредственной кровли близрасположенных карстовых полостей, уплотнение грунтов вследствие суффозии несвязных грунтов в полости и трещины в карстующихся породах).

2. Формирование мульд оседаний продолжается в течение длительного времени (годы, десятки и сотни лет).

3. Скорость оседаний на разных участках мульды неравномерна и составляет от нескольких единиц до нескольких десятков (реже сотен) миллиметров в год.

4. Краевые части мульды оседания растянуты, а срединные – сжаты.

5. Форма мульды оседания может быть самой разнообразной, а ее размеры в плане колеблются от нескольких десятков метров до нескольких километров.

В связи с тем, что защита территорий по недопущению оседаний или уменьшению скоростей оседаний крайне сложна или практически невозможна, основными направлениями в проектировании противокарстовой защиты должны быть специальные конструктивные мероприятия (по аналогии с защитой зданий и сооружений на подрабатываемых территориях) и (или) мероприятия по выправке положения конструкций сооружения.

В условиях покрытого карста *карстовые полости*, являясь основным источником провалов, представляют собой непосредственную угрозу для строительства и эксплуатации сооружений. Это относится прежде всего к сооружениям, имеющим свайное основание с опиранием свай на карстующиеся породы или фундаменты глубокого заложения (сваи – оболочки, опускные колодцы). Кровля карстовой полости может обрушиться как под воздействием нагрузок сооружения в период его эксплуатации, так и в период строительства вследствие динамических воздействий при забивке свай и вибрационного погружения конструкций фундаментов глубокого заложения. Особенно большую опасность представляют собой карстовые полости, заполненные водой или разжиженным заполнителем, при использовании кессонов. В этом случае прорыв воды или разжиженного грунта может привести к гибели людей. Для предотвращения подобных аварий необходимо проводить опережающее бурение под каждый куст свай-стоек, под каждую сваю-оболочку, опускной колодец или кессон. Такое бурение позволит более точно рассчитать несущую способность

фундаментов, определенную с учетом прочностных характеристик карстующихся пород и заполнителя карстовой полости, непосредственно в месте расположения фундаментов.

При проходке тоннелей в толще карстующихся пород основная опасность карстовых полостей заключается в возможности прорыва вод в штольню и резком увеличении горного давления и, как следствие, разрушении временной или постоянной крепи. В большинстве случаев, как показала практика, это приводит к катастрофическим последствиям и гибели людей. Здесь, очевидно, целесообразно в процессе проходки проводить специальные исследования призабойного пространства (опережающее горизонтальное бурение и т.п.).

В условиях возможности *неравномерных просадок* в местах расположения погребенных воронок, понижений кровли карстующихся пород и т.п. защита зданий и сооружений заключается в реализации мероприятий по приспособлению конструктивных схем к осадкам (разрезка зданий на блоки, применение податливой конструктивной схемы), повышении несущей способности зон дезинтегрированных пород и т.д.

6.4. Основные принципы проектирования противокарстовой защиты в ГДР

Предварительные замечания. В последние десятилетия в карстовых районах ГДР ощущается все возрастающий дефицит благоприятных для строительства территорий. В связи с этим возникает проблема освоения карстоопасных территорий и зонирования этих территорий по степени их опасности. Имеется много примеров, когда районы, оцениваемые как недопустимые для строительства, после тщательных инженерно-геологических изысканий и инженерной подготовки успешно застраивались.

В ГДР противокарстовые мероприятия четко разделяются на два типа.

1. Мероприятия по обеспечению безопасности сооружений при образовании карстовых деформаций в основании сооружений. К ним в первую очередь, относится конструктивная защита сооружений, которая должна предотвратить сооружение от недопустимых деформаций за расчетный срок эксплуатации сооружений.

2. Мероприятия по инженерной подготовке территории, или санация – мероприятия по улучшению свойств карстующихся или покровных пород, подверженных карстовым процессам, с целью предотвращения карстовых деформаций земной поверхности или изменения их параметров в сторону, облегчающую работу сооружения при возникновении в его основании карстовых деформаций.

При этом специалисты ГДР при выборке мероприятий по повышению надежности сооружений и инженерной подготовки территорий учитывают не только параметры карстовых деформаций, но и народнохозяйственное значение осваиваемой территории и проектируемых строительных объектов. При этом соблюдается принцип: строить необходимо не как можно безопасней, а с необходимой и достаточной безопасностью.

Выбор участков для строительства. Участки для строительства в районах возможных оседаний и провалов выбираются так, чтобы уменьшить до приемлемого минимума затраты по предотвращению недопустимых деформаций зданий и сооружений. Непременная предпосылка для такой работы – тесный контакт между инженерами-геологами и специалистами в области разработки проектов генеральных планов, детальной планировки и застройки. Наиболее обоснованно решаются вопросы рационального выбора участков для строительства на таких закарстованных территориях, где ведутся длительные регулярные наблюдения, в том числе инструментальные, за карстовыми деформациями. Такой территорией в ГДР является, например, район Мансфельдерской мульды, где специальные наблюдения за карстовыми оседаниями и провалами ведутся с 1950 г.

Однако не всегда в промышленном строительстве или при размещении объектов на урбанизированных территориях возможен отказ не только от участков, где существуют условия для образования провалов, но и от участков, где зафиксирован процесс оседания. В этом случае уже на стадии принципиального выбора участка следует иметь в виду необходимость принятия соответствующих конструктивных решений, которые бы гарантировали сооружение от недопустимых деформаций.

Еще сложнее обстоит дело в линейном строительстве. Значительные обходы карстоопасных участков часто оказываются неприемлемыми по экономическим соображениям или вообще неприемлемы с точки зрения решения транспортных проблем. Как правило, выбор трассы транспортной магистрали должен проводиться таким образом, чтобы опасные участки пересекались кратчайшим путем.

При выборе участка строительства необходимо учитывать не только современные, но и древние карстовые формы. Они служат для выявления закономерностей карстового процесса и играют важную роль при оценке несущей способности оснований сооружений. Таким образом, уже на стадии выбора площадки должны быть принципиально решены специфические проблемы карста, влияющие на строительство.

Инженерно-строительные мероприятия по обеспечению надежности зданий и сооружений. В ГДР решение о выборе конструктивных мер защиты от карстовых деформаций принимается проектировщиками

только после того, как выявлены параметры карстовых деформаций с учетом их образования за срок службы сооружения. Однако нередко приходится принимать решения при недостатке количественной информации о параметрах деформаций.

Большое влияние на проектирование конструктивных противокарстовых мероприятий оказал опыт конструктивной защиты сооружений на подрабатываемых территориях (рис. 6.1; 6.2). Однако сложность

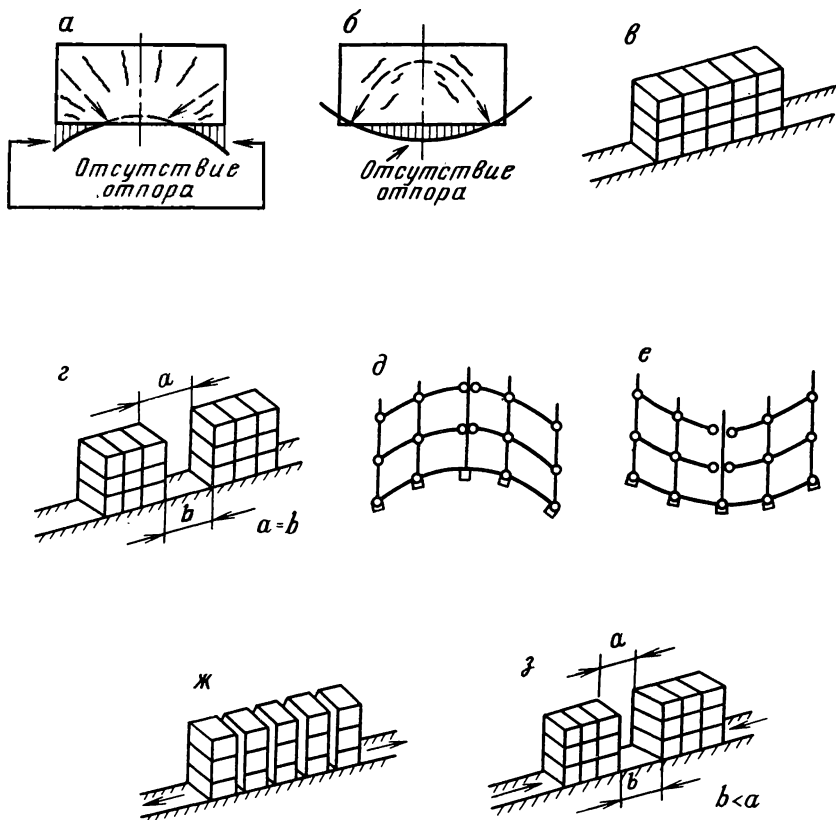


Рис. 6.1. Характер воздействий различных усилий на сооружения большой (а-е) и малой (д-з) жесткости:

а, б, д, е — усилия, вызванные кривизной основания (а, д — выпуклой; д, е — вогнутой); в, г, ж, з — усилия, вызванные линейными горизонтальными деформациями (в, ж — растяжения, г, з — сжатия)

карстового процесса и большое разнообразие сооружений, а также требование достижения эффективности и экономичности, противокарстовых мероприятий почти всегда ведет к необходимости особых решений в каждом конкретном случае (рис. 6.3).

В табл. 6.5–6.7 приведены данные по конструктивной защите сооружений в зависимости от типов сооружений, видов карстовых деформаций и отдельных их параметров.

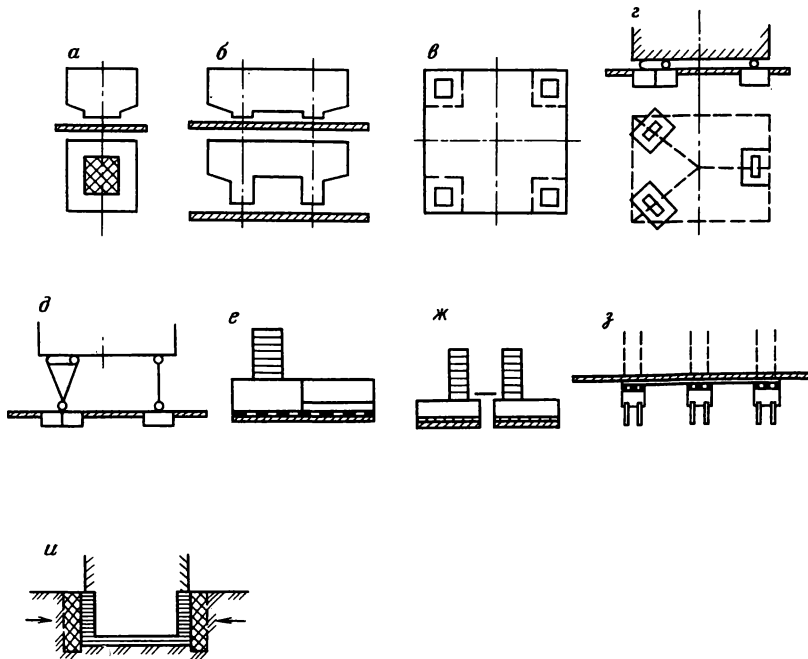


Рис. 6.2. Принципы конструктивной защиты зданий в районах карстовых оседаний от усилий, вызванных кривизной основания (а–д) и линейными горизонтальными деформациями (е–u):

а–в – принципы сопротивляемости (а – опирание на одну плоскость, б – опирание на две плоскости, в – опирание на четыре плоскости – точки); г–д – принципы податливости (г – опирание на три точки в виде катков, д – опирание на три точки с качающимися опорами); е – подфундаментная плита со швом скольжения; ж – швы между отдельными частями сооружения; з – разделение свай от сооружения швом скольжения; u – слой полистирола вдоль стен подвала

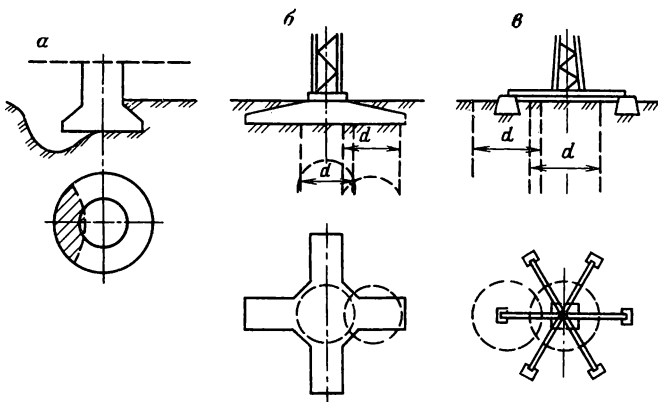


Таблица 6.5

Конструктивные противокарстовые мероприятия по обеспечению надежности соору

Тип зданий и сооружений	Мероприятия по обеспечению	
	кривизны поверхности (см. рис. 6.1; 6.2)	горизонтальной составляющей оседаний (см. рис. 6.1; 6.2)

С большой пространственной жесткостью

Использование принципа сопротивляемости (опирание башеннообразного сооружения на один жесткий фундамент; опирание протяженных сооружений на две или четыре точки). Использование принципа податливости (опирание в трех точках при достаточной жесткости сооружения)

Использование принципа сопротивляемости (обеспечение горизонтальной жесткости путем устройства ленточных фундаментов и сплошных фундаментных плит). Использование принципа податливости (обеспечение пространственной надежности сооружения по подошве фундаментов, применение стеновых блоков небольших размеров, устройство качающихся опор и опор с опиранием на катки и т.п.)

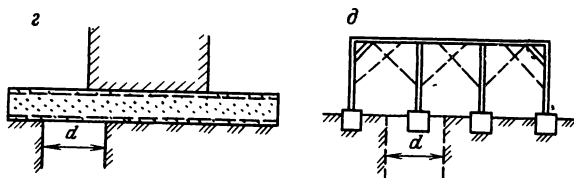


Рис. 6.3. Способы конструктивной защиты зданий от карстовых провалов: а — круглый фундамент с увеличенной площадью опирания (для башеннообразных сооружений); б — фундамент с консольными балками (для тяжелых опор); в — фундамент с выносными точками опирания (для легких опор); г — железобетонные фундаментные балки или плиты с консолями; д — опоры с подпругами

жений в промышленном и гражданском строительстве (по Г. Судерлау)

надежности сооружений при воздействии различных факторов

вертикальной составляющей оседаний и кренов (см. рис. 6.1; 6.2)	трещин	уступов	провалов (см. рис. 6.3)
<p>Устройство плитных фундаментов. Устройство швов между соседними строениями. Опирание сооружения через три точки (при значительных наклонах)</p>	<p>Применение большепролетных одноэтажных зданий с расположением опор по обе стороны трещины</p>	<p>Устройство специальных фундаментов (лапчатые фундаменты, фундаменты с уширенным опиранием для сооружений башенного типа). Применение крупноблочных и панельных зданий</p>	<p>Устройство специальных фундаментов мелкого заложения (лапчатые фундаменты, отдельно стоящие фундаменты с выносными опорами, кольцевые фундаменты для башенных сооружений). Устройство фундаментов глубокого заложения с опиранием на карстающиеся породы достаточной несущей способности</p>

Тип зданий и сооружений	Мероприятия по обеспечению	
	кривизны поверхности (см. рис. 6.1; 6.2)	горизонтальной составляющей оседаний (см. рис. 6.1; 6.2)
С малой пространственной жесткостью	Использование только принципа податливости	Использование принципа сопротивляемости (повышение горизонтальной жесткости элементов фундаментов и межэтажных перекрытий). Использование принципа податливости (обеспечение скольжения между подошвой и грунтом, например, путем устройства разгружающих канав вдоль боковых стенок фундаментов, находящихся в зоне сжатия)

Таблица 6.6

Противокарстовые мероприятия по обеспечению надежности сооружений в транспорте

Тип сооружений	Противокарстовые мероприятия по обеспечению		
	кривизны поверхности	горизонтальной составляющей оседаний	вертикальной составляющей оседаний и кренов
Автомобильные дороги	Нежесткие конструкции дорожных одежд; шпунтовое соединение бетонных плит		Увеличение высоты насыпи в центре оседания; повышенное уплотнение участков насыпей
Железные дороги	Отказ от бесстыкового пути, применение		То же

надежности сооружений при воздействии различных факторов

вертикальной составляющей оседаний и кренов (см. рис. 6.1; 6.2)	трещин	уступов	провалов (см. рис. 6.3)
---	--------	---------	-------------------------

Устройство опор, оповещающих о вертикальных деформациях основания

Применение статически определимых рамных систем. Устройство эластичных соединений строительных конструкций с обеспечением прочности на разрыв

Использование, как правило, принципа сопротивления балочных или плитных фундаментов, рассчитанных на определенный пролет, увеличение жесткости верхнего строения)

ртном строительстве

чению надежности сооружений при воздействии различных факторов

трещин	уступов	провалов
--------	---------	----------

Нежесткие конструкции дорожных одежд; гидроизоляция водоотводных канав нежесткими конструкциями

Обход участков с уступами; железобетонные дорожные одежды (в том числе предварительно напряженные)

Обход участков, где возможны провалы; раздельное земляное полотно для каждого из направлений; железобетонные конструкции дорожных одежд; закрепление грунтов основания; армирование грунта; взрывание, заполнение, уплотнение близко расположенных к поверхности полостей

Гидроизоляция водо-

Обход участков с уступа-

Обход участков, где воз-

Продолжение табл. 6.6

Тип сооружений	Противокарстовые мероприятия по обеспе		
	кривизны поверх-ности	горизонтальной сос-тавляющей оседаний	вертикальной сос-тавляющей оседа-ний и кренов
	ние упругих скреплений; применение уравнительных рельсов		
Мосты	<p>Для однопролетных мостов: применение перекрестных и пли репление основания, выбор статически определяемых систем, повышенной несущей способностью, применение широких осамые по вертикали и горизонтали опорные части, применение но напряженных пролетных строений; армирование грунта</p> <p>Для многопролетных мостов: применение статически неопреде службы сооружения $\Delta S < 1/1000l$ (l – расстояние между опора в виде цепи однопролетных мостов с регулируемыми опорными</p>		
Тоннели	<p>Принцип податливости: применение "строительных материалов с высокими деформативными свойствами (шпунтовые сваи, железобетонные блоки); применение гибкой обделки (при строительстве тоннелей открытым спосо-бом); некоторое превышение габарита по сравнению с нормативным</p>		

Таблица 6.7

Противокарстовые мероприятия по обеспечению надежности линейных коммуника

Тип сооружений	Мероприятия по обеспечению	
	кривизны поверхности	горизонтальной сос-тавляющей оседаний
Трубопроводы для жид-кости и газа	Наиболее вероятно отсут-ствие повреждений	Применение специальных конструкций, восприни-мающих растягивающие усилия (специальные ко-нусные муфты)

чению надежности сооружений при воздействии различных факторов

трещин	уступов	провалов
отводных сооружений нежесткими конструкциями	ми; повышение жесткости рельсовой колеи (напрямер, устройство рельсовых пакетов); армирование грунта основания	можны провалы; повышение жесткости рельсовой колеи; железобетонные конструкции дорожных одежд
тных фундаментов, применение свай и опор с дочных швов, регулируемых стальных и предваритель-	Применение перекрестных и плитных фундаментов, закрепление оснований; армирование грунта основания	
ленных систем при прогнозируемом оседании за срок ми); применение статически определенных систем в частями с возможностью движения во все стороны	Взрывание полостей, заполнение, уплотнение близко расположенных к поверхности полостей	

Обход зон расположения трещин и уступов

Устройство завес от грунтовых вод; инженерная подготовка (санация) оснований; усиление обделки; искусственное обрушение в отдельных частях профиля неустойчивых пород

ций

надежности сооружений при воздействии различных факторов

вертикальной составляющей оседаний и кренов	трещин	уступов	провалов
Наиболее вероятно отсутствие повреждений	Наиболее вероятно отсутствие повреждений	Уравнительные устройства	Пересечение районов провалов по кратчайшему пути; перекрытие полостей специальными конструкциями (железобетонные

Продолжение табл. 6.7

Тип сооружений	Мероприятия по обеспечению	
	кривизны поверхности	горизонтальной составляющей оседаний

Подземные кабели	То же	Прокладка с устройством резервных петель
Линия электропередачи	– ” –	В зонах растяжения увеличение провисания

надежности сооружений при воздействии различных факторов

вертикальной составляющей оседаний и кренов	трещин	уступов	провалов
			балки, защитные трубы, подвешивание трубопроводов); уменьшение сопротивления скольжению
То же	Прокладка с устройством петель в защитных трубах		Не требуется специальных мероприятий по ослаблению сопротивлений скольжению
Исключить излишние натяжения; установка регулирующих выравнивающих устройств	Исключить излишние натяжения		Применение специальных (например, лапчатых) фундаментов; применение расчленивающих канатов

1. Аникеев А.В. Условия подобия водонасыщенной модели из эквивалентных материалов и массива пород. — Инженерная геология, 1988, № 2, с. 96–103.
2. Верткова С.К. О возможности моделирования образований искусственного соляного карста в лабораторных условиях. — В кн.: Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей (Тез. докл. науч.-техн. семинара). Пермь, ПГУ, 1979, с. 80–83.
3. Вопросы строительного освоения закарстованных территорий./Е.А. Сорочан, Т.М. Троицкий, В.В. Толмачев и др. — Инженерная геология, 1986, № 4, с. 80–87.
4. Давыдько Р.Б., Толмачев В.В. О моделировании механизма карстовых провалов. — Тр. ПНИИИС, 1977, вып. 47, с. 28–33.
5. Жернов И.Е., Павловец И.Н. Моделирование фильтрационных процессов (Гидрогеологическое моделирование). Киев, Вища школа, 1976.
6. Зеерев В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. М., Недра, 1982.
7. Зеерев В.П., Зеерева В.А. Физико-химические закономерности развития карста и его интенсивность на территории СССР. — В кн.: Кора выветривания. М., Наука, 1976, с. 195–199.
8. Инженерно-геологические особенности элювия карбонатных пород/Л.А. Аносова, Р.С. Зиангиров, Н.А. Платов, Т.И. Робустова. — М., Наука, 1986.
9. Кожевникова В.Н. Методика оценки устойчивости закарстованных территорий. — Инженерная геология, 1984, № 2, с. 26–40.
10. Костарев В.П. О количественных показателях карста и их использовании при инженерно-геологической оценке закарстованных территорий. — Инженерно-строительные изыскания, 1979, № 1, с. 49–53.
11. Кутепов В.М. Формирование напряженного состояния массивов пород на закарстованных территориях. — Инженерная геология, 1983, № 1, с. 67–81.
12. Лехов А.В. Моделирование карстового процесса. — Инженерная геология, 1981, № 1, 4. с. 89–96.
13. Лехов А.В. Аналитическое исследование изменения раскрытия единичных трещин карстующихся пород. — Инженерная геология, 1984, № 6, с. 63–73.
14. Лехов А.В. Математическое моделирование карстового процесса в совокупности трещин. — Инженерная геология, 1985, № 5, с. 62–67.
15. Лукин В.С., Ежов Ю.А. Карст и строительство в районе г. Кунгура. Методика изысканий и опыт строительства в карстовых областях. Пермь, Перм. книж. изд-во, 1975.
16. Маликова Т.И., Вайнштейн М.С. Проектирование фундаментов зданий на закарстованных территориях Москвы. — В кн.: Основания и фундаменты на засоленных, заторфованных и вечномерзлых грунтах. М., 1982 (сб. научных трудов НИИОСП, вып. 77), с. 33–39.
17. Мартин В.И. Методика районирования закарстованных территорий по степени устойчивости для строительства. — В сб.: Инженерно-строительные изыскания. М., Стройиздат, 1979, № 3, с. 31–38.
18. Мартин В.И., Травкин А.И. Моделирование карстовых провалов и прогноз устойчивости закарстованных территорий для строительства. — В кн.: Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей (Тез. докл. науч.-техн. семинара 29–30 ноября 1979 г.). Пермь, 1979, с. 18–20.

19. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М., Мир, 1968.
20. *Метелюк Н.С.* Совершенствование расчета сооружений, возводимых в сложных грунтовых условиях. Киев, Будівельник, 1980.
21. *Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами.* /В.В. Толмачев, Е.Г. Карпов, В.П. Хоменко и др. – Инженерная геология, 1982, № 4, с. 46–59.
22. *Молоков Л.А.* Инженерно-геологические процессы. М., Недра, 1985.
23. *Нещеткин О.В.* Вопросы механизма образования карстовых провалов в песках. – В кн.: Изучение свойств массивов пород и геологических процессов. М., Наука, 1986, с. 87–94.
24. *Нещеткин О.В.* Выбор исходной информации для расчета пролета карстового провала, поражающего сооружение. – В кн.: Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии городов и городских агломераций. М., Наука, 1987, с. 141–151.
25. *Основные задачи инженерно-геологических исследований для строительства на закарстованных территориях.* /В.И. Мартин, В.В. Толмачев, А.Н. Ильин, И.А. Саваренский. – Инженерная геология, 1983, № 2, с. 59–64.
26. *Печёркин А.И.* Геодинамика сульфатного карста. Издательство Иркутского университета, 1986.
27. *Печёркин И.А.* Вопросы изучения карста в инженерных целях. – Инженерная геология, 1982, № 5, с. 77–80.
28. *Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов.* М., Стройиздат, 1984.
29. *Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях.* М., НИИОСП, 1985.
30. *Розовский Л.Б., Зелинский И.П.* Инженерно-геологические прогнозы и моделирование. – Одесса, Изд-во Одес. ун-та, 1975.
31. *Савин В.В., Хусаинов И.Д.* Определение критического радиуса карстовой полости. – Автомобильные дороги, 1984, № 12, с. 20–21.
32. *Сорочан Е.А., Троицкий Г.М., Толмачев В.В.* Комплексные защитные мероприятия при строительстве на закарстованных территориях. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1982, № 4, с. 16–19.
33. *Толмачев В.В.* Вероятностный подход при оценке устойчивости закарстованных территорий и проектировании противокарстовых мероприятий. – Инженерная геология, 1980, № 3, с. 98–107.
34. *Толмачев В.В., Беляев В.Л., Карпов Е.Г.* Система "карст – сооружения" как основа оптимизации инженерно-геологических изысканий в карстовых районах. – Инженерная геология, 1983, № 5, с. 55–61.
35. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М.* Определение расчетного размера карстовых провалов при проектировании фундаментов на закарстованных территориях. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1983, № 2, с. 22–24.
36. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.Н.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М., Стройиздат, 1986.
37. *Троицкий Г.М., Григорук П.Д., Хоменко В.П.* Моделирование на ЭВМ и расчет размеров карстовых провалов и воронок. – В кн.: Строительство на закарстованных территориях (Тез. докл. Всесоюзного совещания), М., 1983, с. 72–74.
38. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М., Наука, 1986.
39. *Хоменко В.П., Зиангиров Р.С.* Экспериментальное изучение закономерностей формирования провалов в песках, перекрывающих карстовые полости. – Инженерная геология, 1981, № 2, с. 72–82.

40. *Annales de la Societe Geologie de Belgique*, Liege, T. 108. 1985.
41. *Bull of the International Association of Engineering Geology*. N° 24–25. – Sump. on eng.-geol. problems of construction on soluble rocks. 14–18 sept., 1981, Istanbul.
42. *Fenk J.* Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge. – *Freiberger Forschungshefte*, A 639, 1981.
43. *La Craie*. – *Bull. LCPC*, special V, oct. 1973, Paris.
44. *Molek H., Reuter F.* Ingenieur-Geologie. Geodynamische Prozesse. 2. Lehrbrief: Karst., Bergakademie Freiberg, 1974.
45. *Reuter F., Molek H.* Ingenieurgeologisch-strukturgeologische Grundlagen zur Beschreibung von Objekten des Sulfat – und Chloridkarstes. – *Freiberger Forschungshefte*, A 622, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1980.
46. *Schmidt G.* Bautechnische Probleme bei der Errichtung von Hochbauten in Senkungsgebieten. – *Zeitschrift für geologische Wissenschaft*, v. 4, A 8, 1976 – s. 1183–1203.
47. *Suderlau G.* Neue Aspekte der Senkungsbeobachtung. – *Neue Bergbautechnik*, 1. Jg., H. 4, 1971 – s. 258–263.
48. *Symposium of the International Association of Engineering Geology (IAEG)*. Sinkholes and subsidence. Eng.-geol. problems related to soluble rocks. 10–13 sept., Hannover, 1973.
49. *The first multidisciplinary conference on sinkholes: their geology, engineering and environmental impact*. Orlando, Florida, USA, 1984.
50. *The first multidisciplinary conference on sinkholes: their geology, engineering and environmental impact*. Orlando, Florida, USA, 1987.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Основные термины и понятия инженерного карстоведения	7
Глава 2. Основные тенденции развития инженерного карстоведения	12
2.1. Становление и развитие инженерного карстоведения как науки в СССР	12
Анализ основополагающих публикаций	12
Вопросы освоения закарстованных территорий в нормативных и методических документах	20
2.2. Основные тенденции развития инженерного карстоведения в ГДР	24
2.3. Особенности инженерного карстоведения в других странах	26
2.4. Характеристика инженерного карстоведения как прикладной науки и перспективы дальнейшего его развития	30
Глава 3. Инженерно-геологические условия развития карста	32
3.1. Природные закономерности карстования	32
3.2. Формы карстопроявлений	46
3.3. Закономерности (механизм) карстовых деформаций	54
3.4. Влияние техногенных воздействий на развитие карстового процесса	59
Классификация техногенных воздействий	59
Механизм влияния техногенных воздействий на формирование карстовых провалов	64
Примеры влияния горных работ на активизацию карстовых процессов	69
Глава 4. Особенности инженерных изысканий в карстовых районах	71
4.1. Основные требования строительного проектирования к изысканиям в карстовых районах	71
4.2. Основные виды изысканий в карстовых районах	73
4.3. Особенности изысканий для промышленного и гражданского строительства	73
Взаимодействие сооружений и оснований в районах карстовых оседаний ..	73
Специальные методы изысканий	78
4.4. Особенности изысканий для линейных (транспортных) сооружений ..	79
4.5. Особенности проведения изысканий в карстовых районах при проведении горных работ	80
Глава 5. Методы прогнозирования развития карста	82
5.1. Специфика прогнозирования карста	82
5.2. Прогнозирование скорости растворения пород	82
Геологические аспекты	82
Теоретико-расчетные методы и физическое моделирование	84
5.3. Прогноз карстовых провалов	89
Инженерно-геологические классификации карстопроявлений	89
Прогнозирование провалообразования	94
Физическое моделирование процессов провалообразования	105
Вероятностно-статистические методы прогноза карстовых провалов	113
Математико-статистические методы анализа направленности провалообразования	121
5.4. Прогнозы карстовых оседаний	123

Глава 6. Противокарстовая защита	126
6.1. Специфика проектирования	126
6.2. Характер воздействий и последствий карстовых деформаций на сооружения	127
6.3. Влияние отдельных видов карстовых деформаций на выбор способов противокарстовой защиты	131
6.4. Основные принципы проектирования противокарстовой защиты в ГДР	136
Список литературы	148

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ (ПРАКТИЧЕСКОЕ) ИЗДАНИЕ

Толмачев Владимир Викторович
Ройтер Фриц

ИНЖЕНЕРНОЕ КАРСТОВЕДЕНИЕ

Заведующий редакцией *Л.Н. Аважанская*
 Редактор издательства *Л.А. Дубкова*
 Обложка художника *Г.И. Бронниковой*
 Художественный редактор *В.В. Шутько*
 Технический редактор *М.Л. Новикова*
 Корректор *Л.В. Зайцева*
 Оператор *Т.Н. Череди́на*
 ИБ 8206

Подписано в печать с репродуцируемого оригинал-макета 11.05.90. Т – 05153.
 Формат 60 x 88¹/₁₆. Бум. офсетная № 2. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 9,31. Усл. кр.-отт. 9,55. Уч.-изд. л. 9,75. Тираж 1690 экз.
 Зак. 2189 /2174–4. Цена 50 к.

Набор выполнен на наборно-пишущей машине

Ордена "Знак Почета" издательство "Недра".
 125047 Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата" Госкомитета СССР по печати.

109033, Москва, Волочаевская ул., 40

