

Госстрой России
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Производственный и научно-исследовательский институт
по инженерным изысканиям в строительстве» (ФГУП «ПНИИИС»)

На правах рукописи

УДК 624.131.1:551.3

Хоменко Виктор Петрович

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРОГНОЗ
СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

25.00.08 - Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Москва -2004

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве» (ФГУП «ПНИИИС») Госстроя России

Официальные оппоненты:

Доктор геолого-минералогических наук. АЛ. Рагозин

Доктор геолого-минералогических наук АА. Варга

Доктор геолого-минералогических наук В.С. Круподеров

Ведущая организация: Московский государственный геологоразведочный университет

Защита диссертации состоится 16 апреля **2004** г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.048.01 при Институте геоэкологии РАН по адресу: **Москва, ул. Николаямская, д. 51**

С диссертацией, представляющей собой опубликованную монографию, можно ознакомиться в библиотеке Института геоэкологии РАН

Автореферат разослан 16 марта 2004 г.

Отзывы на автореферат в 2^х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: **101000**, Москва, Уланский переулок, 13. Институт геоэкологии **РАН**. Ученому секретарю **диссертационного** совета Д **002.048.01**, доктору геолого-минералогических наук СМ. Семенову

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук



СМ. Семенов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что в последние десятилетия во всем мире наблюдается тенденция возрастания ущерба от негативных воздействий суффозионных процессов на различные объекты, играющие важную роль в жизни людей (жилые дома, гидротехнические сооружения, сельскохозяйственные угодья, рекреационные зоны, памятники архитектуры). Последствия этих воздействий все чаще приобретают катастрофический характер.

Вместе с тем, до сих пор не существует общей теории суффозионного процесса, не определены его роль и место среди других экзогенных геологических процессов, не до конца выяснен механизм формирования некоторых суффозионных проявлений. В инженерной геодинамике отсутствует раздел, посвященный изучению суффозии. Отдельные виды процесса являются сейчас предметом исследования разных направлений научной и инженерной деятельности. Это не способствует правильному пониманию природы вещей и выработке грамотных решений, особенно в сложной природно-техногенной обстановке.

Цель диссертации состоит в разработке теории суффозионного процесса и принципов его прогнозирования в качестве научной основы предотвращения чрезвычайных ситуаций при наличии суффозионной опасности.

Основные задачи, решение которых требовалось для достижения указанной цели, включали в себя:

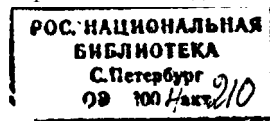
1. Систематизацию существующих представлений о суффозии, о методах ее прогнозирования и о способах противосуффозионной защиты;
2. Создание единой концептуальной модели суффозионного процесса, отражающей закономерности ее развития в пространстве и во времени и ее взаимосвязи с другими геологическими процессами;
3. Разработку новых и усовершенствование существующих методов и технических средств прогнозирования суффозии;
4. Разработку единого подхода к оценке суффозионной опасности для хозяйственных объектов различного назначения.

Научная новизна работы определяется ее основными защищаемыми положениями. **На защиту выносятся:**

1. Определение понятия «суффозия» и соответствующие ему классификации процесса: а) по характеру разрушения горных пород; б) по условиям выноса и перемещения разрушенных пород. Перечни необходимых предпосылок и причин появления суффозии, вызванных процессами и воздействиями природного и техногенного происхождения, классификации последствий развития суффозии в виде суффозионных проявлений и постсуффозионных геологических процессов.

2. Закономерности развития суффозии во времени, которые прослеживаются по изменению скважности горных пород в рамках суффозионного цикла, и интерпретированы пятью типичными схемами механизма формирования суффозионных проявлений, обусловленных: а) химической суффозией и частичным фильтрационным разрушением; б) подземной эрозией; в) присклоновым фильтрационным разрушением; г) фильтрационным разрушением пород восходящим потоком; д) закрытым фильтрационным разрушением пород нисходящим потоком.

3. Закономерности пространственного распространения суффозии, которые рассматриваются, как результат сложных и противоречивых взаимодействий при-



родных и техногенных факторов и отражены на схематической карте развития суффозии в пределах Российской Федерации.

4. Принципы прогнозирования суффозионных и постсуффозионных процессов на основе необходимой исходной информации и три апробированных и верифицированных методики такого прогнозирования, рассмотренные на конкретных примерах: а) определение условий и параметров суффозионного провалообразования; б) определение местоположения ожидаемого провала; в) лабораторное физическое моделирование.

5. Критерии оценки существующей и ожидаемой суффозионной опасности, устанавливаемые, соответственно, на основе информации о поверхностных суффозионных проявлениях и по результатам количественного прогнозирования суффозионных и постсуффозионных процессов. Инженерно-геологическая классификация противосуффозионных мероприятий.

Практическое значение и реализация результатов работы. Научные исследования, положенные в основу диссертации, осуществлялись в рамках четырех государственных программ: ГНТП № 16 «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф» (1990-1995), ЦКП «Строительство в районах с экстремальными условиями и инженерная защита территорий» (1991-1993), ГМНТП «Инженерная защита городов и населенных пунктов России от воздействия опасных природных и техногенных процессов» (1994-2000) и ФНТП «Развитие малых и средних городов Российской Федерации в условиях экономической реформы» (1997-2005). Отдельные положения работы включены в МСНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».

Разработанные автором принципы и практические приемы инженерно-геологического изучения и прогнозирования суффозии были реализованы в трех направлениях:

а) при идентификации опасных для строительства суффозионных проявлений в разных регионах России и за рубежом, в том числе, в городах Москва, Зарайск Московской области, Павлово и Дзержинск Нижегородской области, в Садовском районе Рязанской области и в Кинешемском районе Ивановской области, на площадке АЭС «Бушер» (Исламская Республика Иран);

б) при прогнозе развития суффозии на площадках существующих и проектируемых объектов промышленного и гражданского строительства, включая памятники истории и архитектуры, в городах Москва, Щелково и Протвино Московской области, Самара, Казань, Нижний Новгород, Дзержинск и Саров Нижегородской области, в поселке Янтарный Калининградской области (более 40 объектов от отдельных зданий и сооружений до крупных жилых районов и заводских территорий), на площадках Ровенской (Украина) и Нововоронежской АЭС на трех направлениях Горьковской железной дороги;

в) при выборе противосуффозионных мероприятий для защиты зданий различного назначения в городах Москва, Самара и Щелково Московской области.

Методика исследований, исходные данные и личный вклад автора в решение поставленных задач. В основу диссертации положены результаты полевых, экспериментальных и теоретических исследований, анализов и обобщений, а также методические и технические разработки, выполненные лично авто-

ром или под его непосредственным научным руководством. Автор занимается инженерно-геологическим изучением и прогнозированием суффозионных процессов в Производственном и научно-исследовательском институте по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС), начиная с 1975 г.

Исходные данные для теоретических обобщений были получены автором в ходе осуществления плановых научных исследований и договорных работ, выполнявшихся по заказу различных организаций и ведомств, при подготовке многочисленных технических заключений и экспертиз, а также в порядке личной инициативы. При этом использовались предоставленные автору материалы инженерных изысканий, выполненных ПНИИИСом или другими организациями (в том числе, организациями-заказчиками), а необходимые дополнительные исследования осуществлялись самим автором или под его научным руководством.

В ходе изучения закономерностей развития суффозионных процессов особое место занимало их лабораторное физическое моделирование. Часть экспериментов проведена самим автором, а часть - под его руководством молодыми специалистами Н.Е. Ворониной и С.Э. Пидяшенко. Эксперименты выполнялись на специально созданном для этой цели оборудовании, защищенном патентом Российской Федерации № 1823923 АЗ (авторы: Хоменко В.П., Маханько Е.П., Исаев и др.). Оно представляет собой модернизированный вариант установки для исследования суффозионной устойчивости грунтов конструкции В.П. Хоменко (авторское свидетельство СССР № 851201). Изготовление опытных образцов нового экспериментального оборудования осуществлялось под руководством автора в СКБ с ОП НПО «Стройизыскания» в г. Рязани, согласно п. 25 раздела 1а «Сводного тематического плана важнейших научно-исследовательских, опытно-конструкторских, тематических и других работ... НПО «Стройизыскания» на 1989 г.». По данному пункту плана автор являлся ответственным исполнителем.

Представленная в диссертации схематическая карта развития суффозии на территории России является упрощенным вариантом карты масштаба 1:5000000, созданной авторским коллективом в составе В.Т. Рубина, Б.М. Фаминцына и В.П. Хоменко под научным руководством диссертанта. Эта первоначальная карта вошла в «Схему районирования территории РСФСР по степени пораженности опасными геологическими процессами...», составленную в 1990г. по заданию Госстроя РСФСР. Базой для ее построения послужили карты регионально-геологических и зонально-климатических факторов развития опасных геологических процессов на территории России, созданные в рамках той же работы под руководством А.Л. Рагозина и А.В. Груздова. В основу карты была положена информация о суффозионных процессах и их проявлениях, полученная по запросу Госстроя РСФСР от органов местной власти автономных республик, краев и областей России, от территориальных трестов инженерно-строительных изысканий, а также из литературных и фондовых источников. Схематическая карта была дополнена новыми сведениями, собранными автором за прошедшие 12 лет.

Предложенная автором теория суффозионного процесса базируется на закономерностях его развития в пространстве и во времени, выявленных не только им самим, но и другими исследователями. Автор провел систематизацию существующих взглядов на этот процесс, с учетом их эволюционных изменений за столетний период, одновременно пытаясь внести определенность в крайне запутанную терминологию. Такой анализ в сочетании с личным опытом эксперименталь-

ных исследований и нагурных наблюдений позволил синтезировать развернутую концептуальную модель суффозионного процесса, имеющую новые черты.

Теоретически обобщая и анализируя отечественный и зарубежный опыт инженерно-геологического прогнозирования и, в то же время, решая конкретные практические задачи, автор разработал несколько методик прогноза суффозионных и постсуффозионных процессов. Он выполнил эту работу в качестве ответственного исполнителя заданий 03.02.04 (1992 г.) и 03.02.05 (1993 г.) ЦКП «Строительство в районах с экстремальными условиями и инженерная защита территорий», а также задания 2.1.1.6 (1994 г.) ГМНТП «Инженерная защита городов и населенных пунктов России от воздействия опасных природных и техногенных процессов». Одна из методик имеет характер изобретения (Хоменко В.П. Способ определения зоны возможного провалообразования в грунтах: Патент РФ № 1752869 А1), а для ее оперативной реализации П.В. Корбутяком под руководством автора была разработана специальная компьютерная программа.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на совещаниях и семинарах по проблемам изучения и прогноза изменений геологической среды на городских территориях (Ленинград, 1986; Одесса, 1987; Петропавловск-Камчатский, 1990), на региональных (Уфа, 1980 и 1984; Сочи, 1991), всесоюзных (Пермь, 1980 и 1985; Алушта, 1982; Подольск, 1983; Владивосток, 1986; Куйбышев, 1990) и международных (Пермь, 1992; Панама-Сити (США), 1993) совещаниях по проблемам общего и инженерного карстоведения, на семинарах «Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей» и «Инженерная геология Западного Урала» (Пермь, 1979 и 1982), на всесоюзном семинаре «Режимные инженерно-геологические и гидрогеологические наблюдения в городах...» (Сочи, 1983), всесоюзном совещании «Процессы подтопления застроенных территорий грунтовыми водами (прогноз и защита)» (Новосибирск, 1984), 5-й всесоюзной конференции «Проблемы инженерной геологии в связи с промышленно-гражданским строительством и разработкой полезных ископаемых» (Свердловск, 1984), всесоюзной конференции «Подземные воды и эволюция литосферы» (Москва, 1985), 4-м всесоюзном совещании по фундаментостроению (Уфа, 1987), 1-м всесоюзном съезде инженеров-геологов, гидрогеологов и геокриологов (Киев, 1988), 12-й международной конференции по механике грунтов и фундаментостроению (Рио-де-Жанейро, 1989), совещании «Проблема псевдокарста» (Пермь, 1992), международной конференции «Анализ и оценка природных рисков в строительстве» (Москва, 1997), 4-й международной конференции «Новые идеи в науках о земле» (Москва, 1999), 10-й научной школе «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (Алушта, 2000), конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (Москва, 2002), конференции «Инженерные изыскания в XXI веке» (Москва, 2003).

Публикации. Кроме монографии, представленной в качестве диссертации, ее основные положения опубликованы в 86 печатных работах. По теме диссертации сделано 5 изобретений.

Структура и объем работы. Диссертация представляет собой опубликованную монографию: Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. Она состоит из введения, четырех глав, включающих 14 разделов (24 подраздела), заключения, списка литературы, содержащего 282

наименования, и двух тестовых приложений. Объем монографии составляет 216 страниц, она содержит 72 иллюстрации и 14 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность коллективу ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, где он работает с 1972 г., и, прежде всего, его генеральному директору, профессору В.В. Баулину и ученому секретарю О.П. Павловой, без организационной поддержки которых монография не увидела бы свет. Постоянный интерес к данной работе проявляли доктор геолого-минералогических наук И.О. Тихвинский и доктор технических наук Е.С. Дзекер. Огромное влияние на формирование научных взглядов автора оказали ушедшие из жизни профессора Ф.В. Котлов и Н.И. Кригер, а также работающий в настоящее время в Мосгоргеотресте профессор Р.С. Зиангиров. Свои первые шаги в изучении суффозия автор смог осуществить лишь благодаря неоценимой консультативной и технической помощи, оказанной ему ныне покойным доцентом ВЗПИ В.Н. Славяновым.

Многие из присутствующих в диссертации обобщений и выводов были сделаны автором, когда он привлекался в качестве соисполнителя к работам, выполнявшимся ФГУП «Противокарстовая и береговая защита» (г. Дзержинск Нижегородской области). Автор испытывает чувство большой благодарности к коллективу этого государственного предприятия, где ему были предоставлены все необходимые условия для творческой деятельности. В первую очередь это относится к бывшему директору В.В. Толмачеву, нынешнему директору Б.А. Гантову и мастеру Г.Ф. Гладшинову, безупречно осуществлявшему в течение почти двадцати лет до последнего дня своей жизни техническое обслуживание и эксплуатацию разработанного автором экспериментального оборудования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено постановке проблемы и обоснованию ее актуальности, а также содержит краткую характеристику работы и выражение признательности автора организациям и отдельным лицам за оказанную ему помощь и поддержку.

Глава 1. Состояние вопроса

1.1. Терминология

Термин «суффозия» был введен в конце XIX века А.П. Павловым (1898) для обозначения специфической разрушающей деятельности подземных вод в виде выщелачивания и механического выноса частиц горных пород. Он широко используется во всем мире, однако в английском языке слову «suffosion» предпочитают термин «ripping», а во французском - «genard».

В наши дни термин «суффозия» понимают по-разному, и есть сторонники широкой трактовки этого понятия (Казаков, 1981; Газизов, Костенко, 1979; Печеркин, Закоптелов, 1982; Фролов, Коротких, 1983; Хоменко 1996). В данной работе под суффозией понимается *разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс дисперсных и цементированных обломочных пород, в том числе, слагающих структурные элементы скальных массивов*. По мнению многих специалистов, суффозия имеет определенные генетические разновидности, однако содержание и структура всех известных классификаций суффозии зависят от понимания их авторами этого термина.

1.2. Классификации суффозионных процессов и явлений

При широком понимании термина «суффозия» фильтрационное разрушение горных пород считается одним из видов этого процесса, а в гидротехнике под суффозией понимают свободное перемещение частиц в порах, как разновидность фильтрационных разрушений. По этой причине классификации таких разрушений рассматриваются в диссертации как частные классификации суффозии. К ним относятся классификации, предложенные В.С. Истоминой (1957), А.Г. Лыкошиным (1976) и Ю. Цимсом (Ziems, 1967), а также классификация, вытекающая из представлений Р.Р. Чугаева (1936), А.Н. Патрашева (1938) и Е.А. Лубочкова (1962). К. Терцаги и Р. Пек (Terzaghi, Peck, 1948), понимая под суффозией (piping) фильтрационное разрушение горных пород, выделяли две разновидности этого процесса. Согласно В.А. Мироненко и В.М. Шестакову (1974), фильтрационные деформации на откосах могут проявляться в четырех видах, а Л.А. Молоков (1985) считал, что фильтрационные деформации заполнителя карстовых полостей и трещин также имеют четыре разновидности. Существуют и общие классификации суффозии, авторы которых исходят из широкого понимания этого термина (Бочков, 1936; Славянов, 1979; Печеркин, Закоптелов, 1982). Такова же и классификация Ю.В. Архидьяконских (1982), но он трактовал понятие «суффозия» слишком широко, выходя за рамки понятийной базы инженерной геодинамики.

В отличие от суффозионных процессов, суффозионные проявления классифицировались редко, и все эти классификации имеют частный характер. Например, И.А. Клевцов (1985) выделил три типа суффозионных оползней на территории Северного Кавказа. К суффозионным проявлениям могут быть отнесены три типа оползней, входящих в классификацию И.О. Тихвинского (1988). Существуют также классификация карстово-суффозионных явлений (Хоменко, 1986) и классификация псевдокарстовых форм в лессовых породах (Кригер и др., 1983).

1.3. Краткая история изучения суффозии

Согласно Дж. Хатчинсону (1982), первые описания суффозионных объектов появились в конце XVIII в. в Великобритании. В XIX в. процесс привлекает внимание британского исследователя У. Фиттона (Fitton, 1847), известного немецкого географа и геолога Ф. Рихтхофена (Richthofen, 1877), крупнейшего русского ученого В.В. Докучаева (1878). Сразу же после своего появления в 1898 г. термин «суффозия» начал быстро распространяться, причем в широкой трактовке. В России новое геологическое понятие принимает и развивает С.С. Неуструев (1918), однако Л.С. Берг (1908), П.А. Тутковский (1910), А.Д. Нацкий (1916), исследуя суффозионный процесс, предпочитают именовать его карстом или псевдокарстом.

После первой мировой войны интенсивно изучается техногенная, главным образом, механическая суффозия. Этим вопросом занимались: Н.Н. Павловский (1922), В.С. Баумгарт и Р.Н. Давиденков (1929), Е.А. Замарин (1931), С.В. Избаш (1933), Л.И. Козлова (1934), Д.Д. Джагин (1936), Р.Р. Чугаев (1936), Н.М. Бочков (1938) и А.Н. Патрашев (1938) в СССР, У.Блай (Bligh, 1916), К. Терцаги (Terzaghi, 1929) и Э. Лэйн (Lane, 1935) в США, М. Херцог (Herzog, 1938) в Германии. Одновременно продолжалось изучение суффозионных процессов как природного феномена. В этом направлении активно работали Е.В. Милановский (1925), Д.И. Щербаков (1930), К.И. Лисицын (1932), И.С. Шукин (1933), П.С. Ма-

кеев (1937), А.С. Кесь (1939), американские исследователя М. Фуллер (Fuller, 1922), Т. Куэрк (Quirke, 1930), К. Лэндс (Landes, 1933), немецкий географ А. Филиппсон (Philippson, 1931). Инженерная геология, полностью оформившаяся в 1930-х годах как новая наука, включила суффозию в число процессов, требующих изучения и практической оценки (Саваренский, 1939).

По окончании второй мировой войны исследования суффозии приобрели большой размах при значительном обогащении арсенала используемых для этой цели технических средств и методических приемов. Независимо друг от друга в послевоенные годы усиленно изучались следующие виды суффозии:

1) карстово-суффозионное провалообразование (Огильви, 1948; Кавеев, 1956; Короткевич, 1964; Хоменко, 1986; Кутепов, Кожевникова, 1989; Nogushi et al., 1970; Liszkowski, 1979; Brink, 1984; Hodek et al., 1984; Newton, LaMoreaux, 1989; Chen, 1988), а также суффозионное провалообразование над полостями некарстового (в том числе, и искусственного) происхождения (Передельский, 1968; Иванцов, 1976; Маркин, Харитонов, 1982; Мавроди, 1983; Stohret et al., 1988);

2) суффозионное разрушение заполнителя трещин и полостей (Жиленков, 1975; Молоков, 1985; Плотников, 1989);

3) суффозионное разрушение искусственных откосов (Певзнер, 1978; Васильев, 1978; Kaiser, Hewitt, 1977) и естественных склонов (Печеркин, 1969; Кузнецов, Иконников, 1978; Заруба, Менцл, 1979), включая суффозионное оползнеобразование (Самохвалова, 1978; Хатчинсон, 1982; Печеркин, Закоптелов, 1982; Тихвинский, 1988), представление о котором было сформулировано еще в 1930-х годах в работах Ф.П. Саваренского (1935) и К. Терзаги (Terzaghi, 1931);

4) «суффозионный псевдокарст» (Ларионов и др., 1959; Ступишин, 1967; Третьцов, 1972; Кригер, 1975; Кухарев, 1975; Маматкулов, 1985; Рященко и др., 1989; Bujwid, Dietrich, 1973; Kirchner, 1981; Niculescu, 1988; Mendonga et al., 1993).

5) псевдовулканическая суффозия (Котлов, 1978; Золотарев, 1983; Kalin, 1977), интерес к которой проявился уже в начале прошлого века (Quirke, 1930);

6) фильтрационное разрушение грунтов на объектах гидротехнического строительства (Истомина, 1957): результаты этих исследований нашли отражение в нормативных документах и государственных стандартах ряда стран (СНиП 2.02.02-85 и СНиП 2.06.05-84 в СССР; Waro 4.04 в ГДР);

7) химическая суффозия (Петрухин, 1980; Мустафаев, 1985), результаты изучения которой были отражены в СНиП 2.02.01-83 и ГОСТ 25585-83 (ныне в разделе 5.4.6 ГОСТ 12248-96).

В конце прошлого века в нашей стране наметилась новая тенденция решения суффозионной проблемы, о чем свидетельствует появление СНиП 22-01-95 и ГОСТ Р 22.1.06-99. В этих документах суффозия впервые была включена в директивные перечни опасных процессов, даны критерии Сценки ее опасности и определены требования к ее мониторингу и прогнозированию.

Глава 2. Закономерности суффозионных процессов

2.1. Природа суффозии и среда ее протекания

По характеру разрушения горных пород суффозия разделяется на химическую и механическую. Химическая суффозия представляет собой прямое фильтрационное растворение и выщелачивание простых солей (галоидов, сульфатов и

Таблица 1. Суффозионно неустойчивые породы

Горные породы, подверженные суффозионному разрушению			Вид суффозии		
Скальные: обломочные, цементированные растворимым цементом, трещиноватые			Химическая	трещинная	
Дисперсные	связные и несвязные	засоленные проницаемые		поровая	
		любые	Размывание (подземная эрозия)		
	несвязные	любые	Механическая	Фильтрационное разрушение	полное
		с бутовой текстурой			частичное

Таблица 2: Условия, необходимые для выноса и перемещения пород, разрушенных суффозией

Геолого-геоморфологическая обстановка, обеспечивающая суффозионный вынос			Вид суффозии		
Характер рельефа земной поверхности	Структура массива горных пород	Гидрогеологические условия			
Наличие склона	Любая	Разгрузка подземных вод в виде нисходящего источника	Открытая (внешняя)	присклоновая	
		Разгрузка подземных вод в виде восходящего источника		псевдовулканическая	
Любой	Наличие незакольматированных трещин и полостей	Наличие вертикального восходящего потока подземных вод	Закрытая (внутренняя)	Перемещение в трещины и полости	пород, разрушенных восходящим потоком
		Наличие вертикального нисходящего потока подземных вод			пород, разрушенных нисходящим потоком
	Наличие закольматированных трещин и полостей	Наличие нисходящего или горизонтального потока подземных вод	Перемещение заполнителя внутри трещин и полостей		

карбонатов), содержащихся в дисперсных и цементированных обломочных породах в виде цемента или отдельных включений. Поскольку растворение и выщелачивание простых солей протекает по-разному в зависимости от того, являются ли содержащие их горные породы коллекторами трещинного или порового типа (Веригин, 1957), логично вслед за А.Г. Лыкошиным (1976) разделить химическую суффозию на трещинную и поровую.

Механическая суффозия является результатом силового воздействия движущихся подземных вод на вмещающие их породы. Для него необходима достаточно высокая поровая проницаемость горных пород, причем оно бывает полным

или частичным. Полное фильтрационное разрушение породы произойдет тогда, когда в некотором ее объеме гидродинамическое давление превысит эффективные напряжения, и она перейдет в псевдоплавунное состояние, вследствие потери структурных связей. Частичное фильтрационное разрушение представляет собой вынос частиц из межзернового пространства несвязных пород с бутовой текстурой (Кондратьев, 1958).

Таким образом, каждый из видов суффозии, выделенных по характеру разрушения горных пород, протекает в породах определенного типа (табл. 1). Их можно назвать суффозионно неустойчивыми.

В ходе суффозии движущаяся в суффозионно неустойчивых горных породах гравитационная вода не только разрушает их, но и перемещает продукты разрушения. В результате происходит накопление вынесенного минерального вещества в виде заполнения пор кристаллизующимися простыми солями и мелкими нерастворимыми частицами, заполнения трещин и полостей массами дисперсных пород, появления аккумулятивных форм на поверхности земли. Во всех перечисленных случаях, кроме последнего, накопление продуктов суффозионного выноса именуется кольматацией или кольматажем.

По условиям транспортировки продуктов суффозионного разрушения горных пород суффозию можно разделить на открытую или внешнюю (вынос на земную поверхность) и закрытую или внутреннюю (вынос в трещины и полости или перемещение внутри них). Открытая суффозия бывает псевдовулканической, когда вынос обусловлен разгрузкой подземных вод в виде восходящего источника, и присклоновой, когда разрушенные породы выносятся на поверхность склона или откоса. 'Закрытая суффозия может принять вид перемещения заполнителя трещин и полостей в их внутреннем пространстве или перемещения пород из массива в расположенные ниже трещины и полости. Во втором случае процесс также имеет две разновидности, поскольку перемещаемые породы могут быть разрушены нисходящим или восходящим потоком подземных вод. Содержание табл. 2 свидетельствует о том, что возможность реализации каждого из типов суффозии, выделенных по условиям выноса и перемещения разрушенных горных пород, обусловлена определенными особенностями геологической среды.

Суффозия во всех ее разновидностях вызывает изменение структуры горных пород или их массивов, и способна проявиться на земной поверхности или под фундаментами зданий. Суффозионные проявления бывают поверхностными и подземными. К первым относятся псевдовулканы, ниши и пещеры, оползни, поноры, провалы, оседания, а ко вторым - полости, псевдоплавунные зоны, зоны разуплотнения в дисперсных породах и зоны дезинтеграции в скальных породах.

2.2. Динамика суффозионных процессов

Суффозия представляет собой одно из звеньев в цепи преобразований природных и природно-технических геосистем, которые они испытывают в ходе своего существования (Бондарик, 1981). Для этого процесса характерны вполне определенные причинно-следственные связи. Суффозия не может развиваться без необходимых предпосылок (табл. 3), а ее появление бывает вызвано конкретными причинами (табл. 4). В то же время, она сама является причиной некоторых геологических процессов, которые целесообразно именовать постсуффозионными.

Постсуффозионные геологические процессы делятся на склоновые и подземные. Склоновые протекают без нарушения или с нарушением сплошности пород и во втором случае они представляют собой обвалы или оползневые процессы. К подземным постсуффозионным процессам относятся уплотнение пород и их нисходящее перемещение, которое в зависимости от их состояния и свойств может принимать вид обрушения, истечения или прогиба. Развитие постсуффозионных геологических процессов всегда обусловлено действием гравитационных сил, и чаще всего они бывают вызваны увеличением размеров аккумулятивных форм, ниш, поноров, полостей и ослабленных зон при достижении ими некоторых

Таблица 3. Создание условий, необходимых для появления суффозии

Подготовка суффозии	Процессы и воздействия, подготавливающие суффозию	
	природные	техногенные
Накопление суффозионно неустойчивых пород	Естественный литогенез	Накопление культурного слоя Образование грунтовых отвалов Возведение земляных сооружений и насыпей Намыв грунтов
Дезинтеграция скальных пород*	Тектонические движения Выветривание Карст	Производство взрывов
Засоление дисперсных пород**	Затопление территорий морскими водами Привнос солей ветром и атмосферными осадками Испарение высокоминерализованных грунтовых вод	Поступление в грунты сточных и бытовых вод, жидких промышленных отходов Орошение земель
Накопление нерастворимых частиц в порах и заполнителях в трещинах и полостях**	Заиление дна водоемов Разложение органики Выветривание Карст	Искусственный коьматаж песчаных и крупнообломочных грунтов Тампонаж трещин, естественных и искусственных полостей Засыпка подземных выработок Накопление остатков разрушающихся подземных сооружений
Образование трещин и каналов, не контактирующих с водонасыщенными суффозионно неустойчивыми породами*	Тектонические движения Землетрясения Разгрузка напряжений в бортах понижений рельефа Оползнеобразование Усадка глинистых пород Просадка лессовых пород Морозобойное растрескивание Выветривание Жизнедеятельность организмов	Производство буровых работ и экскавация грунтов Деструкция подземных сооружений
Образование полостей, не контактирующих с водонасыщенными суффозионно неустойчивыми породами*	Карст Вулканическая деятельность Подземные пожары Термокарст	Подземная экскавация грунтов и строительство подземных сооружений Добыча полезных ископаемых с помощью выщелачивания, плавления и сжигания
Выход неводонасыщенных суффозионно неустойчивых пород на земную поверхность	Абразия Речная и овражная эрозия Обвалы и оползневые процессы Провалообразование	Разрушение берегов искусственных водотоков и водоемов Открытая экскавация грунтов

* Может также представлять собой результат суффозии

** Может также представлять собой результат единого суффозионно-коьматационного процесса

Таблица 4. Причины суффозии

Фактор, инициирующий суффозию	Процессы и воздействия, способные вызвать суффозию	
	природные	техногенные
1. Появление потока подземных вод в неводонасыщенных суффозионно неустойчивых породах	Затяжные дожди и сильные ливни Бурное таяние снега и льда Паводки и наводнения	Утечки из водонесущих коммуникаций и резервуаров Поступление в грунты сточных и бытовых вод, жидких промышленных отходов Гидромеханизация земляных и горных работ Скважинная добыча нефти и газа с применением за-контурного ивнутриконтурного обводнения Орошение земель Функционирование гидротехнических сооружений
2. Увеличение агрессивности подземных вод по отношению к простым солям		Строительное водоопонижение, осушение грунтов и земель Эксплуатация подземных вод Функционирование гидротехнических сооружений
3. Увеличение скорости потока подземных вод		
4. Выход области суффозионного выноса на контакт с водонасыщенными суффозионно неустойчивыми породами*	Абразия Речная и овражная эрозия Обвальные и оползневые процессы Провалообразование Карст Термокарст Разрушение глинистых водопупоров над полостями Жизнедеятельность организмов	Разрушение берегов искусственных водотоков и водоемов Эксплуатация грунтов Производство буровых работ и проходка подземных горных выработок Деструкция подземных сооружений

* В роли данного фактора может также выступать суффозионный процесс природного или техногенного происхождения

критических величин. Вместе с тем, постсуффозионные процессы могут инициироваться иными факторами, как правило, внешними по отношению к данной геосистеме: динамическими воздействиями на горные породы, их увлажнением, и изменением их напряженного состояния.

Развиваясь во времени, суффозия закономерно изменяет состояние суффозионно неустойчивых пород и структуру включающего их массива: в ходе суффозионных процессов увеличивается скважность горных пород, а постсуффозионные процессы приводят к обратному результату. Это позволяет говорить о суффозионном цикле, включающем отдельные фазы и субфазы (рис. 1). В развитии процесса может наблюдаться и стадийность, которая бывает индуцированной и органичной. Индуцированная стадийность связана с изменениями количественной характеристики фактора, инициирующего суффозию или постсуффозионный процесс, когда их течение прерывается периодами псевдостабилизации, или появлением новых инициирующих факторов. Органичная стадийность является результатом распространения суффозионных и постсуффозионных процессов на другие среды или закономерного перехода от одного их типа к другому.

В некоторых обстоятельствах суффозионный цикл прерывается. Это происходит в том случае, если на суффозию накладывается другая, не относящаяся к постсуффозионным, геологический процесс. Он должен охватить тот объект геосреды, который ранее был охвачен суффозией. В настоящее время известно два процесса, выступающих в подобной роли: овражная эрозия и динамическое разжижение водонасыщенных песков

2.3. Механизм суффозионных процессов

Химическая суффозия я частичное фильтрационное разрушение. Оба процесса представляют собой массоперенос в подземных водах, приводящий к разуплотнению и разупрочнению пород (рис. 2). В некоторых случаях суффозионное разупрочнение пород, слагающих склон, приводит к оползнеобразованию. Постсуффозионное уплотнение суффозионно разуплотненных пород может происходить самопроизвольно под действием их собственного веса и сопровождается образованием на земной поверхности оседаний (западин). Оно резко ускоряется при внешних статических нагрузках, что нередко вызывает деформации передающего их здания или сооружения (Петручин, 1980).

Уплотнение однородных по гранулометрическому составу несвязных дисперсных пород, испытавших частичное фильтрационное разрушение, инициируется только динамическими воздействиями. Если суффозионное разуплотнение вызывает увеличение пористости таких пород выше критического предела, обеспечивающего их динамическое разжижение в водонасыщенном состоянии (Абелев. Кругов, 1989), разжижение накладывается на суффозию, охватывая

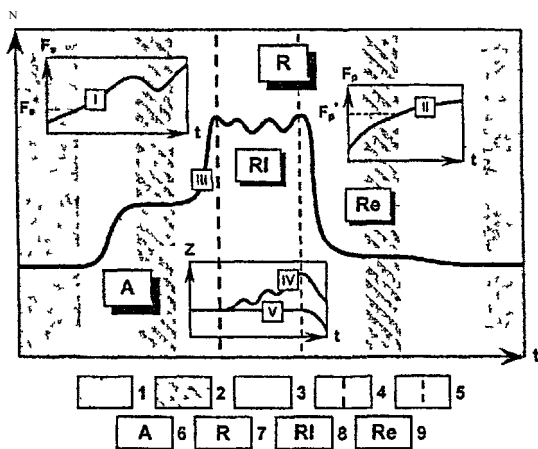


Рис. 1. Суффозионный цикл

Состояние геосистемы. 1 – стабильное, 2 – псевдостабильное, 3 – лабильное. Границы 4 – между фазами суффозионного цикла, 5 – между субфазами суффозионного цикла. Фазы и субфазы суффозионного цикла 6 – активная фаза, 7 – реактивная фаза, 8 – латентная субфаза реактивной фазы, 9 – экспрессивная субфаза реактивной фазы. Изменение во времени (t) I – количественной характеристики (F_p) фактора, инициирующего суффозию (F_p^* – критическая величина), II – количественной характеристики (F_p) внешнего фактора, инициирующего постсуффозионный процесс (F_p^* – критическая величина), III – скважности горных пород (N), IV – отметки земной поверхности (Z) при псевдовулканической суффозии, V – то же при других видах суффозии

Раздел проиллюстрирован блок-схемами, на которых латинскими аббревиатурами обозначены периоды суффозионного цикла (см рис 1), соответствующие образованию характерных суффозионных проявлений, с цифровыми индексами, указывающими на стадийность

область за пределами разуплотненных пород, прерывая тем самым суффозионный цикл.

Подземная эрозия. Термином «подземная эрозия» обозначают суффозионные разрушения горных пород, в состав которых входит их размывание. Этот процесс приводит к формированию подземных каналов (рис. 3), которые могут принимать размеры пещер (Дублянский, Андрейчук, 1989). Подземную эрозию, протекающую в сцементированных обломочных, глинистых и лессовых породах иногда называют, соответственно, кластокарстом, глинистым карстом и лессовым псевдокарстом.

В ходе присклоновой подземной эрозии суффозионный канал, имея субгоризонтальную ориентацию, растет в длину и вширь, что приводит к обрушению его кровли, вплоть до провалообразования. Иногда там, где подземный канал раскрывается на склоне, образуется оползень. В дальнейшем на подземную эрозию может накладываться поверхностная, что приведет к формированию оврага. Закрытая (внут-

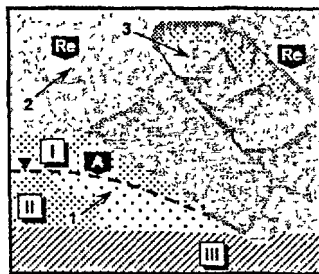


Рис. 2. Геологические явления, обусловленные химической суффозией и частичным фильтрационным разрушением

1 - зона разуплотнения; 2 - оседание (западина); 3 - оползень пресадочного типа по В.В. Лисовину (1968). Горные породы: I - проницаемые дисперсные засоленные или несвязные с бутовой текстурой, находящиеся в зоне аэрации; II - то же, в зоне насыщения; III - слабопроницаемые

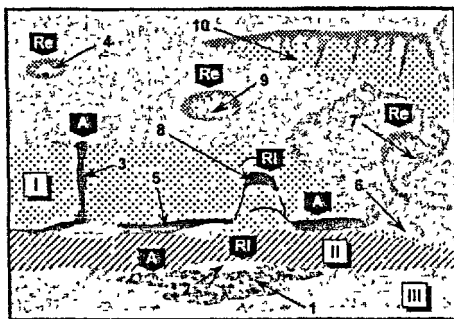


Рис. 3. Геологические явления, обусловленные подземной эрозией

1 - зона дезинтеграции; 2 - кластокарстовая полость, заполненная водой; 3 - вертикальный суффозионный канал (понор); 4 - расширенный понор (воронка просасывания); 5 - горизонтальный суффозионный канал (пещера); 6 - аккумулятивные накопления в виде «языка»; 7 - оползень над входом в суффозионную пещеру по К. Терцаги (1958); 8 - полость обрушения; 9 - провал; 10 - овраг, образующийся после завершения суффозионного цикла. Горные породы: I - размываемые дисперсные; II - слаборазмываемые слабопроницаемые; III - проницаемые скальные обломочные, сцементированные растворимым цементом

ренняя) подземная эрозия связана с появлением и ростом в суффозионно неустойчивых (размываемых) породах не субгоризонтальных, а субвертикальных каналов. Они выполняют функцию водопоглощающих поноров и в верхней части могут принимать вид так называемых воронок просасывания. Обе разновидности подземной эрозии зачастую развиваются совместно.

Присклоновое фильтрационное разрушение. Фильтрационное разрушение горных пород может протекать в двух формах: плавной и резкой. На склонах различие между ними проявляется особенно четко (рис. 4).

Морфологическим признаком плавного протекания присклонового фильтрационного разрушения является устойчивая ниша, сформировавшаяся в водопроницаемых породах, которая по

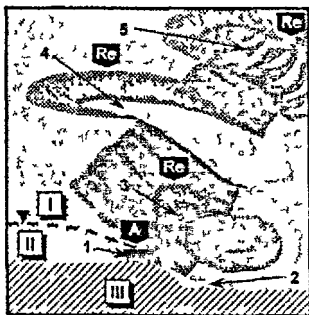


Рис. 4. Геологические явления, обусловленные присклоновым фильтрационным разрушением
 1 - суффозионная ниша, 2 - аккумулятивные накопления, 3 - оползень над суффозионной нишей (уступом), 4 - оползень суффозионного механизма по И О Тихвинскому (1988), 5 - оползень выплывания по В В Кюнтцелс (1992) Горные породы I - дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации, II - то же, в зоне насыщения, III - слабопроницаемые

склона в результате разрушения перекрывающего ее слабопроницаемого экрана. Если склон перекрыт глинистыми накоплениями, они могут быть «срезаны» оползнями сдвига. Если же экран образовался вследствие сезонного промерзания водонасыщенных пород, его прорывы происходят под действием воды (нередко горячей), поступившей из поврежденных коммуникаций.

Наложение поверхностной эрозии на присклоновое фильтрационное разрушение приводит к образованию своеобразных оврагов, которые называют эндвинными (Матвеев, 1969) В то же время, овражная эрозия подготавливает и даже инициирует рассматриваемый процесс.

мере развития процесса все глубже проникает внутрь склона. Ниша, врезающаяся в склон подобно штольне, может вызвать образование провалов вдоль ее оси, а если она растет как поперек, так и вдоль склона, образуя уступ, то следует ожидать обваливания или оползания нависающего над ней «карниза».

Результатом резкого протекания присклонового фильтрационного разрушения являются оползни двух типов- суффозионного механизма (Тихвинский, 1988) и выплывания (Кюнтцель, 1992) Оползнеобразование первого типа представляет собой циклическое обваливание пород над вновь возникающими суффозионными нишами, которое распространяется вверх по склону. Второй тип оползнеобразования характеризуется практически мгновенным превращением определенного объема водопроницаемых пород в псевдоплыун, сопровождающимся его смещением вниз по склону Присклоновое фильтрационное разрушение, протекающее в резкой форме, часто бывает вызвано «внезапным» выходом водонасыщенных пород на поверхность

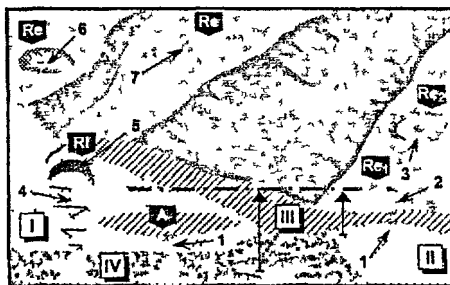


Рис. 5. Геологические явления, обусловленные фильтрационным разрушением пород входящим потоком

1 - суффозионная полость, заполненная водой, 2 - псевдовулкан, 3 - псевдокальдера (провал), 4 - зона фильтрационного разрушения пород восходящим потоком, принимающего вид единого суффозионно-обвального процесса, 5 - полость обрушения, 6 - провал 7 - оседание, образовавшееся в результате прогиба Горные породы I-дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации, (I - то же, в зоне насыщения, III - глинистые слабопроницаемые, IV - содержащие трещины и полости любого происхождения

Фильтрационное разрушение восходящим потоком. Разрушение пород восходящим фильтрационным потоком встречается в трех разновидностях: при-склоновой (не отличающейся по своим последствиям от присклонового фильтрационного разрушения), псевдовулканической и закрытой. Последние две показаны на общей блок-схеме (рис. 5).

Псевдовулканическое фильтрационное разрушение с максимальной полнотой проявляется при разгрузке первого от поверхности напорного водоносного горизонта через сквозное нарушение сплошности перекрывающего его глинистого водоупора (Albiker, 1973). В этом случае на поверхности земли формируется специфическое аккумулятивное образование - псевдовулкан. Под подошвой водоупора растет заполненная водой полость, вызывая его прогиб и последующее обрушение с образованием псевдокальдеры.

Закрытая (внутренняя) разновидность фильтрационного разрушения пород восходящим потоком протекает как при отсутствии, так и при наличии водоупора, отделяющего водопроницаемые породы от полости-приемника, если в нем существовало или возникло сквозное нарушение сплошности. Процесс начнется в результате появления в водопроницаемых породах восходящего потока. В неводонасыщенных породах он возникнет при поступлении в них воды снизу, из полости-приемника, а в водонасыщенных - при оттоке из них воды, например, вследствие водоотбора. В ходе процесса в испытывающих разрушение породах происходит цикличное формирование сменяющих друг друга заполненных и не запол-

ненных водой полостей. Вторые возникают над первыми в результате обрушения их кровли, а первые образуются на месте вторых после их заполнения вытесненной водой. Процесс распространяется снизу-вверх до отметки уровня или пьезометрического напора горизонта, из которого поступает вода. Если он достигнет земной поверхности, на ней появится провал, как результат обрушения, или оседание, как результат прогиба.

Закрытое фильтрационное разрушение нисходящим потоком. Рассматриваемый процесс протекает по-разному в зависимости от того,

подвергаются разрушению водонасыщенные или неводонасыщенные породы. Это показано на рис. 6.

В неводонасыщенных породах, перекрывающих открытую незакольматированную и обезвоженную полость-приемник, направленный в нее нисходящий фильтрационный поток возникает при любых поступлениях воды извне в зону аэрации.

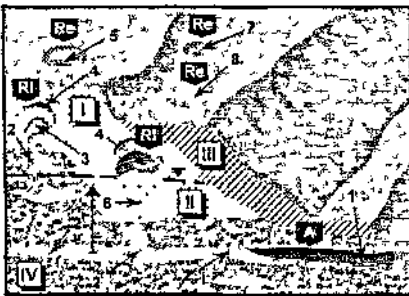


Рис. 6. Геологические явления, обусловленные закрытым фильтрационным разрушением пород нисходящим потоком

1 - полость несэффузионного происхождения (пещера), лишенная заполнения в результате суффозии; 2 - заполнитель полостей; 3 - зона совместного проявления суффозии и обрушения в виде суффозионно-обвального процесса; 4 - полость обрушения; 5 - провал по Г В Короткевичу (1964); 6 - псевдопльвинная зона; 7 - провал по В П Хоменко (1986); 8 - оседание, образовавшееся в результате прогиба. Горные породы I - дисперсные с высокой поровой проницаемостью, находящиеся в зоне аэрации; II - то же в зоне насыщения; III - глинистые слабопроницаемые; IV - содержащие трещины и полости любого происхождения

Его разрушительная работа проявляется в циклическом обрушении вновь возникающих не заполненных водой суффозионных полостей, которое может достигнуть земной поверхности (Короткевич, 1964).

Для закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком водонасыщенных пород достаточно выхода не заполненной водой полости-приемника на контакт с ними, а если приемник заполнен водой, процесс инициируется ее оттоком и (или) поступлением воды в вышележащие породы (Хоменко, 1986). Направленный в полость фильтрационный поток разрушает водонасыщенные породы, в них появляется и растет псевдоплавунная зона. После того, как ее верхняя точка достигнет подошвы слабопроницаемого слоя или свободной поверхности грунтовых вод, она будет расти только вширь, вызывая прогиб или дискретное обрушение вышележащих пород, вплоть до образования оседания или провала.

Закрытое фильтрационное разрушение пород нисходящим потоком тесно связано с миграцией заполнителя трещин и полостей. Нередко заполнитель сам представляет собой продукт суффозионного выноса вышележащих пород в полость-приемник, а его разрушение является фактором, инициирующим такой вынос. В массиве скальных пород жесткая внутренняя поверхность трещины или полости ограничивает развитие этого вида закрытой суффозии. В случае выхода такой трещины или полости на склон, фильтрационное разрушение и вынос заполняющих ее пород способны сформировать нишу, и суффозионный процесс будет протекать по схеме присклоновой подземной эрозии, но без образования провалов или оползней.

2.4. Пространственное распространение суффозии

Доминирующая роль в пространственном распространении суффозионных процессов явно принадлежит регионально-геологическим факторам. Развитию суффозии благоприятствует наличие в геологическом разрезе лессовых, засоленных дисперсных и перекрытых песками карстующихся пород. Ему, безусловно, должны способствовать восходящие современные тектонические движения и приуроченность территории к положительным тектоническим структурам.

В меньшей степени на пространственное распространение суффозии влияет физико-географическая зональность. Отдельные суффозионные проявления отмечаются в лесотундровой зоне субарктического пояса. Процесс активно развит в умеренном поясе северных широт и в лесной зоне северного субтропического пояса, имеет слабое развитие в зоне саванн и в каком-то виде присутствует в зоне тропических лесов. В пределах северного умеренного пояса суффозия сильно развита в степной и лесостепной зонах, слабее в зоне полупустынь, еще слабее в зоне пустынь и наиболее слабо в лесной зоне. Внутри перечисленных физико-географических зон (за исключением пустынь) в распространении суффозионных процессов отчетливо проявляется высотная зональность. Суффозия наиболее активна на приморских равнинах, менее активна на континентальных равнинах и обладает минимальной активностью в горах, присутствуя не только в низкогорном, но также в средне- и высокогорном высотном поясах.

Если дифференцированно рассматривать влияние отдельных компонентов совокупности «природные условия» на распространение суффозии в пределах одного инженерно-геологического региона первого порядка, как это было сделано

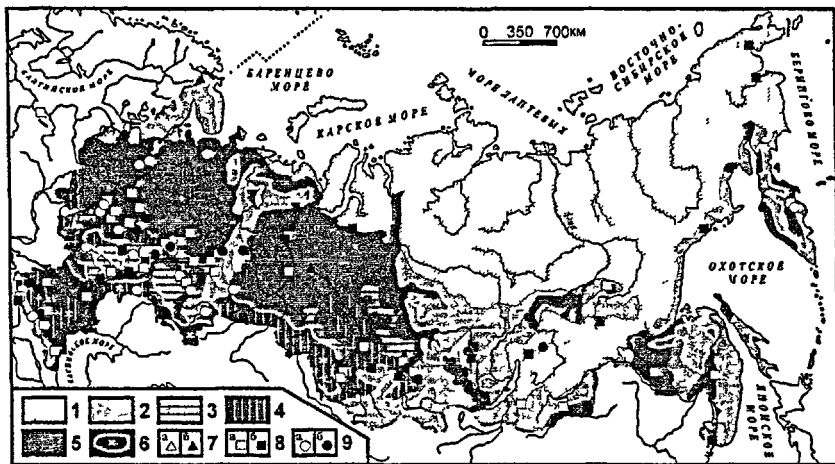


Рис. 7. Схематическая карта развития суффозии на территории России

1 - область весьма ограниченного развития суффозии, в пределах которой оно возможно только в таликах и морозобойных трещинах, а также при техногенном протаивании мерзлых пород. Территории возможного широкого развития отдельных разновидностей суффозии: 2 - выноса заполнителя трещин и полостей в скальных породах и подземной эрозии в виде кластокарста; 3 - подземной эрозии в виде «глинистого карста», 4 - подземной эрозии в виде «лесового псевдокарста»; 5 - подземной эрозии и фильтрационного разрушения; 6 - химической суффозии. Районы интенсивного развития суффозии природного (а) и техногенного (б) происхождения: 7 - псевдо-вулканической, 8 - присклоновой; 9 - закрытой (внутренней)

К.Я. Казаковым (1981) применительно к Русской платформе, нетрудно обнаружить, что такое влияние может быть неоднозначным и даже противоречивым. Именно так обстоит дело с влиянием на развитие суффозии климатических условий и растительности. Влияние геоморфологических условий на пространственное распространение суффозионных процессов имеет более определенный характер: обстановка для развития суффозии тем более благоприятна, чем более контрастен рельеф данной местности, особенно если такая контрастность обусловлена речной и овражной эрозией. Деятельность землероющих животных однозначно способствует суффозионным процессам, районы интенсивного развития которых могут совпадать с ареалами их расселения.

В связи с тем, что суффозия относится к процессам, крайне чувствительным к техногенным воздействиям на геологическую среду, места ее распространения в значительной мере совпадают с местами концентрированного проявления таких воздействий. Суффозия активно развивается в районах добычи полезных ископаемых, на подтопленных территориях и в районах орошаемого земледелия, на берегах равнинных водохранилищ. Техногенная суффозия представляет собой чрезвычайно распространенный феномен на территориях городов, а за их пределами, бывает приурочена к отдельным гидротехническим сооружениям, промышленным предприятиям, объектам энергетики и транспортным магистралям.

Закономерности пространственного распространения суффозии в той или иной мере прослеживаются на территории России (рис. 7). Районы наиболее ак-

тивного развития суффозии природного происхождения, в основном, приурочены к субширотной простирающейся полосе с сезонным, преимущественно весенним и осенним умеренным питанием грунтовых вод и с наличием устойчивого зимнего промерзания верхней части зоны аэрации. Негативные проявления техногенной суффозии сосредоточены в районах интенсивного хозяйственного освоения.

Глава 3. Прогноз суффозионных процессов»

3.1. Принципы прогнозирования суффозии

Для прогноза суффозии необходима определенная исходная информация. Сведения о поверхностных или подземных суффозионных проявлениях представляют собой прямую исходную информацию для прогнозирования, а к косвенной относятся данные об условиях развития суффозии и инициирующих ее факторах природного или техногенного происхождения. Информацию о подземных суффозионных проявлениях в полном объеме получить невозможно, а информация о техногенных факторах, инициирующих суффозию, в основном, сама представляет собой результат прогнозирования.

Количественное прогнозирование геологических процессов осуществляется разными методами. Обычно их объединяют в пять групп, к которым относят: а) экстраполяцию результатов стационарных наблюдений; б) методы, базирующиеся на детерминированных математических моделях; в) методы, базирующиеся на вероятностных моделях; г) физическое моделирование; д) методы аналогий. Все эти методы, как правило, применяют в определенных сочетаниях.

В настоящее время широко используются способы прогноза развития экзогенных геологических процессов, оперирующие показателем интенсивности формирования их поверхностных проявлений, например, карстового провалообразования (Саваренский, Миронов, 1995). Подобный подход вполне применим к региональному экстраполяционному прогнозу развития суффозионных процессов.

Методы прогноза суффозии, основанные на использовании детерминированных математических (геомеханических) моделей, разработаны не для процесса в целом, а для определения параметров его конкретных проявлений или условий протекания его конкретных генетических разновидностей. Такие модели были созданы с целью количественного прогнозирования условий и параметров суффозионного провалообразования (Хоменко, 1986), оползнеобразования (Мироненко, Шестаков, 1974; Печеркин, Закоптелов, 1982; Хатчинсон, 1982; Тихвинский, 1988), оврагообразования (Матвеев, 1969), фильтрационного разрушения грунтов оснований гидротехнических сооружений (Dunn et al., 1980), химической (Веригин, 1957) и псевдовулканической (Kalin, 1977) суффозии.

В последние годы в инженерной геодинамике широкое распространение получили вероятностные математические модели. Применительно к суффозии вероятностно-детерминированные прогнозы использовались только в гидротехнике (Van Zyl, Nagt, 1983), а вероятностно-статистические не использовались вовсе, но с этой целью могут применяться решения, предложенные в области инженерно-геологического изучения карста (Толмачев и др., 1986; Yang, Zhou, 1989; Reuter et al., 1990) и оползней (Гулакян и др., 1977; Шешеня, 1986).

Прогноз суффозии осуществляется и с помощью физического моделирования. Для этой цели широко используют натурный эксперимент (Молоков, 1985;

Золотарев, 1990), а также испытания созданных в полевых условиях крупномасштабных моделей земляных сооружений (Павчич, Балыков, 1976). В лабораторных условиях применяются трехмерные экспериментальные установки (Архидьяконских, 1982) или двухмерные модели с прозрачными стенками (Слободян, 1959; Девдариани, Воронкевич, 1961; Nogushi et al., 1970; Vujwid, Dietrich, 1973; Lei, Jiang, 2001). При лабораторной имитации суффозии всегда используется принцип моделирования в фильтрационных лотках (Жернов, Павловец, 1976), но в ряде случаев процесс можно моделировать на образцах грунтов в компактных фильтрационных приборах (Истомина, Буренкова, Мишурова, 1975; Жиленков, 2001; Kezdi, 1976; Sherard et al., 1976; Kalin, 1977). Наиболее подробно технология работы с подобными устройствами изложена В.Н. Славяновым (1971) и В.Н. Жиленковым (1975), а также в разделе 5.4.6 ГОСТ 12248-96. Моделирование суффозионных и постсуффозионных процессов осуществляют также на центрифуге (Федоров, 1957) или, применяя эквивалентные материалы (Chen, Beck, 1989) с учетом специфических критериев подобия (Аникеев, 1987). К использованию искусственных сред в качестве материалов моделей прибегают также в случае аналогового моделирования суффозии (Jennings, 1966).

Для прогноза суффозии полностью приемлем и метод натуральных аналогий, принципы которого универсальны и исчерпывающе сформулированы Л.Б. Розовским (1969). Тем не менее, в этом качестве он до сих пор не используется.

В следующих разделах главы 3 рассмотрены методики прогноза суффозионных и постсуффозионных процессов, разработанные в ПНИИСе самим автором или под его непосредственным научным руководством.

3.2. Геомеханические модели суффозионного провалообразования

Модели обрушения дисперсных пород. Первоначальное обрушение дисперсных пород над растущей суффозионной полостью или псевдопльвинной зоной произойдет в тот момент, когда она достигнет определенной ширины. Если она расположена недостаточно глубоко, на поверхности земли возникнет провал. Для определения критической полуширины суффозионной полости или псевдопльвинной зоны, обеспечивающей образование провала (a^{\wedge}) вполне пригодны универсальные решения В.М. Кутепова (1986) и Г.М. Троицкого (Толмачев и др., 1986). При отсутствии в испытывающих обрушение дисперсных породах водоносных слоев, для расчета величины a_{c2} можно использовать упрощенные решения М. Пенцеля (Penzel, 1980) или В.П. Огоноченко (1979):

$$a_{c2} = z \xi_2 \operatorname{tg} \varphi_2 + 2c_2 / \gamma_2 \quad (1)$$

где z - глубина верхней точки суффозионной полости или псевдопльвинной зоны; $(\xi)_2$ - средневзвешенный по величине z параметр, рассчитанный для всей толщи дисперсных пород, перекрывающих суффозионную полость или псевдопльвинную зону; ξ - коэффициент бокового давления, который может быть рассчитан по известной формуле $\xi = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \varphi / 2)$; φ - угол внутреннего трения; c - удельное сцепление; γ - удельный вес пород без учета направленного вверх гидростатического давления на водоупоры.

В одной из своих работ (Хоменко, 1984) автор предложил оценивать условия образования провалов в необводненной песчаной толще по формуле:

$$a_{c2} = 0,19 z \quad (2)$$

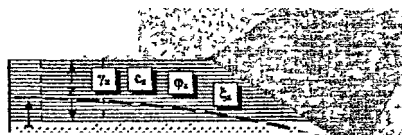
Формулы (1) и (2) пригодны для прогнозирования параметров провалов, образующихся в результате при-склоновой суффозии (рис. 8), поскольку диаметр подобного провала (d) можно принять равным величине $2a_c$. Если при-склоновая суффозия, протекающая в виде подземной эрозии, сформировала сквозной подземный канал, диаметр ожидаемого провала должен находиться внутри диапазона значений, рассчитанных для величин Z_{\min} и Z_{\max} . Эти величины измеряются так, как показано на рис. 8 в. Для «глухого» подземного канала минимально возможный диаметр провала принимается равным величине $4c_z/\gamma_z$.

Если в процессе своего роста суффозионная полость или псевдопльвинная зона не достигает критической величины, обеспечивающей образование провала, над ней все же может произойти обрушение вышележащих дисперсных пород без выхода на земную поверхность, что приведет к формированию на некоторой глубине полости обрушения (внутреннего вывала). С точки зрения прогнозирования первоочередной интерес представляет ситуация, когда внутреннему вывалу подвергается слабопроницаемый слой глинистых пород (промежучочный водоупор) и перекрывающие его несвязные дисперсные породы.

Согласно предлагаемому автором решению, в основе которого лежит модель М.М. Протождяконова (Насонов, 1969), критическая полуширина суффозионной полости или псевдопльвинной зоны, обеспечивающая образование внутреннего вывала (a_c), может быть рассчитана по формуле:

$$a_c = m_1 G \left[\sqrt{1 + 2(2c_1 + \gamma_1 m_1 \xi_1 \operatorname{tg} \varphi_1) \operatorname{tg} \varphi_2 / \gamma_2 m_1 G^2} - 1 \right], \quad (3)$$

где m - мощность слоя; $(\cdot)_1$ - параметр слоя слабопроницаемых связных пород; $(\cdot)_2$ - параметр слоя вышележащих несвязных пород; $G = (\gamma_1 \operatorname{tg} \varphi_2 - 2\gamma_2 \xi_1 \operatorname{tg} \varphi_1) / \gamma_2$ (величину γ_2 целесообразно принять равной 20 кН/м^3).



<?>]hi>i 4*if ^^ 4>v?> ^ A-'j* ,..

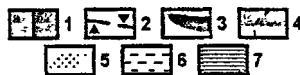


Рис. 8. Схемы к расчету диаметров провалов, образующихся в результате при-склоновой механической суффозии: фильтрационного разрушения при безнапорном (а) и напорном (б) характере потока подземных вод и подземной эрозии (в). Пояснения см. в тексте

1 - субгоризонтальная (а) и наклонная (б) земная поверхность; 2 - свободная или пьезометрическая поверхность подземных вод; 3 - существующие подземные полости; 4 - ожидаемый суффозионный провал. Дисперсные породы: 5 - с высокой поровой проницаемостью; 6 - с высокой поровой проницаемостью и слабопроницаемые; 7 - слабопроницаемые

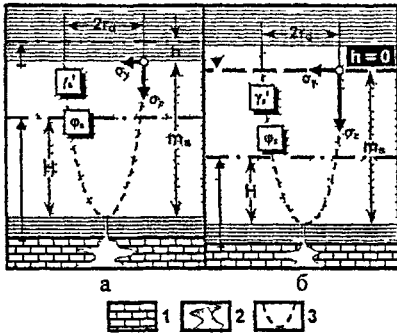


Рис. 9. Схемы к расчету ширины псевдоплавунных зон, образующихся в результате закрытого фильтрационного разрушения несвязных пород нисходящим потоком при его напорном (а) или безнапорном (б) характере Пояснения см в тексте

1 - породы, содержащие подземные полости естественного или искусственного происхождения, 2 - существующая подземная полость, заполненная водой, 3 - контур ожидаемой псевдоплавунной зоны. Остальные условные обозначения см на рис 8

Невыполнение условия, выраженного формутой (4), свидетельствует о том, что суффозионный процесс локализован в зоне насыщения, и поэтому образование провала исключается. Оно произойдет только в том случае, если:

$$2r_d = d \geq 2a_{c2} \quad (5)$$

где r_d - максимально возможный радиус верхней части псевдоплавунной зоны, образовавшейся вследствие фильтрационного разрушения нисходящим потоком; d - диаметр провала

Величина r_d определяется формулой.

$$r_d = m_s \left[\gamma_w (m_s + h - H) + 2\sigma_y \right] / (2\gamma'_s m_s + 3\sigma_z) \operatorname{tg} \varphi_s, \quad (6)$$

где γ' - удельный вес породы, взвешенной в воде, принимаемый равным 10 кН/м^3 . σ_z - вертикальное нормальное напряжение на верхней границе водонасыщенных несвязных пород

Расчет критического снижения напора воды (Δh) в полости-приемнике, при котором произойдет образование провала, осуществляется по формуле

$$\Delta h = H + a_{c1} (2\gamma'_s m_s + 3\sigma_z) \operatorname{tg} \varphi_s / \gamma_w m_s - (m_s + h + 2\sigma_y / \gamma_w) \quad (7)$$

В ситуациях, когда несвязные породы представляют собой первый от поверхности слой и содержат безнапорный водоносный горизонт, суффозионный провал может возникнуть и в результате подъема уровня грунтовых вод выше некоторой критической величины (ЛБ), что обычно бывает связано с техногенной инфильтрацией. Для расчета этой величины используется формула:

$$\Delta h = [\gamma_s m_s \xi_a - \gamma_w (m_s - H)] / (\gamma_w + \gamma_s \xi_a) \quad (8)$$

где $(\xi)_a$ - параметр несвязных пород зоны аэрации.

Модель закрытого фильтрационного разрушения нисходящим потоком.

Анализируя структуры полей гидродинамического давления и эффективных напряжений в толще водонасыщенных несвязных дисперсных пород, испытывающих закрытое (внутреннее) фильтрационное разрушение нисходящим потоком, можно прийти к выводу, что псевдоплавунная зона выйдет на контакт с верхней границей зоны насыщения (рис.9) только при условии

$$\gamma_w (m_s + h - H) \geq \sigma_y, \quad (4)$$

где γ_w - удельный вес воды, принимаемый равным 10 кН/м^3 ; $(\xi)_a$ - параметр водонасыщенных несвязных пород; h - напор присутствующих в них подземных вод, H - напор воды в полости-приемнике, считая от их подошвы, σ_y - горизонтальное нормальное напряжение на их верхней границе.

Невыполнение условия, выраженного формутой (4), свидетельствует

Диаметр суффозионного провала, образующегося при критическом подъеме уровня грунтовых вод, определяется по формуле:

$$d = 2(m_1 + \Delta h) \left[\gamma_w (m_1 + \Delta h - H) + 2\gamma_s \epsilon_s (m_1 - \Delta h) \right] / \left[2\gamma'_s (m_1 + \Delta h) + 3\gamma_s (m_1 - \Delta h) \right] \operatorname{tg} \alpha_s \quad (9)$$

Модель закрытого фильтрационного разрушения восходящим потоком.

Общая картина закрытого (внутреннего) фильтрационного разрушения несвязных пород восходящим потоком позволяет идентифицировать данную разновидность суффозии с их, так называемым, ползучим разжижением (Иванов, 1962), протекающим в специфических условиях. Предлагаемое автором теоретическое решение позволяет рассчитывать максимально возможный радиус верхней части зоны разрушения (r_a) по формуле:

$$r_a = M \left[1 - 0,56 \sqrt[3]{(e_{as} + 1)/e_{as}} \right] / \operatorname{tg} \alpha_{as} \quad (10)$$

где M - максимально возможная высота верхней части зоны разрушения; $(\alpha)_{as}$ - параметр толщ несвязных пород, испытывающих фильтрационное разрушение восходящим потоком; e - коэффициент пористости; α - угол естественного откоса под водой.

Если породы, подвергающиеся фильтрационному разрушению восходящим потоком, перекрыты слоем слабопроницаемых связных пород, величина M определяется, исходя из условия:

$$M = \begin{cases} m_{as} & \text{при } H > m_{as}, \\ H & \text{при } H \leq m_{as}. \end{cases} \quad (11)$$

Когда разрушаемые несвязные породы выходят на земную поверхность, M становится равным H , и величина r_a , рассчитываемая по формуле (10), сравнивается с величиной a_{c2} , которая определяется формулами (1) или (2). Если $r_a < a_{c2}$, считается, что провалообразование исключено, а если это условие не выполняется, делается вывод о возможности появления провала, с максимальным диаметром $d = 2r_a$.

При наличии в толще дисперсных пород, перекрывающих полость-приемник, слабопроницаемых слоев (рис. 10), прогнозирование осуществляется с учетом возможности их вовлечения в рассматриваемый процесс. С этой целью для уровня подошвы каждого слабопроницаемого слоя, сложенного несвязными породами, начиная с самого нижнего, по формулам (10) и (3) определяются величины r_a и a_{c1} и, если первая меньше второй, делается вывод о невозможности образования провала. В противном случае следующий расчет осуществляется уже для уровня подошвы более высоко расположенного слабопроницаемого слоя, а в формулу (10) в качестве параметра M включается величина, соответствующая более высокому положению фронта разрушения. При этом для каждого уровня по формулам (1) или (2) рассчитывается также величина a_{c2} и, если $r_a \geq a_{c2}$, делается вывод о возможности образования провала, диаметр которого не может превышать величину $2r_a$.

3.3. Определение местоположения ожидаемого провала

Основные теоретические предпосылки. Наличие ослабленных зон вокруг провалов — известный феномен, который отчетливо прослеживается по результатам статического и динамического зондирования грунтов (Кочев и др., 1989; Lebegue, 1973). Аналогичная картина наблюдается и там, где провалы отсутствуют,

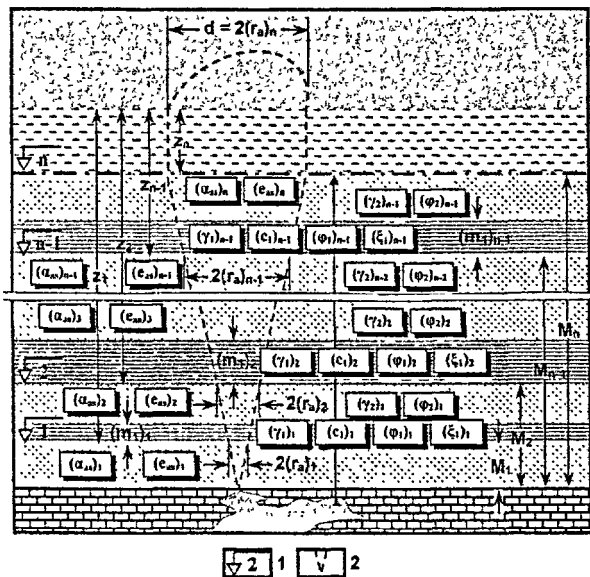


Рис. 10. Схема к расчету диаметров провалов, образующихся в результате закрытого фильтрационного разрушения несвязных пород восходящим потоком. Пояснения см. в тексте
 1 - расчетный уровень и его номер; 2 - контур ожидаемой зоны разрушения. Остальные условные обозначения см. на рис. 8 и 9

места образования ожидаемых провалов. Такой анализ целесообразно осуществлять, оперируя средним для данной точки зондирования значением сопротивления грунта конусу зонда (R^*), которое представляет собой частное от деления площади эпюры графика зондирования на ее высоту.

Базовые статистические модели и практическая реализация прогноза.

Исходя из некоторых, полностью подтверждаемых эмпирически соображений теоретического характера, можно прийти к выводу, что поле параметра R над полостью адекватно аппроксимируется функцией:

$$R^* = R_f^* - \Delta R_c^* \exp \left[-(\rho/\rho_k)^2 \right] \quad (12)$$

где R_f^* - фоновое значение параметра R^* ; ΔR_c^* - штрих деление фонового значения параметра R^* над центром полости; ρ - замеренная в горизонтальной плоскости удаленность точки зондирования от центра полости; ρ_k - эмпирический коэффициент, имеющий размерность длины.

Отсюда следует, что для определения местоположения подземных полостей с готовой обрушиться кровлей а, следовательно, и будущих провалов, необходим такой анализ двумерного поля параметра R^* , который позволил бы находить в нем аномалии, отвечающие эталонному критерию, выраженному формулой (12). Практически это осуществляется следующим образом. Для каждой точки статиче-

но были обнаружены подземные полости (Rey, Suderglau, 1984). Причина этого явления заключается в закономерном изменении напряженного состояния дисперсных пород над полостью, обрушение которой впоследствии приводит к образованию провала (Хоменко, Коломенский, 2000).

Таким образом, анализируя структуру поля напряжений, косвенно выраженную через пространственную изменчивость сопротивления грунта конусу зонда, можно заранее определять

ского или динамического зондирования рассчитывается величина параметра R^* , причем глубина, от которой начинается осреднение, должна быть постоянной. Выбирать ее следует, исходя из необходимости исключения влияния первого от поверхности слоя с переменной мощностью, сложенного породами, обладающими нестабильным, чрезмерно высоким или низким сопротивлением конусу зонда. Затем строится карта изолиний параметра R^* , на которой по принципу «водораздела» оконтуриваются участки понижений на изображенной поверхности.

Предполагается, что искомые аномалии приурочены к таким участкам.

Локализация и идентификация аномалий осуществляются отдельно для каждой из групп точек зондирования, расположенных на выделенных участках, причем такая группа должна включать не менее пяти точек. Эта задача может решаться с применением двух подходов. При первом подходе локализации и идентификации подлежит центральная часть аномальной зоны, а при втором - вся зона. Прогнозы, построенные с помощью обоих подходов, одинаково хорошо верифицируются (рис. 11), поэтому трудно отдать предпочтение одному из них.

В основе первого подхода лежит предпосылка, что эталонная модель центральной части искомой аномалии может быть выражена параболоидом вращения или круглым конусом. Для реализации прогноза на карте изолиний параметра R^* произвольно выбирается система прямоугольных координат (x, y), а точкам зондирования, входящим в одну группу, присваиваются порядковые номера от 1 до 1.

Статистическая обработка исходных параметров заключается в определении коэффициентов полинома $f(K)$, выражающего случайную функцию вида:

$$R^* = K_1 + K_2x + K_3y + K_4(x^2 + y^2), \quad (13)$$

после чего рассчитываются координаты центра аномальной зоны.

$$x_0 = K_2/2K_4, \quad (14)$$

$$y_0 = K_3/2K_4. \quad (15)$$

Отклонения фактических значений параметра R^* от поверхности тренда, которая аппроксимируется полиномом, выраженным формулой (13), обуславливает существование в горизонтальной плоскости круговой зоны, внутри которой будет

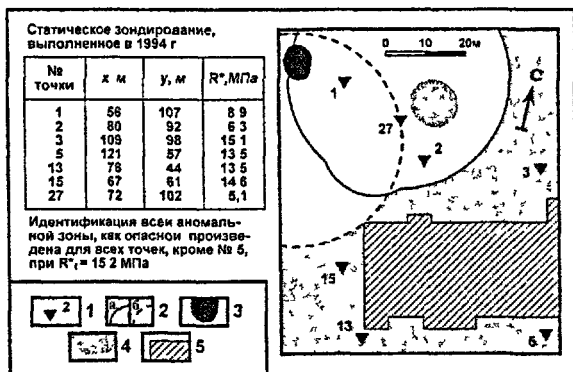


Рис. 11. Пример реализации и верификации прогноза, осуществленного с помощью метода определения местоположения ожидаемого провала в промышленной зоне г. Дзержинска Нижегородской области

1 - точка статического зондирования и ее номер, 2 - зона, внутри которой, согласно прогнозной идентификации ее центральной части (а) и всей зоны (б), должен находиться центр провала в случае его образования; 3 - провал, образовавшийся в 1996 г.; 4 - старая провальная воронка. 5 - контур здания

располагаться центр ожидаемого провала. Ее радиус определяется доверительным интервалом и теснотой тренда, а координаты ее центра рассчитываются по формулам (14) и (15). Для оценки размеров зоны определяется расстояние от ее центра до каждой точки зондирования (ρ). Если коэффициент линейной корреляции между параметрами \mathbf{R}^* и ρ меньше 0,6, делается вывод о невозможности провалообразования. В противном случае вычисляется стандартная ошибка оценки значения величины ρ при ее регрессии по величине \mathbf{R}^* . Радиус зоны равен удвоенной величине стандартной ошибки. Прогнозные расчеты должны осуществляться вариантно, для различных комбинаций точек зондирования, отнесенных к данной депрессии, если их больше пяти. Все варианты расчетов считаются равноценными, поэтому провалоопасная зона может выглядеть как пятно сложной конфигурации, представляющее собой композицию из нескольких слившихся кругов с разными радиусами.

Второй подход основан на допущении, что исследуемая депрессия полностью аппроксимируется функцией, выражаемой формулой (12), в которой параметр \mathbf{R}_f^* имеет значение, равное или близкое максимальной величине \mathbf{R}_i^* , зафиксированной в данной группе точек зондирования $(\mathbf{R}_i^*)_{\max}$. Для каждой точки определяется параметр $(\mathbf{R}^*)' = \ln(\mathbf{R}_i^* - \mathbf{R}_f^*)$, а в качестве идентифицирующего значения коэффициента корреляции между параметрами $(\mathbf{R}^*)'$ и ρ принимается величина 0,8. Радиус провалоопасной зоны рассчитывается как квадратный корень из величины стандартной ошибки. Величина $(\mathbf{R}^*)'$ не должна равняться бесконечности, поэтому для групп, включающих пять точек зондирования, допускается условие:

$$\mathbf{R}_f^* = (\mathbf{R}_i^*)_{\max} + 0,1 \text{ МПа} \quad (16)$$

3.4. Лабораторное физическое моделирование суффозии

Экспериментальное оборудование и принципы моделирования. Для моделирования суффозии в ПНИИИСе и ФГУП «Противокарстовая и береговая защита» используется экспериментальная установка, конструкция которой показана на рис. 12. Условия, необходимые для имитации конкретных видов суффозии, создаются на моделях путем включения в работу соответствующих узлов и деталей установки, а также с помощью дополнительных технических устройств.

Если воспроизводимая на модели геосистема допускает простую схематизацию, моделирование целесообразно осуществлять в виде серии экспериментов, которая должна завершиться построением математических моделей имитируемых процессов (Хоменко, 1999). Сущность такого моделирования заключается в том, что при переходе от одного опыта к другому изменяются условия их реализации при однотипном внешнем воздействии на модель. В каждом эксперименте воспроизводится элемент природы, а прогностическая задача решается путем регистрации откликов модели на изменение его размеров и структурных характеристик.

В ходе отдельного опыта фиксируются результативные параметры (\mathbf{R}), представляющие собой критическую величину воздействия на модель, при достижении которой начинается имитируемый процесс, а также размеры его проявлений и его длительность (или длительность отдельных стадий его развития). Параметры модели, меняющиеся от опыта к опыту, именуется исходными (Z). В силу некоторых известных положений теории эксперимента (Шенк, 1972), результативные, и исходные параметры целесообразно выражать в безразмерной форме.

Статистическая обработка экспериментальных данных с использованием приемов корреляционного анализа позволяет получить псевдофункциональные зависимости результативных параметров моделирования от его исходных параметров. Переход от этих зависимостей к натуре, как правило, невозможен без определенного математического и содержательного анализа, например, отбраковки масштабных эффектов. Все вышеизложенное целесообразно проиллюстрировать конкретным примером.

Моделирование суффозионных процессов, протекающих в г. Сарове. В последние десятилетия в исторической части г. Сарова Нижегородской области наблюдается активное развитие суффозии техногенного происхождения, вызванной утечками воды из подземных коммуникаций. В частности, это происходит на

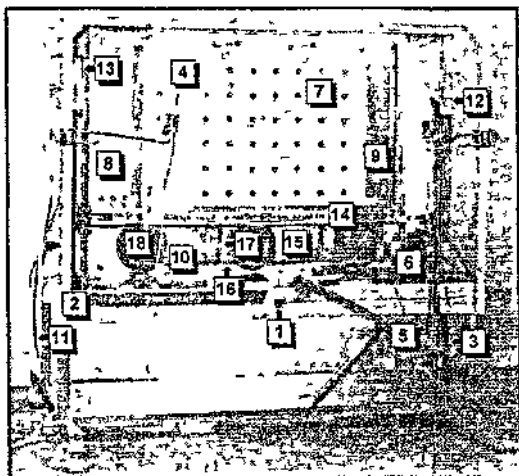


Рис. 12. Установка для моделирования суффозионных и постсуффозионных процессов, конструкции В П Хоменко, Е.П Маханько, Е.И. Исаева и др.

1 - горизонтальная опорная ось, 2 - жесткая неподвижная рама, 3 — поворотное устройство, переводящее фильтрационный лоток в наклонное положение, 4 - осветитель, 5 - подвижная система крепления фоторегистратора, 6 - фоторегистратор, 7 - рабочая камера фильтрационного лотка, заполняемая материалами модели, 8 - боковая водопримная камера фильтрационного лотка, 9 - съемная перфорированная перегородка, 10 - нижняя водопримная камера фильтрационного лотка, 11 - один из соединительных шлангов, 12 - устройство для автоматического поддержания постоянных уровней и напоров рабочей жидкости в водопримных камерах, 13 - перемешиваемый напорный бак, 14 - водоупорная система, позволяющая создавать в ней несколько расширяющихся шелевидных отверстий, 15 - камера-грунтоприемник переменного объема, 16 - вертикально перемещаемое основание камеры-грунтоприемника, 17 - горизонтально перемещаемая перфорированная боковая стенка камеры-грунтоприемника с автоматически изменяющейся высотой, 18 - очистной люк

территории бывшего Саровского монастыря (Пустыни), строительство которого началось в XVIII в. Существующий архитектурный комплекс расположен на плоском холме, пронизанном подземными ходами, столь же старыми, как и сам монастырь, и водонесущими коммуникациями, которые были проложены в середине прошлого века.

Поверхность монастырского холма повсеместно перекрыта техногенными накоплениями супесчано-песчаного состава. Они подстилаются элювием нижнепермских карбонатных пород (доломитовой мукой), практически полностью теряющим водопроницаемость при увлажнении. Грунтовые воды присутствуют в нижележащих трещиноватых доломитах, и их свободная поверхность расположена ниже подошвы холма. В этой обстановке поступление воды в техногенные грунты приводит к ее высачиванию в местах выхода на северный и южный

склоны холма контакта этих пород с доломитовой мукой. Результатом является их отчетливо выраженное присклоновое фильтрационное разрушение, сопровождающееся образованием типичных суффозионных ниш, высотой почти до 1,5 м.

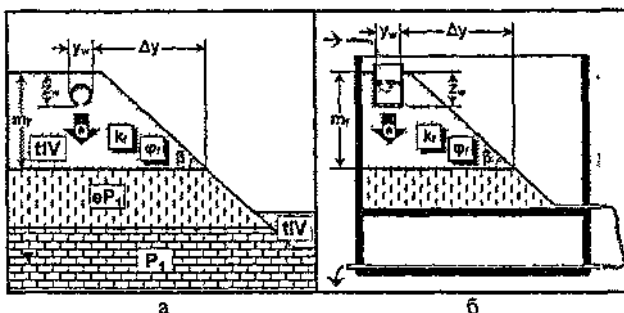


Рис. 13. Схематизированные природно-техногенные условия развития присклоновой суффозии в г. Сарове Нижегородской области (а) и технологическая схема ее лабораторного физического моделирования (б). Пояснения см. в табл. 5

Моделирование суффозии осуществлялось в соответствии с технологической схемой, показанной на рис. 13, а его исходные и результативные параметры

Таблица 5. Исходные данные и результаты лабораторного физического моделирования присклоновой суффозии, развивающейся на территории г. Сарова

Исходные и результативные параметры		Номера опытов								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свойства материала верхнего слоя модели	Коэффициент фильтрации (k_f), см/сек	0,032	0,038	0,038	0,006	0,008	0,006	0,010	0,005	0,007
	Угол внутреннего трения (ϕ_f)	36°	29°	33°	35°	27°	29°	31°	29°	30°
Максимальная высота верхнего слоя модели (m_p), см		21	29	36	21	36	26	27	31	51
Крутизна откоса (β)		27°	36°	45°	27°	37°	45°	27°	36°	45°
Удаленность инфильтрующего устройства по горизонтали от точки высачивания воды (Δy), см		54	48	65	45	54	33	54	62	65
Средненный расход воды, поступавшей в инфильтрующее устройство, см³/сек	в период неразрушающей фильтрации (Q_0)	12	12	10	16	15	1	4	16	12
	в течение всего опыта (Q)	12	12	10	15	13	13	4	16	8
Продолжительность неразрушающей фильтрации (t_0), мин		13	9	57	17	8	5	11	32	24
Окончательный горизонтальный размер зоны суффозионно-оползневого разрушения (L), см		-	-	26	-	27	33	53	58	39

Примечание: 1) нижний слой модели был сложен доломитовой мукой и во всех опытах имел высоту 15 см, а длину основания – 100 см; 2) во всех опытах заглубление инфильтрующего устройства в верхний слой модели (z_w) составляло 6 см, его длина (y_w) была равна 14 см, а ширина (x_w), как и ширина модели в целом – 27 см; 3) окончательной считалась величина L , не претерпевавшая изменений в течение 30 мин и более; 4) знак (-) в нижней строке означает, что в ходе суффозионного процесса по техническим причинам было допущено увеличение расхода воды, поступавшей в инфильтрующее устройство, что делает данный опыт некорректным относительно возможности определения размеров форм разрушения

Таблица 6. Результаты статистической обработки данных лабораторного физического моделирования присклоновой суффозии, развивающейся на территории г. Сарова (см. табл. 5)

Номера опытов	Исходные параметры (Z)						Результативные параметры (R)
	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅	Z ₆	
1. Определение продолжительности неразрушающей фильтрации $Z_1 = \operatorname{tg} \varphi_f$; $Z_2 = Q_0/x_w y_w k_f$; $Z_3 = \operatorname{tg} \beta$; $Z_4 = (m_f - z_w)/\Delta y$; $Z_5 = (m_f - z_w)/x_w$; $Z_6 = (m_f - z_w)/m_f$ $R = t_0 k_f / \Delta y$							
1	0,73	1,0	0,50	0,28	0,56	0,71	0,46
2	0,56	0,8	0,73	0,48	0,85	0,79	0,42
3	0,64	0,7	1,00	0,46	1,11	0,83	1,98
4	0,71	6,6	0,50	0,33	0,56	0,71	0,15
5	0,50	4,9	0,75	0,56	1,11	0,83	0,07
6	0,56	5,9	1,00	0,61	0,74	0,77	0,05
7	0,61	1,1	0,50	0,39	0,78	0,78	0,12
8	0,56	8,0	0,74	0,40	0,93	0,81	0,16
9	0,58	4,8	1,00	0,69	1,67	0,88	0,15
Аппроксимирующая функция: $Y = 0,962 - 1,29X$, где $X = Z_1^2 Z_3 Z_5 / Z_2 Z_4 \exp Z_6$, $Y = \exp(-R)$ Коэффициент корреляции: -0,97 (обратная функциональная связь)							
2. Определение длины зоны суффозионно-оползневго разрушения $Z_1 = \operatorname{tg} \varphi_f$; $Z_2 = Q/x_w y_w k_f$; $Z_3 = \operatorname{tg} \beta$; $Z_4 = (m_f - z_w)/\Delta y$; $Z_5 = (m_f - z_w)/x_w$ $R = L/\Delta y$							
3	0,64	0,7	1,00	0,46	1,11	-	0,40
5	0,50	3,9	0,75	0,56	1,11	-	0,50
6	0,56	5,9	1,00	0,61	0,74	-	1,00
7	0,61	1,1	0,50	0,39	0,78	-	0,98
8	0,56	8,0	0,74	0,40	0,93	-	0,94
9	0,58	3,2	1,00	0,69	1,67	-	0,60
Аппроксимирующая функция: $Y = 2,82 + 1,92X$, где $X = \ln(Z_1^4 \sqrt{Z_2 Z_4} / Z_3 \sqrt{Z_5})$, $Y = \ln R^2$ Коэффициент корреляции: 0,98 (прямая функциональная связь)							

даны в табл. 5. Экспериментальное оборудование было дополнено инфильтрующим устройством, имитирующим утечку воды из подземной коммуникации.

В ходе экспериментов разрушение склона выражалось в виде последовательного формирования на нем ниш и оползней. Динамика суффозионно-оползневго процесса свидетельствовала о его самозатухании при постоянной величине инфильтрации. Благодаря этому обстоятельству, суффозия не привела к образованию оползней на склонах монастырского холма за все время существования подземных коммуникаций.

В окончательную статистическую обработку были включены безразмерные параметры, величины которых приведены в табл. 6. В конечном итоге было установлено, что присклоновая суффозия может начаться только при соблюдении граничного условия:

$$Q \geq 1,35 B D k_f \Delta y \operatorname{tg}^2 \varphi_f / A \exp(\Delta z / B), \quad (17)$$

где Q - объемный расход утечки воды из трубопровода; B - превышение бровки склона над точкой высачивания; D - диаметр трубопровода; $(\sigma)_f$ - параметр неводонасыщенных пород, испытывающих фильтрационное разрушение при поступлении в них воды; k - коэффициент фильтрации; D_y - ближайшее расстояние по горизонтали от точки высачивания до линии подземной водонесущей коммуникации; A — расстояние по горизонтали от точки высачивания до бровки склона, замеренное в том же направлении, что и величина Δy ; Δz - превышение нижней точки трубопровода над точкой высачивания.

Катастрофическая ситуация, когда суффозионно-оползневое разрушение склона монастырского холма достигнет стены здания, будет обеспечена, если:

$$Q \geq 0,06 L_k^2 B^2 D k_f / \Delta y A^2 i g^3 \sigma_f, \quad (18)$$

где L_k - расстояние по горизонтали от точки высачивания до стены здания, замеренное в том же направлении, что и величина Δy .

Глава 4. Суффозия и сфера человеческой деятельности

4.1. Социально-экономические и экологические последствия суффозии

Несмотря на присутствие определенных позитивных моментов, суффозия оказывает преимущественно негативное влияние на сферу человеческой деятельности. В результате суффозионного разрушения горных пород ухудшаются их прочностные и деформационные характеристики, а также увеличивается их проницаемость. Когда испытывавшие суффозионное разрушение породы находятся в зоне взаимодействия с инженерным сооружением, это может привести к его деформированию, а если оно гидротехническое, то и к недопустимым фильтрационным потерям из искусственных водотоков и водоемов.

По-видимому, самая значительная суффозионная катастрофа произошла в 1976 г. на территории США в результате разрушения земляной плотины Титон. Ущерб от катастрофы исчислялся сотнями миллионов долларов, и при этом погибло 14 человек. Вместе с тем, есть все основания полагать, что основной ущерб, обусловленный суффозией, связан не столько с крупными авариями и катастрофами, сколько с широко распространенными, практически постоянными или периодически повторяющимися, мелкомасштабными негативными воздействиями техногенных суффозионных процессов на хозяйственные объекты. По оценке А.Л. Рагозина (1993), на территории России такого рода воздействия наблюдаются в 958 городах, а вызванный ими ориентировочный среднесуточное экономический ущерб составляет полмиллиарда рублей в ценах 1990 года.

Согласно В.Т.Трофимову и Н.С.Красиловой (2000), суффозия не может привести к экологическому бедствию, но вызывает определенный экологический ущерб. Он проявляется в виде деградации естественных ландшафтов, порчи земель и питьевых вод, обмеления водоемов, образования грязных луж, гибели животных и растительности, стихийного формирования мусорных свалок на местах поверхностных суффозионных проявлений.

4.2. Суффозионная опасность

Дифференцированная оценка суффозионной опасности для определенных видов строительства или хозяйственной деятельности зависит от того, были обна-

ружены на подлежащей освоению территории или при функционировании объекта признаки развития суффозии или этого не произошло. В первом случае целесообразно говорить о существующей, а во втором – об ожидаемой суффозионной опасности.

Оценку существующей суффозионной опасности можно осуществлять на основе информации о поверхностных проявлениях суффозии. Для этого приемлемы некоторые принципы,

используемые в инженерном карстоведении (Толмачев и др, 1986), например предлагаемая автором схема, показанная на рис. 14. Оценка ожидаемой суффозионной опасности базируется на результатах прогнозирования. Ее можно дать в том случае, если прогноз позволяет установить, по крайней мере, один из двух критериев: появления суффозии и суффозионной катастрофы.

Критерий появления суффозии (C_e) выражает граничное условие перехода геосистемы из стабильного (или псевдостабильного) в лабильное состояние или от одного типа лабильного состояния к другому, что соответствует началу определенных фаз или стадий суффозионного цикла (см. рис. 1). Этот критерий определяется формулой:

$$C_1 \geq C_e = f(C_2, C_3, \dots, C_n), \quad (19)$$

где C - численно выражаемое условие протекания суффозии; n - количество таких условий.

Формула (19) выражает граничные условия, достаточные для появления суффозии при нарастании величины C_1 . При необходимости, в левой части формулы может находиться любая из способных к изменению величин, включенных в функцию, с возможной переменной знака неравенства. Выполнение граничного условия появления суффозии означает возможность образования опасных суффозионных проявлений, способных нанести ущерб среде обитания человека. Оцениваемая по данному критерию суффозионная опасность всегда бывает завышена.

Оценка, учитывающая граничные условия суффозионной катастрофы (или, согласно ГОСТ Р 22 0.02-94, чрезвычайной ситуации, источником которой является суффозия) лишена этого недостатка, но она, как минимум, требует знания местоположения, формы и размеров в плане проектируемого или существующего хозяйственного объекта. В идеале для такой оценки необходимо сопоставление параметров, характеризующих развитие суффозии во времени, со сроками службы зданий и сооружений, а также знание их конструктивных и функциональных

Максимальный линейный размер поверхностного суффозионного проявления в плане (средняя величина), м	Интенсивность образования поверхностных суффозионных проявлений, случаи / км ² в год				
	< 0,01	0,01 – 0,05	0,05 – 0,1	0,1 – 1	> 1
	Плотность поверхностных суффозионных проявлений (средняя величина), м				
	< 1	1 – 5	5 – 50	50 – 100	> 100
< 3	1				
3 – 10		2			
10 – 20			3		
> 20				4	

Рис. 14. Количественные критерии оценки существующей суффозионной опасности для объектов промышленного, гражданского и транспортного строительства

1 – очень низкая опасность, не накладывающая ограничений на строительство; 2 – низкая опасность, требующая незначительного удорожания строительства; 3 – средняя опасность, требующая значительного удорожания строительства, 4 – высокая опасность, делающая строительное освоение проблематичным

особенностей. Аналитическое выражение критерия суффозионной катастрофы (P_k) имеет вид формулы:

$$P \geq P_k = f(C_1, C_2, \dots, C_n), \quad (21)$$

где P - количественная характеристика суффозионного процесса или его проявления.

В некоторых обстоятельствах более удобной может оказаться форма выражения критерия суффозионной катастрофы не через количественную характеристику суффозионного процесса или его проявления (P_k), а через численно выражаемое условие протекания суффозии (C_k).

Для одной и той же геосистемы может быть установлено несколько критериев появления суффозии и суффозионной катастрофы. В определенной обстановке

Таблица. 7. Классификация противосуффозионных мероприятий

Типы защитных мероприятий	Содержание защитных мероприятий данного типа	Характер защиты		
		Профилактический	Оперативный	
Пассивные	Архитектурно-планировочные	Безопасное размещение объектов на осваиваемой территории и выбор их формы в плане Рациональная прокладка трасс линейных сооружений	+	-
	Конструктивные	Специальные конструкции фундаментов, в том числе, свайных Рациональные конструктивные схемы зданий и сооружений	+	+
	Контролирующие	Контроль за состоянием грунтовой толщи в зоне ее взаимодействия с объектом Наблюдения за режимом подземных вод Регистрация изменений земной поверхности и состояния склонов Контроль за напряженным состоянием и деформациями конструктивных элементов сооружений	+	+
Активные	Провоцирующие	Обводнение грунтов и создание в них фильтрационного потока Динамические воздействия на грунты. Эксплуатация грунтов	+	-
	Предупреждающие	Проектные решения, исключающие возможность появления суффозионных и постсуффозионных процессов в результате эксплуатации объекта Удаление суффозионно-неустойчивых грунтов из зоны их взаимодействия с объектом	+	-
	Управляющие	Снижение скорости движения подземных вод и их растворяющей способности с помощью искусственного обводнения или осушения грунтов, а также путем регулировки работы гидротехнических сооружений и водозаборов подземных вод	-	+
	Препятствующие	Устройство противофильтрационных и гидравлических завес, водонепроницаемых покрытий Планировка рельефа и организация поверхностного стока Каптаж источников подземных вод и устройство «обратных фильтров» в зоне их разгрузки Гампоаж трещин и полостей Закрепление грунтов и снижение их проницаемости	+	+

Примечание: знаками (+) и (-) обозначены, соответственно, возможность или невозможность осуществления противосуффозионных мероприятий данного типа в профилактическом или оперативном порядке

РОС. НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
99 108 акт

новке один из критериев суффозионной катастрофы может совпадать с одним из критериев появления суффозии.

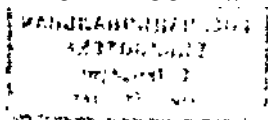
4.3. Противосуффозионная защита

Термин «противосуффозионная защита» употребляют довольно редко, однако такая защита существует и эффективно применяется в различных ситуациях. Подобные мероприятия можно представить в систематизированном виде так, как это показано в табл. 7. Прежде всего, они могут быть активными, оказывающими прямое воздействие на факторы, инициирующие суффозионные и постсуффозионные процессы, и на среду их протекания, или пассивными, то есть не оказывающими такого воздействия. По другому признаку защитные мероприятия можно разделить на профилактические и оперативные: первые осуществляются до начала суффозии или до начала эксплуатации (а иногда и строительства) сооружения, вторые - в условиях взаимодействия процесса и сооружения, что, конечно, обходится значительно дороже.

Заключение содержит краткое изложение методологических принципов, которыми руководствовался автор в ходе работы над диссертацией. В нем также сформулированы первоочередные задачи дальнейших исследований, которые необходимо осуществить в рамках рассматриваемой проблемы.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации:

1. *Хоменко В.П.* Суффозионные свойства водонасыщенных песков вблизи зоны карстово-суффозионных провалов // Реф. сб. Инженерные изыскания в строительстве. Сер. 2. 1976. Вып. 11 (52). С. 15-22.
2. *Хоменко В.П.* Опыт прогноза развития подземной суффозии // Реф. информ. Инженерные изыскания в строительстве. Сер. 15.1978. Вып. 2 (67). С. 15-22.
3. *Хоменко В.П.* Лабораторная модель суффозионно-гравитационных процессов, протекающих в песчаных грунтах в условиях покрытого карста // Моделирование формирования суффозионных и карстовых полостей: Тез. докл. Науч.-техн. семинара: Пермь, 29-30 нояб. 1979. Пермь, 1979. С. 57-59.// Там же. С. 57-59.
4. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и методы их изучения // Карст Нечерноземья: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещания: Пермь, 11-13 нояб. 1980. Пермь, 1980. С. 75.
5. *Хоменко В.П.* Количественная оценка совокупного воздействия некоторых факторов природной обстановки на ход карстово-суффозионных процессов // Карстовый процесс и его прогноз: Тез. докл. Уфа, 1980. С. 62-63.
6. *Хоменко В.П.* Отражение динамики развития карстово-суффозионных процессов в локальной изменчивости свойств пород покрывающей толща // Там же. С. 76-78.
7. *Хоменко В.П., Зиангиров Р.С.* Экспериментальное изучение закономерностей формирования провалов в песках, перекрывающих карстовые полости // Инженерная геология. 1981. Кс 2. С. 72-84.
8. *Хоменко В.П.* Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов: Авт. св. СССР № 851201, кл. G 01N 15/08. Заявл. 03.10.1979. Опубл. 30.07.1981. Бюл. № 28. 4 с.
9. *Хоменко В.П.* Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов и ее практическое применение // Инженерная геология Западного Урала: Тез. докл. семинара: Пермь, 25-26 февр. 1982. Пермь, 1982. С. 93-94.
10. *Хоменко В.П.* К вопросу о механизме суффозионного процесса в несвязных грунтах // Комплексная оценка свойств грунтов и инженерно-геологические процессы. М.: Стройиздат, 1982. С. 136-153.
11. *Толмачев В.В., Карпов Е.Г., Хоменко В.П. и др.* Механизм деформаций горных пород над подземными карстовыми формами // Инженерная геология. 1982. № 4. С. 46-59.



12. *Хоменко В.П., Толмачев В.В., Давыдько Р.Б.* Изучение подземных и поверхностных проявлений глубинной закарстованности (методы физического моделирования) // Состояние, задачи и методы изучения глубинного карста СССР: Тез. докл. 3-го Всесоюз. карст.-спелеол. совещания: 1-3 окт. 1982. М., 1982. С. 53-54/Там же. С. 53-54.
13. *Хоменко В.П.* Установка ДДЯ изучения разрушений рыхлых водонасыщенных грунтов над карстовыми полостями // Каталог паспортов: Научно-технические достижения, рекомендуемые для использования в строительстве. 1982. Вып. 3-4. С. 67-68.
14. *Баулин В.В., Хоменко В.П., Зиангиров Р.С. и др.* Комплексные режимные инженерно-геологические наблюдения на территориях промышленного и гражданского строительства // Режимные инженерно-геологические и гидрогеологические наблюдения в городах. М.: Наука, 1983. С. 19-26.
15. *Хоменко В.П., Толмачев В.В.* О механизме карстовых разрушений // Строительство на закарстованных территориях: Тез. докл. Всесоюз. совещания: Подольск, 22-2 нояб. 1983. М., 1983. С. 5-8.
16. *Хоменко В.П.* Геомеханическая модель провалообразования в необводненных песчаных грунтах // Комплексные инженерно-геологические исследования для промышленного и гражданского строительства. М.: Наука, 1984. С. 69-74.
17. *Толмачев В.В., Хоменко В.П., Троицкий Г.М.* Использование инженерно-геологической информации при проектировании противокарстовых мероприятий в условиях покрытого карста // Тез докл. 5-й Всесоюз. конференции «Проблемы инженерной геологии в связи с промышленно-гражданским строительством и разработкой месторождений полезных ископаемых»: Свердловск, май 1984. Т. 1. Свердловск, 1984. С. 301-304.
18. *Троицкий Г.М., Григорук П.Д., Хоменко В.П. и др.* К вопросу прогнозирования на ЭВМ размеров карстовых провалов // Застройка закарстованных территорий: Тез. докл. совещания-семинара: Уфа, сент. 1984. Уфа, 1984. С. 66-68.
19. *Хоменко В.П.* Активизация суффозионных процессов в результате подтопления застроенных территорий грунтовыми водами // Тез. докл. Всесоюз. совещания «Процессы подтопления застроенных территорий грунтовыми водами (прогноз и защита)». 4. 2. Новосибирск, 1984. С. 73-75.
20. Рекомендации по лабораторному физическому моделированию карстовых процессов. М.: Стройиздат, 1984. 48 с. (соавторы В.В. Толмачев, Р.Б. Давыдько).
21. *Хоменко В.П., Толмачев В.В.* Принципы и методы лабораторного моделирования некоторых карстовых разрушений // Методика изучения карста: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещания: Пермь, 5-7 июня 1985. Пермь, 1985. С. 134-136.
22. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. М.: ПЭМ ВНИИИС, 1985. 78 с. (соавторы Т.А. Маликова, Г.М. Троицкий, В.В. Толмачев и др.).
23. *Хоменко В.П.* Количественная оценка карстоопасности для промышленного и гражданского строительства // Инженерно-геологические исследования для строительства. М.: Наука, 1985.
24. *Хоменко В.П.* Роль суффозионных процессов в эволюции литосферы // Подземные воды и эволюция литосферы: Мат-лы Всесоюз. конф. Т. 2. М.: Наука, 1985. С. 476-479.
25. *Хоменко В.Л.* Прогнозная карта карстово-суффозионного провалообразования // Картографирование и районирование карста в связи с освоением территорий: Тез. докл. 4-го Всесоюз. карст.-спелеол. совещания.: Владивосток, 15-16 апр. 1986. Владивосток, 1986. С. 113-115.
26. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
27. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.
28. Рекомендации по использованию инженерно-геологической информации при выборе способов противокарстовой защиты. М.: Стройиздат, 1987. 80 с. (соавторы В.В. Толмачев, В.Б. Сорокина, О.Б. Нешеткин и др.).
29. *Хоменко В.П.* Подземные обрушения грунтов // Свойства грунтов и инженерно-геологические процессы. М.: Наука, 1987. С. 68-75.
30. *Хоменко В.П., Троицкий Г.М.* Строительное освоение карстоопасных территорий // Проектирование и инженерные изыскания. 1987. № 2. С. 23-25.

31. *Хоменко В.П.* Принципы подбора эквивалентных материалов при моделировании геологических процессов // Инженерно-геологические исследования для промышленного и гражданского строительства. М.: Стройиздат, 1987. С. 15-21.
32. *Беляев В.Л., Хоменко В.П.* Экспериментальное изучение разрушений песчаных грунтов, вызванных утечками из водонесущих сетей в карстовых районах // Ускорение научно-технического прогресса в фундаментастроении: Сб науч. тр. Т. 2. М.: Стройиздат, 1987. С. 183-185.
33. *Хоменко В.П.* Прогноз карстово-суффозионных процессов и возможность управления их развитием // Современные проблемы инженерной геологии и гидрогеологии территории городов и городских агломераций. М.: Наука, 1987. С. 381-382.
34. *Толмачев В.В., Хашенко В.П., Троицкий Г.М.* Основные схемы формирования поверхностных карстовых проявлений и особенности их взаимодействия с фундаментами сооружений // Республ. межвед. науч.-техн. сб. Строительные конструкции (УССР). 1987. Вып. 40. С. 9-15.
35. *Зиангиров Р.С., Саваренский И.А., Хоменко В.П.* Состояние и перспективы инженерно-геологических изысканий для строительства на закарстованных территориях // Проблемы изучения опасных геологических процессов. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1988. С. 15-23.
36. *Хоменко В.П., Егоров А.Я.* Учет механизма формирования крупного суффозионного оползня при выборе защитных мероприятий // Инженерно-геологическое обоснование защиты территорий от опасных геологических процессов. М.: ПНИИИС Госстроя СССР, 1988. С. 32-43.
37. *Хоменко В.П., Беляев В.Л., Максимова О.Р.* Прогноз развития карстово-суффозионных процессов, вызванных техногенным воздействием на подземную гидросферу // Гидрогеологические и инженерно-геологические условия территории городов. Методы изучения и прогноза изменений. М.: Наука, 1989. С. 54-61.
38. *Хоменко В.П.* Провалообразование, вызванное интенсивной эксплуатацией водоносных горизонтов // Проблемы инженерной геологии, гидрогеологии и геокриологии районов интенсивной инженерной нагрузки и охрана геологической среды: Тез. докл. 1-го. Всесоз. съезда инженеров-геологов, гидрогеологов и геокриологов: Киев, 10-14 окт. 1988. Ч. 3. Киев: Наукова думка, 1989. С. 243-245.
39. *Sorochan E.A., Khomenko V.P., Tolmachyov V. V. et al.* Karst failures: Model testing and conceptual models // Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering: Rio de Janeiro 13-18 Aug. 1989. Rotterdam, 1989. P. 977-981.
40. *Саваренский И.А., Хоменко В.П.* Карстовые и суффозионно-карстовые процессы (раздел 1.5) // Проблемы охраны литосферы в СССР. Т. 1. Ереван: АН АрмССР, 1989. С. 19-22.
41. *Беляев В.Л., Хоменко В.П.* Прогноз развития карстово-суффозионных процессов, вызванных утечками из водонесущих сетей // Прогноз изменений инженерно-геологических условий при строительстве. М.: Наука, 1990. С. 94-102.
42. *Саваренский И.А., Хоменко В.П.* Закономерности развития карста и прогноз карстоопасности для промышленного и гражданского строительства // Противокарстовая защита объектов строительства: Мат-лы Всесоюз. совещания 4-7 сент. 1990. Куйбышев, 1990. С. 32-35.
43. *Троицкий Г.М., Четыркин Н.М., Хоменко В.П.* Обеспечение устойчивости тоннеля, сооружаемого открытым способом, на закарстованном основании // Там же. С. 55-56.
44. *Хоменко В.П., Рубин В.Т., Фамицын Б.М. и др.* Техническое устройство для моделирования карстово-суффозионных процессов // Там же. С. 75-77.
45. *Дзекцер ЕС, Поздняков С.П., Хоменко В.П. и др.* Инженерная защита закарстованной территории от подтопления подземными водами // Там же. С. 129-130.
46. *Хоменко В.П.* Физическое моделирование процессов провалообразования // Толмачев В.В., Ройтер Ф. Инженерное карстование. М.: Недра, 1990. С. 105-112.
47. *Хоменко В.П.* Суффозионные процессы на территориях городов // Мат-лы науч.-практ. семинара «Проблемы инженерной геологии и инженерной сейсмологии городов и урбанизированных территорий»: Петропавловск-Камчатский, 1990. Т. 1. М., 1990. С. 118-124.
48. *Хоменко В.П., Поздняков С.П., Колосова И.А. и др.* Детерминированная оценка карстовой опасности с использованием персональной ЭВМ // Изучение и использование карста Западно-го Кавказа: Мат-лы 3-го регион, карст.-спелеол. совещания. Сочи, 1991. С. 91-95.
49. *Хоменко В.П.* Способ определения зоны возможного провалообразования в грунтах: Пат. РФ № 1752869 А1, кл. Е 02 D 1/02, G 01 N 33/42. Заявл. 26.07.1989. Оpubл. 07.08.1992. Бюл. № 29. С. 5.

50. *Гольдфельд И.З., Хоменко В.П.* Способ определения параметров полости в грунте: Авт. св. СССР № 1763567 А1, кл. Е 02 D 1/00, G 01 F 17/00. Заявл. 10.10.1989. Оpubл. 23.06.1992. Бюл. № 35.4 с.

51. *Хоменко В.П.* Роль суффозии в формировании псевдокарстовых явлений // Проблема псевдокарста: Тез. докл. совещания: Кунгур, 15-16 дек. 1992. Пермь, 1992. С. 23-25.

52. *Khomenko V.P.* Forecasting of karst-piping sinkhole formation // Engineering geology of karst: Proc. Int. Symp. 6-8 July 1992 (Perm), Russia. Vol. 1. Perm, 1993. P. 127-132.

53. *Хоменко В.П., Маханько Е.П., Исаев Е.И. и др.* Установка для исследования суффозионной устойчивости грунтов: Пат. РФ № 1823923 А3, кл. G 01N 15/08. Заявл. 26.06.1991. Оpubл. 23.06.1993, Бюл. № 23.5 с.

54. *Troitzky GM, Tolmachev V. V., Khomenko V.P.* Sinkhole danger - Engineering problem of covered karst // Applied karst geology: Proc. 4th Multidiscipl. conf. on sinkholes and the environmental impacts of karst. Panama City, Fla., 25-27 Jan. 1993. Rotterdam, 1993. P. 231-232.

55. *Хоменко В.П., Гольдфельд К.З.* Способ определения параметров подземной полости: Пат. РФ № 2018157 С1, кл. G 01 F 17/00. Заявл. 24.12.1991. Оpubл. 15.08.1994. Бюл. № 15.6 с.

56. *Хоменко В.П.* Суффозия // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Т. 3 (РАСЭ-3). М.: ТОО Изд-во «Альфа», Внешторгиздат, 1996. С. 320 - 321.

57. *Хоменко В.П.* Оценка суффозионной опасности // Промышленное и гражданское строительство. 1996. № 8. С. 46-47.

58. *Киселев Ю.В., Пидяшенко С.Э., Хоменко В.П.* Прогнозирование опасных карстово-суффозионных процессов на примере г. Саров и ЗАТО Арзамас-16 // Анализ и оценка природных рисков строительстве. М.: ПНИИИС, 1997. С. 43-44.

59. *Хоменко В.П.* Логическая схема последовательно развивающихся геологических процессов // Там же. С 62-64.

60. *Хоменко В.П.* Суффозия (подраздел 4.42) // Москва: геология и город. М.: АО «Московские учебники и Картолитография», 1997. С. 194-196.

61. *Хоменко В.П.* Суффозионные провалы (подраздел 7.4.2) // Там же. С. 278-280.

62. *Хоменко В.П.* Противокарстовые мероприятия (подраздел 7.7.1) // Там же. С. 296-299.

63. *Molek H., Tolmatshev V.V., Chomenko V.P.* Untersuchungen zum Mechanismus von Karststuf-Tosions-Erdfallbildungen und deren Einfluß auf Baumaßnahmen // 11. Nadonale Tagung für Ingenieurgeologie. Würzburg, 23-25 April 1997. Würzburg, 1997. S. 345-356.

64. *Хоменко В.П.* Оценка опасности провалов по результатам зондирования грунтов // 4-я Междунар. конференция «Новые идеи в науках о Земле»: Тез. докл. Т. 4. М., 1999. С. 115.

65. *Хоменко В.П.* Моделирование опасных геологических процессов для целей промышленного и гражданского строительства // Промышленное и гражданское строительство. 1999. № 8. С. 25-27.

66. *Коломенский Е.Н., Хоменко В.П.* Математическое моделирование поведения дисперсных пород над подземными пустотами // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Сб. науч. тр. 10-й Междунар. науч. школы: Алушта, 18-24 сент. 2000. Симферополь, 2000. С. 75-76.

67. *Хоменко В.П., Коломенский Е.М.* Влияние подземных полостей на состояние вышележащих дисперсных пород // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 8. С. 39-41.

68. *Хоменко В.П.* Суффозия (раздел 3.2) // Экзогенные геологические опасности. Тематический том. М.: КРУК, 2002. С. 158-174.

69. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

70. *Хоменко В.П.* Противосуффозионная защита объектов строительства // Инженерные изыскания в XXI веке: Мат-лы науч.-производств. конференции. М., 2003. С. 86-89.

71. *Хоменко В.П.* Прогнозирование суффозионных процессов с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: 2-я науч.-инж. конф. 23 окт. 2002 г. М., 2003. С. 233-239.

72. *Хоменко В.П.* Инженерно-геологическое изучение суффозионных процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2003. № 10. С. 13-15.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	3
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.....	7
Глава 1. Состояние вопроса.....	7
1.1. Терминология.....	7
1.2. Классификации суффозионных процессов и явлений.....	8
1.3. Краткая история изучения суффозии.....	8
Глава 2. Закономерности суффозионных процессов.....	9
2.1. Природа суффозии и среда ее протекания.....	9
2.2. Динамика суффозионных процессов.....	11
2.3. Механизм суффозионных процессов.....	14
2.4. Пространственное распространение суффозии.....	18
Глава 3. Прогноз суффозионных процессов.....	20
3.1. Принципы прогнозирования суффозии.....	20
3.2. Геомеханические модели суффозионного провалообразования.....	21
3.3. Определение местоположения ожидаемого провала.....	24
3.4. Лабораторное физическое моделирование суффозии.....	27
Глава 4. Суффозия и сфера человеческой деятельности.....	31
4.1. Социально-экономические и экологические последствия суффозии.....	31
4.2. Суффозионная опасность.....	31
4.3. Противосуффозионная защита.....	34
Основные работы, опубликованные по теме диссертации.....	34

Подписано в печать 02.03.2004 г. Формат 60 х 90 /16
Печ. л. 2,2. Тираж 100 экз. Заказ № 54.
Отпечатано во ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России
105187, Москва Окружной проезд, 18

№ - 5226