

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

*Под редакцией академика
В.И. Осипова*



Москва

Российский университет дружбы народов
2020

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Под редакцией академика В.И. Осипова

Москва
Российский университет дружбы народов
2020

УДК 504.03.711(035.3)
ББК 26.3
Г36

*Издание подготовлено по результатам
и при финансовой поддержке гранта РНФ 16-17-00125*

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник ИГЭ РАН *Н.Г. Мавлянова*;
кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора ЕНИ ПГНИУ *Н.Г. Максимович*

Авторы:

*В.И. Осипов, А.В. Аникеев, В.Н. Бурова, И.В. Козлякова,
Г.П. Постоев, О.Н. Еремина, Ю.А. Мамаев, А.И. Казеев, Е.В. Булдакова,
П.В. Стольникова, М.М. Кучуков*

Г36 **Геологический риск урбанизированных территорий** : монография /
В. И. Осипов, А. В. Аникеев, В. Н. Бурова [и др.]; под ред. акад.
В. И. Осипова. – Москва : РУДН, 2020. – 316 с. : ил.

Монография представляет собой обобщение результатов исследований в области оценки риска опасных природных процессов в пределах городских и техногенно-урбанизированных территорий. На примере столичного мегаполиса г. Москвы и Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации Пермского края разработана методология оценки опасности и риска отдельных экзогенных процессов, а также интегральной оценки и картографирования геологического риска городов как результата наложения характеристик уязвимости инфраструктуры и природных опасностей. Наибольшее внимание уделено оползневым и карстово-суффозионным процессам, имеющим широкое распространение в платформенных условиях Европейской части России и часто приводящим к катастрофическим последствиям на городских территориях.

Издание предназначено для широкого круга специалистов в области геоэкологии, инженерной геологии и урбанистики.

ISBN 978-5-209-10442-1

© Коллектив авторов, 2020
© Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 2020
© Российский университет дружбы народов, 2020

Оглавление

Введение (<i>В.И. Осипов</i>)	6
Глава 1. Риск-анализ в геологии. Современные подходы, принципы, проблемы (<i>В.Н. Бурова</i>)	9
1.1. Основные понятия	15
1.2. Анализ классификаций опасности и риска	16
1.3. Классификация природных опасностей и рисков	20
1.4. Методология риск-анализа в геологии	25
1.5. Специфика интегральной оценки риска	27
Глава 2. Урбанизированные территории как объект риск-анализа. Мировой опыт исследования геологического риска в городах (<i>О.Н. Еремина, Е.В. Булдакова</i>)	29
2.1. Современные тренды развития урбанизированных территорий и экологические проблемы городов	29
2.2. Геологические опасности в городах – предмет изучения урбанистической геологии.	42
2.3. Разработка методик оценки природных опасностей на основе специального картографирования городских территорий	48
2.4. Разработка методик оценки уязвимости и геологического риска городской среды	55
Глава 3. Оценка опасности и риска оползней (<i>А.И. Казеев, Г.Н. Постоев, М.М. Кучуков</i>)	62
3.1. Типизация оползней по механизму	63
3.2. Оползневые процессы на территории Москвы	69
3.3. Механизм развития глубоких блоковых оползней	75

3.4. Предельное состояние массива надоползневой уступа и новый подход к расчету глубины поверхности скольжения	80
3.5. Оценка риска от развития оползневой процесса	81
3.6. Подходы к оценке оползневой опасности	85
3.7. Качественная оценка оползневой опасности и риска	91
Глава 4. Оценка карстово-суффозионной опасности и риска на территории г. Москвы (А.В. Аникеев)	99
4.1. Карстово-суффозионные воронки и провалообразование	100
4.2. Механизмы провалообразования	114
4.3. Основные критерии карстово-суффозионной опасности	126
4.4. Оценка карстово-суффозионной опасности и риска	140
Глава 5. Оценка опасных экзогенных процессов на техногенно-урбанизированных территориях (Ю.А. Мамаев, П.В. Стольников)	167
5.1. Методологические подходы к оценке и картографированию природных (геологических) рисков от опасных процессов на техногенно-урбанизированных территориях	167
5.2. Развитие опасных экзогенных процессов на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации Пермского края	171
5.3. Анализ и картографирование геологических рисков от опасных экзогенных процессов на территории СБГПА	182
Глава 6. Интегральная оценка и картографирование риска экзогенных геологических процессов (на примере Москвы) (В.Н. Бурова, И.В. Козлякова, О.Н. Еремина)	191
6.1. Особенности инженерно-геологических условий территории г. Москвы	191
6.2. Картографирование опасных экзогенных процессов территории г. Москвы	203
6.3. Инженерно-геологическое районирование г. Москвы и его применение	212

6.4. Особенности формирования геологического риска на урбанизированных территориях	224
6.5. О проблемах картографирования геологического риска	233
6.6. Картографирование геологического риска в масштабе 1:25 000 – 1:50 000 и мельче	237
6.7. Детальное картографирование геологического риска (в масштабе 1:10 000 и крупнее)	256
ЗАКЛЮЧЕНИЕ (В.И. Осипов)	279
ЛИТЕРАТУРА	284

Введение

Данная монография представляет собой обобщение результатов комплексных исследований, выполненных в ИГЭ РАН под руководством академика В.И. Осипова в 2016–2020 гг. в рамках проекта «Оценка риска опасных природных процессов на урбанизированных территориях», поддержанного Российским научным фондом.

Наблюдающийся в современном мире быстрый рост антагонизма между техногенезом и обществом свидетельствует о необходимости разработки новой стратегии развития цивилизации, основанной на сохранении баланса между хозяйственной деятельностью человека и требованиями сохранения окружающей среды. Эта задача стоит особенно остро для городов как мест наибольшего сосредоточения людей, объектов инфраструктуры и промышленности. Обеспечить экологическую безопасность крайне важно и одновременно сложно в мегаполисах и крупных промышленных центрах, где проявления природных опасностей усугубляются техногенными факторами и могут повлечь за собой очень большие ущербы.

Целью работы является разработка методологии оценки риска опасных геологических процессов на урбанизированных территориях для обеспечения их природной безопасности, а также экономической эффективности нового строительства и эксплуатации существующей инфраструктуры.

Как показал обзор отечественного и зарубежного опыта исследований в этом направлении, наиболее эффективным экономическим инструментом для обеспечения устойчивого развития городов и управления рисками является территориальное планирование, согласованное с картами природных опасностей, где указаны запреты или ограничения к освоению территорий того или иного назначения. Важнейшей задачей современных геологических исследований в городах является переход от оценки и картографирования опасности экзогенных геологических процессов

к оценке и картографированию риска, что даст возможность получить наиболее адекватное представление о размерах возможного ущерба от проявлений природных опасностей на городской территории. Однако до сих пор нигде в мире не существует единой общепринятой методики количественной оценки риска от развития экзогенных геологических процессов. Практически все исследователи для оценки геологического риска на территории городов идут по пути совмещения карт опасных природных процессов с картами уязвимости городской среды, рекомендуя различные подходы к оценке уязвимости объектов инфраструктуры.

Проведенные исследования включали поэтапную разработку методологии оценки опасности и риска отдельных экзогенных процессов, и далее – интегральной оценки и картографирования геологического риска городов как результата наложения характеристик уязвимости инфраструктуры и природных опасностей. Наибольшее внимание уделено таким экзогенным геологическим процессам, как оползни и карстово-суффозионные провалы и оседания, которые имеют широкое распространение в платформенных условиях Европейской части России и часто приводят к катастрофическим последствиям на городских территориях.

Работы выполнены на примере территории крупнейшего мегаполиса России – г. Москвы и Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБГПА) Пермского края. Такой выбор объектов исследований не случаен. Развитие опасных природных процессов и последствия от их проявления имеют специфические черты на территории крупных мегаполисов и небольших по площади городских промышленных районов.

В крупных мегаполисах, занимающих большие площади, наблюдается большое разнообразие природных геологических условий, что приводит к многообразию проявления природных опасностей в разных частях города. Одновременно мегаполис, будучи сложно построенным организмом, оказывает разнообразное и комбинированное техногенное воздействие на природную среду, что влечет за собой широкий спектр разноплановых техноприродных процессов и явлений, обуславливающих возникновение природных рисков. Их изучение и оценка представляют собой сложную комплексную задачу. Москва представляет собой наиболее яркий пример такого мегаполиса в России.

Промышленные производства, часто являющиеся градообразующими предприятиями небольших по размеру городов, зачастую становятся направленным источником мощного негативного техногенного воздействия на окружающую среду. При определенном сочетании геологических условий такое техногенное воздействие, иницирующее и усиливающее развитие даже одного опасного природного процесса, приведет к негативным последствиям, которые могут охватить всю площадь городского промышленного поселения. В промышленных центрах с высокой концентрацией экологически опасных производств на незначительной площади аварии, вызванные проявлением какого-либо опасного геологического процесса, могут перерасти в настоящие экологические бедствия, охватывающие значительные площади, с тяжелыми последствиями для населения. Анализ катастрофического развития карстового процесса на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации представляется очень актуальным как с практических, так и с методологических позиций.

По сути, настоящая работа представляет собой первый опыт обобщения теоретических и методологических основ оценки риска от опасных геологических процессов для урбанизированных и промышленных территорий России.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории геоинформатики и компьютерного картографирования ИГЭ РАН О.К. Миронова, Е.А. Карфидову, М.Н. Комаревскую за помощь в подготовке картографических материалов.

Монография подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 16-17-00125.

Глава 1. Риск-анализ в геологии. Современные подходы, принципы, проблемы

В настоящее время оценка риска является основным механизмом принятия научно обоснованных решений по предупреждению и уменьшению последствий от воздействия опасных природных процессов на техносферу, социум и окружающую среду. Данное положение регламентируется некоторыми нормативными документами (СНиП 02-96; Рекомендации, 2002; СНиП 22-02-2003). Согласно этим документам, безопасность любого объекта (отдельное здание, сооружения, территории, человек и т.д.) должна определяться через риск ее нарушения, причем оценка риска должна проводиться на всех уровнях принятия решений по безопасному функционированию природно-технических, природно-социальных и тому подобных систем.

К примеру, в Москве строительство объектов различного назначения (прежде всего, высотных зданий и сооружений с заглублением фундамента более 3 м и т.д.) не разрешается без предварительной оценки геологического риска (СНиП 22-02-2003).

Однако до настоящего времени, несмотря на то что разработаны теоретические и методологические подходы к оценкам риска, не существует не только единого методического способа оценки риска, но имеется масса разногласий даже в терминологической базе, характеризующей это относительно новое направление в инженерной геологии (табл. 1.1 и 1.2). В самом начале развития данного направления диапазон мнений в каждой области знаний по толкованию риска и методам его оценки был чрезвычайно широк, также разнообразны были и подходы к оценкам риска. На данный момент исследований в области риска вопрос унификации наших знаний по-прежнему остается открытым.

Таблица 1.1

Определения понятия «опасность»

Термин	Определение	Источник
Опасность	Способность причинить какой-либо вред, угроза жизни и здоровью человека или иным его ценностям	Порфирьев, 1991
Опасность	Угроза (потенциальная и существующая) ущерба (здоровью человека, материального, экономического и т.д.)	Дзекцер (Анализ и оценка природных рисков..., 1997)
Опасность	Показатель, характеризующий степень неблагоприятности или угрозы со стороны каких-либо объектов, их действий, процессов по отношению к каким-либо другим объектам, раскрывающий содержание и величину угроз	Максимов, Голицын (Анализ и оценка природных рисков..., 1997)
Опасность	Вероятность проявления того или иного процесса в данном месте, в данное время и с определенными энергетическими характеристиками (скорость проявления, площадь и объемы горных пород, вовлеченных в процесс, дальность их перемещения и др.)	Шеко (Анализ и оценка природных рисков..., 1997)
Опасность	Процесс, свойство или состояние природы, общества или техники, представляющие угрозу для жизни или благосостояния людей, объектов хозяйства или окружающей среды	Рагозин (Безопасность России, 1999)
Опасность	Состояние, при котором возможна угроза возникновения явлений или процессов, способных нанести какой-либо ущерб личности, обществу, государству	Гурлев и др., 1996
Опасность	Любой фактор, воздействие которого может привести к неблагоприятному отклонению здоровья человека или состояния окружающей среды от их среднестатистических значений	Быков и др., 1997

Опасность	Угроза (природного, социального, экономического, военного и т.д. характера), реализация которой в окружающей среде может привести к ущербу для здоровья человека (болезни, ранению, преждевременной смерти и т.д.) и/или к ухудшению качества окружающей среды (истощению невозобновляемых природных ресурсов, снижению функциональных возможностей экосистем, утрате материальных, духовных, социальных ценностей и т.д.) 1. Возможность осуществления некоторых условий технического, природного, экономического или социального характера, при наличии которых могут наступить неблагоприятные события и процессы (природные катастрофы или бедствия, аварии на промышленных предприятиях, экономические или социальные кризисы и т.д.)	Кузьмин и др., 1997
Опасность	Состояние, при котором становится реальной возможность осуществления некоторых условий наступления неблагоприятных событий и процессов	Измалков и др., 1997
Опасность	Объективно существующая возможность негативного воздействия на объект или процесс, в результате которого может быть причинен какой-либо ущерб, вред, ухудшающий состояние, придающий развитию нежелательные динамику или параметры (характер, темпы, формы и т.д.; вероятность увеличения вреда и/или уменьшения пользы; состояние, когда не обеспечена защищенность жизненно важных средств субъектов от возможности снижения пользы или причинения вреда	Безопасность России, 1999
Техногенная опасность	Любой фактор техногенного воздействия, который может привести к нарушению жизнедеятельности человека, общества и окружающей среды	Быков и др., 1997
Техногенная опасность	Состояние техносферных комплексов и элементов, при которых возможны аварии и катастрофы на промышленных и других объек-	Измалков и др., 1997

	тах и становится реальной угрозой жизненно важным интересам личности, обществу и окружающей среде	
Чрезмерная опасность	Превышение величины приемлемого риска	Быков и др., 1997

Таблица 1.2

Определение понятий «риск»

Термин	Определение	Источник
Риск	Оценка стратегии управления сложными системами в условиях неопределенной тенденции развития	Кофф, 1990
Риск	Возможная опасность, количественное выражение ее последствий	Порфирьев, 1991
Риск	Вероятность потерь в данный период времени	Шойгу и др., 1992
Риск	Вероятность ущерба, которую обычно определяют как произведение вероятности определенного ЭГП данного энергетического класса и ожидаемого ущерба	Шеко (Анализ и оценка природных рисков..., 1997)
Риск	Вероятностная мера возникновения техногенного или природного явления, сопровождающаяся формированием и действием вредных факторов, и нанесенного при этом социального, экологического, экономического, а в ряде случаев и эстетического ущерба	Измалков, 1994
Риск	Возможность нежелательных последствий какого-либо действия или течения событий. Измеряется вероятной величиной потерь	Мягков, 1995
Риск	Вероятностная мера опасности, установленная для определенного объекта в виде возможных потерь за определенное время	Рагозин (Безопасность России, 1999)
Риск	Произведение вероятности события на его последствия	Сафронов и др., 1996
Риск	Мера опасности. Набор вероятностей нежелательных событий и размер их последствий (в дискретном случае, функция распределения – в непрерывном)	Быков и др., 1997
Риск	1. Вероятная величина тех или иных потерь, снижающих жизнеспособность народа	Курбатова и др., 1997

	2. Вероятный ущерб от событий, непредвиденных или неизбежных, включая независимые от человека. Может измеряться абсолютной величиной потерь, затратами на их снижение до приемлемого уровня, тяжестью (восполнимостью) ущерба 3. Возможность нежелательных последствий преднамеренных действий человека или независимых от его воли событий	
Риск	Вероятностная мера реализации опасности в виде некоторого ущерба (материального, социального и экологического) при принятии ЛПР управляющих решений	Дзекцер (Анализ и оценка природных рисков..., 1997)
Риск	Мера для количественного измерения опасности, представляющая собой векторную (т.е. многокомпонентную) величину, измеренную, например, с помощью статистических данных или рассчитанную с помощью имитационных моделей, включающих количественные показатели: – ущерба от воздействия того или иного фактора; – вероятности возникновения (частоты) рассматриваемого опасного фактора; – неопределенности в величинах ущерба и вероятности	Кузьмин и др., 1997
Риск	Вероятностная мера возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся формированием и действием вредных факторов и нанесенного при этом социального, экономического, экологического, а в ряде случаев и эстетического ущерба	Измалков и др., 1998
Риск	Вероятность наступления опасности; потенциальная опасность получения нежелательных (отрицательных) результатов; элемент стиля социального управления в условиях неопределенности обстановки	Безопасность России, 1999
Риск природный	1. Часть социально-экологического риска, создаваемая опасными воздействиями стихий на население и хозяйство 2. Один из видов риска по его источнику, которым служат неблагоприятные и опасные природные процессы и явления (НОЯ)	Курбатова и др. 1997
Риск индивидуальный	Вероятность смертельного поражения (гибели) одного человека за определенный срок, например, за один год	Измалков и др., 1994

Риск индивидуальный	Вероятность поражающих воздействий определенного вида (смертельный исход, нетрудоспособность, серьезные травмы без потери трудоспособности и т.д.), возникающих при реализации определенных опасностей в определенной точке пространства (где находится индивидуум)	Кузьмин и др., 1997
Риск социальный	Соотношение между количеством людей, которые могут погибнуть при аварии, характеризующейся определенными последствиями, и вероятностью возникновения такой аварии	Измалкови др., 1994
Риск социальный	Зависимость вероятности нежелательных событий, связанных с поражением групп людей, подвергаемых воздействиям определенного вида при реализации соответствующих опасностей, от численности групп	Кузьмин и др., 1997
Риск социально-экологический	Суммарный риск потерь	Курбатова и др., 1997
Приемлемый риск	Уровень риска, оправданный с точки зрения экономических, социальных и экологических факторов	Быков и др., 1997
Риск приемлемый	Величина которого настолько незначительна, что ради получаемой при этом выгоды в виде материальных и социальных благ человек или общество в целом готово пойти на этот риск	Кузьмин и др., 1997
Риск приемлемый	Риск, для которого затраты на предотвращение больше, чем ожидаемый ущерб	Курбатова и др., 1997
Риск природно-техногенный	Риск, создаваемый разного рода авариями, происходящими от воздействия НОЯ	Курбатова и др., 1997
Риск демографический	Число жертв, раненых, заболевших, пострадавших иным образом	Курбатова и др., 1997
Риск экономический	Натуральное или денежное выражение потерь в техносфере	Курбатова и др., 1997
Предельно допустимый уровень риска	Уровень индивидуального риска, обусловленный хозяйственной деятельностью, который не должен превышать, независимо от экономических и социальных преимуществ такой деятельности для общества в целом	Кузьмин и др., 1997
Пренебрежимый уровень риска	Уровень индивидуального риска, обусловленный хозяйственной деятельностью, который пренебрежимо мал для индивидуума, поскольку, например, он находится в пределах флуктуации естественного (фоновое) уровня риска	Кузьмин и др., 1997
Приемлемый уровень риска	Уровень индивидуального риска, обусловленный хозяйственной деятельностью, который находится в диапазоне от предельно допустимого уровня риска	Кузьмин и др., 1997

	до пренебрежимого уровня риска и должен быть настолько низким, насколько это возможно по экономическим и социальным соображениям	
Величина социально-экологического риска	Снижение средней продолжительности жизни людей относительно наивысшей возможной на данной территории	Курбатова и др., 1997
Риск возникновения природной ЧС	Вероятность возникновения неблагоприятных (негативных) последствий воздействия поражающих факторов источников природных ЧС на население, территорию и окружающую природную среду	Госстандарт, 1999

1.1. Основные понятия

Будучи основоположниками в области риск-анализа, авторы данной работы предлагают следующие определения понятий опасности и риска, которые на настоящий момент времени являются общепринятыми в нашей стране и за рубежом.

Опасность природная – процесс, свойство или состояние определенных частей литосферы, гидросферы, атмосферы или космоса, представляющие угрозу для людей, объектов экономики и (или) окружающей среды (Природные опасности... , 2003).

Риск природный – вероятностная мера опасности (совокупности опасностей), установленная для определенного объекта в виде возможных потерь за заданное время (Природные опасности... , 2003).

С позиций типологии категории «опасность» и «риск» являются самостоятельными объектами исследований. Эти понятия отображают разнообразие связей и взаимоотношений между различными системами, такими как природа, социум, техносфера. В результате взаимодействия этих систем возникают различные эффекты воздействия опасности на определенный объект. Последствия (или результаты такого воздействия) оцениваются различными показателями, которые и отражают категорийное понятие «риск». Очень важным моментом при таких воздействиях является определение источника и реципиента опасности. Основные источники и реципиенты представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3

Классификация опасностей и рисков по источникам их возникновения и поражаемым объектам-мишеням (по А.Л. Рагозину, 1999)*

Источник	Объект		
	Природный	Социогенный	Техногенный
Природный	Природный	Природно-социальный	Природно-техногенный
Социогенный	Социоприродный	Социальный	Социотехногенный
Техногенный	Техноприродный	Техносоциальный	Техногенный

* Полужирным шрифтом выделена надгруппа природных рисков

1.2. Анализ классификаций опасности и риска

В настоящее время существует много классификаций опасности и риска, в основе которых лежат различные признаки деления. Все существующие классификации в своем большинстве являются частными, т.е. в них использован какой-то один признак деления опасностей и рисков.

Одним из основных признаков классификации представляется ее генезис. По мнению некоторых специалистов, в основе генетической классификации, учитывающей весь спектр явлений и процессов, способных приводить к стихийным бедствиям, авариям и катастрофам, необходимо использовать признаки максимально высокой интеграции. К признакам максимально возможной интеграции формирования и развития той или иной опасности можно относить генераторы энергии (Шойгу, Болов, 1997). По мнению этих авторов, существуют семь видов генераторов энергии: геологические экзогенные; геологические эндогенные; атмосферные; радиационно-химические; микробиологические; солнечно-космические; и технологические процессы. Классификации, построенные на этих принципах, позволят получать достаточно стройную систему причинно-следственных связей чрезвычайных ситуаций. А также, в свою очередь, это выстраивает второй уровень классификации, дифференцирующий весь спектр опасных явлений и процессов по их потенциальной

возможности генерировать вторичные явления. В результате весь спектр опасных явлений получает иерархическое строение, в основе которого лежит принцип убывания потенциала вторичных явлений.

Сразу хочется отметить, что далеко не всегда вторичные явления, спровоцированные каким-либо процессом, имеют меньшую разрушительную силу и приводят зачастую к не меньшим ущербам, чем первичные опасности. Можно привести следующий пример. Землетрясение, произошедшее в океане, вызывает развитие цунами, которое наносит громаднейший ущерб территории и расположенным в ее пределах объектам экономики, а также к значительным человеческим жертвам.

По А.И. Шеко (1997) каждый генетический тип экзогенной геологической опасности характеризуется энергетикой проявления этого процесса, которая определяется площадью, объемом действующих форм, скоростью движения грунтовых масс и дальностью их перемещения. Количественно она может быть выражена работой (энергией), которая затрачена на образование одной формы проявления данного генетического типа экзогенного геологического процесса. Другими признаками, по которым можно классифицировать или типизировать экзогенные геологические опасности и риски, по А.И. Шеко (1995) являются площадь охвата (объектный, локальный, региональный), характер проявления (дискретный, непрерывный), полнота учета (частный – от одной генетической опасности, суммарный – от нескольких генетических опасностей), форма проявления (прямой, косвенный).

С.М. Мягков (1995) разделяет природные опасные процессы и явления по преимущественному генезису на солнечно-космические, климатические, гидрологические, геолого-геоморфологические, биогеохимические и биологические, которые, в свою очередь, подразделяются на типы по характеру границ зон поражения (слабо ограниченные или возможные всюду и резко ограниченные). Эту классификацию можно отнести к смешанной по критериям выделения различных типов опасностей и явлений.

В основном созданы классификации по типам опасностей разного генезиса, т.е. проведена типизация природных процессов по степени их опасности. В основе этих частных классификаций лежат признаки, характеризующие разрушительный потенциал рассматриваемых опасных процессов. Например, для землетрясений существует типизация по магниту-

де и разрушительной силе, классификации по степени разрушения зданий, классификация по балльности в соответствии с ММСК-86, где каждому баллу соответствует определенная степень разрушения хозяйственных объектов и изменений окружающей среды и т.п.

Степень оползневой опасности определяется основными характеристиками данного процесса, т.е. пораженностью территории (%), повторяемостью, объемами оползневых смещений (m^3), глубиной захвата пород оползнем, скоростью смещения, что и определяет негативные последствия от развития этих процессов. Все эти характеристики лежат в основе классификации (типизации) оползневой опасности (Природные опасности ... , 2002). По аналогичным признакам составлены типизации селевой опасности, опасности обвалов и осыпей.

Опасность лавин, прежде всего, определяется внезапностью возникновения, широким распространением и большой повторяемостью. Разрушительная способность лавин зависит от потенциальной энергии лавины, которая определяется высотой падения (уровнем превышения лавиносбора), крутизной склона, массой лавины, и реализуется в оказываемом ею давлении (Божинский, Лосев, 1987).

Степень опасности овражной эрозии зависит от интенсивности линейного роста овражных форм, их плотности (шт/км²) и густоты (км/км²) (Зорина, 1981). Типизация участков рек по степени опасности согласно Р.С. Чалову (1995) проводится с использованием следующих характеристик процесса: скорость перемещения побочной (осередков) (м/год); скорость размыва (намыва берегов) (м/год); максимально возможные размывы берегов (м/год); периодичность развития рукавов (годы); протяженность зоны деформаций (% длины участка).

При абразионной опасности морских побережий наиболее показательными характеристиками процесса представляются линейные скорости отступления береговой линии (м/год). Наряду с этими показателями также учитываются и объемные скорости разрушений (m^3) (их удельные значения, $m^3/км \cdot год$), и пораженность береговой линии процессом переработки берегов (%).

Категории карстовой опасности зависят от степени закарстованности массива горных пород, скорости карстового процесса и устойчивости территории. Степень закарстованности массива пород оценивается по числу или площади поверхностных карстовых форм, по выходу керна бу-

ровых скважин и по косвенным признакам – водопроницаемости пород, скорости прохождения сейсмических и электрических волн. Скорость карстового процесса обычно характеризуется скоростью растворения и показателем активности – процентным отношением объема растворенной за некоторое время породы к объему карстующегося массива. Устойчивость закарстованных территорий устанавливается по совокупности данных о карстовом процессе, карстовых формах, геологическом строении и гидрогеологических условиях.

Опасность развития суффозионных процессов зависит от степени пораженности и поражаемости территории, частоты, повторяемости и интенсивности суффозионных провалов.

Важнейшей характеристикой наводнений является максимальный уровень воды за период половодья или паводка, который позволяет оценить площадь, высоту слоя и продолжительность затопления местности.

Выше перечислены критерии типизации или классификации по степени опасности для различных генетических типов природных процессов. Как видно, эти критерии весьма разнообразны, но, тем не менее, можно отметить некоторую общность, заключающуюся в оценке интенсивности каждого рассматриваемого процесса и повторяемости его проявления (частоте). Чем больше интенсивность и частота проявления, тем большей потенциальной разрушительной силой характеризуется тот или иной опасный природный процесс.

Возникновение и развитие собственно природных опасностей и рисков ограничено отдельными природными средами – литосферой, гидросферой, атмосферой, биосферой и космосом. В случае непосредственного поражения природными опасностями отдельных групп населения (социума) или техносферы возникают опасности и риски соответственно природно-социального и природно-техногенного генезиса.

Специального обсуждения требует вопрос о наличии и сущности социоприродных опасностей и рисков. Физическое воздействие собственно человека на природу весьма невелико, так как оно в основном опосредовано через технические средства. Поэтому к социоприродным, по всей видимости, следует относить преимущественно все действия и бездействия, связанные с недостатком знаний, халатностью и преступлениями, которые приводят к возникновению ОПТП, деградации или разрушению природной среды.

Основным источником техноприродных опасностей и рисков является техногенная деятельность человека, часто приводящая к возникновению негативных процессов там, где их развитие ранее было практически исключено.

Характерными примерами таких опасностей могут служить переработка берегов водохранилищ, техногенное подтопление территорий, многочисленные проявления индуцированных землетрясений в местах добычи нефти и газа, в районах водохранилищ, инициирование склоновых и карстово-суффозионных процессов неконтролируемой хозяйственной деятельностью и т. д.

Во всех охарактеризованных выше группах целесообразно дополнительно различать подгруппы процессов и явлений, связанных с живой и неживой (абиотической) природой.

Природный риск возникает только при воздействии природной опасности в любом из ее проявлений на объект (мишень или реципиент). Механизмы воздействия источников природной опасности на объекты весьма разнообразны и определяют такое же разнообразие возможных природных рисков.

Так как отдельные составляющие систем, относящиеся к понятию «опасности» и «риска», могут быть одновременно источником и объектом (реципиентом) риска, о чем говорилось выше, то классификации этих категорий во многом могут совпадать.

1.3. Классификация природных опасностей и рисков

Предлагаемая классификация природных опасностей и рисков проводилась с использованием общей классификации опасностей и рисков (см. табл. 1.3), а также рассмотренных выше общих и частных классификаций по дифференциальным опасностям и классификатора природных и техноприродных опасностей и рисков (Природные опасности ... , 2003).

Рассмотрим по аналогии с таблицей 1.3 источники (все опасные природные процессы), которые могут воздействовать на объекты и тем самым наносить ущерб с определенной вероятностью, т.е. приводить к природным рискам. Следует отметить, что проявление любого природно-

го процесса представляется как взаимодействие различных природных сред и факторов. Но, тем не менее, целесообразно классифицировать природные опасности и риски по основной среде их развития (источнику), так как среда определяет и механизм, и интенсивность развития опасного процесса, которые в конечном итоге обуславливают соответствующие опасности и риски. Поэтому, прежде всего, были определены основные генетические классы природной опасности, исходя из основных сред ее развития: литосферы, атмосферы и гидросферы. Согласно схемам взаимоотношения основных сред (источников природной опасности) развития опасных природных процессов, представленных на рис. 1.1 (а, б, в), вырисовывается следующая картина. Каждая из рассматриваемых сфер развития природных опасностей является источником определенных генетических классов опасностей. В литосфере, обозначенной на рис. 1.1 (а, б, в) цифрой 1, возникают экзогенные и эндогенные геологические процессы, в атмосфере (цифра 2) – метеорологические, в гидросфере (цифра 3) – гидрологические. При взаимодействии литосферы с атмосферой (цифра 4) развиваются геометеорологические (рис. 1.1, а) и метеогеологические процессы (цифра 6, рис. 1.1, б). Геогидрологические (цифра 5, рис. 1.1, а) и гидрогеологические процессы (цифра 8, рис. 1.1, в) возникают при взаимодействии литосферы и гидросферы.

Метеогидрологические (цифра 7, рис. 1.1, б) и гидрометеорологические (цифра 9, рис. 1.1, в) соответствуют двум взаимодействующим природным сферам (атмосфере и гидросфере). Таким образом, выделяется девять генетических классов природной опасности и риска.

Каждый из девяти выделенных генетических классов природных опасностей и рисков можно разделить по механизму их проявления на соответствующие подклассы, типы и т.д. Например, геологические опасности и риски могут подразделяться на эндогенные геологические опасности и риски и экзогенные геологические опасности и риски. Для наиболее ясной картины, на наш взгляд, в каждом генетическом классе следует определить возможные основные наиболее ущербобразующие процессы, отвечающие определенному генетическому типу, которым и будут отвечать соответствующие опасность и риск.

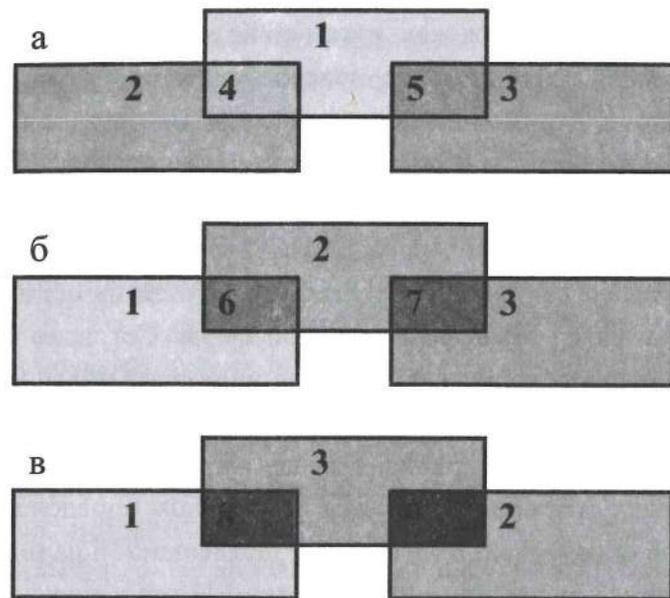


Рис. 1.1. Схемы соотношения основных сред развития опасных природных процессов.

Процессы: 1 – геологические; 2 – метеорологические; 3 – гидрологические; 4 – геометеорологические; 5 – геогидрологические; 6 – метеогеологические; 7 – метеогидрологические; 8 – гидрогеологические; 9 – гидрометеорологические

Типы и подтипы природных опасностей и рисков можно выделять по механизму их развития в пределах каждого выделенного генетического класса. Выделенные таким образом типы и подтипы все равно будут непосредственно связаны с генезисом рассматриваемых процессов.

Геологические опасности и риски – это опасности и риски, связанные с развитием следующих опасных процессов: современные движения земной коры, оползни, обвалы, землетрясения, извержение вулканов и некоторые другие. Метеорологические – экстремальные температуры, ветры, дожди, снегопады и т.п. Гидрологические – подводные течения, изменение уровней и некоторые другие.

Гораздо больше происходит опасных процессов при взаимодействии основных сред их развития.

Среди метеогеологических процессов наиболее распространенными и ущербобразующими являются дефляция, коррозия, образование барханов, дюн и т.п. Геометеорологические процессы и соответствующие

им опасности и риски связаны с такими явлениями, как изменение состава и свойств атмосферы при извержениях вулканов, эманациях углекислого газа, метана и других газообразных веществ.

Гидрометеорологические опасности и риски возникают и оцениваются при циклонах, ураганах, смерчах, дождях, снегопадах, а метеогидрологические – при наводнениях, штормах, нагонах и т.п.

Гидрогеологические опасности и риски связаны с изменениями расходов и запасов подземных вод, абразией, эрозией, селями, карстом, суффозией и т.п., а геологогидрологические – с цунами, перемещением наносов и т.п.

Следует также выделить отдельный тип опасностей и рисков, которые возникают при сложных многофакторных природных процессах, отвечающих взаимодействию (наложению) различных природных сред. Исходя из сказанного выше, генетическую классификацию природных опасностей и рисков можно представить следующим образом (табл. 1.4).

Классифицирование природных опасностей и рисков можно осуществлять по самым различным критериям, которые, в свою очередь, будут объединять между собой отдельные типы и подтипы генетической классификации. Например, в каждом генетическом классе или типе существуют опасности и риски, которые можно отнести к постоянно, или относительно постоянно действующим или к разовым (многократным) воздействиям. Но это уже не будет иерархическим продолжением генетической классификации по классам, типам и подтипам. Следовательно, деление природных опасностей по другим различным критериям реализуется в других видах классификаций (отдельных и самостоятельных), что можно оправдать целями, которые преследует каждый вид классификации. И, по всей видимости, невозможно создать единую, обобщающую классификацию природных опасностей и рисков (по многим критериям выделения уровней классифицирования) из-за несоблюдения иерархичности, как основы классифицирования любых систем реальности.

Генетическая классификация природных опасностей и рисков

Классы								
Геологические	Гео-гидрологические	Геометеорологические	Гидрологические	Гидрогеологические	Гидрометеорологические	Метеорологические	Метеогеологические	Метеогидрологические
Типы								
современные движения земной коры, оползны, обвалы, землетрясения, извержение вулканов и т.п.	цунами, землетрясения, наводнения, оползны, обвалы, т.п.	изменение состава и свойств атмосферы при извержениях вулканов, эманациях углекислого газа, метана и других газообразных веществ	подводные течения, изменение уровней в естественных и искусственных водоемах и некоторые другие	изменения расходов и запасов подземных вод, абразия, эрозия, сели, карст, суффозия и т.п.	циклоны, ураганы, смерчи	экстремальные температуры, дожди, снегопады, ветры, туманы и т.п.	дефляция, коррозия, образование барханов, дюн и т.п.	наводнения, штормы, нагоны и т.п.
Подтипы								
суффозионно-оползневые, карстово-обвальные, абразионно-оползневые, сейсмогравитационные и т.п.								

1.4. Методология риск-анализа в геологии

В настоящее время разработана методология оценки риска от развития опасных природных процессов, позволяющая определять риски как от одного опасного процесса, так и от их совокупности, состоящая из следующих основных блоков.

1. Идентификация опасности;
2. Оценка уязвимости;
3. Оценка риска;
4. Управление риском.

Под *идентификацией опасности* понимается прогнозирование развития определенного опасного процесса и (или) совокупности процессов в пределах оцениваемых участков территорий, требующее ответа на следующие два основных вопроса: 1. Какие опасности (генезис), где, когда и при каких природных и техногенных условиях поражали и поражают исследуемую территорию? 2. Какова их интенсивность, частота проявления и длительность воздействия? Ответ на эти вопросы может быть получен при выполнении следующих действий. Прежде всего, это проведение районирования оцениваемой территории по основным природным и техногенным факторам с целью выделения конечных таксонов (участков территории), характеризующихся однородностью природно-техногенных условий и, соответственно, возможностью проявления в их пределах совершенно определенного комплекса опасных природных процессов.

Под *уязвимостью* в общем виде понимается свойство любого материального объекта частично или полностью утрачивать способность к выполнению своих естественных или заданных функций в результате его поражения процессом или явлением определенного генезиса, интенсивности и длительности воздействия (Рагозин, 1999, с изменениями). Уязвимость по определению зависит как от свойств самого объекта, его способности противостоять негативным воздействиям, так и от характера и интенсивности этих воздействий. Поэтому оценка уязвимости осуществляется в первую очередь для отдельного объекта (реципиента опасности). Таковым может быть здание, сооружение, авто- и железные дороги, продуктопроводы и т.д.

Уязвимость оцениваемого таксона (территории) состоит из уязвимости площади данного участка и уязвимости технического объекта (объектов) (типовой застройки, сооружений и т.п.), расположенных в его пределах:

$$Y_T = Y_3 + Y_{To},$$

где Y_T – уязвимость таксона (территории), Y_3 – уязвимость оцениваемого участка, Y_{To} – уязвимость технического объекта (определенного его типа).

Для оценки полной уязвимости таксона (территории) целесообразно пользоваться удельными значениями уязвимости для площадных оценок и для оценок уязвимости технических объектов. Удельные значения уязвимости позволяют сравнивать между собой данные, полученные для различных технических объектов и территорий, и в дальнейшем использовать их при оценках на других территориях и иерархических уровнях.

Оценка уязвимости сейчас представляет собой весьма сложную комплексную задачу, предполагающую во всех случаях последовательное выполнение следующих операций для получения ответов на следующие вопросы: 1. Как используется исследуемая территория (идентификация объекта – реципиента негативных воздействий и риска)? 2. Какие объекты экономики на ней расположены (структурирование каждого оцениваемого объекта с выделением ведущих однотипных элементов, непосредственно реагирующих на воздействия определенных опасных процессов и их территориальных комплексов; возраст и состояние этих объектов)? 3. Какова уязвимость отдельных объектов, их систем для опасностей определенного генезиса и интенсивности (определение и сопоставление реакции каждого элемента объекта на воздействия определенных опасностей для определения функций его уязвимости)?

Оценка риска определяется как вероятность возможных ущербов от воздействия опасных природных процессов на объекты (реципиенты опасности) в пределах определенных территорий в определенный момент времени. В результате оценок риска во всех случаях должны быть получены вопросы на следующие ответы: 1. Какие сценарии развития и последствия опасностей возможны? 2. Какова вероятность реализации этих сценариев? 3. Какими будут потери от отдельных опасностей? 4. Какими будут суммарные потери?

Управление природными рисками – это завершающий этап общей процедуры риск-анализа опасных природных процессов. Под управлением риском понимается комплекс взаимосвязанных мероприятий и механизмов, направленных на уменьшение или предупреждение возможных или существующих потерь населения и окружающей среды от природных опасностей разного генезиса как в пределах локальных участков, так и на Земле в целом.

Характер и методы решения задач по управлению рисками существенно различаются от уровня управления несмотря на то, что конечной целью управления на всех уровнях является уменьшение потерь от проявления опасных природных процессов.

В зависимости от задач, отвечающих каждому уровню управления, используются различные методы, которые могут быть объединены в пять основных групп: методы, основанные на использовании карт риска, нормативно-правовые, организационно-административные, экономические и инженерно-технические. Основной задачей для целей управления природными рисками представляется оценка и картографирование природных опасностей и рисков в различных масштабах в зависимости от цели выполняемой работы. Как правило, основным конечным результатом оценок риска является их графическое отображение. Карты риска – это графическое отображение прогнозных значений возможных потерь (экономических, социальных, экологических) от опасности (различного генезиса) или совокупности опасностей за заданное время.

1.5. Специфика интегральной оценки риска

В настоящее время существует достаточное количество методик, позволяющих оценивать ущербы от проявления отдельных опасных природных процессов. Но, как правило, территории подвержены одновременно совокупности нескольких опасных процессов, и оценка природного риска связана с интегральными значениями рисков от этих процессов.

Для интегральных оценок риска по вышеуказанной методологии необходимо провести типизацию опасных процессов по категориям. Типизация заключается в отнесении того или иного процесса с известными

характеристиками интенсивности (объем, скорость, площадь единовременного проявления, пораженность и т. д.) и частоты (вероятности) проявления к одной из категорий опасности (обычно используются 4 категории) в зависимости от их потенциальной разрушительной силы. Мемой этой силы может служить максимально возможный социально-экономический ущерб от процессов в пределах территорий с примерно одинаковой степенью освоенности (плотностью национального богатства). К примеру, характеристика одной из категорий (чрезвычайно опасной) может иметь следующее определение. Процессы, как правило, возникают внезапно и развиваются за секунды и первые минуты, реже – за несколько часов и дней. Поражают относительно одновременно как локальные участки, так и огромные территории площадью до сотен и первых тысяч км². Проявляются с периодичностью от 1 раза в год (лавины) до 1 раза в 10–100 и более лет. На урбанизированных территориях эти процессы обычно приводят к летальным исходам, которые в отдельных случаях могут достигать первых сотен и тысяч человек, а также к огромным экономическим потерям, превышающим 500 миллионов рублей. Количество пострадавших превышает 500 чел., потерпевших – более 10 000 чел.

Использованный методический прием позволяет свести в одну группу опасности процессы разного генезиса, с различными механизмами их развития и проявления. Каждой категории опасности присваивается балл, отличающийся на порядок при переходе от одной категории к другой и имеющий стоимостное выражение.

Стоимость 1 балла рассчитывается исходя из среднескользящих потерь от проявления опасных природных процессов на определенной территории с известной площадью, либо из прогнозных значений ущербов от определенных процессов на определенной площади. Эти значения следует рассматривать в качестве приближенных, подлежащих уточнению при более детальных исследованиях из-за естественной генерализации факторов-обстановок развития опасных процессов и показателей их разрушительной силы.

Глава 2. Урбанизированные территории как объект риск-анализа. Мировой опыт исследования геологического риска в городах

2.1. Современные тренды развития урбанизированных территорий и экологические проблемы городов

Начавшийся в конце XIX века процесс урбанизации к началу XXI века приобрел колоссальный размах. В 1900 г. на земном шаре насчитывалось всего 12 городов с населением свыше 1 млн человек: Лондон, Париж, Берлин, Вена, Санкт-Петербург, Стамбул, Нью-Йорк, Чикаго, Филадельфия, Токио, Пекин и Осака (Legget, 1973, 1976). В настоящее время число городов-миллионеров составляет 360, а мегаполисов с населением более 10 миллионов – 35 (Gu et al., 2015; Gu, 2019). По прогнозам, к 2030 г. число таких мегаполисов увеличится до 60 (Genske, 2006). Как отмечает известный голландский геолог-урбанист Э. де Мульдер, за последние 25 лет рост городов стал особенно стремительным (Mulder, 2009). Так, за этот период взрывной рост по площади был характерен для таких городов как, например, Париж, Пекин, Сидней, Лас-Вегас. Последний, увеличив свою площадь более чем в 100 раз с 1973 г., признан самым быстрорастущим городом США. Согласно официальной статистике, в первом десятилетии XXI века число городских жителей достигло 3,4 млрд человек, что впервые в мировой истории превысило половину населения земного шара. В 2018 г. мировое городское население составило около 55% жителей земного шара против 43% в 1990 г. Сейчас городское население составляет 75% в Европе, 74% – в Северной Америке и 48% – в Азии (Mulder, 2009).

Следует упомянуть, что в настоящее время, согласно британским стандартам, к городам (urban areas) относятся населенные пункты с населением свыше 10 000 человек, в то время как в США – населенные пункты с населением свыше 2 500 чел. (Petley, 2009). Число городов с населе-

нием более 300 000 жителей в 2018 г. достигло 1860 (по сравнению с 305 в 1950 г. и 976 в 1990 г.) (Gu, 2019). В ближайшие десятилетия прогнозируется дальнейший стремительный рост городского населения, которое удвоится к 2050 г. и достигнет 5 млрд, что составит 66% населения Земли (Marker, 2009). Как ожидается, к 2050 г. более двух третей населения земного шара будет жить в городах (Gu, 2019).

Необходимо отметить, что азиатский регион, где проживает 60% населения планеты, лидирует по темпам урбанизации. Уже сейчас 6 из 10 крупнейших мегаполисов мира находятся в Азии. Стремительный рост городского населения (со скоростью 2% в год) характерен для развивающихся стран Азии и Африки и фиксируется, например, в таких городах как Лагос (Нигерия), Дакка (Бангладеш) и Карачи (Пакистан) (Price et al., 2016). В то же время исследователи отмечают наметившийся в последние годы обратный процесс субдеурбанизации и сокращения размеров городов в связи с их деиндустриализацией в густонаселенной Европе и США (Martinez-Fernandez et al., 2012, Price et al., 2016).

Города развиваются и сталкиваются с новыми проблемами и вызовами: расширением территории, уплотнением застройки и населения городов на уже освоенных территориях, а также вовлечением в застройку новых территорий, в том числе так называемых «неудобий» с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями строительства; необходимостью ведения многоэтажного строительства и вовлечением подземного пространства в городскую среду, усложнением подземных транспортных и коммунальных систем, ростом потребления и сокращением минеральных, энергетических и водных ресурсов.

Несмотря на то, что урбанизированные территории в пределах суши занимают не более 15% (Осипов и др., 1999), степень их воздействия на окружающую среду очень высока. В результате расширения и развития крупных городов можно наблюдать заметное ухудшение состояния окружающей среды. К экологическим проблемам городов относятся прежде всего загрязнение воздуха, накопление тяжелых металлов и токсичных веществ в почвах, грунтах, подземных и поверхностных водах; возникновение мощных ареалов техногенных физических полей (температурных, шумовых, вибрационных, электрических), накопление огромного количества промышленных и бытовых отходов и создание предприятий по их переработке, служащих источниками вторичного загрязнения окружающей среды.

Высокая концентрация различных видов человеческой деятельности в городах приводит к нарушению существующего баланса между искусственными и естественными компонентами городской среды. Растущая плотность застройки, транспортные проблемы и загрязнение воздуха на локальном уровне, а также климатические изменения в глобальном масштабе с каждым годом обостряют экологические проблемы урбанизированных территорий. Антропогенная деятельность активизирует опасные природные и природно-техногенные геологические процессы, такие как карст, суффозия, оползни, подтопление, наведенная сейсмичность и другие.

Очевидно, что урбанизация влияет на окружающую среду и, наоборот, окружающая среда влияет на уязвимую к ней городскую среду. Все возрастающая концентрация населения в урбанизированных регионах наряду с высокой плотностью сосредоточенного там капитала и материальных ценностей делают городские территории гораздо более уязвимыми к воздействию природных опасностей, чем сельские районы (Gencer, 2013). Как отмечает Б. Маркер (Великобритания), опасные процессы, не представляющие большой угрозы на неосвоенных территориях, могут представлять большую проблему в уязвимых густонаселенных городских районах и обуславливать высокий риск для проживания (Marker, 2009). Сегодня современные города характеризуются существенным нарушением геологической среды, активизацией и возникновением опасных природных и техногенных процессов, геохимическим загрязнением и др. В России по некоторым оценкам насчитывается 1117 городов и 611 городских округов, где проживает 81% населения страны; в связи с усилением урбанизации от таких процессов страдают более 135 городов, а экономический ущерб за последние 15 лет составил 23 млрд рублей (Абатурова и др., 2015). Таким образом, города сами являются как источником, так и реципиентом риска (Pereira, 2003).

Мегаполисы, оказывающие наибольшее воздействие на окружающую среду, и сами оказываются в большей степени подверженными воздействию опасных природных, в том числе геологических, процессов, чем малые города (Gencer, 2013; UN-Habitat, 2009; UN-Habitat, 2011). По наблюдениям ООН, мегаполисы чаще всего оказываются расположенными в местах, подверженных негативному воздействию опасных природных процессов (Gu, 2019). По данным ООН, 65% мирового городского населения населяет прибрежные районы. По прогнозам этот показатель

достигнет 74% к 2025 году (UN-Habitat, 2011). Большинство мегаполисов располагаются либо на морских побережьях, либо на берегах рек, что повышает их подверженность (exposure) воздействию таких природных опасностей, как наводнения, подъем уровня моря, переработка берегов и береговая эрозия, оползни (Genser, 2013). Исследованиями европейских ученых показано, что из всех городов Европы самыми небезопасными в геоэкологическом отношении являются города, расположенные на средиземноморском побережье, в наименьшей степени – города Швеции (Mulder, 1998; 2000; 2009).

По данным ООН, в 2018 г. в 83% городов зафиксирован высокий уровень риска смерти по крайней мере от одного вида природной опасности, а 89% городов оценены как высоко уязвимые в отношении экономического ущерба по крайней мере от одного вида природной опасности (Gu, 2019). Некоторые статистические данные, опубликованные ООН, по природным опасностям в городах приведены на рис. 2.1 и 2.2.

Рост числа и разнообразия опасных процессов, приводящих к снижению уровня безопасности городской среды, оказываются в центре внимания современной градостроительной политики. На передний план при развитии современных городов выходит повышение безопасности городской среды, минимизация накопленного экологического ущерба и удовлетворение населения качеством городского пространства, что подтверждается целым рядом национальных документов и программ (Sustainable development goals, UNEP – Национальный проект РФ «Жилье и городская среда», 2018; Проект цифровизации городского хозяйства «Умный город», Минстрой РФ, 2019).

Особое внимание урбанистов, проектировщиков, политиков и простых горожан в настоящее время уделяется проблеме **глобального изменения климата**, которое стало реальной угрозой безопасному проживанию в городах. В последние десятилетия отмечается значительное увеличение частоты возникновения разрушительных природных явлений в городах (ураганов, обильных дождей и ливней, периодов аномальных температур, ледяных дождей, обильных снегопадов), которые несут все более высокие риски для инфраструктуры городов (энергетики, транспорта, водообеспечения и водоотведения и т.д.), зданий и сооружений, здоровья населения и качества природных сред (Как разработать Климатический план города?, 2017).

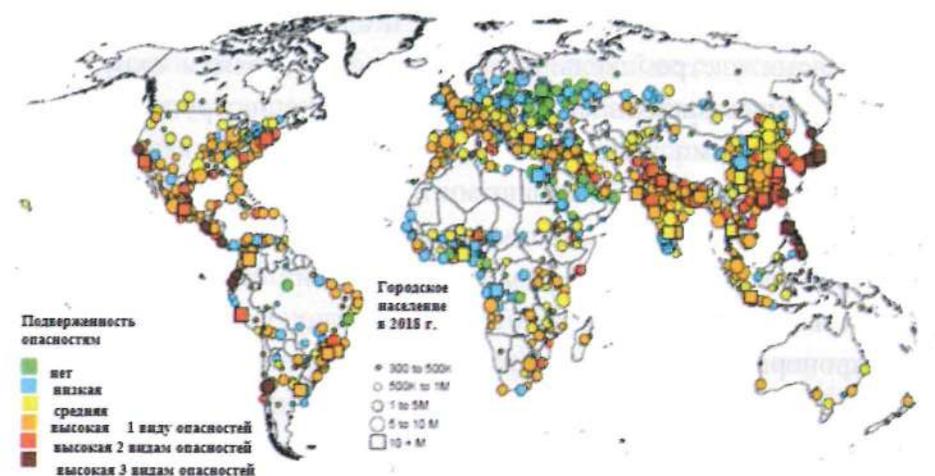


Рис. 2.1. Распределение городов по численности населения и подверженности природным опасностям.
Данные ООН (Gu, D. 2019)

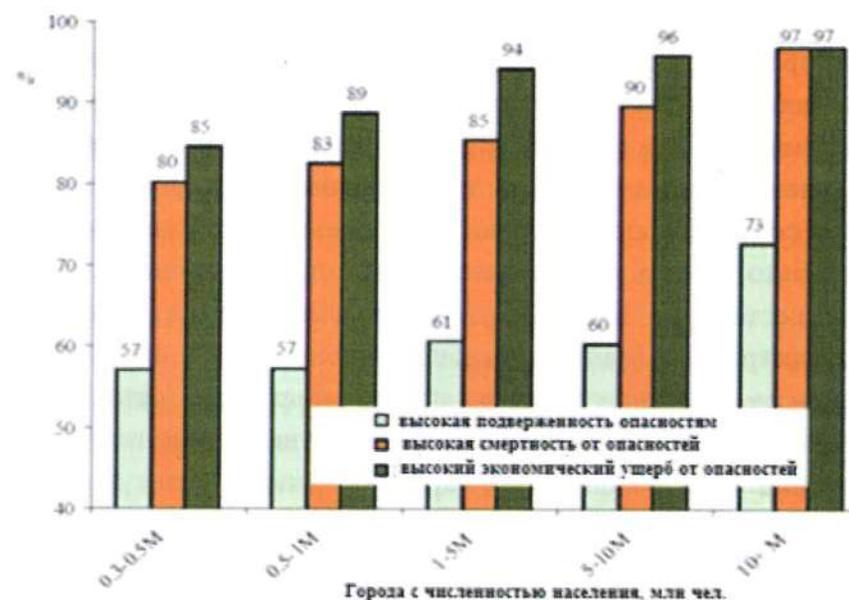


Рис. 2.2. Процентное соотношение городов с высоким уровнем подверженности (exposure), по крайней мере, 1 виду природной опасности в зависимости от размера города (по численности населения).
Данные ООН (Gu, 2019)

В этой связи одним из приоритетных направлений управления городским пространством является разработка мер, направленных на прогнозирование, смягчение последствий и адаптации технологий природопользования к стремительно меняющимся условиям окружающей среды. В настоящее время в мегаполисах одним из инструментов управления климатическими изменениями является создание климатических планов, в которых наряду с основными целями и задачами подчеркивается необходимость адаптации к последствиям изменения климата.

Наблюдается тенденция резкого увеличения объемов накопления *твердых коммунальных отходов* (ТКО) в городах. Показатель образования ТКО пропорционален благосостоянию населения. По некоторым данным в Москве удельный объем накопления отходов составляет 320 кг/чел·год, в то же время в городах европейских стран этот показатель доходит до 500 кг/чел·год. В дальнейшем прогнозируется рост объема отходов, что будет оказывать существенную нагрузку на окружающую среду. Проблема отходов продолжает оставаться одной из самых сложных экологических проблем в городах.

Современные глобальные тренды развития мировой экономики безусловно определяют модели будущего развития городов. Ответом на эти вызовы являются разрабатываемые в настоящее время комплексные проекты, направленные на обеспечение инновационного развития городов. Среди основных стратегических направлений в этих проектах можно выделить три составляющих: модернизация транспортной инфраструктуры, которая часто идет за счет сокращения площади «зеленых» зон; возрождение общественных пространств; перепланировка уже освоенного городского пространства (набережных, промышленных зон или городского центра) или расширение с захватом пригородных территорий. Все это обуславливает деформацию окружающей среды, увеличение техногенной нагрузки на единицу площади городского пространства, что с одной стороны ведет к разрушению значимых элементов городской среды, а с другой – к увеличению риска возникновения опасных природных (в том числе геологических) процессов. Поэтому реализация подобных проектов не может проходить без учета геологических рисков.

Так, важным глобальным трендом развития городов в последние годы является *редевелопмент городских территорий* с накопленными

негативными последствиями воздействия геологических факторов. Кроме того, часто под новое строительство отводят неудобные для освоения участки, где объекты экономики оказываются в зонах действия опасных геологических процессов. Освоение территорий со сложными инженерно-геологическими условиями в пределах урбанизированных территорий – актуальная задача городского планирования. Непригодные по естественным условиям земли в среднем составляют 10–15%, а в отдельных городах достигают 35–40%. Существенную долю среди них занимают овраги и балки (Казанов, 2004; Заиканов и др., 2019). Постоянное расширение урбанизированных территорий вдоль берегов рек постепенно изымает все новые пространства гидрографической сети. Во многих случаях это позволяет понять причины увеличения уязвимости городских территорий к воздействию гидрогеологических процессов.

Помимо расширения территории городов, еще одна современная тенденция – все более широкое *вовлечение подземного пространства в городскую среду*. Существенное увеличение доли использования городского подземного пространства наблюдается во всех мировых мегаполисах. Основными причинами этого процесса представляется как нехватка места на поверхности для дальнейшего развития городского хозяйства, так и стремление к улучшению экологических условий городов. За рубежом термин «территориальное планирование» (land-use planning) все чаще заменяется термином «пространственное планирование» (spatial planning). Эта тенденция отражает все более ярко выраженную «трехмерность» городской среды, куда активно вовлекается освоение подземного пространства и высотное строительство (Mulder, 2001; Mulder, 2009; Priceetal., 2011; Priceetal., 2016; Taselaar, 2008; Sterling, 1996).

В настоящее время средняя плотность использования городского подземного пространства составляет 0,05 м³/м². При этом удельный объем освоенного подземного пространства в городах на 1 человека достигает 10 м³ (Bobylev, 2016; Bobylev, 2016a). Современный мировой опыт функционирования городских агломераций показывает, что оптимальные условия для устойчивого развития и комфортного проживания в городе достигаются при доле подземных сооружений от общего числа построенных объектов не менее 20–25% (Меркин и др., 2013). На сегодняшний день этот показатель для г. Москвы, по данным А. Левченко (Левченко,

2009), составляет всего 8%. Подземная урбанизация включает развитие транспортной инфраструктуры в комплексе с «сопутствующими» объектами торгового, коммунально-бытового и другого обслуживания населения; сооружение объектов инженерной инфраструктуры города; объектов энергетики; строительство сооружений общественного назначения, перемещение в подземное пространство предприятий, расположенных в черте города в промышленных зонах; складские и коммунальные объекты, а также предприятия, функциональное назначение которых требует изоляции как от внешних воздействий (шума, вибрации и т.п.), так и по соображениям экологической безопасности (Меркин и др., 2013).

В отечественной и зарубежной градостроительной практике прослеживается тенденция к объединению торгово-бытовых предприятий, зрелищных, культурно-просветительных, административных и спортивных учреждений, транспортных сооружений в крупные комплексы с подземной частью. Такие комплексы располагают на основных транспортных магистралях, их пересечениях, в транспортных узлах, под крупными городскими площадями либо улицами. Развитие подземных городов – относительно новое явление, оно началось в 1960-х гг. в Канаде (Монреаль, Торонто). На сегодняшний день Монреальский подземный город RESO, проект которого был разработан урбанистом Винсентом Понте в середине прошлого века, является самым большим в мире и занимает площадь более 12 км² с протяженностью туннелей более 32 км (рис. 2.3). Эти туннели соединяют торговые комплексы, жилые здания, отели, дома, банки, офисы, музеи, университеты, 10 станций метро, железнодорожные и автобусные станции, сохраняя при этом исторический облик города на поверхности. Во время плохой погоды, которая не редкость в Монреале, улицы пустеют – все перемещаются под землю (Кухаренко, 2014; Мавлянова и др., 2015).

Подземные комплексы стремительно развиваются и становятся неотъемлемой частью мегаполисов в мире. Так, в Париже – это подземный центр с торговыми рядами под площадью Этуаль, который включает пересечения линий метро и подземных переходов; подземный торговый центр Ле Алль на месте бывшего Центрального рынка, где совмещены пересадочные станции автобуса и метро; 11-уровневая система различных сооружений под площадью Дефанс (Мавлянова и др., 2015).

В последнее десятилетие лидером в освоении подземного пространства стал Китай. В 2007 г. в Пекине использовалось 30 км² подземного пространства, и эта цифра ежегодно увеличивается на 10% (Mulder, 2004). Уже более чем в 200 городах Китая имеются подземные торговые комплексы. Примером стремительного освоения подземного пространства является Шанхай, самый крупный город в мире, с населением более 25 млн человек (рис. 2.4). В 1995 г. в городе была только одна линия метрополитена. В 2010 г. в Шанхае уже 11 линий с 267 станциями и 410 км туннелей. К 2025 г. планируется построить еще 7 линий метро (Mulder, Pereira, 2009).



Рис. 2.3. Подземный город RESO в Монреале.

Источник: [Wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RESO.jpg)

Современная практика проектирования и строительства подземных торговых комплексов также получает свое развитие в России и странах СНГ. Одним из первых крупных подземных торговых центров в г. Москве стал «Охотный ряд», построенный в 1997 г., общей площадью

63000 м². В настоящее время крупнейшим торговым центром Москвы является «Афимол Сити», построенный в 2011 г. в составе «Москва-Сити», площадь которого составляет 179000 м² (Мавлянова и др., 2015). В декабре 2017 г. Архитектурный совет Москвы одобрил новый уникальный проект строительства многофункционального подземного торгового комплекса на Павелецкой площади размером 73 тыс. м², открытие которого запланировано на август 2021 г. (рис. 2.5). Торговый центр будет включать в себя 3 подземных уровня: 2 торговых этажа и парковку, а сверху на площади будет разбит современный городской парк на 2,8 га с площадками для городских событий, фестивалей и концертов (рис. 2.6).



Рис. 2.4. 18-этажное здание отеля InterContinental Shanghai Wonderland расположено в заброшенном карьере в Шанхае на глубине 90 метров под землей. 16 из 18 этажей находятся ниже поверхности.

Источник: <https://www.buro247.ua/lifestyle/architecture/quarry-underground-hotel-shanghai.html>

Освоение подземного пространства как компонента устойчивого развития городской среды – сложное и комплексное направление урбанистики, требующее совместных усилий ученых разных отраслей знания (Carmody and Sterling, 1993; Sterling, 1997; Bobylev, 2006; Bobylev, 2011; Bobylev and Sterling, 2016; Rogers, 2009; ITACUS, 2010; Sterling et al., 2012). В настоящее время много научно-исследовательских проектов направлено на поиск эффективных путей обеспечения устойчивого разви-

тия урбанизированных территорий и включения подземного пространства в городское планирование (Makana et al., 2016; Campbell et al., 2017). Так, например, проблемы устойчивого развития городов и планирование сбалансированного освоения подземного пространства рассматриваются комитетом по использованию подземного пространства международной тоннельной ассоциации (ITACUS) (ITACUS, 2010). В 2013-2017 гг. усилиями более чем 30 стран выполнялся крупный проект ЕС (European COST Sub-Urban Action (TU1206)), направленный на обеспечение устойчивого развития подземного пространства и преодоление разрыва между учеными-урбанистами и потенциальными потребителями. Это один из примеров комплексного междисциплинарного подхода к решению вопроса устойчивого развития, который включает экономическую, социально-культурную и экологическую составляющие (Admiraal and Cornaro, 2016; Bobylev, 2009; Bobylev and Sterling, 2016; Li et al., 2016; Sterling et al., 2012; Wende et al., 2010).



Рис. 2.5. Строительство «подземного города» под Павелецкой площадью в Москве.

Источник: stroi.mos.ru



Рис. 2.6. Проект благоустройства городского пространства над торгово-развлекательным центром «Павелецкая Плаза» в Москве.
Источник: *stroj.mos.ru*

Для развития городских земель существует множество *ограничений*, среди которых важное место занимают геоэкологические (Rai, 1994; Grecchi, Rejon., 1998; Заиканов и др., 2017). Их учет и предотвращение при проектировании и планировании городского пространства является залогом формирования безопасной среды, способствующей жизнедеятельности человека и устойчивому развитию территории. Поэтому наряду с решением социально-экономических задач необходимо рассматривать вопросы предельно допустимых нагрузок на природные компоненты, а также прогнозировать риски от проявления природных и техногенных опасностей. Управленческие решения в области градостроительства, принимаемые различными ведомственными структурами, такими как департаменты строительства и архитектуры, при подготовке планов развития и освоения урбанизированных территорий учитывают прежде всего социально-экономические условия и особенности инфраструктуры, а возможные природные и техногенные опасности

учитываются в проектах и стратегиях в меньшей степени. Между тем их активизация в городских условиях может привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. Отсутствие системных нормативных стандартов и законодательных документов, необходимых для учета возможных рисков при проектировании градостроительной деятельности, препятствует решению задач безопасного и устойчивого развития (Прядко, 2009; Lateef et al., 2010).

В экологических рейтингах городов (City Prosperity Initiative, 2016; Бюллетень городов России, 2017) обычно не учитываются геологические факторы, выходящие за рамки экологических исследований, которые включают данные мониторинга загрязнения воздуха, почвы, поверхностных и подземных вод. В то же время недооцениваются такие неблагоприятные факторы, как стабильность геологической среды, наличие и динамика опасных геологических процессов и др., которые в перспективе пространственного развития могут привести к значительному ущербу для окружающей среды, экономических объектов и здоровья населения.

Для обеспечения геоэкологической безопасности необходимо разрабатывать новые технологии, снижать техногенную нагрузку и т.д. Одним из путей в этом направлении является оценка геологических рисков и своевременное их предупреждение.

Пространственное и городское планирование с учетом запретов или ограничений являются наиболее эффективным экономическим инструментом для предотвращения опасных природных явлений. Современная концепция стратегического развития города должна включать следующие элементы:

- лучшие (на уровне мировых стандартов) планировочные и градостроительные решения;
- технологии и идеи повышения экорейтинга, инвестиционной привлекательности города и обеспечения геоэкологической безопасности проживания.

Для минимизации рисков возникновения опасных природных и природно-антропогенных процессов и явлений требуется сбалансированность между социальными, экономическими и экологическими интересами в области политики и принятия решений по планированию городского пространства. Взаимодействие геологов и градостроителей,

архитекторов и других специалистов в области принятия решений требует создания единого информационного поля для различных участников процесса планирования, учитывая, что многие из них имеют ограниченное понимание вопросов геологического риска на урбанизированных территориях.

Для решения стратегической задачи по повышению требований к обеспечению безопасности городской среды необходимо усовершенствовать сбор и анализ данных по оценке геологического риска на территории городов на основе системы взаимосвязанных, релевантных и измеряемых показателей, учитывающих аспекты взаимодействия человека с природой. Необходима разработка единой методологии оценки городского пространства для выявления пространственной дифференциации геологических рисков.

2.2. Геологические опасности в городах – предмет изучения урбанистической геологии

Комфортное и безопасное проживание людей в городах – проблема комплексная и многосторонняя. Одним из ее аспектов является изучение геологических опасностей и оценка их влияния на городскую инфраструктуру, что входит в круг задач, решаемых урбанистической геологией.

Практически все крупные города мира подвержены воздействию опасных природных процессов, которые наносят большой ущерб экономике, а в случае их катастрофического развития приводят и к человеческим жертвам.

Как было отмечено выше, опасные природные процессы наносят наибольший ущерб урбанизированным территориям, где плотность населения и инфраструктуры особенно высока. Только в 2018 г. 58% всех городов с населением свыше 300 тыс. жителей (1087 городов из 1860) подверглись высокому риску воздействия по крайней мере одного из 6 самых опасных природных процессов, к которым по статистике ООН относят циклоны, экстремальные температуры, землетрясения, извержения вулканов, оползни и наводнения (Gu, 2019). При этом города в менее развитых регионах терпят больший экономический ущерб от природных ката-

строф, чем городские территории в высокоразвитых странах. 92% всех смертей, которые повлекли за собой крупные природные катастрофы, относятся к странам с низким и средним уровнем развития (UNDRR, 2019b). Крупные города и особенно мегаполисы более уязвимы по отношению к опасным природным процессам, включая геологические и гидрометеорологические процессы (с точки зрения возможного количества человеческих жертв и экономического ущерба), чем малые и средние города (Gencer, 2013; UN-Habitat, 2011). Так, в 2018 г. из 33 мегаполисов мира с общим населением 529 млн человек 8 подверглись воздействию как минимум одного опасного процесса, а для 24 мегаполисов был зафиксирован высокий риск такого воздействия (Gu D., 2019).

На урбанизированных территориях происходит интенсивное техногенное изменение геологической среды, активизируются природные и формируются новые природно-техногенные и техногенные геологические процессы. Из-за большой плотности населения, жилой, административной и промышленной застройки и прочей городской инфраструктуры на таких территориях значительно возрастают опасность и риск проявления любых геологических процессов. Проявление опасных процессов на городских территориях влекут за собой значительное число жертв и большой экономический ущерб. Между тем, во многих случаях негативных последствий катастроф, источником которых являются опасные геологические процессы, можно было бы избежать, если бы геологическая информация адекватно и своевременно учитывалась городскими властями.

На геоэкологические проблемы городов ученые обратили внимание лишь во второй половине XX века. В 1960-х гг. за рубежом зародилась и оформилась в самостоятельную научную дисциплину так называемая «*урбанистическая геология*» (urban geology). Этот термин был впервые использован в циркуляре Геологической службы США Дж. Т. МакГиллом (McGill, 1964). Известные английские инженер-геологи М. Калшоу и С. Прайс называют «отцом урбанистической геологии» Р. Леггета за его фундаментальный труд «Города и геология» (Culshaw, M.G., Price, S.J., 2011). Эта книга, впервые опубликованная в США в 1973 г., была переведена на русский язык в 1976 г. (Леггет, 1973, 1976). Именно этот ученый впервые привлек внимание к тому, что роль геологических наук недооценена при планировании городского развития. По

его мнению, пренебрежительное отношение к геологическим процессам и условиям во многих случаях приводит к серьезным негативным последствиям в городах. В своей книге «Города и геология» Р. Леггет пишет: *«При планировании города или района площадь, намеченную к застройке, нельзя уподоблять чистому листу бумаги, на котором возможна материализация любых идей строителя.... Планирование и строительство новых городов немислимы без учета основных особенностей органического мира и динамики природы. Только при этих условиях человеческая деятельность будет гармонично вписываться в окружающую среду и не нарушит ее биологическое равновесие. ...Как прозорливо сказал Фрэнсис Бэкон почти четыре столетия назад: «Чтобы управлять природой, надо ей подчиняться» (Леггет, 1976).*

Урбанистическая геология сформировалась в отдельную отрасль геологического знания благодаря трудам таких ученых, как С. Прайс, У. Дирман, Б. Маркер, М. Калшоу (Великобритания); Э. де Мульдер (Нидерланды), О. Уайт (Канада) и др. (Brennard, 1998; Culshaw, M.G., Price, S.J., 2011; de Mulder et al., 2001; de Mulder et al., 2009; Dearman, 1991; Karrow, P.F. and O.L. White, 1998; Marker, 2009; Marker, 2016; Price et al., 2011; Price et al., 2016). Ими отмечается, что урбанистическую геологию (urban geology) следует отличать от геологии городов (geology of urban areas), прежде всего, по предмету исследования. Так, уже первые работы в области урбанистической геологии касались не только изучения геологического строения урбанизированных территорий, но и возникающих там природных и техноприродных опасностей. В 1862 г. австрийский ученый Э. Зюсс (Eduard Suess) опубликовал труд «Грунты г. Вены», в котором впервые дал комплексную характеристику всей городской геологической среды, описав геологическое строение территории, гидрогеологические условия, состав грунтов, в том числе техногенных отложений, используемые стройматериалы, а также выделив социально-экологические аспекты, в частности здоровье населения. В 1897 г. сотрудник Британской геологической службы Х. Вудворт (Horace Woodward) построил карту грунтовых толщ большого Лондона, на которой были учтены не только геологическое строение, но и гидрогеологические и геоэкологические особенности территории (например, расположение кладбищ с точки зрения санитарно-гигиенических норм), а также представлены сведения о

грунтовых основаниях зданий и сооружений, о водоснабжении и дренажных системах. Этот труд предназначался не только для геологов, но и для других категорий потребителей (Culshaw and Price, 2011). К. Клайтон (Clayton, 2001; 2009) отмечает, что в настоящее время потребителями картографической информации в урбанистической геологии выступают не только геологи, но и проектировщики, финансисты, страховщики и прочие категории специалистов разных областей, а также и неспециалисты – обычные городские жители. М. Калшоу и С. Прайс (Culshaw and Price, 2011) предлагают такое определение предмета урбанистической геологии: *изучение взаимодействия между человеком и геологической средой в пределах урбанизированных территорий и возникающих в результате этого взаимодействия техноприродных процессов с целью предоставления необходимой геологической информации для обеспечения устойчивого и сбалансированного развития, рационального использования и охраны природной среды городов.* По мнению Мульдера, урбанистическая геология охватывает изучение всего комплекса геоэкологических и социально-экономических проблем, возникающих при планировании градостроительной деятельности и освоении подземного пространства городов (Mulder et al., 2001; 2009).

Еще в 1960-х гг. Р. Леггет с сожалением отмечал, что недооценка геологических условий городов является причиной многих серьезных проблем на городских территориях. В своей книге «Города и геология» он отмечает, что «во многих случаях с геологией вынуждены считаться только тогда, когда происходило несчастье и выяснялось, что причина его – результат пренебрежительного отношения к геологическим условиям местности» (Леггет, 1976). По свидетельству М. Калшоу, осознание роли геологических наук в планировании градостроения и понимание необходимости создания политематических геологических карт, которые удовлетворяли бы потребностям многих специалистов, а не только инженеров-строителей, пришло к началу 1970-х гг. (Culshaw and Price, 2011). В 1969 г. И. Макхарг, возглавлявший кафедру пейзажной архитектуры и регионального планирования Пенсильванского университета, опубликовал книгу под названием «Проектируйте вместе с природой», в которой нашли отражение новые на тот момент тенденции в городском планировании (McHarg, 1969). И. Макхарг выделяет две группы факторов, опре-

деляющих рациональное планирование: геоморфологические препятствия и социально-экономические ценности. Первая включает рельеф, дренаж, коренные породы и грунты, вторая – исторические достопримечательности, растительный и животный мир, жилой фонд. Однако тот же автор отмечает, что «...основным критерием для освоения любой территории является экономика, и если какое-либо использование земли вызывается экономическими интересами общества, оно осуществляется, невзирая на физические особенности территории. Если же отсутствует экономическая необходимость, то самые удобные для освоения земли планеты не вызовут желания их использовать» (McHarg, 1969).

Проблемы, поднятые И. Макхаргом и Р. Леггетом почти полвека назад, продолжают оставаться актуальными и сейчас, о чем свидетельствует неослабевающее внимание к ним со стороны специалистов. Так, 10-й конгресс Международной ассоциации по инженерной геологии и окружающей среде (МАИГ), состоявшийся в г. Ноттингеме (Великобритания) в 2006 г., а также вторая Европейская конференция МАИГ (2008 г. Мадрид, Испания) были целиком посвящены обсуждению инженерно-геологических и геоэкологических проблем, обостряющихся с ростом городов. Работы по урбанистической геологии и планированию устойчивого развития городов составили отдельный том трудов 12-го конгресса МАИГ 2014 г. (Турин, Италия, 2014 г), который проходил под девизом «Инженерная геология для общества и территорий». Много докладов по этой проблематике было представлено на 34-м и 35-м Международных геологических конгрессах в 2012 г. (Брисбан, Австралия) и в 2016 г. (Кейптаун, ЮАР), на 13-м Международном конгрессе МАИГ (Сан-Франциско, США, 2018 г.), а также на 12-й Азиатской региональной конференции по инженерной геологии (Ю. Корея, 2019 г.). Специальная секция по урбанистической геологии работала в рамках Европейского конгресса по региональному и научному картографированию и информационным системам, состоявшимся в Болонье (Италия) в 2012 г. Как отмечалось выше, в фокусе внимания современной урбанистической геологии находится изучение взаимодействия между человеком и геологической средой в пределах урбанизированных территорий и возникающих в результате этого взаимодействия техноприродных процессов с целью предоставления необходимой геологической информации для обеспече-

ния устойчивого и сбалансированного развития, рационального использования и охраны природной среды городов (Culshaw and Price, 2011).

Опасные процессы геологической природы, проявляющиеся на урбанизированных территориях, которые чаще всего оказываются в центре внимания ученых – инженер-геологов, включают землетрясения, переработку берегов (береговую абразию и эрозию), оползни и обвалы, провалы и оседания поверхности карстово-суффозионной и техногенной природы, а также подтопление. Проявление различных геологических опасностей в городах часто взаимосвязано и взаимно обусловлено. Сейсмические события, как правило, служат триггером целого комплекса опасных природных явлений (разжижение грунтов, оползни, цунами и др.) Оседание земной поверхности часто сопряжено с подъемом УГВ и подтоплением городских территорий, которое, в свою очередь, способно индуцировать склоновые процессы.

Очевидно, что геологические опасности на территории городов с целью оценки рисков и планирования городского развития необходимо изучать в комплексе. В настоящее время необходимость комплексного учета природных опасностей при среднесрочном и долгосрочном городском планировании не подлежит сомнению. Сегодня общепризнано, что *наиболее эффективным экономическим инструментом для обеспечения устойчивого развития городов является территориальное планирование, согласованное с картами природных опасностей, где указаны запреты или ограничения к освоению территорий того или иного назначения.* Ученые сходятся во мнении, что на ранних предпроектных стадиях инженерных изысканий для оценки опасных геологических процессов в городах наиболее эффективно применять районирование и специальное картографирование территорий (Clayton, 2009; Culshaw and Price, 2011; Marker, 2009; Pereyra et al., 2003).

В последние десятилетия исследования геологов-урбанистов направлены на развитие дистанционных методов изучения и мониторинга, совершенствование методов сбора данных, картографирования и моделирования городской среды, оценку геологических опасностей и рисков для целей рационального городского планирования и использования подземного пространства городов (Lollino, 2015). При этом, по мнению Б. Маркера, пространственное планирование подразумевает комплексный

учет всего спектра социальных, экологических и экономических факторов, влияющих на потенциал городского развития (Marker, 2016).

Междисциплинарные научные исследования в области опасностей и риска привели к существенному прогрессу в понятийной и методологической базе риск-анализа; также достигнуты значительные результаты в развитии методик и подходов к оценке природных опасностей, уязвимости, и в управлении природным риском (Gencer, 2013; Cutter, 2001; UNISDR 2009; Culshaw et al., 2009).

Важнейшая задача современных геологических исследований в городах – переход от оценки и картографирования опасности геологических процессов к оценке и картографированию риска, что даст возможность получить наиболее адекватное представление о размерах возможного ущерба от проявлений геологических процессов на городской территории.

2.3. Разработка методик оценки природных опасностей на основе специального картографирования городских территорий

Работы многих зарубежных ученых посвящены специальному картографированию территорий городов для планирования городской среды крупных городов с учетом геологических опасностей (Dermentzopoulos and Katsaridis, 1998; Lee et al., 1988; Legget, 1987; Parry, 2006).

С 1980-х гг. в Великобритании началось выполнение проектов по составлению комплектов тематических специализированных геологических карт для планирования градостроительства на урбанизированных территориях для различных районов Англии, Шотландии и Уэльса. Комплекты карт включали карты фактического материала, интерпретационные карты и суммирующие карты, показывающие основные геологические опасности для целей городского планирования. Уже первый выполненный проект, охватывавший площадь в 100 км² в Шотландии, включал 18 базовых карт, 4 интерпретационные карты и 5 суммирующих (синтетических) карт (Culshaw and Price, 2011). По данным Дж. Риз, А. Гиббсона и др., к 2009 г. Британской геологической службой была построена цифровая геологическая карта Великобритании в масштабе

1:50 000 (Rees, 2009). Выделено 14500 типов грунтов, которые систематизированы и закодированы по ряду параметров, включая прочность, пластичность, проницаемость и предрасположенность к подвижкам. К этой карте привязана Британская национальная оползневая база данных, национальная карстовая база данных и национальная геотехническая база данных. В 1990-х гг. такие исследования для оценки грунтовых условий выполнялись уже на основе ГИС и в цифровой форме. К 2012 г. Британской геологической службой завершен проект по составлению цифровой карты мира в масштабе 1:1 000 000 (Rees, 2009). Геоинформационные технологии для изучения инженерно-геологических условий городов активно применяются с 1990-х годов и в Нидерландах, где в Национальном институте прикладных геологических исследований (TNO) была создана оцифрованная база данных на всю территорию страны. Начатая в цифровой форме в 1994 г., уже в 1996 г. эта база данных включала результаты опробования по 400 000 буровых скважин с плотностью покрытия по стране в среднем 10 точек на км². На основе этой постоянно пополняемой базы данных возможно построение тематических карт, показывающих глубины заложения фундаментов и их стоимости, потенциальную осадку, состав и строение грунтовых толщ, гидрогеологические условия, потенциальные пути распространения загрязнения и др. В настоящее время в ГИС Нидерландов также включаются не только геологические и геофизические данные, но и геотехнические параметры, гидрогеологические и геохимические свойства, а также археологические данные.

К началу XXI века ГИС-метод многофакторного анализа инженерно-геологических данных для оптимизации планирования градостроительного освоения территорий с успехом применяется в Великобритании, Греции, Нидерландах, Австралии, Франции, Канаде и многих других странах мира (Culshaw and Price, 2011; Culshaw et al., 2009; Kargow and White, 1998). Разрабатываются способы оценки природных опасностей, создаются специальные интернет-интегрированные механизмы, методики и инструменты, учитывающие пространственно-временную изменчивость и вероятностный механизм проявления опасных процессов. Производится многокритериальная (многофакторная) оценка территорий на основании учета комплекса опасных геологичес-

ких процессов с последующим зонированием по степени пригодности городской территории к различному виду ее использования (Cavaleiro, 2009; Dermentzopoulos and Katsaridis, 1997). Набор учитываемых факторов (критериев) существенно различен в разных исследованиях. Так, например, при инженерно-геологическом картографировании г. Сан-Паоло (Бразилия) оценивалась оползневая опасность, затопление и береговая эрозия (Marchiori-Faria, 2009), для г. Лион (Франция) при специальном инженерно-геологическом картировании учитывались склоновые процессы, оползни, проседания и провалы грунтов над горными выработками (Thierry and Vinet, 2001). В ЮАР при разработке национальной программы по картографированию урбанизированных территорий, покрывающих 55% площади страны, принимались во внимание такие природные опасности, как сейсмические явления, карстовые провалы, набухающие грунты (Richards, 2006). При инженерно-геологическом картографировании территории ряда крупных городов Китая для составления среднесрочных планов городского развития наряду с сейсмической опасностью учитывались такие вторичные природные опасности, индуцируемые сейсмическими событиями, как разжижение грунтов, оползни, и цунами (Forster et al., 2006). Для района Братиславы была создана карта инженерно-геологических условий с учетом несущей способности грунтов-оснований и трудности их разработки, а также глубины залегания и агрессивности подземных вод (Dunčková, 2019). Маршалко и др. (Marschalko, 2009, 2012) при разработке ограничений городского планирования на основе ГИС для г. Острава (Чехия) уделили внимание 4 факторам: подтоплению, радоновой опасности, неустойчивости склонов и степени подработки территории горными выработками. При инженерно-геологическом картографировании г. Туниса с использованием ГИС основными факторами, ограничивающими городское развитие, были выбраны литология грунтов, топография поверхности и устойчивость склонов, сейсмические и тектонические условия, глубина залегания грунтовых вод и возможность развития подтопления (El May et al., 2010). Список примеров таких исследований можно продолжать.

Один из ключевых вопросов специального картографирования заключается в выделении геологических данных, которые должны учитываться при планировании городского развития. Р. Хак считает, что

важность представляют все сведения о трехмерном геологическом пространстве городов: геологические границы, тектонические нарушения, данные о свойствах материалов (включая жидкости и газы), наличие уже существующих подземных и наземных инженерных сооружений, исторические и археологические сведения (археологические артефакты), а также данные о климате, растительном покрове, землепользовании (Hack, 2009). По мнению Б. Маркера, для обеспечения устойчивого развития городов на основе городского планирования с учетом экологических ограничений необходимо учитывать сведения о расположении прошлых и настоящих горных выработок, а также о местах будущих горных разработок; местонахождении ценных минералов и полезных ископаемых, которые должны исключаться из других видов использования территорий; охраняемых зонах ресурсов поверхностных и подземных вод; ценных сельскохозяйственных угодьях и землях, подверженных эрозии почв; районах с разными категориями грунтовых условий, влияющими на стоимость строительного освоения территорий; охраняемых природных территориях; территориях распространения опасных природных и техногенных процессов и расположении объектов, которые могут быть причиной таковых; расположении инженерных сооружений, которые могут быть источником загрязнения окружающей среды; местах расположения свалок, предприятий по переработке отходов и участков, пригодных для расположения таких предприятий в будущем (Marker, 2016).

При специальном картографировании городских территорий первостепенным является вопрос разработки методик комплексной оценки природных опасностей и учета многих факторов, накопленных в базах геологических данных городов. Работы многих исследователей посвящены организации ГИС городской среды с разным набором компонентов. Как было показано выше, геоинформационные технологии для изучения инженерно-геологических условий городов активно применяются с 1990-х годов. Методика инженерно-геологического картирования (типизации подземного пространства) урбанизированных территорий с учетом природных опасностей разрабатывалась в работах таких исследователей, как Э. де Мульдер, ван Рой и Стиф, М. Калшоу, С. Мейзина, Маршалко (Culshaw, M.G. and Price, S.J., 2011; Culshaw et al., 2009; Mulder, 1998; Meisina, 2008; Meisina, 2009; Rooy, 2001; Marschalko, 2012). Так, например,

итальянские исследователи разработали мультидисциплинарную методику инженерно-геологического картирования для городского проектирования и освоения подземного пространства городских территорий на примере района северной Италии с использованием данных о геологическом, геоморфологическом строении, гидрологических условиях, градостроительном развитии и историческом использовании данной территории (Meisina, C., 2008; 2009). Очень подробно методика инженерно-геологического картирования городской территории и типизация по благоприятности освоения городской среды с перечислением возможных геологических ограничений для развития города освещена в работах исследователей из ЮАР (Rooy, 2001), Чехии (Marschalko, 2012) и Туниса (El May et al., 2010).

Информация, которую необходимо учесть для построения карт опасностей, очень многообразна и включает в себя как пространственную, так и временную составляющие. Для построения карт и моделирования различных сценариев развития событий необходимо использовать данные дистанционного мониторинга в комбинации с ГИС-методами. Геологические данные характеризуются большой неопределенностью и с трудом поддаются строгому количественному учету. Тем не менее, переход от качественной оценки природных опасностей к их количественному ранжированию представляет собой основной тренд современных исследований (Van Western and Georgiadou, 2001).

Современное картографирование опасных природных процессов строится на использовании следующих методов: 1) исторического; 2) детерминистического; 3) статистического; 4) вероятностного; 5) экспертных оценок, а также мультикритериального комбинаторного метода автоматизированного комбинирования различных картируемых параметров (Dong et al., 2018; Richards, 2006; Thierry and Vinet, 2001).

Для оценки состояния природной среды урбанизированных территорий ее пригодности для хозяйственного освоения и оценки рисков часто привлекают математический аппарат системного подхода к сложным проблемам принятия решений. Ранжирование опасностей и определение вклада различных факторов в геоэкологическую ситуацию в настоящее время чаще всего осуществляется на основе *метода анализа иерархий* (analytic hierarchy process, АНР) – математического инстру-

мента, предложенного Т. Саати (Саати, 1993; Saaty, 2008), который уже более 30 лет широко применяется в самых различных областях деятельности человека. Метод анализа иерархий (Саати, 1993; Saaty, 2008) сводит комплексную многофакторную проблему к последовательности парных сравнений, которые выявляют вклад разных факторов и их веса, а затем синтезируются в матрицу взаимодействия. Широкое применение метода обеспечивается простотой интегрирования разнородных данных. Этот многоцелевой и многоуровневый метод принятия решений широко и успешно применяется за рубежом для геоэкологической оценки пригодности городских территорий для застройки и выявления ограничений к их использованию (Thierry and Vinet, 2001; Tsangaratos, 2014; Zhang, 2006; Rodriguez et al., 2020). Сложность принятия решения по оценке природной среды урбанизированной территории обусловлена, в первую очередь, междисциплинарностью задачи, т.е. значительным количеством социальных, экономических и технических данных и сведений об окружающей среде, которые необходимо учитывать. Поэтому во многих исследованиях используются различные вариации метода многокритериального анализа, которые позволяют выработать компромиссное и объективное решение с учетом множества часто противоречивых факторов и интересов различных участников (Юганова, 2019). Метод анализа иерархий с помощью доступного программного обеспечения позволяет сопоставить важность различных критериев оценки участков для лица, принимающего решение, выполнить анализ чувствительности приоритетов и ранжировать городские территории на основе выбранных критериев и экспертной оценки. Более сложный метод анализа сетей (analytic network process, ANP) (Saaty, 2001) применяется при наличии дополнительных связей между критериями и/или альтернативами. Они позволяют структурировать задачу на достаточно автономные блоки (критерии, подкритерии, факторы) и оценить их по отдельности (возможно, разными специалистами), сопоставить по важности для лиц, принимающих решения, или критерия более высокого уровня, затем добавить в модель возможные взаимосвязи блоков и, наконец, рассчитать приоритеты альтернатив решения с помощью доступного программного обеспечения. Оно также дает возможность провести анализ чувствительности результата к субъективным оценкам важности критериев (Юганова, 2019).

Неопределенность исходной информации, необходимость использования экспертных оценок принятия решения вынуждают обращаться к математическим методам распознавания образов на основе нечеткой логики (fuzzy pattern recognition). Задачи, решаемые с помощью методов нечеткой логики с привлечением экспертных систем, характеризуются невозможностью строгого алгоритмического решения; противоречивостью, неполнотой, возможной ошибочностью исходных данных; огромной размерностью и динамически меняющимся составом данных (в силу постоянного их пополнения, изменения и развития); необходимостью широкого использования в процессе решений эвристических и эмпирических процедур, сформулированных экспертами; необходимостью участия в процессе решения человека (пользователя), который путем ответа на дополнительно задаваемые вопросы привносит дополнительную информацию и выбирает альтернативные пути принятия решения. Решение задач распознавания образов, основанных на нечеткой логике, позволяет оптимальным образом сочетать детерминированный и эвристический подходы (Леоненков, 2003; Lotfi, 2001). Нечеткий АНР (fuzzy АНР) позволяет лучше представить плохо определенную и содержащую помехи «зашумленную» информацию, размытые границы. Этот количественный метод, активно применяемый в самых разных областях, в последние годы все чаще используется для планирования городского развития и оценки состояния городской среды на основе ГИС. Так, например, подобная оценка геологической среды была проведена для г. Пекина (Dong et al., 2018). Алгоритм, разработанный этим автором, включает 6 основных шагов: (1) выбор влияющих факторов и установление их иерархических взаимосвязей; (2) вычисление веса каждого фактора с помощью аппарата АНР; (3) построение трехмерных геологических и геотехнических моделей; (4) оцифровка исходных данных о влияющих факторах, их перевод в растровую форму и нормализация к интервалу [0,1]; (5) вывод расчетной модели для оценки геологической среды на основе метода нечеткого распознавания образов; (6) построение карты зонирования территории для целей городского планирования (Dong et al., 2018).

Необходимо отметить, что, по свидетельству Дж. Лоллино, на сегодняшний день существуют различные методики оценки опасных природных процессов для целей городского планирования, связанные с

использованием ГИС и полуавтоматизированных технологий (Lollino, 2015). Помимо традиционных эвристических и статистических подходов появляются новые методы, основанные на множественных аспектах системного анализа и искусственном интеллекте. Тем не менее, чем более удобнее в использовании становится система, тем дальше она уводит пользователя от контроля за исходными данными и сходимостью результатов. Как в любом системном анализе, конечные результаты сильно зависят от сложности входных данных – их плотности и распределения, точности измерения параметров, применения архивных данных, климатических характеристик, антропогенного воздействия и т.д. Обобщение опыта использования всех методик позволяет правильно оценивать опасности, создавать более эффективные методики, учитывающие контекст, параметры исходных данных и их сложность (Lollino, 2015).

2.4. Разработка методик оценки уязвимости и геологического риска городской среды

Наиболее актуальной проблемой для обеспечения устойчивого развития городов является разработка методики и процедуры оценки рисков опасных геологических процессов. Многочисленные исследования в области наук о Земле, техники и социальных наук внесли свой вклад в современное понимание опасности, уязвимости и управления рисками. Однако эти исследования основаны на различных теоретических подходах и определениях опасности, уязвимости, риска и бедствий (см. главу 1). Как указано в работе S. Cutter (Cutter, 2001): *«Различие между опасностью, риском и катастрофой важно, поскольку оно иллюстрирует разнообразие взглядов на то, как мы признаем и оцениваем угрозы (риски), что мы делаем с ними (опасности) и как мы реагируем на них после того, как они происходят (катастрофы)»*. К сожалению, в зарубежной научной литературе термин «геологический риск» часто ошибочно употребляется как синоним термину «геологическая опасность» (Hobbs et al., 2008; Rauh et al., 2008; Richards, 2006; Thierry and Vinet, 2001). В последние годы понятийная и терминологическая база

риск-анализа активно развивается, что позволяет существенно сблизить позиции ученых в разных странах в понимании природных опасностей, уязвимости и управления риском (Gencser, 2013). Определения понятий «опасность», «уязвимость» и «риск» даны в документах, подготовленных Секретариатом Международной стратегии снижения опасности природных бедствий ООН (UNISDR 2009; 2010; 2015). Эти понятия формулируются также в ряде фундаментальных зарубежных научных трудов (Gencser, 2013; Cutter, 2001; Gu, 2015; Pusch, 2004). Кроме понятия уязвимости (vulnerability), за рубежом часто используется термин «подверженность» (exposure) (Gencser, 2013; Gu D., 2019). В этом случае оценка последствий от различных опасных процессов предполагает использование трех компонент: природная опасность, подверженность и уязвимость. При этом показатель опасности характеризует вероятность проявления опасного процесса в пространстве и времени, показатель подверженности описывает количество и ценность объектов, попадающих в зону потенциального воздействия, а показатель уязвимости характеризует тяжесть последствий для подверженных объектов в случае возникновения опасного процесса (Кулыгин В.В., 2017). В некоторых трудах для оценки состояния природной среды наряду с понятием «уязвимость» используется термин «хрупкость» (ecological frailty) (Guan et al., 2008).

В иностранной литературе теория количественной оценки геологического риска для городов развивается в работах Генсера, Дж. Нилла, Б. Калснаса, С. Мора, С. Клайтона и др. (Gencser, 2013; Clayton, 2001; Kalsnes, 2010; Knill, 2003; Mora, 2010). Так, известным английским ученым инженером-геологом Джоном Ниллом (J. Knill) риск понимается как функция вероятности проявления опасности для данного инженерного объекта. Последствие (ущерб) реализации этой опасности есть продукт природы опасного процесса и уязвимости системы, на которую оказывается воздействие (Knill, 2003). Этот подход вполне соответствует теории геологического риска, который развивается в нашей стране и был подробно описан выше, в главе 1 (Рагозин, 1999; Ragozin and Yolkin, 2006). Дж. Нилл отмечает, что количественная оценка риска – задача вполне решаемая для отдельных природных процессов, однако при оценке интегрального риска от нескольких

опасностей уровень неопределенности существенно возрастает. По мнению этого ученого, на ранних стадиях инженерных изысканий трудно оценить, какой именно фактор будет являться источником риска для сооружения. На ранней стадии проектирования количественная оценка геологического риска затруднена. Задача инженерной геологии на этом этапе состоит в минимизации риска для сооружений путем его качественной сравнительной оценки (Knill, 2003). Предлагается составлять каталог геологических неопределенностей на основе суммирования разного рода геоданных, в том числе сведений о выявленных геологических опасностях, геоморфологических условиях, типах грунтовых условий и специфических грунтах, изменчивых и сложных грунтовых условиях, местах с недостоверной информацией и труднодоступных местах. По мере разработки инженерного проекта такой перечень геологических неопределенностей замещается реестром геотехнического риска (Clayton, 2001; 2009).

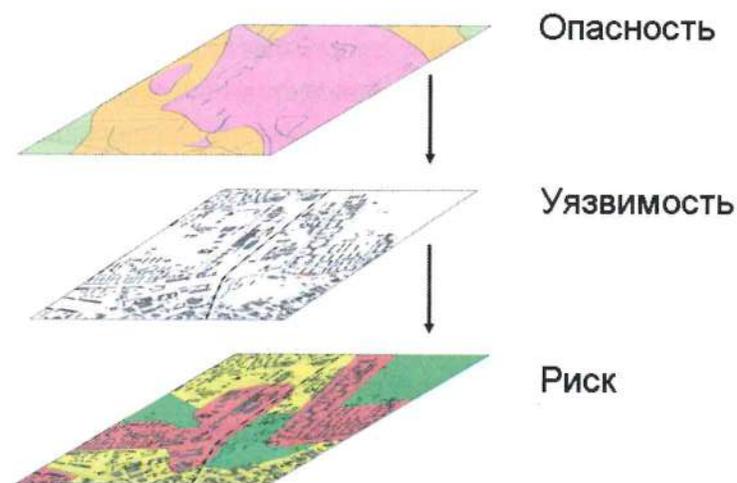


Рис. 2.7. Совмещение карт опасности с картами уязвимости при оценке риска (Осипов, 2017)

Для перехода от оценки геологических опасностей к оценке геологического риска в городах необходимо учитывать **фактор уязвимости** городской среды к воздействию рассматриваемых опасных природных

процессов. Практически все исследователи для оценки геологического риска на территории городов идут по пути совмещения карт опасных природных процессов с картами уязвимости городской среды (рис. 2.7). Предлагаются различные подходы к оценке уязвимости объектов городской инфраструктуры.

Одним из направлений является моделирование уязвимости с использованием кривых уязвимости в ГИС. С целью определения уязвимости реципиентов риска во многих странах нашло распространение т.н. имитационное математическое моделирование. Имитационной моделью называют специальный программный комплекс, который позволяет моделировать природный процесс и его воздействие на исследуемый объект. Для создания имитационной модели необходимо специальное программное обеспечение, называемое системой моделирования (simulation models). Специфика такой системы определяется технологией работы набором языковых средств, сервисных программ и приемов моделирования. Имитационная модель должна отражать большое число параметров, логику и особенности поведения моделируемого объекта как во времени, так и в пространстве (временная и пространственная динамика). Результатом имитационного моделирования является построение кривых уязвимости для объекта (Quan Luna B, 2011). Авторы подчеркивают, что для перехода к количественной оценке потерь необходимо взаимодействие со специалистами в области экономики (Van Western and Georgiadou, 2001).

C.J. van Western и P.Y. Georgiadou полагают, что оценка уязвимости на количественном уровне возможна путем проведения инвентаризации элементов риска (населения, зданий и сооружений, городской инфраструктуры, транспорта, экономических объектов) и оценки возможного ущерба, который может быть им причинен при проявлении опасности (Van Western and Georgiadou, 2001). По мнению этих исследователей, особое внимание должно быть уделено ускоренной инвентаризации элементов риска в густонаселенных районах с использованием аэрофото-снимков высокого разрешения на основе кадастровых баз данных.

Представитель Всемирного банка С. Мора предлагает оценивать уязвимость объектов (реципиентов) риска через инвентаризацию фондов, подверженных природным опасностям. При этом существует понимание того, что такую оценку стоимости можно сделать лишь приблизительно.

Всемирным банком создана база данных, подразделяющая городские объекты риска по категориям и функциональному назначению (Mora, 2010). Итальянские исследователи предлагают оценивать уязвимость (состояние) городской застройки к различным видам геологических опасностей по данным натурного обследования с использованием аэрокосмических снимков (Marchiori-Fariaetal., 2009). При оценке риска от просадок грунтов в Сан-Паоло исследователями из Бразилии качественная оценка уязвимости зданий производилась исходя из стоимости восстановительных работ. В результате проведенного исследования геологический риск был качественно ранжирован на три категории (высокий, средний, низкий) (De Oliveira, 2006). Китайские исследователи (Zhang et al., 2006) оценивали риск для городской застройки г. Нанкин от воздействия таких опасных геологических процессов, как оползни, береговая эрозия, просадка грунтов и оседания поверхности. Уязвимость городской среды оценивалась ими на основе функционального зонирования с выделением 4 типов зон городской среды в зависимости от их функционального назначения: зоны промышленной, торговой и жилой застройки, складские и парковые территории. Учет ограничений, накладываемых геологическими условиями, и оценка применимости городской территории для застройки производилась по вышеописанному методу анализа иерархий Саати (Саати, 1993; Saaty, 2008; Zhang et al., 2006). Аналогичный подход, основанный на использовании математического инструмента принятия решений для ранжирования территорий, был применен японскими исследователями при оценке уязвимости природной среды к антропогенному воздействию в карстовых районах (Guan et al., 2008). Такой подход, который можно считать полуколичественным, согласуется, например, с методом типологического зонирования геологической среды для освоения подземного пространства городов для Москвы для оценки стоимости, который разрабатывался в нашей стране Г.Л. Коффом и подробно описан в главе 6 данной монографии (Кофф, 2006). Близкий подход применялся для оценки уязвимости городской среды городов Алжира путем совмещения карт природных опасностей с картами объектов городской инфраструктуры (Mimouni, 2008).

Определенный интерес представляет метод оценки уязвимости городской среды к природным опасностям, который предлагается Р. Блон-

гом, исходя из возможного ущерба (Blong, 2003). Автором метода предлагается выражать ущерб через так называемый «дом-эквивалент», который рассчитывается как произведение коэффициента замены и среднего уровня ущерба. Автором разработана шкала ущерба от различных природных катастроф, основанная на индексе ущерба сооружениям относительно среднего дома в Австралии. Шкала построена так, что ущерб в разных точках от разных событий и/или от нескольких природных катастроф можно сравнить и суммировать. При этом на шкалу практически не влияет инфляция, поэтому можно сравнить влияние на сооружения событий, произошедшие в различные годы.

Определенный опыт оценки уязвимости накоплен в страховых и перестраховочных компаниях, которые не разглашают свои методы из коммерческих интересов (Van Western and Georgiadou, 2001). На некоммерческом уровне методология оценки уязвимости городской инфраструктуры лучше всего разработана для сейсмического риска. Под эгидой Секретариата Международного десятилетия по снижению природных опасностей ООН (IDNDR 1990-2000) был выполнен ряд международных программ, направленных на разработку методологий оценки уязвимости и риска от геологических опасностей городских территорий (например, программы RADIUS, HAZUS, AGSO) (Van Western and Georgiadou, 2001).

В последние годы разными учеными разрабатываются геоинформационные модели интегральной оценки рисков опасных природных явлений, основанные на вероятностном подходе – использовании байесовских сетей. Совместное использование байесовских сетей и геоинформационной системы обеспечивает моделирование многочисленных разнородных факторов, необходимых для анализа рисков опасных явлений, их причинно-следственных связей в пространственно-явной форме. Так, в России подобные исследования выполнены В.В. Кулыгиным для региона морехозяйственной деятельности (Кулыгин, 2017).

В ряде исследований предпринимаются попытки привлечения математического аппарата нечеткой логики для оценки устойчивости и адаптивности геологической среды к городскому хозяйственному освоению на основе трехмерного моделирования (Dong et al., 2018). Однако сами авторы приходят к заключению, что такую оценку нельзя

считать строго количественной, так как определенные этапы процедуры подразумевают использование качественных, описательных экспертных оценок.

Исходя из изложенного, можно заключить, что, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в оценке природных рисков урбанизированных территорий в последние десятилетия, проблему количественной оценки геологического риска городской среды нельзя считать решенной нигде в мире. Необходимо дальнейшее совершенствование методологии и перевода процедуры оценки рисков на количественный уровень.

Глава 3. Оценка опасности и риска оползней

Зачастую в пределах береговых территорий, а также вблизи склонов размещаются важные инфраструктурные объекты (автомобильные, железнодорожные и метромосты), спортивные сооружения (трамплины, горнолыжные сооружения и пр.), значимые здания и объекты культурного наследия (церкви, памятники, здания научных институтов, жилые комплексы, культурные центры и др.). Через склоны прокладываются коллекторы различного назначения (канализационные, кабельные и др.), их пересекают линии метро, автомобильные мосты и тоннели.

В России воздействию оползней подвержено более 700 городов. Среди них такие крупные города, как Москва, Нижний Новгород, Казань, Ульяновск, Волгоград, Чебоксары, Саратов, Саранск, Пермь, Сочи, Ростов-на-Дону, Томск, Барнаул. Оползневые цирки достигают внушительных размеров (4500x350 м, с глубиной захвата 100 м и более – Воробьёвы горы, Москва).

Оползневые процессы ежегодно наносят территории России огромный экономический, социальный и экологический ущерб. Значительная часть городской территории зачастую находится в условиях развития оползневых процессов с возможностью проявления разрушительных оползневых смещений, возникновение которых нередко происходит внезапно.

В последнее десятилетие в Москве и ряде других мегаполисов страны активно реализуются программы интенсивного строительства инженерных сооружений различного назначения. При этом с особой остротой стоит задача обеспечения сохранности различных объектов городской инфраструктуры, попадающих в зону строительных работ, особенно если эти работы ведутся в условиях опасных геологических процессов.

Иррациональный подход к использованию склоновой территории и недоучет особенностей механизма развития оползней приводит к деформированию и разрушению инженерных сооружений, либо к значительным затратам на реализацию противооползневых мероприятий.

3.1. Типизация оползней по механизму

При оценке оползневой опасности территории наибольшее значение имеет типизация существующих оползней, а также выявление вероятных сценариев потери устойчивости исследуемого склона.

Разработано множество классификаций оползней, в основе каждой из которых лежит один какой-либо признак: механизм; форма в плане; площадь оползня; объем оползня; возраст оползня; глубина захвата склона; приуроченность к геологической формации, свите и т.д.

Наиболее распространены классификации по механизму оползневого процесса (Гулакян, 1970; Петров, 1987; Демин, 2009; Емельянова, 1972; и др.). Однако за основу чаще всего берут механизм движения оползневых масс (оседание, выдавливание, срезание, скольжение, течение, сброс), оставляя в тени механизм формирования (подготовки, нарушения равновесия грунтового массива и отделения тела оползня).

Это нередко затрудняет процесс распознавания типа оползня по признакам проявления, поскольку на промежуточном этапе развития различные оползни имеют сходный механизм движения – смещение тела оползня по образованной поверхности скольжения.

За рубежом, например, принято использовать классификацию типов оползней, предложенную Круденем и Варнсом (1996) (Hungr, 2014). Однако данная классификация не учитывает механизм формирования оползня. В связи с вышеизложенным целесообразно в типизации оползней учитывать преобладающее силовое воздействие и характер деформирования грунтового массива в подготовительную стадию оползневого процесса, которая в значительной степени определяет механизм формирования и развития оползня. По этим признакам известное множество оползней по **механизму их формирования** подразделяется на три основных типа (Оползни и сели, 1984).

Первый тип – *блоковые относительно глубокие оползни сжатия-выдавливания*. Нарушение равновесия массива и деформирование при формировании оползня происходят по схеме сжатия. Под сжимающим вертикальным давлением от веса покрывающих пластов деформируется (раздавливается) горизонт, структурная прочность σ_{str} грунтов которого меньше указанного бытового давления. Вследствие деформирования

грунтов раздавливаемого горизонта в сторону склона происходят проседание и прогиб вышележащего массива с формированием в зоне изгиба сначала концентрации растягивающих напряжений, а затем – трещины закола (опущенной трещины растяжения). Далее по этой трещине отделяется и оседает по крутой криволинейной поверхности скольжения оползневой блок. Поверхность скольжения ниже по склону выполаживается и может быть близкой к горизонтальной. Под давлением нового блока происходит смещение ранее отделившихся блоков, расположенных ниже по склону.

Наибольшее распространение имеют блоковые оползни сжатия, поверхности скольжения которых формируются в глинистых грунтах. Они поражают берега рек, морей, озер, образуются на откосах выемок, насыпей, на бортах карьеров (рис. 3.1). Оползни в полускальных и скальных грунтах менее известны. Они встречаются в горных и предгорных регионах. Для них характерно медленное развитие деформации в стадию подготовки смещения продолжительностью до нескольких сотен лет.

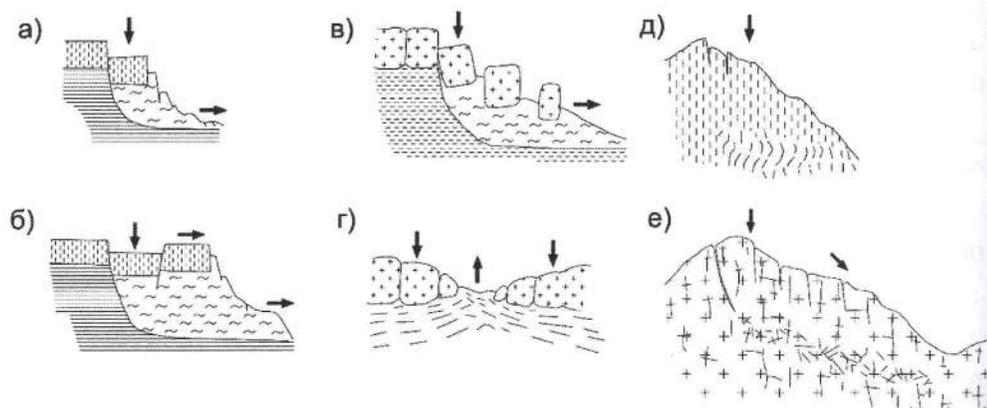


Рис. 3.1. Схемы оползневых деформаций по механизму сжатия:
а, б – оползень сжатия в глинистых грунтах; *в* – оседание и расползание блоков полускальных и скальных пород; *г* – выпор дна долины; *д* – гравитационные складки: глубинная ползучесть с S-образным изгибом пластов; *е* – гравитационные деформации хребтов

Однако нередко этап образования нового блока с деформированием массива по схеме сжатия не анализируется при изучении механизма оползня, и оседание блока по крутой криволинейной поверхности сколь-

жения ошибочно представляют как процесс срезания с отнесением оползня к типу сдвига-скольжения.

При распознавании данного типа отмечается фронтальность как для образуемых блоков, так и для цирка (участка), сформированного глубокими блоковыми оползнями. Рельеф, как правило, ступенчатый, отражающий блоковое строение оползневого массива. Ступенчатый характер оползневого участка может быть слабо выражен в рельефе при завершении оползневого цикла, когда верхний блок и тем более расположенные ниже по склону в результате длительных перемещений достигают самого низкого положения, образуя выровненную почти горизонтальную оползневую террасу.

Характерны основные протяженные непрерывные трещины при активном смещении глубоких оползневых блоков. Трещины, как правило, проходят сверху, по контакту оползневого тела с коренным массивом и по границам между оползневыми блоками, а также по контуру образуемых валов сжатия (выдавливания) перед блоками и в нижней части склона.

Стенка срыва крутая, наиболее высокая в центральной части верхнего блока (цирка). Поверхность скольжения при отделении оползневого блока от коренного массива – крутая, криволинейная, близкая к круглоцилиндрическому очертанию. В нижней части она выполаживается и соединяется с почти горизонтальной поверхностью скольжения ранее сместившихся оползневых блоков, составляющих тело оползня в существующем оползневом цирке.

Блоковые оползни сжатия-выдавливания практически могут образоваться в любых породах, если в массиве возникает условие:

$$\gamma h > \sigma_{str}, \quad (3.1)$$

где γ – удельный вес пород вышележащих слоев; h – глубина заложения потенциально деформируемого слоя и σ_{str} – структурная прочность пород этого слоя $\sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg}(45 + \varphi / 2)$.

Смещение тела оползня происходит вследствие давления верхних блоков, поэтому в районе базиса оползня образуется вал сжатия, выпора. Особенно четко этот морфоэлемент проявляется в стадию основного смещения, когда от плато отделяется новый оползневой блок. При этом в нижней части склона образуется упомянутый вал, который у прибрежных оползней с поверхностью скольжения оползня, выходящей в подводную часть склона,

нередко выглядит в виде острова. Характерные валы (гряды) могут иметь место и перед каждым оползневым блоком, составляющим тело оползня.

Второй тип – *оползни сдвига-скольжения*. В допредельном состоянии (на этапе формирования оползня) происходит концентрация в соответствующих зонах грунтового массива касательных сдвиговых напряжений: подготовка сдвигов грунта на крутых участках склона при формировании угла естественного откоса; ползучесть выветрелых приповерхностных склоновых отложений (покровные оползни) с перемещением по схеме бесконечного откоса, сдвиг по predeterminedенной геологическим строением зоне ослабления (по контакту с кровлей более прочных пород, по плоскости напластования). Деформирование склона (откоса) происходит в виде прогрессирующего сдвига с падением сопротивления по мере деформирования, снижением прочности от пикового значения до остаточного и постепенным формированием поверхности (плоскости) скольжения. На крутых уступах сдвиг (скольжение) оползающей части массива происходит, как правило, по криволинейной поверхности скольжения, выходящей к подошве уступа или выше ее (рис. 3.2, а). Таким образом, формируется профиль равнопрочного или равноустойчивого откоса со смещением (нередко обрушением) разупрочненных грунтов.

Поверхность скольжения может быть приурочена к наклонным геологическим границам между слоями (рис. 3.2, б). При этом могут сдвигаться значительные пачки горных пород. Схема сдвига по ломаным плоским поверхностям скольжения характерна для оползания делювиально-элювиальных склоновых накоплений по наклонной кровле коренных пород (рис. 3.2, в). Частой формой оползневых проявлений является сдвиг (спływ) почвенно-растительного покрова (рис. 3.2, г), выявляющийся по серии относительно коротких оползневых трещин. Медленная ползучесть приповерхностного слоя в виде сдвига может наблюдаться на относительно устойчивых склонах с крутым падением пластов прочных пород (рис. 3.2, д).

Как указывалось выше, преобладающий силовой фактор – сдвигающие силы по наклонной границе (поверхности сдвига). Границы проявления могут быть в виде очага, потока или неопределенного очертания при медленной ползучести покровных слоев. Рельеф чаще бугристый, реже – ступенчатый при мощности оползневого тела 10 м и более. Трещины, образуемые по контуру проявления, как правило, непротяженные, серпообразные,

прерывистые, более четкие по бортовым границам (для потокообразных проявлений). Стенка срыва оползня чаще пологая, нередко с обнажением пологой верхней части донного ложа со штриховыми следами скольжения.

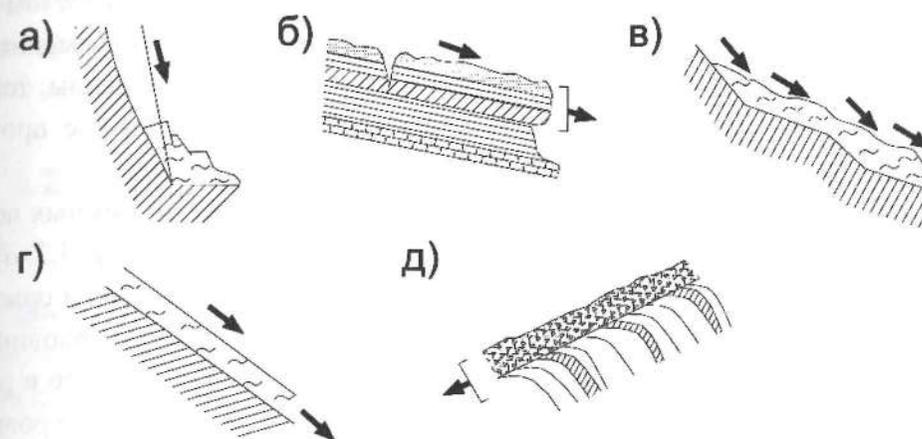


Рис. 3.2. Схемы оползневых деформаций по механизму сдвига: а) сдвиг-срезание; б) сдвиг по напластованию; в) сдвиг-скольжение покровных масс; г) сдвиг (спływ) почвенно-растительного слоя; д) изгиб голов круто падающих пластов

Поверхность тела оползня, как и поверхность скольжения, обычно наклонная. Для оползней срезания (выравнивание крутых уступов) она может иметь криволинейный характер. В нижней части оползневого склона образуется в зоне разгрузки вал перемятого сползшего грунта.

Третий тип – *оползни разжижения-течения*. Нарушение равновесия склоновых массивов в виде разжижения происходит вследствие преобладающего силового воздействия подземных (грунтовых) вод. Основной механизм разжижения, рассматриваемый в механике грунтов как фильтрационное деформирование грунта, – это увеличение порового давления (давления воды в порах грунта) и, как следствие, уменьшение эффективных напряжений. В водонасыщенном грунтовом массиве поровая вода в той или иной степени может оказывать на минеральный скелет грунта гидростатическое взвешивание и фильтрационное давление разной направленности, вызываемые фильтрационными объемными силами. Интенсивность и направленность этих сил зависят от внешних воздействий: статической и динамической нагрузок на склон, скорости фильтрационных потоков и колебания уровня подземных вод, уровенно-

го режима в водоемах и поверхностных водотоках, интенсивности атмосферных осадков и т.д.

Данный механизм формирования оползней особенно характерен для дисперсных грунтов, обладающих слабым структурным скелетом и малой фильтрационной способностью. К ним относятся современные илы, водонасыщенные молодые глины и суглинки, пльвуны, почвы, торфы, а также глинистые грунты различного возраста, потерявшие прочность в результате разуплотнения, выветривания и гидратации.

В месте выхода (разгрузки) на поверхность склона подземных вод нередко образуется оползневой цирк с суженной горловиной (рис. 3.3, а).

Разжиженные грунтовые массы (продукт обрушения стенки срыва и бортов) в виде вязкопластического потока перемещаются из горловины на откос с образованием конуса выноса у подножия. Возникающее в результате сильных ливней, обильного таяния снега повышение уровня подземных вод и соответственно восходящие фильтрационные силы могут снизить внутреннее трение в грунте до нуля, а разуплотнение при малых нагрузках (поверхностные слои) – привести к потере связности между минеральными частицами. Разжижение песчано-глинистого грунта в таком случае может произойти даже при небольших уклонах поверхности (1:10 и менее) (рис. 3.3, б). Часто встречаются нарушения локальной устойчивости участка склона в местах избыточного увлажнения грунтов и деформирования в виде оплывин (рис. 3.3, в).

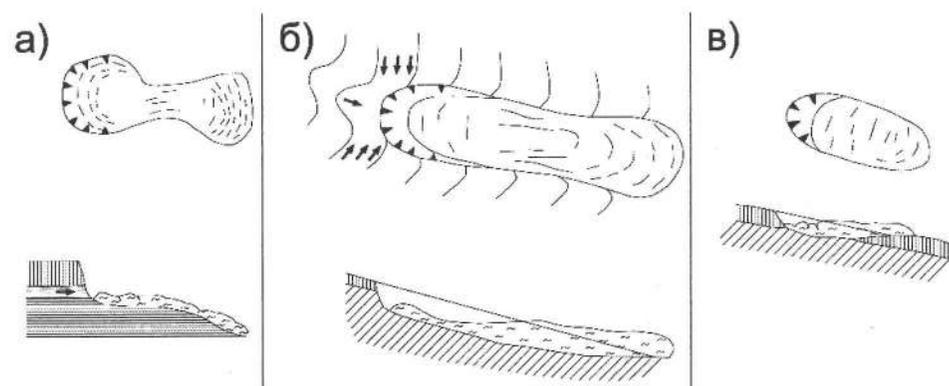


Рис. 3.3. Схемы оползневых деформаций по механизму разжижения (вверху – в плане; внизу – в разрезе):
а – оползневой цирк с узкой горловиной (разгрузка подземных вод);
б – оползень-поток; в – оплывина

В распознавании данного типа оползня в проявлении на склоне индицирующими признаками являются следы действия подземных вод: высачивание, западины, источники, временные и постоянные водотоки, эрозионные врезы, а также многочисленные трещины, мелкобугристый рельеф и т.д.

3.2. Оползневые процессы на территории Москвы

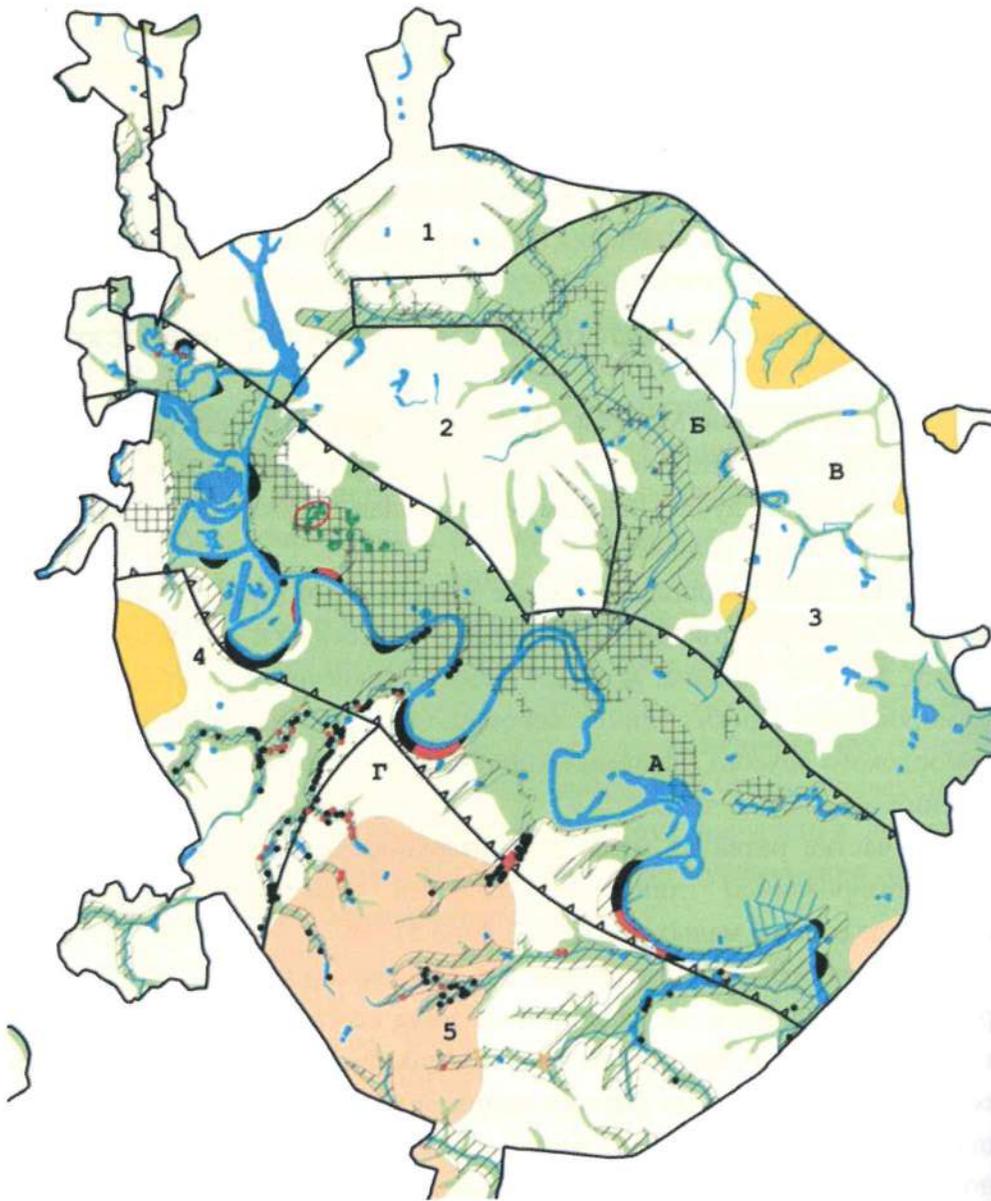
На территории Москвы имеется 15 крупных участков развития глубоких блоковых оползней. В последние годы происходит их активизация, в некоторых случаях напрямую связанная с инженерно-хозяйственной деятельностью человека.

Оползневые и оползнеопасные зоны на территории Москвы располагаются преимущественно вдоль берегов р. Москвы и ее притоков (реки Сходня, Сетунь, Раменка и др.). Глубокие оползни, обусловленные деформированием юрских глинистых отложений (титонского (волжского) и оксфордского ярусов), сформировали склон долины р. Москвы в зоне нарушений осадочного чехла.

Участки развития мелких и поверхностных оползней, связанные с деформированием глинистых разностей четвертичных отложений, осложняют склоны малых рек (рис. 3.4 и 3.5).

На прибрежной территории в г. Москве в долине р. Москвы и ее притоков выделяются оползнеопасные зоны не только в пределах выявленных оползневых цирков, но и на склонах, имеющих сходные геологическое строение, условия формирования, и на участках плато, прилегающих к оползневым склонам. Таким образом, по соседству с данными оползневыми цирками располагаются естественные склоны с коренным залеганием пород, на которых может возникнуть оползневая угроза, связанная со строительством сооружений различного назначения, в том числе подземных сооружений.

Оползни на территории Москвы по масштабам проявления подразделяются на два типа – глубокие, характеризующиеся площадью до 0,8–1,5 км² с глубиной захвата пород до 100 м, и поверхностные, мелкие – площадью до 0,002 км² с глубиной захвата пород преимущественно 1–5, реже 10–15 м.



Условные обозначения:

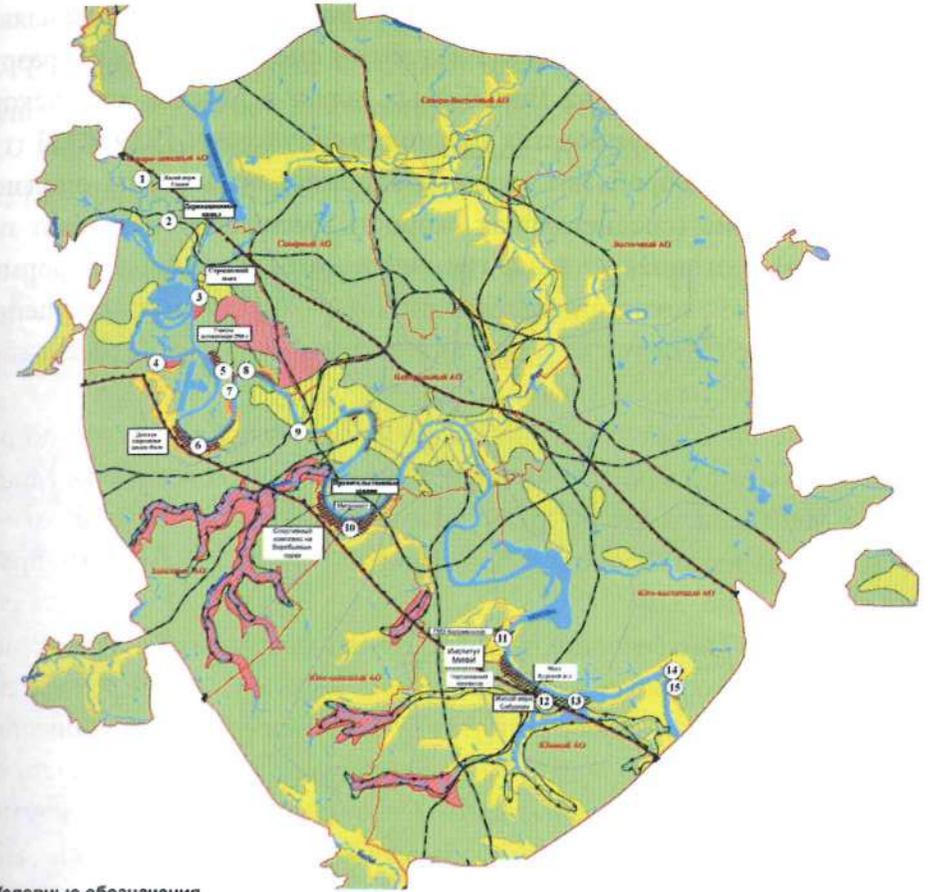
I II III IV

V VI

VII VIII IX

X

Рис. 3.4. Схема распространения и активности оползневых и карстовых процессов (по данным ФГУП «Геоцентр-Москва», 2005 г.)



Условные обозначения

Районы по опасности проявления оползневых и карстово-суффозионных процессов

Безопасные A-1 A-2 Потенциально опасные B-1 B-2 B-3 Опасные B-1 B-2 B-3 B-4

Рис. 3.5. Карта-схема карстовой и оползневой опасности на территории Москвы (по данным ФГУП «Геоцентр-Москва», 2005 г.)

Геоморфологические условия: I – структурно-денудационный рельеф; II – грядово-холмистый рельеф; III – полого-волнистый рельеф основной морены; IV – эрозионно-денудационный рельеф, области унаследованного развития речных долин. Площадные неотектонические структуры: А – Москворецкая зона структурного раздела; Б – Люберецко-Егорьевский макроблок; 1 – Химкинский блок; 2 – Неглинский блок; 3 – Измайловский блок; Г – Московско-Коломенский макроблок; 4 – Кунцевский блок; 5 – Теплостанский блок. Линейные неотектонические структуры: V – зоны нарушения осадочного чехла; VI – линеаменты. Проявления экзогенных геологических процессов: VII – участки развития глубоких оползней: а – активных; б – неактивных; VIII – участки возможного развития мелких оползней (склоны резных долин); IX – поверхностные и мелкие оползни: а – активные; б – в стадии временной стабилизации; в – старые задернованные, спланированные; X – участки возможного проявления карстово-суффозионных процессов на поверхности (юрские отложения отсутствуют).

Основную угрозу для городской инфраструктуры представляют глубокие блоковые оползни. Так, оползневыми смещениями была разрушена эскалаторная галерея на Воробьёвых горах в Москве уже вскоре после завершения ее строительства (период эксплуатации 1959–1983 гг.), метромост станции «Воробьёвы горы» продолжает испытывать оползневое деформирование (среднегодовая скорость смещений составляет порядка 5 мм/год), разгонная эстакада горнолыжного спуска была деформирована вследствие техногенной активизации оползневых смещений (в 2007 г., рис. 3.6), что также привело к закрытию канатно-кресельного подъемника и горнолыжного склона.

Развитие оползневых смещений также приводит к изменению русел рек и линии фарватера, что имеет место на оползневом участке Москворечье в Москве, где русло реки вследствие нерациональной хозяйственной деятельности, приводящей к развитию оползней, сузилось практически в 2 раза (рис. 3.7).

Условия и интенсивность проявления оползневых и карстово-суффозионных процессов: А-1 – Водоразделы и склоны долин рек крутизной $< 5^\circ$. Оползневые явления отсутствуют. Безопасные: А-2 – Территории с мощностью юрских глин > 10 м. Поверхностные проявления карста отсутствуют. Потенциально опасные: Б-1 – Склоны долин малых рек крутизной более 5 градусов с единичными проявлениями мелких оползней. Б-2 – Склоны долин р. Москвы и р. Сходня крутизной $> 5^\circ$ и высотой > 9 м, в разрезе которых присутствуют юрские глинистые отложения. Явные признаки глубоких оползневых подвижек отсутствуют, отмечаются единичные проявления мелких оползней. Б-3 – Территории с мощностью юрских глин < 10 м, приуроченные к склонам доледниковых и доюрских долин. Поверхностные проявления карста отсутствуют. Опасные: В-1 – Склоны долин малых рек и оврагов крутизной $> 5^\circ$ с многочисленными, периодически активизирующимися мелкими оползнями. В-2 – Склоны долины р. Москвы, сформированные глубокими оползнями, с признаками активных глубоких подвижек и с единичными периодически активизирующимися мелкими оползнями. В-3 – Склоны долины р. Москвы, пораженные глубокими оползнями, активизация которых достигла значительных величин. В-4 – Территории с мощностью юрских глин < 10 м, приуроченные к склонам доледниковых и доюрских долин с поверхностными проявлениями карста.

Участки развития глубоких блоковых оползней: 1 – Сходня; 2 – Тушино; 3 – Щукино; 4 – Серебряный Бор; 5 – Хорошево-1; 6 – Фили-Кунцево; 7 – Нижние Мневники; 8 – Хорошево-2; 9 – Поклонная гора; 10 – Воробьёвы горы; 11 – Коломенское; 12 – Москворечье; 13 – Сабурово; 14 – Чагино; 15 – Капотня.



Рис. 3.6. Оползень на Воробьёвых горах (Москва, 2007 г., фото Г.П. Постоева)



Рис. 3.7. Оползневые деформации склона в Москворечье (Москва, 2009 г., фото А.И. Казеева)

В сентябре 2006 г. пришел в движение блоковый оползень на участке Хорошёво-1. Возникла реальная угроза устойчивости Храму Живоотворящей Троицы в Хорошёво (памятник XVI века) и жилым зданиям ТСЖ «Годуново». В результате катастрофической активизации оползневой процесс от плато, на котором находятся указанные выше сооружения, отделился массивный новый оползневой блок длиной более 220 м. При этом оседание блока составило около 3,5 м с вовлечением в смещение всего оползневой склона на протяжении 350 м берега по почти горизонтальной поверхности скольжения (рис. 3.8), установленной по данным мониторинга на глубине 31 м (от бровки плато) в оксфордских глинах юрской системы вблизи кровли слоя.



Рис. 3.8. Новая стенка срыва и поверхность смещенного блока (Москва, Хорошёво-1, 2006 г., фото А.И. Казеева)

На участке Коломенское в г. Москве в 1970-х годах активизация блокового оползня произошла после строительства канализационного коллектора диаметром 3,0 м. На склоне образовались протяженные трещины (до 500 м длиной). Подвижки захватили весь склон с разрывом коллектора в нескольких местах. Инструментальными наблюдениями (инклинометрические и тензометрические измерения изгибов стационарных труб в скважинах) установлено, что основная поверхность скольжения глубокого оползня находится на отметках 100,5–101,0 м, в то время как отметка уровня воды в реке Москве – 114,3 м (рис. 3.9). То есть базис оползания находится в черных глинах оксфордского яруса юрской систе-

мы, ниже базиса эрозии, что характерно для глубоких блоковых оползней в данном регионе (Постоев, 2001).

В конце 1980-х годов на участке Н. Мневники при активизации деформаций язык оползня наблюдался в русле реки на расстоянии порядка 30 м от берега. На такое же примерно расстояние от берега в русло реки распространялись деформации коллектора на участке Коломенское.

Основным природным фактором образования глубоких оползней является эрозионная деятельность рек в основании склонов. Так, например, боковая эрозия р. Москвы в 1955–1960 гг., когда весенний подъем уровня в реке составлял 2,0–2,5 м, вызывала отступление бровки берегового уступа до 0,3 м/год. В последующие годы непосредственные наблюдения за боковой эрозией прекратились в связи со строительством набережных. Но и весенние подъемы уровней в р. Москве уже не достигали таких размеров, а колебались в пределах 0,15–0,35 м. Однако производились периодические сбросы воды для прочистки дна реки, что вызывало подъем уровня на 1,60–2,65 м («Москва. Геология и город», 1997).

Вторая составляющая эрозионной деятельности р. Москвы – донная эрозия. Ее изучение в последние годы показало, что в условиях зарегулированности русла процесс миграции наносов приводит к периодически сменяющимся процессам обмеления и углубления прибрежной части русла перед оползневыми склонами (Тихвинский, 1988).

Глубокие оползни в Москве характеризуются стадийностью развития. Продолжительность полного оползневой цикла составляет 100–1000 лет, средняя продолжительность цикла по данным В.В. Кюнтцеля составляет 300 лет (Оползни и сели, 1984).

3.3. Механизм развития глубоких блоковых оползней

Глубокие оползни представляют основную опасность для городской инфраструктуры. Они имеют сложный механизм развития, обладают огромной массой, вызывая большие проблемы при осуществлении противооползневых мероприятий.

Оползневой цикл развития глубокого блокового оползня состоит из стадий подготовки и основного смещения. Стадия подготовки охватывает большую по времени часть оползневой цикла.

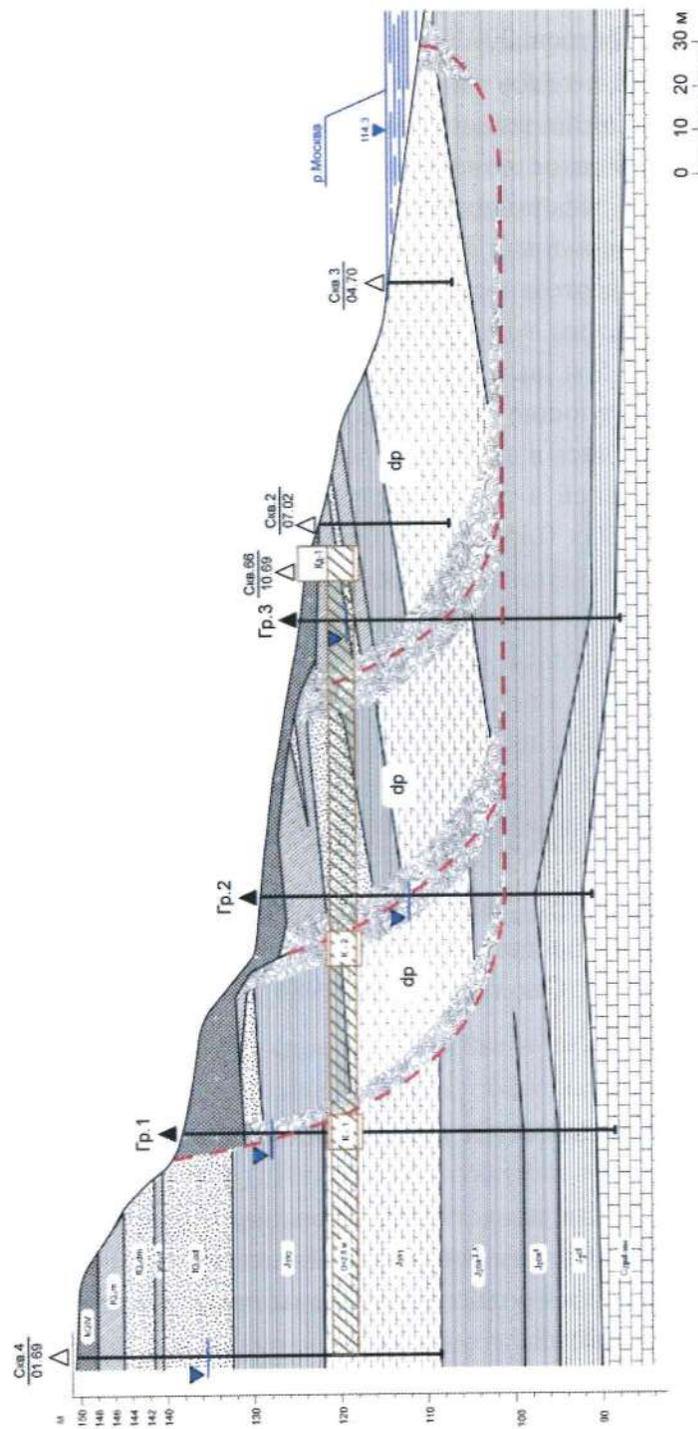


Рис. 3.9. Схематический геологический разрез оползневого склона на участке размещения глубинных реперов (Москва, Коломенское, 2005 г.)

Сначала смещения на склоне идут очень медленно. В этот период оползневые подвижки могут не проявляться на поверхности склона, и визуально заметных признаков активности может не отмечаться. Однако со временем скорости деформаций нарастают, и на поверхности склона появляются трещины, новая стенка срыва. На стадии основного смещения, в частности, в катастрофическую фазу (Оползни и сели, 1984), протекающую в течение короткого периода времени, происходит окончательное оформление границ нового оползневого блока, отделение его от плато и смещение вниз, что вызывает деформирование нижерасположенной части склона с возможным выходом языка оползня в реку.

В существующем оползневом цирке новый оползневой блок формируется в надоползневом уступе. Крутая криволинейная поверхность скольжения нового блока переходит в почти горизонтальную унаследованную поверхность сдвига ранее сместившихся блоков оползневого тела, слагающих оползневую террасу в нижней части склона.

В оползневой зоне формируются три области, различающиеся по характеру деформаций. Эти особенности присущи всем глубоким оползням Москвы (а также глубоким блоковым оползням сжатия-выдавливания в отличных инженерно-геологических условиях) и имеют большое значение при выборе типа и места размещения противооползневых мероприятий.

Первая зона (зона А, рис. 3.10) – область растяжения или опускания – занимает верхнюю часть оползневого склона и прибрежную часть плато. Она характеризуется постепенным отделением от коренного массива нового оползневого блока, опускающегося с запрокидыванием по сравнительно крутой трещине отрыва (растяжения). Величины вертикальных составляющих вектора смещений превышают значения горизонтальных составляющих и имеют, как правило, отрицательное значение. Здесь преобладают деформации растяжения. Типичны раскрытые, дугообразные трещины, обращенные вогнутостью в сторону движения, а также крутые оползневые рвы и грабены, образующиеся в результате клинообразного проседания отдельных частей отчлняющегося блока.

Вторая область (зона В), называемая областью перемещения (транзита), занимает большую часть склона, иногда до самого его подножья. Здесь горизонтальные составляющие векторов смещения заметно преоблада-

дают над вертикальными. В этой области развиты трещины различного типа, нередко оконтуривающие оползни второго и более высокого порядков.

Третья область (область сжатия и поднятия (зона С, рис. 3.10)) занимает полосу вдоль подножья склона и отдельные участки впереди нее. В ней заметно возрастают вертикальные составляющие векторов смещений, направленные вверх. Образование области сжатия связано с сопротивлением пород, не захваченных оползанием, движению оползающих масс.

Главной особенностью движения оползней данного типа является то, что тело оползня состоит из отдельных блоков, в разное время отделившихся от коренного массива. Каждый из блоков помимо поступательного перемещения по основной горизонтальной поверхности скольжения может испытывать вращательное движение с формированием перед блоком вала выпирания.

При каждом образовании оползня первого порядка от коренных пород отделяется только один блок, который смещается вместе со всеми расположенными ниже ранее отделившимися блоками. Таким образом, ближайший к коренному массиву наиболее высоко расположенный блок является наиболее молодым, а ближайший к реке – наиболее старым.

На участках с развитием глубоких оползневых подвижек в Москве происходят оползневые смещения, несмотря на большую продолжительность оползневого цикла для данных оползней и выполняемые противооползневые мероприятия, которые не являются достаточно эффективными. Об этом свидетельствует продолжающееся развитие деформаций на склонах участков Воробьевы горы, Фили-Кунцево, Коломенское, Хорошево-2, Москворечье и др.

Следует подчеркнуть, что существует опасность провоцирования активизации оползневого процесса с формированием и отделением от плато нового оползневого блока как в пределах оползневых цирков, так и на склонах, не затронутых глубокими подвижками. Величины оползневых смещений в катастрофическую фазу (основного смещения) в верхней части склона (оседание блока) составили 3 м или 0,14Н (Н – высота склона) для Хорошево-1 и соответственно 5 м или 0,17Н для Москворечья, определив разрушительный характер возможных деформаций на других оползневых участках города как для сооружений, находящихся в границах участка активизации, так и для коммуникаций, расположенных в смещающихся массивах.

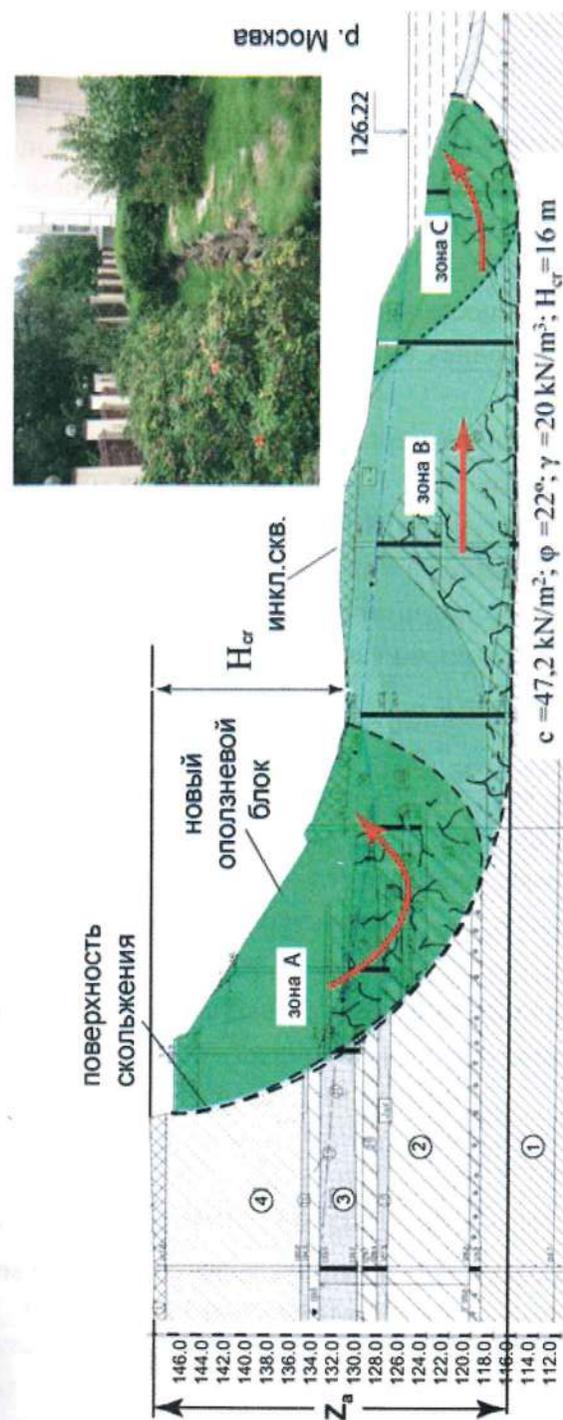


Рис. 3.10. Геологический разрез склона на участке активизации оползневых смещений в Хорошево-1:

1, 2 – соответственно глины окфордского и волжского (титонского) ярусов юрской системы;
3 – пески нижнемеловых отложений; 4 – пески четвертичных отложений; зона А – зона оседания блока и формирования зоны выпора-сжатия в головной части оползня; зона В – зона поступательного горизонтального смещения; зона С – зона выпора-сжатия в языке оползня; $H_{кр}$ – критическая высота надоползневой уступа; Z_a – глубина до поверхности скольжения ($Z_a=31,0$ м – по данным инклинометрии; $Z_a=31,8$ м – расчетным способом по формуле 3.3)

3.4. Предельное состояние массива надоползневого уступа и новый подход к расчету глубины поверхности скольжения

Развитие оползневой массы в виде глубоких блоковых подвижек затухает, когда образуется ровная оползневая терраса (рис. 3.10) при завершении оползневой массы.

При этом по оси оползневой массы (очага) высота стенки срыва достигает критического значения H_{cr} . В этот момент на оползневом склоне деформации временно отсутствуют, тело оползня неподвижно. Однако массив надоползневого уступа находится в предельном состоянии, которое для данного оползневой массы (при двумерной постановке задачи) может быть определено как:

$$Z_a - \frac{\sigma_{str}}{\gamma} = \frac{\pi}{2}(Z_a - H_{cr}), \quad (3.2)$$

где γ – средний удельный вес грунтов покрывающей толщи над потенциально деформирующимся горизонтом; Z_a – глубина до поверхности скольжения по оси оползневой массы; и H_{cr} – высота надоползневого уступа над оползневой террасой; σ_{str} – структурная прочность грунтов деформируемого горизонта $\sigma_{str} = 2c \cdot \text{tg}(45 + \varphi / 2)$.

Таким образом, глубина до поверхности скольжения может быть рассчитана следующим образом:

$$Z_a = \frac{\frac{\pi}{2} H_{cr} - \frac{\sigma_{str}}{\gamma}}{\frac{\pi}{2} - 1}. \quad (3.3)$$

При этом устойчивость массива надоползневого уступа (K_{st}) может быть оценена по степени приближения к критическому состоянию:

$$K_{st} = \frac{Z_a - H_f}{Z_a - H_{cr}}, \quad (3.4)$$

(см. обозначения к рисунку 3.11).

Переход от временно устойчивого предельного состояния к катастрофической активизации оползневой массы с образованием нового оползневой массы и разрушительными деформациями, охватывающими весь оползневой цирк, может произойти как в виде эволюционного изменения напряженно-деформированного состояния в оползневой массе, так и внезапно, вследствие аномального воздействия какого-либо фактора. Последний служит «спусковым крючком» (триггером) активизации оползневой массы.

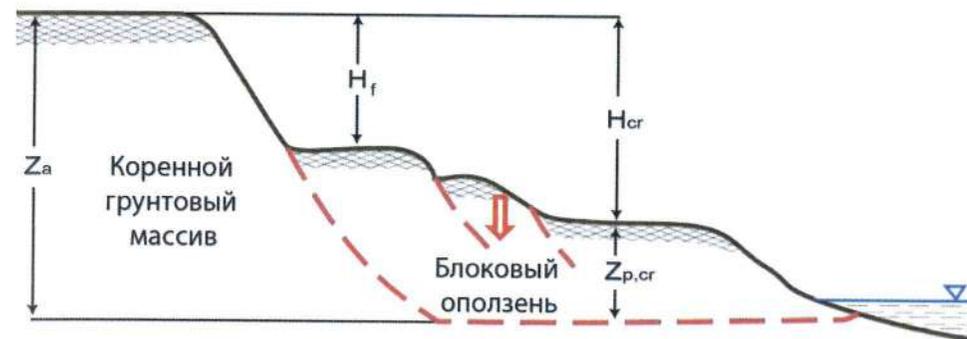


Рис. 3.11. Схема к расчету глубины поверхности скольжения (Z_a)

Таким образом, важнейшими задачами противооползневых мероприятий на участке развития глубоких блоковых оползней являются: своевременное выявление участков оползневой массы, состояние которых приближается к предельному; определение местоположения в разрезе массива поверхности скольжения, поступательного движения оползневой массы и разработка эффективных способов повышения устойчивости выявленных участков с предельным состоянием для предотвращения образования новых оползневой массы и развития разрушительных оползневой массы.

3.5. Оценка риска от развития оползневой массы

Выявление оползневой опасности и оценка риска (а главное, учет рекомендаций и выполнение необходимых мероприятий инженерной защиты) способствуют безопасному строительству и эксплуатации зданий и инженерных сооружений, а также природно-ландшафтных территорий. Принятие решений по необходимым мероприятиям при строительстве и

эксплуатации инженерных сооружений должно быть направлено на обеспечение эффективного хозяйствования с позиций минимизации материальных затрат и негативного влияния на окружающую природную и городскую среду, т.е. строительство сооружений должно быть адаптировано к эксплуатации в условиях проявления оползневых процессов.

Оползневые процессы, развивающиеся на склонах и откосах хозяйственно осваиваемых территорий, могут приводить к различным неблагоприятным последствиям, т.е. к возникновению прямого и косвенного ущерба. Ущерб выражается причиненным вредом жизни и здоровью людей, материальными убытками (Маций и др., 2015).

К настоящему времени известны различные предложения по оценке оползневой опасности (Маций, 2015; Fell, 2009; Постоев, 2003; и др.), выполнена разработка ряда отраслевых методических документов по оценке оползневой опасности для объектов автодорожной (ОДМ 218.2.030-2013, 2014) и железнодорожной (Методические указания по оценке рисков земляного полотна, 2018) инфраструктуры, ГОСТов и пр.

Целью анализа и оценки риска является получение необходимой информации для того, чтобы обеспечить безопасность функционирования конкретного объекта. В общем виде риск-анализ можно представить в виде двух этапов (рис. 3.12):

- оценка риска, то есть определение количественных показателей при различных сценариях развития неблагоприятных процессов и стратегиях защиты;

- управление риском, то есть выбор защитных мероприятий, снижающих риск до допустимого (приемлемого) уровня, и контроль эффективности принятых решений (посредством мониторинга).

Исследование оползневой опасности и риска на оползневой и оползнеопасной территории позволяет:

- изучить причинно-следственный механизм возникновения и развития оползневых процессов на рассматриваемой территории;

- выявить потенциальную оползневую опасность для проектируемых сооружений;

- провести сравнение оползневой опасности различных участков;

- установить приоритеты при строительстве защитных сооружений и оценить их эффективность;

- определить необходимый состав работ по содержанию и геотехническому мониторингу оползневых участков.

Выявление **факторов оползневой опасности** (рис. 3.12) заключается в идентификации, перечислении и описании всех характерных особенностей, условий и закономерностей развития оползневого процесса.

Оценка оползневой опасности и риска заключается в оценке вероятности возникновения оползневого события и возможных неблагоприятных последствий для имущества, населения, окружающей природной среды от его реализации.

Анализ оползневой опасности подразумевает характеристику оползневого процесса (классифицирование, выявление механизма оползня, размеров, скорости смещений, местоположения), а также определение частоты проявления процесса (величина годовой вероятности).

В свою очередь, анализ последствий (возможного ущерба) включает в себя выявление элементов (объектов) риска, их пространственно-временную вероятность захвата оползнем и уязвимость.

Выполнение оценки риска требует наличия статистических данных о частоте (случаев/год), вероятности проявления оползневых подвижек на конкретных площадях и неблагоприятных последствиях, что вызывает практические трудности. Во-первых, подразумевается «необходимость» наличия аварийных ситуаций. Во-вторых, проектно-изыскательские и эксплуатирующие организации такой информацией, как правило, не располагают – в процессе сбора материалов выявляются в лучшем случае сведения только о количестве оползней на исследуемой территории (Безуглова, 2014).

Для оценки возможности воздействия оползневого процесса на объект необходимо установить вероятность активизации оползня и вероятность возникновения неблагоприятных последствий, другими словами – выполнить анализ и оценку риска (Маций и др., 2015).

Анализ оползневой опасности включает в себя процедуры, связанные с определением масштабов исследования, оценкой оползневой опасности, анализом ожидаемого ущерба и непосредственно подсчетом величины риска. Характеристика оползневой опасности основывается на знании механизма оползневого процесса, влияния геоморфологических особенностей, геологического строения, гидрогеологических условий, оползневых трещин, климата и растительности, а также возможного влияния хозяйственной деятельности.

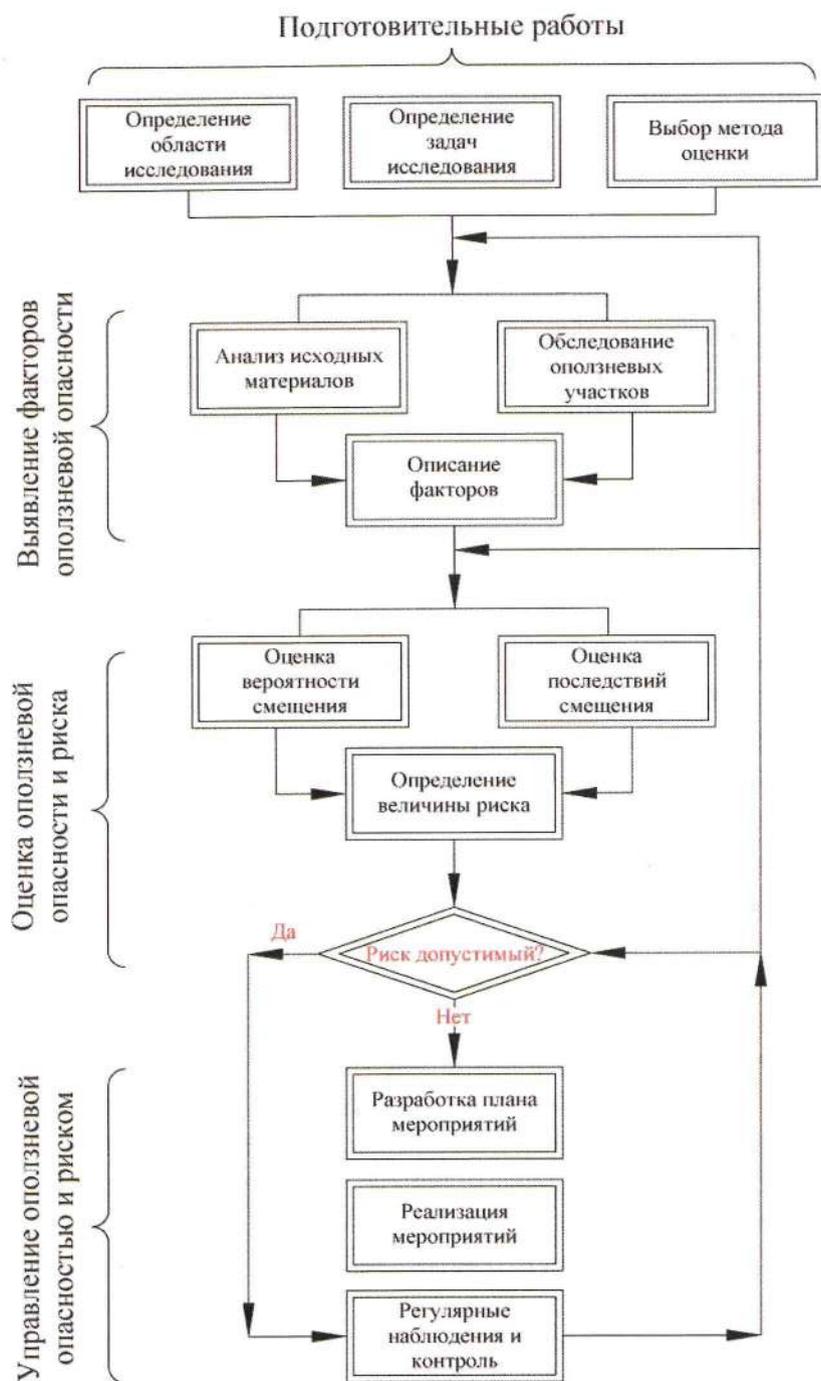


Рис. 3.12. Блок-схема управления оползневыми рисками

Необходимо рассмотреть потенциально опасные процессы и участки территории, расположенные как выше, так и ниже по склону от элементов риска. Повторяемость оползней определяется количеством оползней определенного типа и интенсивности, которые могут произойти на определенной территории в течение года.

Принципиальная схема для анализа, оценки и управления оползневой опасностью, а также понимания видов работ на этих этапах приведена на рис. 3.12 (Fell, 2005; Казеев, 2009; ОДМ, 2014).

3.6. Подходы к оценке оползневого риска

Анализ оползневых рисков и их количественная оценка позволяют определить нежелательные последствия и установить ущерб, ожидаемый при строительстве сооружения и его эксплуатации в случае реализации рискованных событий.

При решении практических задач, в частности при использовании подземного пространства, необходимо управление геотехническими рисками (независимо от существования возможности избежать рискованных событий) посредством их количественной оценки (Меркин, 2013).

Оценив числовое значение степени каждого геотехнического риска в процессе проектирования, можно подсчитать суммарную степень риска R , возможную в конкретных условиях строительства и эксплуатации подземного сооружения, по формуле (Меркин, 2013):

$$R = \sum_{j=1}^{j=m} p_j Y_j, \quad (3.5)$$

где p_j – вероятность проявления возможных рискованных ситуаций, $j = 1, 2, 3... m$ – количество вариантов возможных рискованных ситуаций, Y_j – величина математического ожидания ущерба в j -й рискованной ситуации.

Оползневой риск может быть представлен также в виде следующего выражения:

$$R = P(H) \cdot P(V) \cdot C, \quad (3.6)$$

где R – оползневой риск; $P(H)$ – вероятность проявления оползня; $P(V)$ – вероятность уязвимости объекта; C – ожидаемый ущерб.

Ежегодный риск потери имущества также может быть рассчитан по формуле (Fell, 2005):

$$R = P_L \cdot P_{TL} \cdot P_{ST} \cdot V \cdot E, \quad (3.7)$$

где R – величина ежегодного ущерба, P_L – частота проявления оползней, P_{TL} – вероятность поражения хотя бы части объекта риска оползнем, P_{ST} – пространственно-временная вероятность нахождения объекта риска в оползнеопасной зоне (для стационарных объектов равна 1), V – уязвимость объектов риска оползневому процессу, E – объект риска (например, стоимость здания).

Вероятность поражения оцениваемого объекта оползневой опасностью в пространстве P_{ST} зависит от расположения исследуемого объекта по отношению к телу оползня и оценивается величиной от 0 до 1. Если объект (его часть) по площади совпадает с территорией, на которой может проявиться оползневая опасность, то $P_{ST} = 1$.

Величина экономической уязвимости V изменяется от 0 до 1 и определяет степень повреждений, которые наступят, если произойдет оползневое смещение. Наибольшая уязвимость, как правило, присуща объектам, находящимся на границах оползня, так как при смещении они будут испытывать оползневое давление и деформирование (сжатие, изгиб, срез).

При оценке вероятности поражения объекта оползневой опасностью в пространстве и его экономической уязвимости рекомендуется использовать средние скорости развития процесса оползневого смещения, а также средние скорости деформаций зданий и сооружений.

Например, для Москвы средняя скорость развития оползневых смещений в пределах оползневого цирка составляет 2–5 мм/год (редко первые см/год). При этом в первые дни и месяцы активизации оползневых смещений (в фазу основного смещения) величины смещений могут составить несколько метров ($0,1 - 0,2H$, где H – высота склона).

В некоторых случаях абсолютная величина риска не так уж важна, например, когда оценка риска осуществляется для искусственных выемок и откосов автодороги, а риск оценивается для выявления очередности проведения противооползневых мероприятий (Маций, 2015).

При оценке оползневого риска полученную величину риска сопоставляют с критерием допустимого (приемлемого) риска. Если риск пре-

вышает значение, которое можно было бы принять, то необходимы соответствующие управленческие решения.

Таким образом, результатом оценки оползневого риска является либо отсутствие необходимости проведения защитных мероприятий ввиду низкого значения риска, или же разработка соответствующих управленческих решений.

Оценка оползневой опасности осуществляется на первом этапе оценки риска и, как правило, включает в себя следующий комплекс работ:

- Изучение оползневой обстановки в районе работ, включая анализ всех оползневых проявлений (форма проявления, мощность оползневых масс, степень их обводнения, механизм возникновения и развития оползневых деформаций, тип оползня по механизму) и состояния склонов, примыкающих к исследуемому участку; характеристика типов оползней; возможные формы разрушения склона в результате развития оползневого процесса (характер и величины разрушительных деформаций).

- Геомеханический анализ геологического строения и инженерно-геологических условий участка исследований, включая рассмотрение характеристик физико-механических свойств грунтов толщи, оценку структурной прочности грунта каждого слоя и определение действующего давления от веса вышележащих слоев с учетом возможной техногенной нагрузки.

- Выявление (распознавание) возможного типа оползня и степени активности склона с оценкой оползнеобразующих факторов. Определяются основные факторы (параметры), характеризующие тип оползня и степень его активности.

- Обоснование расчетных схем на основе учета механизма возникновения (активизации) и развития оползневых деформаций. Выбор расчетных характеристик грунтов для соответствующих схем (пиковые значения; свойства в условиях водонасыщения; характеристики из испытаний «плашка по плашке» и др.). Рекомендации по назначению характеристик прочности грунта в зависимости от состояния массива, в том числе на основе результатов исследований А.М. Дёмина (Дёмин, 2009).

- Проведение расчетов устойчивости с целью выявления возможных причин возникновения (активизации) оползневых деформаций (учитываются возможные изменения гидрогеологических условий, в том чис-

ле возникновение восходящей и нисходящей фильтрации и соответствующих напоров; образования подвижек нижней части склона и, как следствие, «подрезки» верхней его части; изменения свойств грунтов в результате обводнения или в процессе деформирования, техногенной нагрузки); для расчета оползневой нагрузки в соответствующих вертикальных сечениях массива, как для наиболее вероятных сочетаний факторов и условий, так и для наихудших сочетаний, обоснования необходимых защитных мероприятий, повышающих устойчивость до необходимого уровня.

- Разработка рекомендаций по эффективным и рациональным защитным мероприятиям и мониторингу.

Определение факторов оползневой опасности, которые устанавливают вероятность нарушения устойчивости склона, а также величину возможного ущерба от данного события, проводится на основе данных, полученных в ходе анализа исходных материалов и результатов инженерно-геологического обследования.

Для последующей оценки вероятности нарушения устойчивости для каждого оцениваемого участка устанавливаются:

- критические характеристики геологической среды, природного и техногенного воздействий (количество выпавших осадков, уровень грунтовых вод, подрезка склонов и др.), при которых происходит активизация оползневых процессов;
- стадийность и повторяемость оползневых процессов или вероятность событий, способных привести к их активизации;
- эффективность имеющихся сооружений инженерной защиты.

Для составления достоверных прогнозов оползневых процессов, обоснования проектирования и расчета различных защитных мероприятий необходимы количественные характеристики динамики оползней, факторов, их определяющих, а также условий возникновения и развития оползневых процессов. Необходима информация о размерах оползня или масштабе возможной активизации, механизме оползневого процесса, а также положении в грунтовом массиве поверхности скольжения.

Из методов локального прогнозирования оползневого процесса наиболее распространенными являются методы расчета устойчивости оползневых склонов. Стоит отметить, что в настоящее время ни одно

проектное решение при хозяйственном освоении склонов или строительстве земляных сооружений не принимается без количественной оценки степени устойчивости оползневых склонов и откосов.

Известно довольно значительное количество методов расчета устойчивости склонов, учитывающих в своих расчетных схемах многообразие типов оползней и использующих разные допущения, в том числе связанные с формой поверхности оползневого смещения и местоположением областей грунта, находящихся в предельном состоянии, с определением коэффициента устойчивости. Как правило, расчеты ведутся в условиях плоской задачи. Для участка сравнительно однородного по геологическому строению с визуально определяемыми границами оползня этим условиям более соответствует центральное сечение.

Опыт показывает, что достоверность расчета не столько определяется строгостью использованного механико-математического аппарата, хотя и это имеет значение, сколько наибольшей степенью учета расчетной схемой механизма деформирования склона (возможного типа оползня), реальных характеристик сопротивления грунта сдвигу по поверхности смещения, формы последней, а также фактического влияния на устойчивость существующего склона различных природных и техногенных факторов, вызывающих изменение обводненности склона, баланса масс или свойств грунтов.

Условие критического состояния грунтов в массиве, как правило, определяют по возникновению поверхностей (или линий в плоской задаче) скольжения, по которым, предполагая отсутствие сдвигов и равновесие, оценивают состояние массива, его устойчивость (Гинзбург, 1986; Тихвинский, 1984).

Исследование напряженно-деформированного состояния склоновых грунтовых массивов и устойчивости склонов в России осуществляется, наравне с инженерными методами расчета, методами конечных элементов, численным моделированием, вариационно-разностными методами.

Расчет устойчивости оползнеопасных склонов и откосов следует выполнять в соответствии с рекомендациями (Тихвинский, 1984). При расчетах необходимо рассматривать устойчивость и/или скорость смещения не только существующих оползневых тел в той или иной фазе развития, но и оценивать возможность зарождения и развития новых, с учетом

общей динамики изменения, природных факторов, а также антропогенной (в том числе планируемой) деятельности. В связи с этим прогноз развития оползневых процессов следует проводить также для разных морфологических элементов склона, сложенных различными породами.

Для оценки величины экономических последствий от реализации оползневой опасности устанавливаются и анализируются:

- критерии, используемые для идентификации последствий;
- последствия предыдущих оползневых смещений на оцениваемой территории или объектах-аналогах;
- расположение объектов риска относительно оползневого тела (относительно коренного склона);
- предполагаемая мощность и скорость смещения;
- степень возможного разрушения проектируемых объектов и существующих на склоне сооружений в связи с планируемыми строительными работами;
- вероятность вовлечения исследуемого участка в оползневой процесс;
- последствия для зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния оползневого процесса;
- качественное или количественное (абсолютное, относительное) выражение возможного ущерба.

Оценка оползневой опасности и риска выполняется качественными, полуколичественными и количественными методами. Подходы к оценке оползневого риска могут быть различными (Маций, 2015). При этом выбор метода определяется исходя из стадии изысканий и объема исходных материалов.

Помимо количественной оценки, применяется и качественная оценка риска, в которой по категориям разделена вероятность возникновения оползня и качественная оценка величины ущерба (от незначительного влияния до катастрофических последствий).

Для определения частоты и вероятности оползневого события применяются: метод экспертной оценки; статистическая обработка архивных данных; метод аналогий; оценка частоты явлений, приводящих к активизации оползневых подвижек; вероятностные расчеты устойчивости

склонов и откосов на основе аналитических методов. Все эти технические приемы могут применяться как по отдельности, так и совместно.

В методе аналогий частота и вероятность смещения устанавливаются на основе анализа оползневых процессов на участках, которые в топографическом, геологическом, гидрологическом и климатическом отношении аналогичны оцениваемому участку.

Для оценки последствий определяются негативные эффекты от воздействия оползневого события – экономические (повреждение сооружений, потеря устойчивости зданий и сооружений в зоне влияния и т.д.) и социальные.

Экономический ущерб может выражаться как в абсолютном денежном эквиваленте, так и в относительных величинах в процентах от стоимости сооружений.

3.7. Качественная оценка оползневой опасности и риска

Качественная оценка оползневой опасности и риска производится на основании экспертного анализа всей совокупности факторов, определяющих вероятность наступления оползневого события и его возможных последствий. Получаемая в результате оценки информация должна обеспечивать основу для разделения данных факторов на качественные характеристики оползневого риска («высокий», «средний», «низкий» и т.п.).

Для каждого конкретного объекта исследований на подготовительном этапе устанавливаются четкие критерии и термины, которые будут в дальнейшем использоваться для классификации оползнеопасных участков по категориям вероятности наступления и тяжести возможных последствий. Степень оползневой опасности оценивается по принципу их пересечения и выражается категорией риска.

Количество категорий вероятности и тяжести последствий оползневых событий обычно выбирается в каждом конкретном случае индивидуально в зависимости от поставленных задач и особенностей исследуемой территории.

Для обеспечения объективности и сопоставимости результатов для описания возможных последствий и вероятности возникновения смеще-

ния могут быть использованы качественные термины, приведенные в таблицах 3.1 и 3.2. Здесь следует отметить, что чем ниже вероятность формирования нового оползневой блока (когда крайний к плато оползневой блок занимает высокое положение), тем выше величины и скорости оползневых смещений и деформаций в контуре оползневой очага (вследствие детрузивного характера развития оползневых смещений на склоне).

Ранжирование по уровню оползневой опасности для имущества, населения и окружающей природной среды выполняется с помощью матрицы риска. Представленная в табл. 3.4 матрица при необходимости может быть изменена (представленное ранжирование носит условный характер и может быть различным).

Полуколичественная оценка оползневой опасности и риска основана на факторном анализе и заключается в переходе от количественных и качественных характеристик природных и технических условий к балльным оценкам.

Полуколичественная оценка оползневой опасности и риска осуществляется в следующем порядке:

- разрабатываются частные балльные шкалы для каждого оцениваемого фактора;
- выбирается способ интеграции балльных оценок и определяется результирующая шкала или матрица риска;
- осуществляется оценка каждого из компонентов оползневой опасности;
- по результатам полученных данных выводится интегральная оценка риска.

Каждый фактор оползневой опасности оценивается в безразмерных единицах-баллах по специальным шкалам, разработанным исходя из интенсивности его проявления, а также роли, которую он играет в формировании оцениваемой геотехнической системы.

На основании полученных показателей вероятности смещения и возможного ущерба аналогично строится интегральная шкала оценки оползневой опасности. При определении степени оползневой опасности также допускается использовать матрицу риска, применяемую в качественных методах оценки (табл. 3.4).

Термины для качественной оценки вероятности оползневой смещения

	Обозначение категории вероятности оползневой смещения				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
Качественная характеристика вероятности оползневой смещения	Очень высокая	Высокая	Возможно	Редко	Маловероятно
Частота оползневых смещений в год	> 1	0,1–1	0,01–0,1	0,001–0,01	$< 0,001$
Вероятность оползневой смещения	Ожидается в течение ближайшего времени	Оползневое событие возможно при ухудшении инженерно-геологических условий в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги	Может произойти при весьма неблагоприятных обстоятельствах в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги	Может произойти в течение расчетного срока эксплуатации участка дороги только в исключительных случаях	Оползневое событие практически невозможно
Коренной склон*	$K \leq 1$	$1 < K < 1,1$	$K < K_{st}$	$K_{st} < K < 1,3K_{st}$	$K > 1,3K_{st}$
Цирк глубокого оползня (очаг) и состояние надоползневой уступа (НОУ)**	Предельное состояние НОУ ($K \leq 1$) + подрезка / высокое положение ВОБ	Предельное состояние НОУ ($K < 1,1$) / высокое-среднее положение ВОБ ($K > 1,5$)	Среднее положение ВОБ, без защитных сооружений + негативное воздействие от сооружения	Среднее / Низкое положение ВОБ + нет негативного воздействия от сооружения	Низкое положение ВОБ + защитные сооружения, НОУ террасирован / преобразован в устойчивое подземное сооружение

* Коэффициент устойчивости по расчетной программе (инженерным методом, МКЭ и др.). ** Коэффициент устойчивости надоползневой уступа (по формуле 3.4). ВОБ – верхний оползневой блок. K_{st} – нормативное значение коэффициента устойчивости (по СП 116.13330.2016).

Таблица 3.2

**Термины для качественной оценки экономических последствий
оползневого смещения**

Обозначение категории возможного ущерба	Качественная характеристика возможного ущерба	Относительные потери для подземных сооружений, %	Относительные потери для наземных сооружений, %	Повреждения инфраструктуры	Описание возможного ущерба подземного сооружения
<i>D1</i>	Катастрофический	>5	80–100	более 5000 МРОТ ¹	Многочисленные трещины и деформирование конструкции подземного сооружения, ограничивающее его работоспособность, крупные повреждения одного или нескольких прилегающих объектов
<i>D2</i>	Крупный	1–5	40–80	От 1500 до 5000 МРОТ	Многочисленные трещины и деформирование конструкции подземного сооружения, возможны средние повреждения одного прилегающего объекта
<i>D3</i>	Средний	0,1–1	10–40	от 500 до 1500 МРОТ	Трещины в сооружении, возможны незначительные повреждения одного прилегающего объекта
<i>D4</i>	Малый	0,01–0,1	1–10	100–500 МРОТ	Умеренное повреждение подземного сооружения (трещины в конструкции)
<i>D5</i>	Незначительный	<0,01	<1	до 100 МРОТ	Ограниченный ущерб практически не влияет на эксплуатационные свойства подземного сооружения (небольшие трещины)

¹ МРОТ – минимальный размер оплаты труда (по документу «Методические указания по оценке рисков земляного полотна», 2018).

Таблица 3.3

**Категории оползневого риска и качественная характеристика
уровней допустимого риска [ОДМ]**

Обозначение категории оползневого риска	Качественная характеристика оползневого риска	Уровень риска
<i>R1</i>	Очень высокий	Недопустимый уровень риска, требуется управление риском, снижение до «низкого» или «среднего»
<i>R2</i>	Высокий	Недопустимый уровень риска, требуется управление риском, снижение до «низкого»
<i>R3</i>	Средний	В некоторых ситуациях может быть допустимым при условии одобрения Заказчиком, рекомендуется снижение до «низкого»
<i>R4</i>	Низкий	В большинстве случаев является допустимым уровнем риска
<i>R5</i>	Очень низкий	Допустимый уровень риска

Таблица 3.4

Матрица оползневого риска

Обозначение категории возможного ущерба	Категория вероятности смещения				
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>
<i>D1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>
<i>D2</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>
<i>D3</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>
<i>D4</i>	<i>R1</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>	<i>R5</i>
<i>D5</i>	<i>R2</i>	<i>R3</i>	<i>R4</i>	<i>R5</i>	<i>R5</i>

Количественные методы оценки оползневой опасности и риска применяются при разработке проектных решений инженерных сооружений и мероприятий инженерной защиты на оползнеопасных участках.

Количественную оценку оползневой опасности и риска рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

- разработка предварительных моделей образования и развития оползней;
- подбор вероятностно-статистических моделей, наиболее адекватно отражающих характерные особенности развития оползневых процессов и учитывающих строение геологической среды;
- оценка вероятности реализации прогнозов оползневой опасности при различных сочетаниях внешних воздействий и физико-механических свойств грунтов;
- определение экономических последствий для объектов инженерных сооружений и социальных последствий для населения в случае оползневого смещения;
- интегрирование полученных значений и установление количественной характеристики оползневого риска.

Полученный в ходе оценки результат сравнивается с допустимым уровнем оползневого риска, который назначается различным для инженерных объектов и населения.

Таким образом, можно заключить, что многочисленные случаи деформирования инженерных объектов на склоновых территориях вызывают повышенный интерес к оползневой проблеме, к выявлению природы и причин возникновения деформаций в грунтовой массе. Это обусловлено тем, что оползневые процессы наносят осваиваемым территориям огромный экономический, социальный и экологический ущерб, несопоставимые со средствами, затрачиваемыми на защитные мероприятия.

Любое строительство на склоновой территории инженерных объектов (мостов, тоннелей, спортивных комплексов, линий электропередач, трубопроводов и пр.) требует тщательного анализа оползневой обстановки, оценки оползневой опасности с возможным развитием деформаций как на допредельном уровне, так и с проявлением оползня определенного типа, закономерности образования и развития которого необходимо учитывать в конструкциях проектируемых сооружений и защитных мероприятиях.

Основные трудности при строительстве сооружений на оползневой территории, в том числе в Москве, в основном связаны с оценкой опасности и выявлением особенностей развития глубоких подвижек по механизму сжатия-выдавливанию (рис. 3.13). Строительные работы могут вызывать активизацию глубоких оползневых смещений, приводить к образованию нового оползневого блока с проявлением разрушительных оползневых деформаций на склоне, приводящих к существенным ущербам для строящихся и существующих сооружений. При этом на склонах и откосах могут возникать и поверхностные оползни, от которых также требуется защита инженерного сооружения.

При хозяйственном освоении склоновой оползнеопасной территории необходимо выполнять исследование оползневой опасности и риска для контроля эффективности принимаемых защитных мероприятий.

Мониторинг оползневого процесса занимает важное место в системе изучения оползней и является элементом для управления оползневым риском, отражая реальное поведение оползней во времени под действием природных и техногенных факторов и обеспечивая информацией, необходимой для оценки состояния оползнеопасного склона (или оползня), прогнозирования его развития и разработки управляющих воздействий по его стабилизации, а также мероприятий по защите проектируемых объектов.



А)



Б)

Рис. 3.13. Стенка срыва глубокого оползня («разрез Милановского», 2016 г.) (А) и укрепленный склон в створе Президентского моста (Б), г. Ульяновск

Глава 4. Оценка карстово-суффозионной опасности и риска на территории г. Москвы

Общая площадь распространения карстующихся пород составляет 31,5% площади суши земного шара. Из них 9,5% занимают районы, где растворимые отложения обнажаются на поверхности, а 22% – где они перекрыты нерастворимыми грунтами (Дублянский, Дублянская, 2007; Максимович, 1963). На этой огромной площади, равной почти $47 \cdot 10^6$ км², едва ли не самую большую экзогенную геологическую опасность представляют провалы и локальные оседания земной поверхности.

Особенности процесса образования воронок провала и оседания обусловлены растворением горных пород, наличием и относительно неглубоким залеганием ослабленных участков массива – карстовых полостей, открытых трещин, зон дробления, погребенных провалов и других подземных карстовых форм. Существованием ослабленных участков объясняется и локализация деформаций дневной поверхности, и сильная их неравномерность, и плохая предсказуемость, и ведущая роль процессов разрушения и перемещения грунтов (Кутепов, Кожевникова, 1989; Печеркин, 1989; Природные опасности ... , 2002; Newton, 1987; Poland, 1981; Waltham et al., 2005). По внезапности проявления, сложности процесса и его прогноза, а порой и по катастрофическим последствиям провалообразование иногда сравнивают с извержениями вулканов (Chen and Beck, 1989). И именно этот процесс служит одним из основных, если не главным, предметом исследований в инженерной геологии карстовых районов, которая у нас в последние три десятилетия чаще называется инженерным картоведением (Дублянский и др., 2011; Печеркин и др., 1984; Толмачев, Ройтер, 1993).

Территория Москвы относится к районам покрытого карбонатного карста. Наряду с оползнями и подтоплением, главную опасность здесь представляет образование карстово-суффозионных воронок (Москва. Геология и город, 1997). Методика оценки риска потерь от развития этого процесса, разработанная в последние годы, представлена в настоящей главе.

4.1. Карстово-суффозионные воронки и провалообразование

4.1.1. Определение основных понятий

Прилагательное «карстово-суффозионный» появляется в научной литературе в конце 1940-х гг. применительно к поверхностным формам покрытого карста. И уже в 1960-е годы оно широко используется российскими карстоведами для обозначения воронок, образовавшихся на поверхности покровной толщи закарстованных массивов (Кавеев, 1956; Максимович, 1963; Короткевич, 1964; Огильви, 1948; Соколов, 1962; Ступишин, 1967; и др.). Хотя единого, общепринятого понимания этого термина разными исследователями не существует.

Позже возникает понятие «карстово-суффозионные процессы», под которыми чаще всего подразумеваются провалы и оседание земной поверхности в районах покрытого карста. При этом собственно карстовый процесс может и не играть существенной роли, а учитываться лишь постольку, поскольку подземные карстовые формы принимают и аккумулируют обломочный материал. Именно такой смысл обычно вкладывается сейчас в это понятие, если устойчивость закарстованных территорий оценивается для гражданского и промышленного строительства (Кожевникова, 1974; Кофф и др., 1997; Козлякова и др., 2000; Кутепов, Кожевникова, 1989; Парфенов, 1981; Толмачев и др., 1986; Рекомендации..., 2002; Хоменко, 1986).

Сейчас многие исследователи карста задаются вопросом, почему в Москве воронки провала и оседания называются карстово-суффозионными, а такие же воронки, образовавшиеся в покровной толще других регионов РФ, – карстовыми? Дело в том, что когда в конце 1950-х – начале 1960-х гг. на северо-западе города стали появляться локальные деформации земной поверхности, мало кто из специалистов (В.Н. Кожевникова, С.И. Парфенов, И.А. Саваренский) связывал их с наличием растворимых отложений. И только в конце 1960-х – начале 1970-х гг. после разрушения дома №35/2 по Хорошевскому шоссе в 1969-м г. стало окончательно ясным, что эти воронки сформировались в результате выноса нерастворимых перекрывающих грунтов в полое подземное пространство

(погребенные карстовые формы) карбонатных отложений под воздействием техногенной нагрузки и, главным образом, откачек трещинно-карстовых вод.

В.Н. Кожевникова рассказывала, что Ф.В. Котлов – признанный авторитет по проблемам инженерной геологии территории г. Москвы – долго отвергал связь активизировавшегося провалообразования с карстом. Но и когда его убедили в этом, он никак не хотел называть воронки карстовыми, интуитивно понимая, что сколько-нибудь заметное растворение карбонатных пород на современном этапе здесь вряд ли имеет место (см. п. 4.1.4). В итоге все поверхностные формы карста и процессы, приводящие к их появлению, в Москве стали называться карстово-суффозионными.

Неприятие термина «карстово-суффозионные процессы» такими известными учеными и экспертами, как В.Т. Трофимов (2009), вызывает удивление, тем более что имя прилагательное составлено по всем правилам русского языка: ключевое слово стоит на последнем месте. Тем самым подчеркивается, что в отличие от «суффозионно-карстовых процессов» определяющую роль здесь играет суффозия. И кстати, тот факт, что несвязные и раздробленные связные грунты выносятся именно в трещинно-карстовые коллекторы, а не в реку, не в тоннель метрополитена или иные техногенные полости в нерастворимых и растворимых грунтах, требует доказательств в каждом конкретном случае. Иначе появление суффозионных воронок и, как следствие, разрушение зданий, подземных сооружений, большой экономический и, возможно, социальный ущерб в результате неверных проектных решений или экономии средств на изыскания и строительство можно легко списать на развитие мало кому понятных «карстово-суффозионных» процессов.

Не менее удивительны и словосочетания «карстовые провалы», «карстовые оседания», «карстовые деформации», «карстовая опасность», «карстовый риск», когда речь идет о формировании воронок внутри или на поверхности мощной (до 50–70 м и более) толщи глинисто-песчаных грунтов, перекрывающих растворимые породы, при том, что растворимость последних чаще всего не рассматривается. Именно так эти процессы, явления или ущерб от них именуется в Нижегородской области (Толмачев, Ройтер, 1990; ТСН 22-308-98 НН, 1999), Пермском крае (ТСН

11-301-2004 По; Щербаков, Катаев, 2013), Республике Башкортостан (Абдрахманов и др., 2002; ТСН 302–50–95. РБ), Республике Татарстан (Информационный бюллетень, 2007; Рагозин, Елкин, 2003) и многих других карстовых районах РФ. Здесь, по-видимому, сказывается и влияние зарубежной научной литературы, где слово "karst" используется в самом широком его значении (Адерхольд, 2010; Andreychouk, Тус, 2013; Gutiérrez et al., 2014; Zhou, Beck, 2008; Waltham et al., 2005).

Термин «карстовое провалообразование» (Хоменко, 2015) лучше характеризует процесс, развивающийся в покровной толще закарстованных массивов. Но и он мало что дает для понимания сути проблемы и даже вносит некоторую путаницу, поскольку, во-первых, провалообразование может завершиться появлением на земной поверхности как глубокой провальной воронки с крутыми обрывистыми стенками, так и мелкой блюдцеобразной воронки оседания. И, во-вторых, прилагательное «карстовое» в данном случае относится лишь к наличию и относительно неглубокому залеганию растворимых пород в геологическом разрезе, но не к их растворению.

В этой связи следует вспомнить определение термина «карст» середины XX века, когда в СССР понятийная база и главные направления инженерно-геологических исследований карстовых районов были в основном сформулированы (Ильин и др., 1960; Соколов, 1962). Так, в 1959 году И.В. Попов, профессор Московского университета и научный руководитель Дзержинской карстовой станции (она в то время входила в Лабораторию гидрогеологических проблем имени Ф.П. Саваренского АН СССР) писал (1959, с. 197):

«В настоящее время под карстом довольно единодушно понимают совокупность геологических явлений в земной коре и на ее поверхности, вызванных химическим растворением горных пород и выраженных в образовании в земной коре пустот, в разрушении и изменении структуры и состояния пород, в создании особого характера циркуляции и режима подземных вод и характерного рельефа местности и режима гидрографической сети. Процесс химического растворения пород, ведущий к образованию карстовых форм, называется карстовым процессом».

И далее: «Это определение было одобрено карстовым совещанием в Москве в 1956 г. Встречавшееся ранее применение названия «карст» к самим пустотам, созданным растворением пород подземными водами, в настоящее время можно считать вышедшим из употребления, и заменяется терминами «карстовые формы», «карстовые пустоты», «пещеры» и т.д. Употребление термина во множественном числе («карсты») осуждено карстовой конференцией 1947 г. в г. Перми. Также признается неправильным применение термина «карст» к явлениям и процессам, их вызывающим, если они не являются главным образом результатом растворения пород и выноса их веществ в растворенном виде. Соответственно этому неправильно построенными надо считать имеющие некоторое распространение термины «глиняный карст», «лёссовый карст» (Попов, 1959, с. 197).

Специалисты в области изучения карста хорошо знают, что нельзя говорить: «карсты», а иногда даже напоминают об этом людям несведущим (Рекомендации ..., 2012; ТСН 22-308-98 НН, 1999). Но почему-то забывают о том, что не вполне правильно называть процессы или обусловленные ими риски карстовыми, если они возникают вследствие наличия в массиве древних подземных форм карста, а не в результате современного выщелачивания растворимых горных пород.

И последнее, о чем хотелось бы сказать, завершая этот параграф. Среди геологов нередко бытует мнение, что провал – не процесс, а лишь его следствие (явление). На самом деле слово «провал» в его первом значении – это «действие по глаголам провалить – проваливать (в 1 знач.) и провалиться – проваливаться (в 1 и 2 знач.)». То есть это «обрушение внутрь», «падение в отверстие». И только во втором значении – «провалившееся место, углубление» (Словарь ..., 1985–1987, т. 3, 1987, с. 467). Не в последнюю очередь таким двойным, а с геоморфологической точки зрения и двойственным значением этого слова, на наш взгляд, объясняются некоторые трудности инженерно-геологической типизации поверхностных карстовых форм и процессов, приводящих к их образованию.

4.1.2. Общие представления о карстово-суффозионном провалообразовании

Принимая определение «карстово-суффозионный», полагаем, что речь все-таки должна идти о процессе, а не процессах образования одноименных воронок, хотя формы его реализации в массиве и на дневной поверхности могут быть самыми разными, непохожими друг на друга. Но связано это лишь с чрезвычайным разнообразием инженерно-геологических условий, а также с множеством сочетаний основных, первичных, принципиально отличных друг от друга механизмов процесса, которых, вообще говоря, немного.

Процесс формирования карстово-суффозионных воронок схематически показан на рис. 4.1. Видно, что на 0-й, начальной стадии процесса в основании грунтовой толщи появляются условия его развития: в растворимых отложениях формируется или освобождается от заполнителя ослабленный участок – карстовая полость, широкая трещина или другая подземная карстовая форма, способная инициировать провалообразование (рис. 4.1, а). На 1-й стадии нижний экранирующий слой в силу тех или иных причин, например, в результате снижения напора трещинно-карстовых вод и случайного гидроразрыва глин (Аникеев, 1993), увеличения пролета ослабленного участка или снижения прочности связных грунтов разрушается, и начинается вынос, или массовая суффозия песков (рис. 4.1, б). Если кровля карстовой полости сложена растворимыми породами и имеет место их обрушение (этот сценарий на рис. 4.1 не показан), то оно, как правило, сразу влечет за собой разрушение нижнего разделяющего пласта, а в его отсутствие – истечение несвязных грунтов.

Заметим, что уменьшение деформационно-прочностных характеристик глинистых грунтов может быть вызвано как их набуханием, так и механическим (гидравлическим) разрушением, а также ползучестью, а увеличение пролета полости в легко- и среднерастворимых (соляных и сульфатных) породах – развитием собственно карстового процесса. В труднорастворимых известняках и доломитах оно, скорее всего, происходит вследствие выноса и перераспределения заполнителя погребенных карстовых форм, то есть развития карстово-суффозионного процесса, как он обычно понимается в изысканиях для гидротехнического строительства (Лыкошин, 1976; Лыкошин и др., 1992; Максимович, 2006; Milanović, 2000).

На 2-й стадии истечение песков продолжается, область выноса достигает верхнего экранирующего слоя, в подошве которого возникает и растет промежуточная полость (рис. 4.1, в). А дальше, на 3-й стадии, в зависимости от низких или высоких показателей свойств и состояния грунтов, их мощности и скорости выноса, процесс при одном и том же строении массива может завершиться образованием воронки оседания (рис. 4.1, з) или воронки провала (рис. 4.1, д). При продолжающемся или возобновляющемся выносе грунтов локальное оседание земной поверхности на 3-й стадии может предшествовать провалу – на 4-й (рис. 4.1, з, д). В толще с большим или меньшим количеством прослоев связных и несвязных грунтов чередующихся стадий их обрушения и истечения будет соответственно больше или меньше вплоть до двух предельных случаев, когда покровная толща однослойная и целиком сложена либо глинами, либо песками.

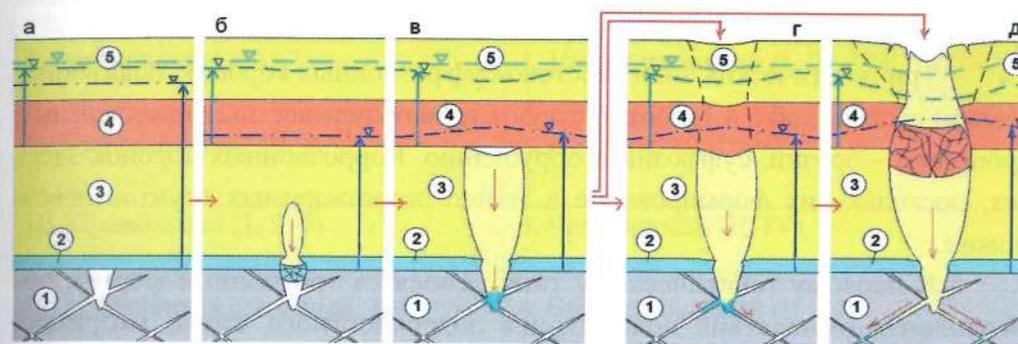


Рис. 4.1. Образование воронок в районах покрытого карста:

1 – растворимые породы, 2 – глины, 3 – пески, 4 – суглинки, 5 – супеси, пески. Толстыми штрихпунктирными линиями и приуроченными к ним толстыми восходящими стрелками показаны уровни подземных вод, тонкими черными линиями – область деформирования и разрушения грунтов, тонкими стрелками – вынос материала в трещинно-карстовые коллекторы, жирными – путь развития (а–в) и завершения (з, д) процесса

Подчеркнем, что рис. 4.1 – это схема, не претендующая на объяснение всех тонкостей и сторон провалообразования. Но на нем по возможности показано и то важное обстоятельство, что большую роль в процессе играет не только техногенное нарушение режима уровней подземных вод, но и изменение напоров в ходе деформирования-разрушения грунтов (Аникеев, 1987, 2002).

Таким образом, под карстово-суффозионным процессом будем понимать гравитационное и фильтрационное деформирование и разрушение покровной толщи закарстованных массивов в результате выноса песчаного и раздробленного глинистого материала в трещинно-карстовые коллекторы. Не будем также забывать, что этот процесс может развиваться и на фоне заметного увеличения размеров подземных карстовых форм вследствие выщелачивания.

4.1.3. О типизации поверхностных карстовых форм

С учетом вышесказанного предлагается все локальные отрицательные формы поверхности покровной толщи закарстованных массивов именовать карстово-суффозионными воронками. А дальше, как показано в табл. 4.1, подразделять их на два типа, которые, вообще говоря, могут быть совершенно не связаны между собой, если их рассматривать вне времени их появления и развития.

Три генетических типа карстово-суффозионных воронок, показанные в левом столбце табл. 4.1, соответствуют трем общеизвестным комплексным процессам – эрозии, суффозии и обрушению. Коррозионных воронок здесь нет, поскольку их формирование в толще нерастворимых грунтов невозможно.

К первому генетическому типу относятся эрозионные формы, образующиеся вследствие локализации поверхностного стока, например, в местах пересечения трещин в грунтах, чаще всего обладающих некоторой связностью. Поэтому эти формы бывают цилиндрическими или коническими, отличаются небольшими размерами в плане и называются также понорами, которые обычно наблюдаются в скальных породах и в днище суффозионных воронок. Отношение их глубины к ширине, как правило, намного больше, чем у воронок других генетических типов.

Суффозионные воронки (II, табл. 4.1) в разрезе могут быть коническими, чашевидными и блюдцеобразными. Синонимом свежих воронок последнего морфологического типа (4, табл. 4.1) служит «воронка оседания», предпоследнего (3, табл. 4.1) – «просадка» (Рекомендации ... , 2012; ТСН 22-308-98 НН, 1999). Последний термин не очень удачный, так как он давно и прочно ассоциируется с поведением лессовых грунтов (Грунтоведение, 1971; Попов, 1959). Форма воронок суффозионного типа тесно

связана с двумя фундаментальными механизмами деформирования несвязных грунтов – разуплотнением и срезом (см. п. 4.2.2).

Провальные воронки, или воронки обрушения бывают цилиндрическими, коническими, чашевидными и сложного строения, хотя две последние формы больше характерны для воронок смешанного (сложного) генезиса (табл. 4.1). Причем последний тип чаще всего характеризуется комбинацией простых геометрических форм. Например, в нижней части воронка может быть цилиндрической, а в верхней – конической, и наоборот.

Таблица 4.1

Классификация форм проявления карста на поверхности грунтовой толщи, перекрывающей растворимые породы, по генетическому и морфологическому признакам

Типы карстово-суффозионных воронок	
Генетические	Морфологические
I. Эрозионный (1, 2) ↓	1. Цилиндрический (I, III, IV) ↓
II. Суффозионный (2, 3, 4) ↓	2. Конический (I–IV) ↓
III. Провальный (1, 2, 3)	3. Чашевидный (II–IV) ↓
IV. Смешанный (сложный, 1–5)	4. Блюдцеобразный (II, IV)
	5. Сложный (смешанный, I–IV)

Примечание. В скобках показана взаимосвязь генетических и морфологических типов (далеко неоднозначная без учета фактора времени); направление одинарных стрелок указывает на увеличение возраста воронок, двойных – на увеличение опасности.

Отметим, что вертикальность стенок не означает, что угол их наклона к горизонту составляет 90° . Он может быть равным и 80° , и 110° – речь идет не о морфометрических показателях, а о визуальном восприятии геолога. Поэтому воронки с обратным уклоном стенок и конические воронки с углом наклона бортов, скажем, 85° будем относить к цилиндрическому типу. Это ни в коей мере не противоречит необходимости количественной характеристики поверхностных форм при обследовании территории.

Появление воронок любого генетического типа сопровождается прогибом земной поверхности, поэтому в табл. 4.1 воронки прогиба не выделены в самостоятельный генетический тип. Для этого есть и другие основания.

Несомненно, изгиб пластов горных пород как следствие возникновения моментов сил в окрестности ослабленного участка массива представляет собой один из наиболее важных первичных механизмов провалообразования. Но это механизм элементарного уровня. Он, как и формирование свода разгрузки или локализация деформаций, непосредственно связан с напряженным состоянием массива и отличается от комплексных механизмов или процессов – эрозии, суффозии и обрушения, которые положены в основу выделения генетических типов. Заметим также, что термин «провалообразование» используется нами чаще всего тогда, когда нужно подчеркнуть, что речь идет именно о процессе, который может завершиться и на стадии подготовки провала как явления. И в этом смысле его синонимом в большей степени является понятие «карстово-суффозионный процесс», нежели «провал» как обрушение земной поверхности.

Рассмотренная выше классификация обращает внимание на то, что нужно быть очень осторожным, относя воронку к тому или иному генетическому типу на основании лишь ее формы. Характерным примером служит суффозионная по генезису воронка (рис. 4.2), вначале ошибочно отнесенная к провальному типу только потому, что обрушилось асфальтовое покрытие в ее центральной части (Кутепов, Кожевникова, 1989; Москва ... , 1997).

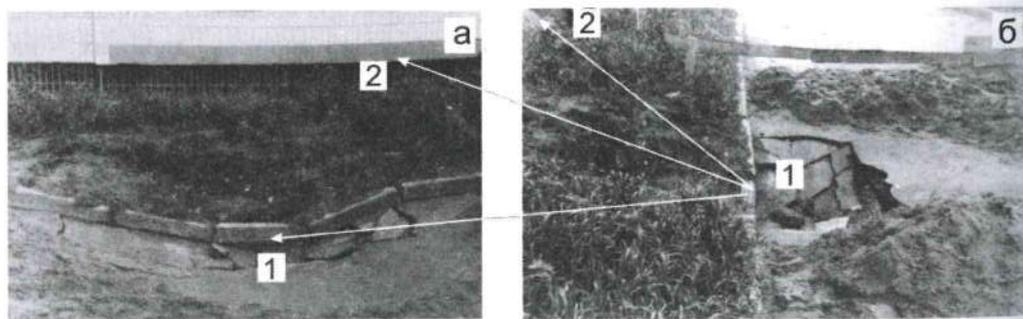


Рис. 4.2. Карстово-суффозионная воронка (1), образовавшаяся в мае 1987 г. у дома 17/1 по ул. Тухачевского в Москве:
а – вид на фасад дома (2), б – вид на проезжую часть

Возникает вопрос, можно ли при оценке устойчивости территории, опасности провалов и обусловленного ими риска потерь ориентироваться лишь на ту закарстованность отложений, которая сформировалась в древние эпохи? Или необходимо учитывать, что и без того комплексный процесс образования воронок будет развиваться на фоне увеличения аккумуляционной емкости растворимых пород за счет их выщелачивания? Ответ на него должен быть обязательно получен в результате изысканий и карстологических исследований того или иного района, так как от этого зависит, с каких позиций – механических или химических – мы будем рассматривать процесс и, в конечном итоге, определять устойчивость, опасность или риск для конкретного сооружения или участка этого района.

Вообще говоря, если размеры полости заметно увеличиваются и в рассматриваемый промежуток времени их нельзя считать константой даже в первом приближении, то при использовании геомеханических моделей провалообразования это обстоятельство может быть учтено в краевых условиях и основных уравнениях, переменными в которых служат размеры. Тем не менее анализ растворимости пород, геохимического режима и растворяющей способности подземных вод представляет собой важную самостоятельную и достаточно сложную проблему (Горбунова, 1985; Зверев, 1967; Максимович, 1963; Соколов, 1962; Родионов, 1963; и др.). И отказываться от ее изучения ни в коем случае нельзя. Иначе от геомеханического подхода к анализу провалообразования мы придем (и все чаще приходим в последнее время) к механистическому подходу.

4.1.4. Влияние карстового процесса на образование воронок в Москве

Территория г. Москвы является типичной территорией покрытого карбонатного карста, находящейся в условиях интенсивной антропогенной нагрузки. Однако вплоть до середины XX века экзогенные геологические процессы на этой территории сводились в основном к овражной и речной эрозии, заболачиванию и оползням. В настоящее время все они за исключением оползней потеряли свое значение для геодинамического развития территории в связи с техногенным изменением ее ландшафта. Карстово-суффозионные же воронки стали неочи-

данно появляться на северо-западе Москвы в конце 1950-х годов, и сейчас последствия их образования, напротив, считаются наиболее опасными (Аникеев, 2002; Кожевникова, 1974; Кофф и др., 1997; Кутепов, Кожевникова, 1989; Москва ..., 1997; Осипов, Чертков, 1986; Парфенов, 1981; и др.). Но если решающая роль откачек подземных вод в формировании воронок провала и оседания на территории Москвы хорошо показана в том числе и в упомянутых выше работах, то влияние собственно карстового процесса на провалообразование до сих пор вызывает много вопросов.

В монографии В.П. Зверева (2006) анализируется гидрохимический режим трещинно-карстовых вод и, в частности, изменение скорости растворения средне- и верхнекаменноугольных карбонатных пород в пределах Московской кольцевой автодороги (МКАД) за последние 60 лет. Учитывается техногенное воздействие на химический состав подземных вод и, как следствие, – на изменение содержания свободной углекислоты в карбонатных водоносных горизонтах. А, как известно, содержание CO_2 , при прочих равных условиях, определяет растворяющую способность подземных вод.

В результате серьезных многолетних исследований им установлено, что в год выщелачивается 9300 т CaCO_3 или, переходя на объем, $V_k = 3600 \text{ м}^3/\text{год}$. Для площади всего мегаполиса, как отмечает В.П. Зверев (2006), это немного, но, учитывая приуроченность процесса к ослабленным зонам массива, полагает, что в таких зонах этого вполне достаточно для образования провалов.

Допуская, что базисом коррозии являются современные речные долины, оценим вклад растворения карбонатных пород в развитие карсто-суффозионного процесса в пределах главных водных артерий нашей столицы. Следуя рекомендациям В.П. Зверева, считаем, что вынос CaCO_3 со скоростью $V_k = 3600 \text{ м}^3/\text{год}$ имеет место не на всей площади города, а лишь в полосе шириной 1 км – по 500 м справа и слева от тальвега основных рек (рис. 4.3, табл. 4.2). Заметим также, что при таком допущении мы заведомо уменьшаем «действующую» площадь и, следовательно, сильно увеличиваем опасность выщелачивания растворимых отложений.

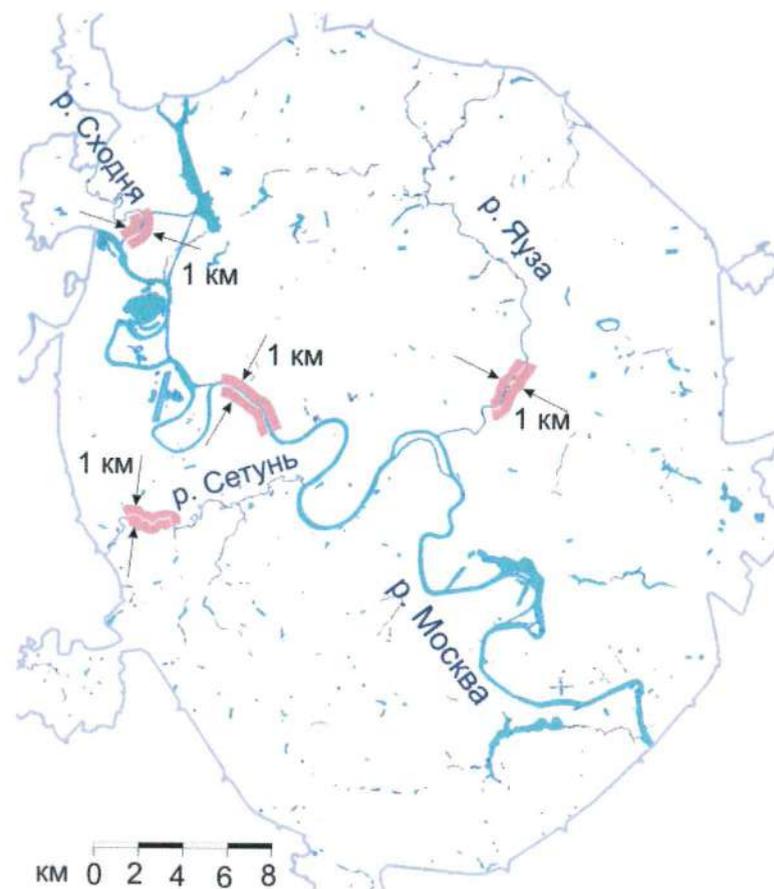


Рис. 4.3. К определению скорости карстовой денудации в Москве на современном этапе геологического развития территории. Стрелками показана ширина фрагментов области влияния главных рек

Из данных последней строки табл. 4.2 следует, что оседание земной поверхности, обусловленное растворением карбонатных пород в прирусловой части основных рек нашего города, развивается со скоростью 0,031 мм/год. Но даже если считать, что весь объем растворенного вещества выносится только из зоны влияния Москвы-реки, то и тогда скорость карстовой денудации будет крайне мала ($v_d = 0,048 \text{ мм/год}$).

Для сравнения, на одном из участков СЗАО г. Москвы в районе, потенциально опасном в карсто-суффозионном отношении, скорость оседания в конце 1940-х годов составляла 14-15 мм/год, к началу 1970-х годов она уменьшилась до 2,5–4 мм/год. Средняя же скорость опускания дневной

поверхности в Москве в конце XX века равнялась 1,5–2 мм/год (Москва ... , 1997, с. 259–265), то есть была, по меньшей мере, в 50–60 раз больше той, что указана в последнем столбце последней строки таблицы 4.2.

Таблица 4.2

Протяженность главных рек и интенсивность развития карстового процесса в пределах МКАД при скорости растворения карбоната кальция $V_k = 3600 \text{ м}^3/\text{год}$

Характеристики \ Реки	Москва	Яуза	Сетунь	Сходня	Все главные реки
Протяженность (км)	75	23	12	6	116
Ширина зоны влияния (км)	1	1	1	1	1
Площадь зоны влияния ($S_{\text{вл}}, \text{м}^2$)	$75 \cdot 10^6$	$23 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$116 \cdot 10^6$
Скорость карстовой денудации ($v_d = V_k/S_{\text{вл}}$, мм/год)	0,048				0,031

Базисы эрозии и карстования могут находиться на разных абсолютных отметках, и именно это сейчас наблюдается в Москве, где современные речные долины, конечно, влияют на развитие карста, но их тальвеги служат в первую очередь базисом эрозии. Положение же базиса коррозии определяется глубиной вреза палеодолин дочетвертичного возраста.

Анализ имеющихся в настоящее время данных о древней речной сети города свидетельствует, что ее протяженность намного превышает длину современных рек (рис. 4.4). Тогда с учетом совместного влияния доледниковых и современных врезов скорость карстовой денудации оказывается как минимум на 3 порядка меньше, чем средняя скорость оседания территории нашего города. Если же учесть и некоторый вклад доюрских эрозионных ложбин в развитие карстово-суффозионного процесса на современном этапе (Kozlyakova et al., 2016), то всерьез говорить о роли растворения карбонатных пород в настоящее время, очевидно, не приходится.

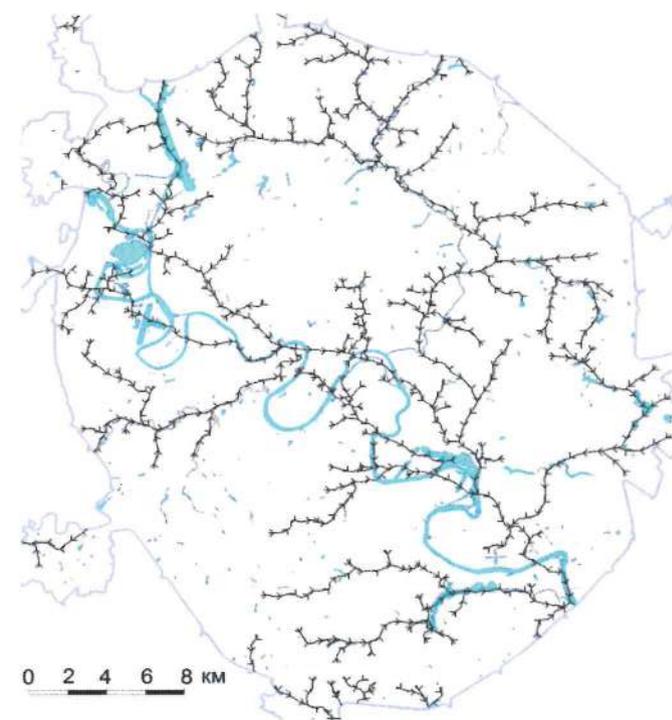


Рис. 4.4. Современная речная сеть и тальвеги доледниковых эрозионных врезов (черные линии со стрелками) на территории г. Москвы (по В.М. Кутепову и др., 2011)

Полученные выше результаты можно трактовать иначе – как скорость изменения размера подземных карстовых форм в плане. Пусть скорость карстовой денудации будет максимальной и согласно данным табл. 4.2 равной $v_d \approx 0,05 \text{ мм/год}$, а коррозия по каким-либо причинам развивается только по горизонтали. Тогда за время $T_0 = 100 \text{ лет}$, а это максимальный срок эксплуатации ответственных сооружений, приращение пролета ΔL вскрытой бурением полости составит всего 5 мм ($\Delta L = v_d/T_0 = 0,005 \text{ м}$). Очевидно, что такое увеличение ширины ослабленного участка, даже если его исходный пролет составляет всего $L = 0,5\text{--}1 \text{ м}$, не говоря уже о больших размерах, в практических расчетах можно не учитывать.

В конце 1920-х – начале 1930-х гг. Ф.П. Саваренский подсчитал меженный модуль стока и ионный сток для Москвы-реки в районе нынешнего Рублевского шоссе. По его данным средняя скорость химической денудации в то время равнялась $v_d = 0,0071 \text{ мм/год}$ (Саваренский,

1950). Полагаем в первом приближении, что эти данные справедливы и для территории всего города. Тогда, сопоставляя $v_d = 0,0071$ мм/год с полученными выше результатами ($v_d = 0,031-0,048$ мм/год, табл. 4.2), приходим к следующему выводу.

В последние 70 лет XX века скорость карстовой денудации в Москве сильно (в 4,4–6,8 раз) возросла. Но, несмотря на это, величина опасности и риска образования карстово-суффозионных воронок на территории Москвы по-прежнему не зависит от интенсивности современного выщелачивания каменноугольных отложений. При этом на первый план инженерно-геологических исследований помимо выявления и количественной характеристики подземных карстовых форм выходит изучение внутренних закономерностей и механизмов деформирования-разрушения покровной толщи.

4.2. Механизмы провалообразования

Представляется, что наличие двух комплексных детерминированных моделей поведения связных и несвязных дисперсных грунтов над полостью, которые характеризуются той или иной степенью водонасыщения и испытывают то или иное гидродинамическое давление, позволило бы осуществлять локальный прогноз образования провалов в покровной толще любого строения в любых гидрогеологических условиях. Причем общий методологический подход к их созданию должен базироваться на представлениях о динамической перестройке геологической среды при внешних воздействиях (Галицкий, Галкин, 1997). И основополагающим при этом является принцип Ле Шателье-Брауна, согласно которому любое внешнее воздействие на находящуюся в равновесии систему вызывает развитие в ней процессов, стремящихся ослабить это воздействие. Другими словами, покровная толща закарстованного массива, которая служит открытой системой, подверженной внешним воздействиям, в том числе и со стороны карстовой полости, как бы стремится к самосохранению и из множества вариантов своего поведения и изменения структуры в окрестности участка ослабления выбирает тот, который обеспечивает ее наибольшую устойчивость в новых условиях.

4.2.1. Обрушение связных грунтов

Выделяются две формы нарушения сплошности слоя связных грунтов над карстовой или промежуточной полостью: 1) классический механизм образования окна в водоупоре, или первая форма разрушения, и 2) механизм случайного гидроразрыва слабопроницаемых пород, или вторая форма. Случайный гидроразрыв представляет собой типичный пример чисто вынужденного процесса, когда вес грунтов мал по сравнению с фильтрационными силами и не входит в уравнение предельного равновесия (см. п. 4.3.4). Изучению этого процесса посвящено много работ автора этой главы (Аникеев, 1993, 2002; и др.); в настоящее время он учитывается (Аникеев и др., 2007; Jia et al., 2018; Sheng, Helm, 1995) и исследуется не только методами физического (Аникеев, 2002; Хоменко, 2009; Lei et al., 2005) и математического (Long et al., 2016; Salvati et al., 2001; Tharp, 1999, 2002, 2003) моделирования, но и в ходе опытно-фильтрационных работ (Meng et al., 2020).

Принимая также во внимание, что краткие сведения о второй форме нарушения устойчивости слабопроницаемых грунтов приводятся в пункте 4.3.4 в связи с формулировкой критериев провальной опасности для их практического использования, ограничимся здесь рассмотрением лишь первой формы разрушения. Она может трактоваться как свободный процесс, так как главным действующим фактором служит объемный вес грунтов, в величине которого учитывается и силовое воздействие подземных вод.

На рис. 4.5 видно, что классический механизм заключается в изгибе слоя и образовании трещин отрыва. Чем прочнее слой и больше его мощность, тем меньше амплитуда прогиба и положе трещины, начинающиеся на краях ослабленного участка. Замыкаясь внутри пласта, они и образуют свод обрушения. Отсюда следует, что для количественного описания первой формы разрушения слоя малой мощности пригодны теории оболочек и плит. В частности, при $m/D < 0,25$ нужную на практике точность обеспечивает использование элементарных формул балочек (Турчанинов и др., 1977). Однако с практической точки зрения прогноз формирования сквозных отверстий в столь тонких пластах не представляет большого интереса: понятно, что они не могут служить надежными

экранами. Оценка же устойчивости мощных, а также прочных разделяющих пластов не очень большой мощности должна, очевидно, базироваться на гипотезах сводообразования (Альбов, 1948).

Если высота свода обрушения b_1 много больше мощности слоя m , то поверхность смещения в глинах может оказаться почти вертикальной (рис. 4.5, а, б, д). Последнее обстоятельство позволяет использовать в расчетах и хорошо разработанную схему среза грунтов по цилиндрической поверхности (Аникеев, 2009; Кутепов, Кожевникова, 1989; Толмачев и др., 1986; Шахунянц, 1953; и др.). Но при этом, очевидно, необходимо учесть перераспределение напряжений в окрестности карстовой полости (Аникеев и др., 1991).

Сделать это в первом приближении можно, введя в расчет давление от веса свода обрушения ($\sigma_{св}$), который формируется в песках над срезаемым блоком глин (Аникеев, 1993; Хоменко, 2003). Если пески водонасыщенные и имеет место перетекание подземных вод (рис. 4.6, а, в), то уравнение предельного равновесия слабопроницаемого слоя записывается в виде (Аникеев, 1993):

$$R_{кр}(\sigma_{св} + \sigma^*) = m(2\sigma_{св} + \sigma^*)\xi_1 \operatorname{tg} \varphi_1 + 2mc. \quad (4.1)$$

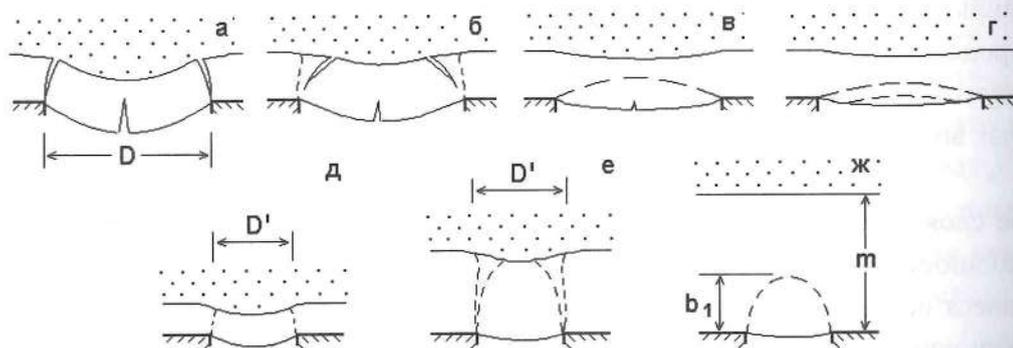


Рис. 4.5. Характер деформирования-разрушения слоя связных грунтов над полостью (первая форма) в зависимости от их консистенции (а – мягкопластичной, б – пластичной, в – полутвердой, г – твердой) и соотношения мощности слоя и пролета полости m/D (д–ж). Центральная трещина отрыва (а–в) образуется в плоских моделях, то есть характерна для вытянутых в плане ослабленных участков. Нижняя часть толщи несвязных грунтов показана крапом (по результатам физического моделирования)

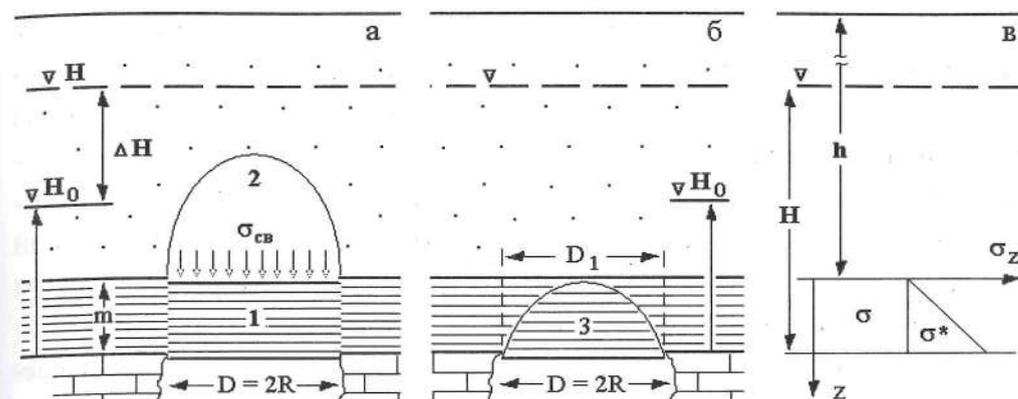


Рис. 4.6. Схемы к расчету устойчивости экранирующего слоя на срез (а) и к определению диаметра сквозного отверстия D_1 при его обрушении в пределах параболического свода 3 (б), эпюра вертикального давления в слабопроницаемых грунтах (в):

1 – смещаемый блок глин; 2 – свод обрушения в песках; $\sigma_{св}$ – среднее давление от веса свода 2; σ – давление песков, равное $\sigma_{св}$ для первой схемы или геостатическим напряжением – для второй; σ^* – фиктивные (с учетом силового воздействия воды) напряжения от веса глин; H, H_0 – уровни подземных вод

В уравнении (4.1) напряжения $\sigma^* = \gamma_1^* m$ от фиктивного веса глин $\gamma_1^* = \gamma_1' + \gamma_w I$ учитывают гидродинамическое давление $\gamma_w I$. Здесь $\gamma_1' = (\gamma_{s1} - \gamma_w)(1 - n_1)$ – это объемный вес взвешенного в воде глинистого грунта, γ_{s1} – объемный вес минеральной части, $\gamma_w \approx 10 \text{ кН/м}^3$ – вес воды, n_1 – пористость грунта, $I = \Delta H/m$ – градиент перетекания, ΔH – разность напоров грунтовых и трещинно-карстовых вод. Коэффициент распора, угол внутреннего трения и сцепление глин обозначены как ξ_1, φ_1, c .

Сцепление связных грунтов в уравнении (4.1) дано без уточняющего нижнего индекса "1", поскольку при решении многих практических задач инженерной геологии сцеплением несвязных грунтов можно пренебречь: $c_2 \approx 0$. В нашем случае это допущение ($c_2 = 0$) более чем корректно, и вот почему.

Принципиальное отличие инженерной геологии карстовых районов от общей инженерной геологии состоит в том, что все интересующие нас процессы, которые мы называем карстово-суффозионным процессом, развиваются в условиях не сжатия, а локального растяжения горных пород

(Аникеев и др., 1991). Причем пески, даже самые плотные и крупнозернистые, не могут противостоять большим отрицательным деформациям (в отличие от положительных деформаций при компрессии). Таким образом, если стандартные прочностные показатели c и φ хоть как-то можно использовать в наших целях, то, например, модуль общей деформации грунтов сам по себе, без учета его корреляционных связей с деформационными или прочностными характеристиками грунтов, полученными в опытах на растяжение, не представляет для нас никакой ценности.

Если средние напряжения от веса песка $\gamma_2' = (\gamma_{s2} - \gamma_w)(1 - n_2)$ в пределах свода ($\sigma_{св}$, рис. 4.6) находятся по формуле М.М. Протоdjаконова (1933):

$$\sigma_{св} = \gamma_2' R_{кр} / 2 \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (4.2)$$

то критическое значение диаметра $D_{кр} = 2R_{кр}$ полости (D , рис. 4.6), а значит и диаметр D_1 окна в водоупоре определяются выражением (Хоменко, 2003):

$$D_{кр} = D_1 = 2G_1 m [(1 + 2(\gamma_1' m \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1 + 2c) \operatorname{tg} \varphi_2 / \gamma_2' G_1^2 m)^{0.5} - 1], \quad (4.3)$$

где $G_1 = (\gamma_1' \operatorname{tg} \varphi_2 - 2\gamma_2' \operatorname{tg} \varphi_1 \xi_1) / \gamma_2'$, φ_2 – угол трения песков.

Допущения, лежащие в основе схемы среза, ограничивают область применения всех базирующихся на ней расчетных моделей небольшой мощностью перекрывающих полость грунтов (Аникеев, 2009). Именно поэтому задача о смещении круглого цилиндра пород поставлена для определения устойчивости только экранирующего слоя, а не всей покровной толщи (Аникеев, 1993). И если мощность этого слоя $m/D > 1-1,5$ (рис. 4.6, а), то использование даже решения (4.3) становится проблематичным.

Хорошей альтернативой рассмотренному выше способу расчета диаметра окна в водоупоре при неизвестной ширине ослабленного участка может служить упоминавшаяся модель М.М. Протоdjаконова (1933), учитывающая элементарные механизмы обрушения пород – изгиб и отрыв. Однако она требует некоторого изменения в соответствии с решаемой нами задачей.

Согласно этой модели, в песках над горной выработкой формируется параболический свод обрушения высотой $b_{св} = D/2 \operatorname{tg} \varphi_2$, откуда

$$D = 2b_{св} \operatorname{tg} \varphi_2. \quad (4.4)$$

Для связных грунтов коэффициент трения $\operatorname{tg} \varphi_2$, следуя рекомендациям М.М. Протоdjаконова, заменим коэффициентом крепости горных пород, который представляет собой отношение их сдвиговой прочности τ к величине сжимающих напряжений σ_z на уровне кровли полости: $\tau/\sigma_z = \operatorname{tg} \varphi_1 + c/\sigma_z$. Учитываем также, что высота свода обрушения должна быть не меньше мощности экранирующего слоя. В этом случае, как следует из опытов (см. рис. 4.5, б, е), нависающие над сводом консоли неустойчивы и смещаются сразу вслед за ним. При этом диаметр D_1 окна в экранирующем слое примерно равен критическому диаметру $D_{кр}$ полости (рис. 4.6, б). Тогда, полагая в выражении (4.4) $b_{св} = b_1 = m$ и $D = D_{кр} \approx D_1$, перепишем его в виде:

$$D_1 \approx D_{кр} = 2m(\operatorname{tg} \varphi_1 + C/\sigma_z), \quad (4.5)$$

где $\sigma_z = \gamma_2(h + m - H) + \gamma_2'(H - m) + \gamma_1' m$; γ_2, γ_2' – вес песков выше и ниже уровня грунтовых вод H (рис. 4.6, б, в).

4.2.2. Формирование воронок в несвязных грунтах

Результаты комплексного изучения суффозии массы позволяют утверждать (Аникеев, 2006), что развитию этого процесса противостоят фундаментальные свойства несвязных грунтов – дилатансия и трение. Именно эти два свойства, как показано в работах Новосибирской школы горных инженеров и геомехаников (Крамаджян и др., 1994; Ревуженко, Стажевский, 1986; Ревуженко и др., 1974, 1982; Стажевский, 1983, 1985; Русин и др., 2007), определяют поведение песков. Им отвечают два элементарных механизма – разуплотнение и срез, а базовым процессом является гравитационное деформирование сыпучей среды.

Обособляются три формы движения сыпучих тел в хранилищах с вертикальными стенками и центральным отверстием в плоском дне (Клейн, 1977): 1) начальная, обусловленная разрыхлением; 2) первая, характеризующаяся трубообразным каналом течения; и 3) вторая, когда канал заметно расширяется вверх по потоку. При выпуске мощных плотных песков и песков средней плотности из достаточно широких емкостей или, что то же самое, из достаточно узких отверстий расширение канала наблюдается лишь вблизи отверстия, а цилиндрической «труба» течения становится на некотором удалении от него (рис. 4.7).

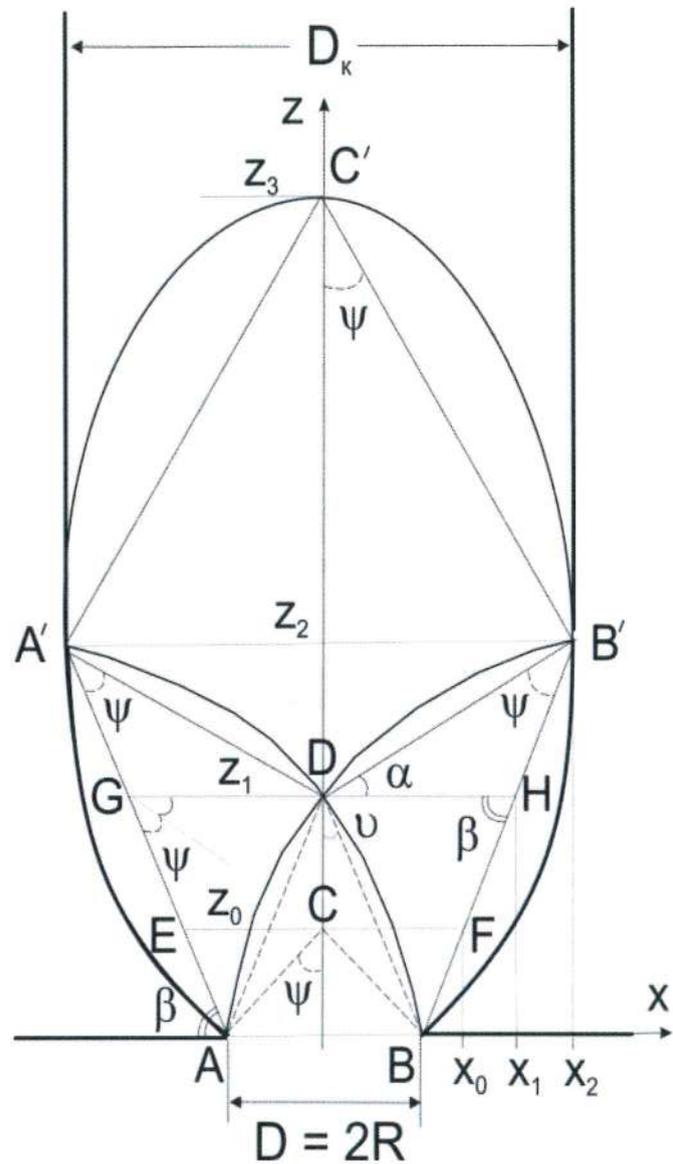


Рис. 4.7. Канал течения в мощном ($h/L = 29,6$) слое плотных воздушно-сухих песков на стадиях подготовки (1), возникновения (2) и роста (3) воронки на поверхности плоской модели

Серьезное отличие гравитационного истечения воздушно-сухих и водонасыщенных песков, установленное в опытах, относится к кинематике процесса. Оно заключается в том, что весовой расход первых пропор-

ционален диаметру выпускного отверстия (полости) в степени 2,5, а вторых – в степени 2 (Аникеев, 2006). Однако и в том, и в другом случае кинематика и механизм процесса хорошо объясняются зональностью области влияния ослабленного участка растворимых пород (рис. 4.8).

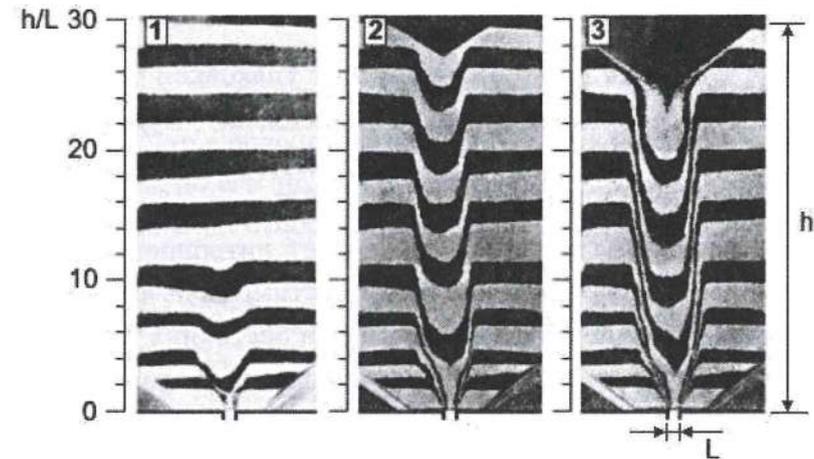


Рис. 4.8. Зональное строение области влияния полости AB в несвязных грунтах:

ACB – зона полных сдвижений, или выпадающий свод (зона свободного падения частиц в режиме быстрого истечения сыпучих тел); ADB – зона разгрузки напряжений, разуплотнения и потенциального обрушения в статике, а в динамике – зона преимущественного столкновения частиц; AA'DB'BDA – зона опорного давления и возможного скольжения (в динамике – зона пластического течения); AA'DB'B – динамический «свод»; DA'CB'D – зона перехода от аномально низких и высоких напряжений к литостатическим (зона возможного прогиба и разуплотнения в статике) и зона перехода от сходящегося движения к поршневому (в динамике); AA'CB'B – область влияния ослабленного участка или эллипсоид выпуска в режиме быстрого движения;
 $\alpha = \pi/4 - \varphi_2/2$, $\beta = \pi/4 + \varphi_2/2$, $\psi = \varphi_2$, $\nu \approx \varphi_2/2$, φ_2 – угол трения;
 D_k – диаметр канала течения песков

Размеры отдельных зон и всей области влияния являются функциями пролета карстовой полости и угла внутреннего трения грунтов (рис. 4.8):

$$D_k = 2x_0 = 2R/\sin\varphi_2, \quad (4.6)$$

$$z_0 = R/\operatorname{tg}\psi = R/\operatorname{tg}\varphi_2, \quad (4.7)$$

$$D_k = 2x_1 = R(1 + \sin\varphi_2)/\sin^2\varphi_2, \quad (4.8)$$

$$z_1 = R/\operatorname{tg}\varphi = R(1 + 2\sin\varphi_2)/2\operatorname{tg}\varphi_2 \cdot \sin\varphi_2 \approx R/\operatorname{tg}(\varphi_2/2), \quad (4.9)$$

$$D_k = 2x_2 = R(1 + \sin\varphi_2)^2/2\sin^3\varphi_2, \quad (4.10)$$

$$z_2 = z_1 + R(1 + \sin\varphi_2)/4\operatorname{tg}\varphi_2 \cdot \sin^2\varphi_2, \quad (4.11)$$

$$z_3 = z_2 + x_2/\operatorname{tg}\varphi_2, \quad (4.12)$$

где $\varphi_2 = \varphi_{\mu'} + \nu$; $\nu_{\min} \leq \nu \leq \nu_{\max}$ – связанный с упаковкой частиц и изменяющийся при деформировании угол дилатансии, $\varphi_{\mu'}$ – угол контактного, или эффективного трения такого сыпучего материала, для которого $\nu = 0$ (Ревуженко, Стажевский, 1986).

Непостоянство угла трения осложняет интерпретацию процесса, поэтому на практике удобно и вполне допустимо пользоваться значениями φ_{\min} или φ_{\max} в зависимости от свойств и состояния несвязных грунтов. Эти значения легко находятся по величине остаточного сопротивления сдвигу или пиковой прочности и в самом первом приближении отвечают значениям угла откоса грунтов предельно рыхлого и плотного сложения. Однако, учитывая принципиальное отличие инженерного карстования от инженерной геологии, о котором говорилось в пункте 4.2.1, лучше всегда ориентироваться на наименьшие значения φ , полученные при изысканиях, особенно если они определены в ходе трёхосного сжатия, выполненного по консолидированной дренированной схеме. Можно и просто принять для песков значения $\varphi = 26\text{--}28^\circ$, а для гравия и щебня $\varphi = 30\text{--}34^\circ$.

Уравнения (4.6) – (4.9) определяют размеры области влияния на стадии неустановившегося, а (4.9) – (4.12) – установившегося движения. Причем $D_k = 2x_0$ является максимально возможной шириной канала при первой форме движения песков ($D \leq D_k \leq 2x_0$), а $D_k = 2x_1$ и $D_k = 2x_2$ – его минимальным и максимальным диаметрами, если реализуется вторая форма ($2x_1 \leq D_k \leq 2x_2$). Уравнения (4.6), (4.8), (4.10) позволяют решить и обратную задачу вычисления пролета отверстия D в основании песчаной толщи по известным значениям диаметра свежих воронок ($D_b \approx D_k$). Эта задача интересна также с точки зрения постановки геофизических исследований и выявления мест потенциального провалообразования.

4.2.3. Некоторые особенности динамической перестройки несвязных грунтов

Эксперименты показывают, что поведение песчаной толщи в окрестности ослабленного участка, в том числе и над срезаемым блоком глин (см. рис. 4.6, а), сильно зависит от мощности толщи (h) и ширины полости ($D = 2R$). Если $h/R < 1/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2 \approx 2,6$, где $\xi_2 = \operatorname{tg}^2(\pi/4 - \varphi_2/2)$ – коэффициент распора песков в состоянии предельного равновесия ($\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2 \approx 0,19$ при $\varphi_2 = 23^\circ\text{--}38^\circ$), то в полость смещается грунтовый цилиндр, вес которого уменьшен трением по его боковой поверхности. При этом схема среза полностью корректна. Если относительная мощность несвязных грунтов лежит в интервале $1/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2 \leq h/R \leq \operatorname{ctg}(\varphi_2/2)$, то опускается свод, стрела подъема которого равна $b_1 = R/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2$ (рис. 4.9, а; кривые 3, 4 на рис. 4.9, б).

При мощности, большей, чем высота разгружающего свода b_2 (z_1 на рис. 4.8): $h/R > b_2/R = \operatorname{ctg}(\varphi_2/2)$, формируется коническая или параболическая зона обрушения высотой $b_1 = R/\operatorname{tg}\varphi_2$, равной высоте $b_{\text{св}}$ свода М.М. Протодыяконова (4.4), и вертикальное давление грунтов над полостью стабилизируется (кривая 2, рис. 4.9, б), но на ее кромках резко возрастает. Эти особенности структурной организации массива и бифуркации процесса, обусловленные взаимодействием всех зон области влияния и особенно зон обрушения, разгрузки и опорного давления, показанных на рис. 4.8, можно записать в виде следующих уравнений:

$$\sigma_z = \gamma_2 h / (1 - h\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2/R), \quad h < R/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2; \quad (4.13)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 R / 4\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2, \quad R/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2 \leq h \leq R/\operatorname{tg}(\varphi_2/2) \approx z_1; \quad (4.14)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 R / 3\operatorname{tg}\varphi_2 \div \gamma_2 R / 2\operatorname{tg}\varphi_2, \quad h > R/\operatorname{tg}(\varphi_2/2) \approx z_1. \quad (4.15)$$

Для песчаной толщи мощностью $h < R/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2$, которая находится в состоянии предельного равновесия, формула (4.13) принимает вид $\sigma_z = \gamma_2 h / (1 - h\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2/R) = (F - N)/\pi R^2 = 0$. То есть при равенстве сдвигающей F и удерживающей N сил $\sigma_z = 0$. Но условие $F = N$, например, в виде уравнения (4.1), лежит и в основе классической схемы среза грунтов по круглоцилиндрической поверхности, или модели Бирбаумера. Отсюда следует, что все современные решения этой модели вполне пригодны для прогноза диаметра свежих провалов в песчаном слое мощностью $h < R/2\xi_2\operatorname{tg}\varphi_2 \approx 1,3D$ ($h_{\text{кр}1}$ на рис. 4.9, а).

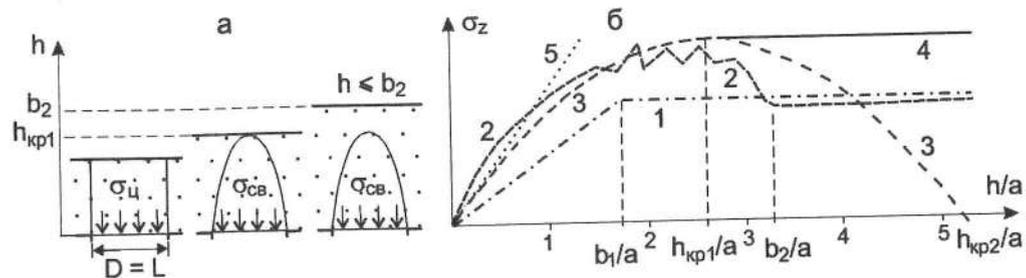


Рис. 4.9. Смещение грунтового цилиндра и формирование свода обрушения при малой мощности слоя песков (а) и изменение вертикального давления в подошве слоя над полостью в зависимости от его мощности (б):
 1, 2 – по М.М. Протодьяконову (1933) (1 – расчетная кривая, 2 – экспериментальная); 3 – по А. Бирбаумеру (1913) (Терцаги, 1933);
 4 – кривая для случая, показанного на рис. а (при $h_{кр2} \leq h \leq b_2$);
 5 – литостатическое давление; b_1, b_2 – высота зон обрушения и разгрузки напряжений (z_0, z_1 на рис. 8); $a = R$ – полупролет или радиус ослабленного участка; $h_{кр1} = R/\xi_2 \text{tg} \varphi_2$, $h_{кр2} = R/2\xi_2 \text{tg} \varphi_2$ – критические значения мощности

В слоях мощностью $h \geq h_{кр1} = R/2\xi_2 \text{tg} \varphi_2$ реализуется качественно иной механизм – сводообразование ($\sigma_z = \sigma_{св}$, рис. 4.9, а), поэтому при подстановке давления песков (4.14) или (4.15) в уравнение равновесия (4.1), мы получаем квадратное уравнение. Его решение при $h > R \cdot \text{ctg}(\varphi_2/2)$, когда в соответствии с выражениями (4.2), (4.15) $\sigma_{св} = \sigma_z = \gamma R/2 \text{tg} \varphi_2$, и записано в виде (4.3). Значение $\sigma_z = \sigma_{св} = \gamma_2 h/3 \text{tg} \varphi_2$ в уравнении (4.15) отвечает конической зоне обрушения АСВ (см. рис. 4.8), которая возникает на ранних стадиях формирования канала течения несвязных грунтов.

Разработанная модель поведения несвязных грунтов над участком ослабления массива растворимых пород позволяет оценить концентрацию вертикальных напряжений на кромках полости, которая может инициировать провалообразование. Для плоской задачи и случая $h/a \gg \text{ctg}(\varphi_2/2)$ коэффициент концентрации имеет вид:

$$K_z = 1 + 2 \text{tg}(\varphi_2/2) \sin(\varphi_2/2) / \varphi_2. \quad (4.16)$$

Безразмерные напряжения K_z , посчитанные по формуле (4.16), хорошо отражают известную тенденцию роста опорного давления с увеличением прочности пород и глубины залегания ослабленного участка. Они не

противоречат экспериментальным данным, а также результатам так называемых «точных» расчетов по формулам теории упругости, выполняемых, как правило, методами математического моделирования. И здесь уместно процитировать А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевского и Е.И. Шемякина.

Они пишут (Ревуженко и др., 1982), что в механике сыпучих сред существуют два основных направления исследований. Первое основано на концепции изолированных поверхностей скольжения и восходит к классическим работам Кулона. Второе базируется на предложенной Сен-Венаном гипотезе о том, что сухое трение развито в каждой точке деформируемой области (предельное состояние). Причем результаты, полученные в рамках первого направления, считаются приближенными, инженерными, а второго – точными. Но под точностью во втором случае понимается не адекватное описание реальных процессов, а точность методов решения поставленной математической задачи. И в этом смысле приближенные решения первого направления могут оказаться намного более точными, чем «точные» решения, полученные в рамках второго направления.

Соображения, изложенные в этом параграфе и, казалось бы, далекие от практики, имеют самое непосредственное отношение к оценке устойчивости закарстованных территорий на участках нереализованной (ожидаемой) опасности. Применение методов математической статистики в потенциально опасных карстовых районах исключается, и для определения диаметра возможных воронок нужно, во-первых, хорошо представлять себе механизмы провалообразования и, во-вторых, уметь соотносить их с инженерно-геологическими условиями участка.

Статистические закономерности распределения воронок и их связь с подземными карстовыми формами или режимом подземных вод, установленные в районах реализованной опасности, использовать можно (Ковалева, 2015; Щербаков, 2013; Щербаков, Катаев, 2013; Xiao et al., 2018). Но на уровне стройплощадки они, на наш взгляд, имеют больше познавательное значение по причине, главным образом, сильной изменчивости геологической среды. Поэтому в основе локальной и особенно точечной оценки карстово-суффозионной опасности и риска должен лежать детальный анализ условий, факторов и возможных механизмов развития процесса на данном конкретном участке (Кутепов, Кожевникова, 1989; Саваренский, Миронов, 1995; и др.).

4.3. Основные критерии карстово-суффозионной опасности

Будем исходить из того (см. п. 4.1.4), что растворение пород на современном этапе развития территории не играет заметной роли в образовании карстово-суффозионных воронок или, по крайней мере, не может повлиять на результаты долгосрочных и, тем более, краткосрочных прогнозов. Тогда существуют пять основных условий, которые необходимо учитывать при оценке устойчивости районов покрытого карста на локальном уровне и отражать на крупномасштабных инженерно-геологических картах. Они рассматриваются ниже, при этом общеизвестные положения инженерной геодинамики или механики грунтов приводятся без ссылок на литературные источники.

4.3.1. Состав и состояние растворимых пород

Главным критерием оценки провальной опасности на участках развития погребенного карбонатного карста служат характер, степень закарстованности и трещиноватости тех отложений, которые могут принимать и накапливать обломочный материал. Ими в первую очередь служат закарстованные породы, непосредственно подстилающие покровную толщу. Чем глубже лежит область аккумуляции, чем больше мощность глинистых прослоев между ней и грунтовой толщей, тем меньше вероятность поступления в нее грунтов при прочих равных условиях (рассматриваемый интервал времени, интенсивность техногенной нагрузки, мощность грунтов, залегающих с поверхности и др.). Однако даже такие простые, но крайне важные характеристики карстово-суффозионной опасности, как местоположение и размеры области аккумуляции, в настоящее время далеко не полно устанавливаются в ходе изысканий, поскольку это требует глубокого изучения истории геологического развития района, его литологических, тектонических и гидрогеохимических особенностей (Аникеев, 2015).

Закарстованность массива обычно оценивается по выходу керна в скважинах, провалам бурового снаряда и описанию состояния горных пород, а также по косвенным признакам – водопроницаемости раство-

римых отложений, скорости прохождения сейсмических, электрических волн и других. Она выражается коэффициентом трещинно-карстовой пустотности – отношением объема (площади, длины) трещин, полостей и каверн к общему объему (площади, длине) участка или образца. А при отсутствии таких данных – степенью закарстованности или раздробленности массива, то есть отношением высоты провалов бурового инструмента или мощности прослоев, выветрелых и разрушенных до состояния щебня, дресвы и муки, к общей или пройденной мощности карстующейся толщи.

Третья, или опасная категория присваивается растворимым породам (III, табл. 3), если они содержат крупные открытые полости и трещины и (или) характеризуются интенсивной раздробленностью и высоким коэффициентом объемной, площадной или линейной закарстованности. Это отражено в Инструкции (1984); ТСН 22-308-98 НН (1999); ТСН 11-301-2004По (2004); ТСН 302-50-95. РБ (1996) и других нормативных и методических документах, требования которых учитывались при составлении таблицы 4.3.

Вторая (II, табл. 4.3), или потенциально опасная категория характеризуется наличием полостей и трещин небольших размеров, заполненных песчано-глинистым материалом, средней степенью раздробленности и трещинно-карстовой пустотности. Первая (I, табл. 4.3), неопасная категория представлена монолитными слабо трещиноватыми и кавернозными породами, трещины и каверны которых часто залечены вторичным кальцитом или гипсом.

Количественные показатели отнесения растворимых отложений к той или иной категории опасности зависят от многих факторов – состава пород, глубины их залегания, строения перекрывающих нерастворимых отложений, гидрогеологических условий и вида техногенной нагрузки. Они региональные, а потому должны регламентироваться территориальными строительными нормами и сводами правил, которые в настоящее время (и это nonsense!) отменены.

Таблица 4.3

Критерии оценки карстово-суффозионной опасности по состоянию каменноугольных карбонатных пород на территории Москвы

Категории опасности	Критерии отнесения участка к категории опасности
III (опасная)	<ol style="list-style-type: none"> Наличие крупных открытых трещин и полостей высотой ≥ 1 м, провалы бурового снаряда с амплитудой $\geq 0,5$ м; Отношение мощности прослоев пониженной прочности, сильнотрещиноватых, по трещинам закарстованным и выветрелым, к общей мощности пород > 70 %; Отношение мощности прослоев, разрушенных до состояния щебня, дресвы и муки, к общей мощности > 50 %.
II (потенциально опасная)	<ol style="list-style-type: none"> Наличие запечатанных трещин и единичных полостей высотой < 1 м, провалы бурового снаряда с амплитудой 0,2–0,5 м; То же, что и I.2, но 30–70 %; То же, что и I.3, но 20–50 %.
I (неопасная)	<ol style="list-style-type: none"> Отсутствие крупных полостей и трещин, провалы бурового снаряда с амплитудой $< 0,2$ м, монолитность и слабая трещиноватость пород; То же, что и I.2, но ≤ 30 %; То же, что и I.3, но ≤ 20 %.

В каждом конкретном случае их значения ранжируются, исходя из общих инженерно-геологических условий территории, масштаба исследований и картографирования, характера карстово-суффозионного процесса, категории ответственности зданий и сооружений. В табл. 4.3 они даны с учетом нашего опыта изучения устойчивости покрытого карбонатного карста и локальной оценки провальной опасности и риска в Москве (Аникеев и др., 2007).

4.3.2. Состав, состояние и мощность покровной толщи

Самым общим результатом выноса нерастворимых грунтов из толщи среднего и плотного сложения является ее разрыхление и формирование промежуточных полостей в пределах локальной области деформирования (рис. 4.1). При небольших размерах промежуточных полостей воронка на земной поверхности может появиться только после того, как высота разуплотненной области становится равной мощности покровной толщи (Андрейчук, 1999; Аникеев, 1995). Когда и как это условие будет выполнено, зависит от аккумуляционной емкости закарстованного массива, строения, состава и свойств перекрывающих грунтов, скорости их деформирования и выноса в трещинно-карстовые коллекторы.

Если покровная толща сложена преимущественно связными грунтами, то область деформирования-разрушения, как и в слое плотных песков, будет, скорее всего, трубообразной. Если же она представлена несвязными грунтами, которые легко разрыхляются и в рыхлом состоянии практически не оказывают сопротивления массовой суффозии, то локальное прогнозирование ее устойчивости сводится не столько к выявлению закономерностей деформирования, сколько к определению величины аккумуляционной емкости и ее сопоставлению с объемом канала истечения песков (Аникеев, 1995).

Отсюда следует, что при одном и том же состоянии растворимых пород, строении и составе покровной толщи мощность последней определяет саму возможность образования воронок на земной поверхности. В этой связи отражение глубины залегания карстующихся пород на картах палеорельефа каменноугольных отложений в Москве (Kozlyakova et al., 2016) трудно переоценить.

Таким образом, критерий мощности перекрывающих нерастворимых пород имеет большой физический смысл. Понятно, что, как и при оценке состояния закарстованных отложений, пороговые значения этого критерия обычно выбираются исходя из опыта и масштаба изысканий на данной конкретной территории, а не по результатам расчетов. Хотя расчеты (Адерхольд, 2010; Андрейчук, 1999; Аникеев, 1995, 2015), на наш взгляд, могли бы оказать существенную помощь в решении этого вопроса.

В таблице 4.4 категории опасности в зависимости от ранжированных значений мощности покровной толщи (Σm), предлагаемые для территории Москвы, даны в первых строках второго столбца (I.1, II.1, III.1). Указанные там значения до сих пор не закреплены в нормативных документах и могут уточняться. Для Республики Башкортостан значения этого критерия, приведенные во вторых строках (I.2, II.2, III.2, табл. 4.4), давно записаны в строительных нормах (ТСН 302–50–95 РБ) и успешно применялись на практике до их отмены.

Таблица 4.4

Суммарная мощность Σm грунтов покровной толщи в Москве (1) и Республике Башкортостан (2) как количественный критерий карстово-суффозионной опасности

Категории опасности	Значения мощности Σm
III (опасная)	1. ≤ 20 м 2. < 35 м
II (потенциально опасная)	1. 20–50 м 2. 35–60 м
I (неопасная)	1. > 50 м 2. > 60 м

В подразделе 4.2.2 отмечалось, что даже если пески характеризуются плотным сложением и канал их деформирования (перемещения) практически не расширяется вверх по течению, то и тогда они слабо сопротивляются размыву и выносу. И в этой связи процентное содержание песчаных или глинистых слоев в общей мощности покровной толщи также может служить критерием ее устойчивости (Аникеев и др., 2007; Ковалева, 2015). Чем больше глинистых прослоев и меньше песчаных, тем устойчивее территория и меньше вероятность образования воронок, величину которой в нормативных документах отражает показатель интенсивности процесса λ (СП 116.13330.2012 и др.). Но другой основной показатель опасности – средний диаметр ожидаемых воронок ($D_{ср}$) при этом, наоборот, будет больше.

4.3.3. Мощность экранирующего слоя

В основании покровной толщи закарстованных массивов чаще всего залегают слабопроницаемые грунты, образующие либо самостоятельный в стратиграфическом отношении слой, либо контактный прослой. Они разделяют грунтовые и трещинно-карстовые воды и служат своеобразным экраном, предотвращающим загрязнение глубоких водоносных горизонтов и поступление несцементированных песчаных пород в трещинно-поровое пространство закарстованного массива. Препятствуя загрязнению и образованию воронок провала и оседания на земной поверхности, этот экранирующий глинистый пласт выполняет важную защитную функцию (Трофимов, Зилинг, 2002).

При прочих равных условиях (состав и состояние глинистых грунтов, закарстованность подстилающих отложений и др.) защитные свойства и устойчивость экранирующего пласта тем выше, чем больше его мощность m . Так, районы г. Москвы, где мощность экранирующих глин не меньше 10 м, согласно Инструкции (1984) относятся к неопасным с точки зрения возможного образования карстово-суффозионных воронок районам (табл. 4.5).

Основой для такого заключения послужил огромный опыт работы московских геологов, в том числе и карстоведов (Кожевникова, 1974; Осипов, Чертков, 1986; Парфенов, 1981; и многие др.). Они заметили, что при выполнении этого условия территория города устойчива, независимо от степени закарстованности каменноугольных пород, растворяющей способности подземных вод, интенсивности гидродинамического воздействия и других факторов. Если мощность глинистого экрана составляет 3–10 м и меньше 3 м, то район считается соответственно потенциально-опасным и опасным (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Категории карстово-суффозионной опасности по величине мощности m слабопроницаемого пласта в кровле растворимых отложений на территории Москвы (1) и Республики Башкортостан (2)

Категории опасности	Значения мощности m
III (опасная)	1. $m < 3$ м 2. $m < 1-2$ м

II (потенциально опасная)	1. $m = 3-10$ м 2. $m = 2-30$ м
I (неопасная)	1. $m \geq 10$ м 2. $m \geq 30$ м

В настоящее время появляются данные о том, что карстово-суффозионные воронки на территории г. Москвы имеют место и там, где мощность экранирующих юрских глин, отделяющих каменноугольные известняки от четвертичных преимущественно песчаных отложений, достигает 5 м (Кочев и др., 2018). Поэтому, возможно, границы третьей опасной категории в табл. 4.5 придется изменить: $m < 5$ м.

В иных инженерно-геологических условиях значения этого важного количественного критерия будут другими. В качестве примера значения мощности, характеризующие те же три категории провальной («карстовой») опасности на территории Республики Башкортостан (ТСН 302-50-95 РБ), показаны во вторых строках правого столбца таблицы 4.5.

4.3.4. Силовое воздействие подземных вод

В границах действия закона Дарси гидродинамическое, или фильтрационное давление p_d определяется разностью гидростатических давлений Δp_s в соседних сечениях потока:

$$p_d = \Delta p_s = \gamma_w \Delta H, \quad (4.17)$$

где γ_w – объемный вес воды, ΔH – разность напоров подземных вод. В гидрогеомеханике под гидродинамическим давлением принято понимать произведение объемного веса воды на градиент напора $I = \Delta H/l$ (l – длина пути фильтрации). При перетекании через экранирующий слой $\Delta H = H - H_0$, где H и H_0 – пьезометрические уровни грунтовых и трещинно-карстовых вод, $l = m$ (см. рис. 4.6), и оно равно:

$$p_d' = \gamma_w I = \gamma_w (H - H_0)/m. \quad (4.18)$$

Видно, что главное различие выражений (4.17), (4.18) заключается в том, что p_d' , судя по размерности, является не давлением, а удельной силой. В расчетах зачастую удобнее пользоваться последней формулой, поскольку в этом случае размерность гидродинамического давления сов-

падает с размерностью объемного веса пород. Поэтому в качестве главного фактора фильтрационного воздействия обычно принимается градиент I , хотя не менее справедливым будет назвать основным фактором разность напоров ΔH .

При нисходящей фильтрации ($H > H_0$) направление p_d (p_d') совпадает с направлением силы тяжести, и гидродинамическое давление считается положительным, при восходящей ($H < H_0$) – отрицательным. Положительное давление, увеличивая объемный вес грунтов, способствует их разрушению и выдавливанию в подземные полости, отрицательное – уменьшая их вес, оказывает удерживающее воздействие на ненарушенные глинистые пласты.

Действие восходящей фильтрации на несвязные или разрушенные связные грунты, залегающие над полостью, иное: уменьшение веса таких пород приводит к снижению их эффективной прочности в результате ослабления сил трения между частицами или блоками пород. Происходит схлопывание промежуточных полостей и при достаточно больших размерах карстовой полости наблюдается свободное истечение в нее грунтов из зоны разуплотнения (Аникеев, 1995; Хоменко, 1986). При критических значениях градиента восходящей фильтрации, когда вес песков полностью исчезает, а вернее компенсируется фильтрационным давлением, они переходят в плавунное состояние независимо от того, какие это пески – пылеватые или крупнозернистые.

Таким образом, трудно сказать, какое гидродинамическое давление опасней – положительное или отрицательное. Это зависит от конкретных инженерно-геологических условий, стадии развития карстово-суффозионного процесса и абсолютной величины ΔH . Однако предпосылки возникновения процесса практически всегда создает нисходящая фильтрация, и именно она в конечном итоге приводит к появлению поверхностных карстовых форм. Поэтому положительные значения градиента вертикальной фильтрации I , принятые в качестве критериев силового воздействия подземных вод на территории Москвы (табл. 4.6), вполне оправданы.

Участки Москвы, в пределах которых $I > 3$, считаются опасными в карстово-суффозионном отношении, для потенциально опасных районов значения этого градиента составляют $I \leq 3$ (Инструкция ... , 1984). Величина I для неопасных участков нормативными документами не регламен-

тируется, однако по опыту изучения устойчивости территории Москвы можно утверждать, что благоприятная ситуация характеризуется градиентом $I \leq 1$ при условии, что он относится к глинистым грунтам. Для песчаной толщи следует ввести поправку: $0 < I \leq 1$. Эти значения градиента показаны в первых строках последнего столбца таблицы 4.6. Здесь необходимо также учитывать, что если нисходящая фильтрация вызвана снижением напора H_0 , то скорость движения трещинно-карстовых вод при этом увеличивается, и начинаются размыв и перераспределение заполнителя подземных карстовых форм.

Таблица 4.6

Критерии силового воздействия подземных вод и их значения для трех категорий карстово-суффозионной опасности

Категории опасности	Градиент вертикальной фильтрации I (1) на территории Москвы и снижение напора ΔH трещинно-карстовых вод при исходной разности напоров $\Delta H'$ (2)
III (опасная)	1. $I > 3$ 2. $\Delta H \geq c/\gamma_w \rho_e + m - \Delta H'$
II (потенциально опасная)	1. $I = 1-3$ 2. $c/\gamma_w \rho_e \leq \Delta H < c/\gamma_w \rho_e + m - \Delta H'$
I (неопасная)	1. $I \leq 1$ ($0 < I \leq 1$) 2. $\Delta H < c/\gamma_w \rho_e$

Не менее важным обстоятельством является и то, что при откачках напорных вод и падении их уровня до критических значений возникает качественно иная форма образования окна в экранирующем слое. Именно она послужила причиной активизации карстово-суффозионного процесса на северо-западе Москвы в середине XX века (Аникеев, 2002).

В отличие от первой, или классической формы вторая форма разрушения слабопроницаемых грунтов заключается в практически мгновенном распространении волны дробления пород от их подошвы к поверхности предельного равновесия. Если эта поверхность находится у кровли глинистых отложений или выше нее, то экран над полостью окажется полностью разрушенным (рис. 4.10). При этом обломочный материал и вышележащие пески могут поступать в карстовые коллекторы

только под действием собственного веса, без дополнительного гидродинамического воздействия. И в данном случае большой пролет полости не является обязательным условием разрушения пласта, как для первой формы обрушения (см. раздел 4.2.1).

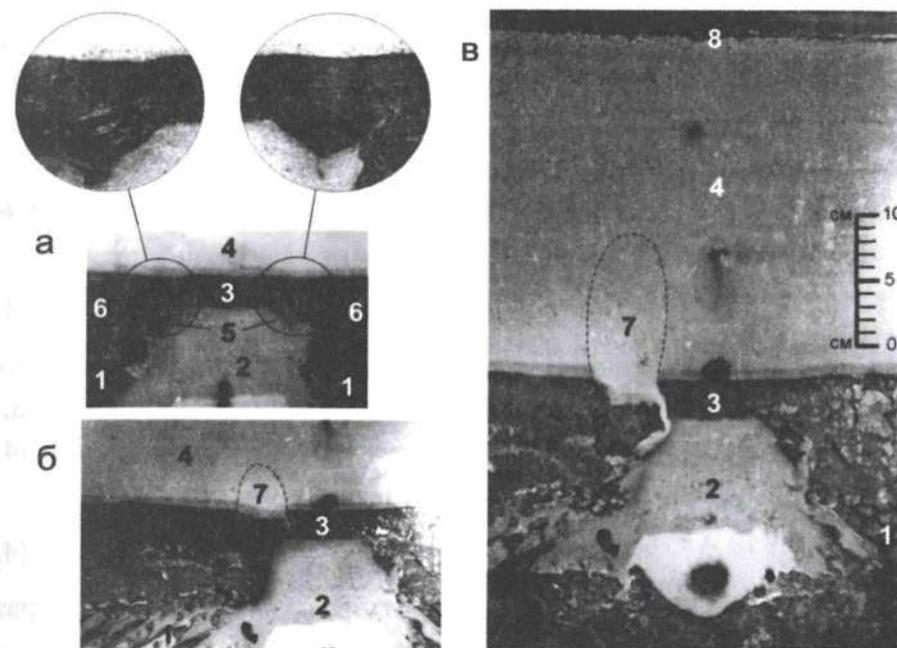


Рис. 4.10. Случайный гидроразрыв экранирующих глин (а) и его последствия (б, в):

- 1 – «закарстованные породы», трещинно-поровое пространство которых служит областью аккумуляции обломочного материала; 2 – зона ослабления массива (палеоврез, древний провал и т.п.);
- 3 – слабопроницаемый пласт; 4 – толщина несвязных грунтов; 5 – полости;
- 6 – участки раздробленных глин; 7 – область разуплотнения песков;
- 8 – дневная поверхность (результаты моделирования методом водонасыщенных эквивалентных материалов)

Впервые обнаруженный в экспериментах в середине 1980-х гг. гидроразрыв был назван случайным (Аникеев, 1987, 1993), чтобы подчеркнуть непреднамеренность дробления, а также отличие характера и условий возникновения этого опасного процесса от растрескивания пород при закачке в них воды или иной жидкости. Анализ достаточно сложного взаимодействия поровой воды и скелета грунтов позволил получить простые зависимости, связывающие величину критической разности напоров

$\Delta H_{кр}$ с мощностью водонасыщенного глинистого слоя m и инженерно-геологическими показателями его свойств – сцеплением (c) и эффективной пористостью (n_e), которая численно равна

$$n_e = (w - w_{mg})\rho_d \approx (w - 2w_g)\rho_d \quad (4.19)$$

Равенство (4.19), в котором w , w_{mg} , w_g , ρ_d – соответственно влажность, максимальная гигроскопическая и гигроскопическая влажность (д.е.) и плотность скелета грунта (г/см^3), справедливо при степени влажности, близкой к единице ($S_r \approx 1$).

Возможность возникновения случайного гидроразрыва записывается в виде простейшего уравнения

$$\Delta H_{кр1} = c/n_e\gamma_w. \quad (4.20)$$

С учетом мощности разделяющего пласта m и исходного положения пьезометрических уровней грунтовых и трещинно-карстовых вод, которое определяется начальной разностью напоров $\Delta H'$, равенство (4.20) приводится к выражению:

$$\Delta H_{кр2} = c/n_e\gamma_w + m - \Delta H'. \quad (4.21)$$

Уравнение (4.21) позволяет оценить возможность полного разрушения экранирующего слоя от подошвы до кровли.

Условия (4.20), (4.21) отражают действительный механизм нарушения устойчивости водоупоров при техногенном изменении гидродинамического режима, обладают достаточной для практических оценок точностью, и значения $\Delta H_{кр}$ могут служить критериями оценки карстово-суффозионной опасности (см. табл. 4.6). Однако, признавая сильную изменчивость строения, состава, состояния и свойств горных пород, мы тем более должны осторожно относиться к таким непостоянным не только в пространстве, но и во времени показателям, как I и ΔH .

4.3.5. Наличие поверхностных форм карста

Самым главным признаком провальной опасности на территории Москвы считается наличие поверхностных карстовых форм (Инструкция ... , 1984). Этот вопрос, несмотря на кажущуюся простоту, до сих пор остается запутанным. Причина заключается в том, что, как отмечалось,

существуют два типа закарстованных территорий, для которых подход к оценке опасности и риска образования провалов принципиально разный. В районах существующей, или реализованной опасности (1-й тип) карстово-суффозионные воронки многочисленны и хорошо выражены в рельефе. В районах ожидаемой (потенциальной, нереализованной) опасности (2-й тип) они отсутствуют или не обнаружены, или зарегистрированы лишь единичные случаи, не позволяющие использовать аппарат математической статистики для прогнозирования процесса.

Для участков 1-го типа все перечисленные в пунктах 4.3.1–4.3.4 признаки, вообще говоря, отходят на второй план. Главным является идентификация поверхностных проявлений карста (Макеев, 1948; Саваренский, Миронов, 1996), которая состоит в определении генезиса воронок, их плотности (4.22), пораженности территории (4.23) и частоты процесса (4.24):

$$K_N = N/S, \quad (4.22)$$

$$K_S = \sum S_s/S = N(S_b)_{cp}/S, \quad (4.23)$$

$$K_T = \lambda^* = N/T. \quad (4.24)$$

Здесь N , S , T – количество, площадь и время образования воронок, $\sum S_s$, $(S_b)_{cp} = \sum S_s/N$ – их суммарная площадь и средняя площадь.

Плотность поверхностных форм карста и пораженность территории устанавливаются по данным полевых обследований местности, анализа топографических карт и дешифрирования материалов аэрокосмической съемки. Обычно они выражаются: K_N – $1/\text{км}^2$, км^{-2} ; K_S – % или $\text{м}^2/\text{км}^2$. Возраст воронок, а значит и время T в (4.24) определяется по результатам полевых и специальных лабораторных исследований. Мерой времени служит 1 год: K_T – $1/\text{год}$, год^{-1} .

Как отмечалось, показателями опасности, которые регламентируются нормативными документами (СП 116.13330.2012 и др.), являются средний диаметр провалов (4.25) и их интенсивность (4.26). В районах реализованной опасности они легко находятся по результатам изысканий из формул (4.22)–(4.24):

$$D_{cp} = (4\sum S_b/\pi N)^{1/2}, \quad (4.25)$$

$$K_{NT} = \lambda = N/ST. \quad (4.26)$$

Из последнего выражения следует, что интенсивность провалообразования λ – это частота, нормированная по площади участка: $\lambda = \lambda^*/S$.

Физический риск потерь земельных угодий, обусловленный возникновением воронок (Природные опасности России, 2003; Рекомендации ... , 2002), можно записать в виде:

$$R_f = \sum S_s/T = N \cdot (S_s)_{cp}/T = \lambda^* \cdot (S_v)_{cp}, \quad (4.27)$$

$$R_f' = R_f/S = \sum S_s/ST = \lambda \cdot (S_v)_{cp}, \quad (4.28)$$

где R_f (м²/год) – полный, а R_f' (м²/км²·год) – удельный риск поражения земной поверхности. Таким образом, критерии опасности и риска (4.25)–(4.28) вторичны, они полностью определены, если известны первичные показатели (4.22)–(4.24).

По значениям среднего диаметра провалов (D_{cp}) различают четыре категории устойчивости (Саваренский, Миронов, 1995; СП 116.13330.2012): А – > 20 м, Б – 10–20 м, В – 3–10 м, Г – < 3 м), а по интенсивности λ (1/год·км² = год⁻¹·км⁻²) – шесть категорий: I – > 1; II – 0,1–1,0; III – 0,05–0,1; IV – 0,01–0,05; V – < 0,01; VI – возможность провалов исключается (табл. 4.7). Очевидно, что последняя, шестая категория не подобна пяти первым и не может стоять в одном с ними ряду (Аникеев, 2016).

Если в верхней части земной коры растворимые отложения отсутствуют, то такие участки мы должны просто исключить из рассмотрения. Если же они присутствуют, а мы, как и при выделении категорий I–V, стоим на стохастических позициях, то тогда надо говорить: возможность провалов практически исключается. При этом подразумевается, что несмотря на все другие неблагоприятные для образования карстово-суффозионных воронок условия и факторы, вероятность проявления карста на поверхности грунтовых массивов, относящихся к категории VI, пусть и крайне малая, но есть. Такие массивы мы вправе считать неопасными, но не должны полностью отрицать возможность появления здесь провалов.

Но главное заключается в том, что ни диаметр D_{cp} , ни интенсивность λ по отдельности не отражают реальную степень провальной опасности закарстованной территории и не могут служить признаками возмож-

ных физических и экономических потерь. Только их совместное действие в виде, например, R_f (4.27) или R_f' (4.28) может быть положено в основу оценки карстово-суффозионной опасности и риска. Этот новый подход к оценке устойчивости закарстованных территорий не исключает, а вбирает в себя достижения инженерной геологии карстовых районов за последние шестьдесят лет. По сути дела, предлагается объединить проверенные временем и хорошо известные изыскателям и строителям категории и представить их в виде единой нелинейной шкалы опасности и риска провалообразования (Аникеев, 2016). Однако этот вопрос, несомненно, требует широкого обсуждения, а возможно, и дополнительных исследований. Поэтому ниже будем придерживаться установившихся норм и правил.

Таблица 4.7

Две общепринятые классификации карстовой (карстово-суффозионной) опасности (а, б), используемые при проектировании и строительстве (по СП 116.13330.2012)

а		б	
Категории устойчивости территории относительно карстовых провалов	Интенсивность провалообразования λ , случаи/км ² ·год	Категории устойчивости территории относительно карстовых провалов	Средние диаметры карстовых провалов D_{cp} , м
I	Свыше 1,0	А	Свыше 20
II	Свыше 0,1 до 1,0	Б	Свыше 10 до 20
III	Свыше 0,05 до 0,1		
IV	Свыше 0,01 до 0,05	В	Свыше 3 до 10
V	До 0,01		
VI	Возможность провалов исключается	Г	До 3

В теории и практике изучения природных рисков принято рассматривать три сценария возможного развития событий – пессимистический, средний и оптимистический, которые отвечают трем категориям опасности на локальном уровне. Эти три категории основных признаков нереализованной опасности, рассмотренные в пунктах 4.3.1 – 4.3.4, определяют общий подход и способы районирования в масштабе 1:5000 и крупнее, схематизации массива, применения тех или иных расчетных моделей процесса и в конечном итоге оценки риска.

4.4. Оценка карстово-суффозионной опасности и риска

Как показывает опыт оценки карстово-суффозионной опасности и риска на участках проектируемого строительства в Москве, процедура такой оценки состоит из четырех основных стадий, или этапов. Первый – это анализ инженерно-геологических условий; второй – районирование территории и схематизации массива в наиболее опасных таксонах; третий – формулировка рабочей гипотезы, разработка сценариев провалообразования и расчет диаметра воронок; четвертый – определение интенсивности процесса и вычисление физического и экономического ущерба. Содержание работ и особенности каждого этапа проще всего и наглядно раскрываются на конкретном примере.

Но прежде, чем перейти к его рассмотрению, заметим, что некоторые из отмеченных выше этапов или отдельные входящие в них работы могут оказаться лишними. Так, например, при однородности инженерно-геологических условий и маленьких размерах участка излишним является его районирование. А при незаинтересованности застройщика в оценке риска необязательным становится определение возможного ущерба.

4.4.1. Анализ инженерно-геологических условий

Участок строительства площадью около 100000 м² расположен на высоком правом берегу р. Москвы в Филях. Проектируемый жилой комплекс состоит из трех связанных между собой зданий – центрального 51-этажного, северного и южного, 36-этажных. Предусмотрено также возведение 2-этажного детского сада и 4-этажной школы (рис. 4.11).

Все здания находятся в пределах поверхности и уступа второй надпойменной, Мневниковской террасы (2-й нпт), абс. отметки которых в настоящее время составляют 130–132 м и 123–129 м соответственно. В отличие от примыкающей к ней на юго-востоке 3-й, Ходынской террасы (рис. 4.12) геоморфологические элементы 2-й нпт выделяются лишь по величине относительных и абсолютных высот, так как их уклон к реке практически одинаков (0,05–0,07).

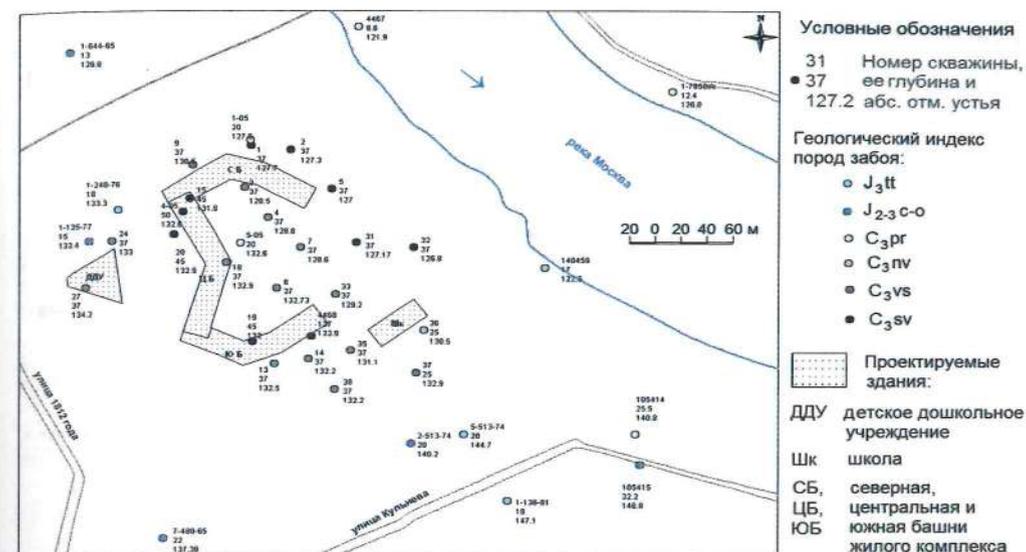


Рис. 4.11. Карта фактического материала

На северо-востоке Мневниковская терраса сочленяется с высокой поймой (рис. 4.12). Поверхность поймы с отметками 120–123 м также плохо выражена, что связано с гидротехническим строительством 1930-х годов и техногенным изменением русла и берега, а также повышением уровня воды в реке на 5 м.

Из сопоставления геоморфологической карты и карты мощности насыпных отложений (рис. 4.12, 4.13) следует, что современный рельеф образовался в результате его неоднократной планировки, которая началась здесь на рубеже XIX–XX вв. в связи с интенсивным фабрично-заводским строительством. Другой важный вывод заключается в том, что современные локальные формы рельефа карстово-суффозионного генезиса на этой территории отсутствуют. Аномальное увеличение мощности насыпных грунтов до 10,2 м вблизи северной башни жилого комплекса (рис. 4.13) приурочено к верховьям засыпанного оврага (рис. 4.12) и объясняется суффозионным выносом песков в р. Москву по ложу проходящей здесь древней промоины (рис. 4.14).

В геологическом строении территории принимают участие современные насыпные и пойменные супесчано-суглинистые накопления мощностью 0,0–10,2 м и 0,0–4,5 м, средне- и верхнечетвертичные аллювиальные преимущественно песчаные отложения мощностью, обычно не

превышающей 9,0 м и 4,6 м соответственно. Четвертичные грунты подстилаются мезозойскими песчано-глинистыми породами 3-х ярусов средней и верхней юры – титонского и нерасчлененных келловейского и оксфордского ярусов (рис. 4.14).

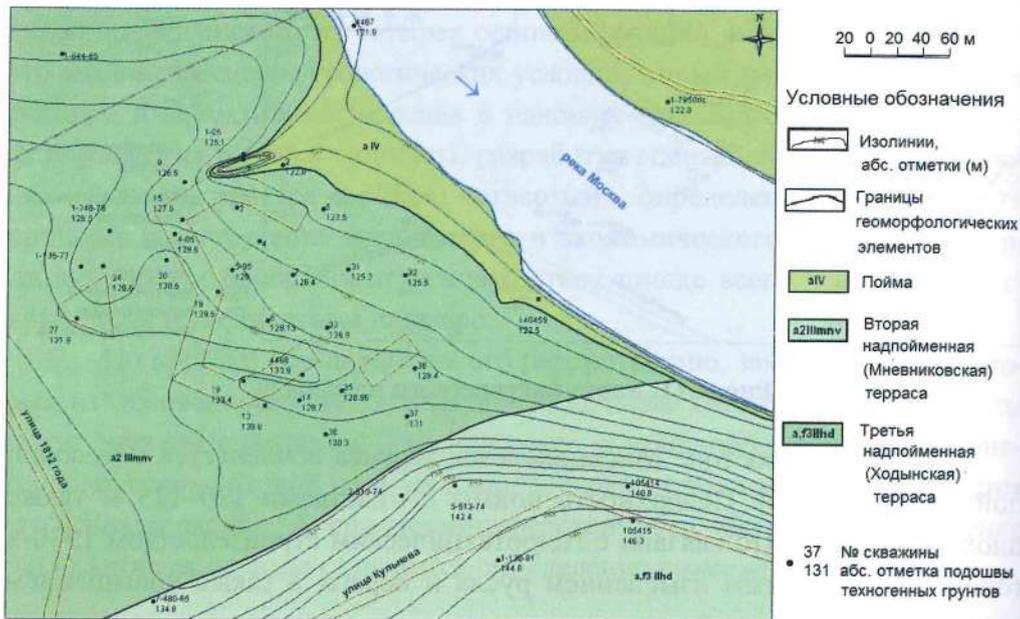


Рис. 4.12. Геоморфологическая карта подошвы техногенных отложений

Отложения титонского яруса мощностью до 13,9 м образуют правый склон доледниковой долины с отметками 132–138 м на юго-западе и юге территории и 118 м вблизи современного русла р. Москвы (рис. 4.14).

В нижней части разреза они представлены глинами, мощность которых может достигать 12,3 м, а в верхней – суглинками, супесями или песками. Келловей-оксфордские глины, мощность которых на площадке составляет 0,9–6,8 м, широкой полосой выходят на древнюю эрозионную поверхность в русле на абс. отметках ≤ 116 м и в прирусловой части палеодолины (116–118 м).

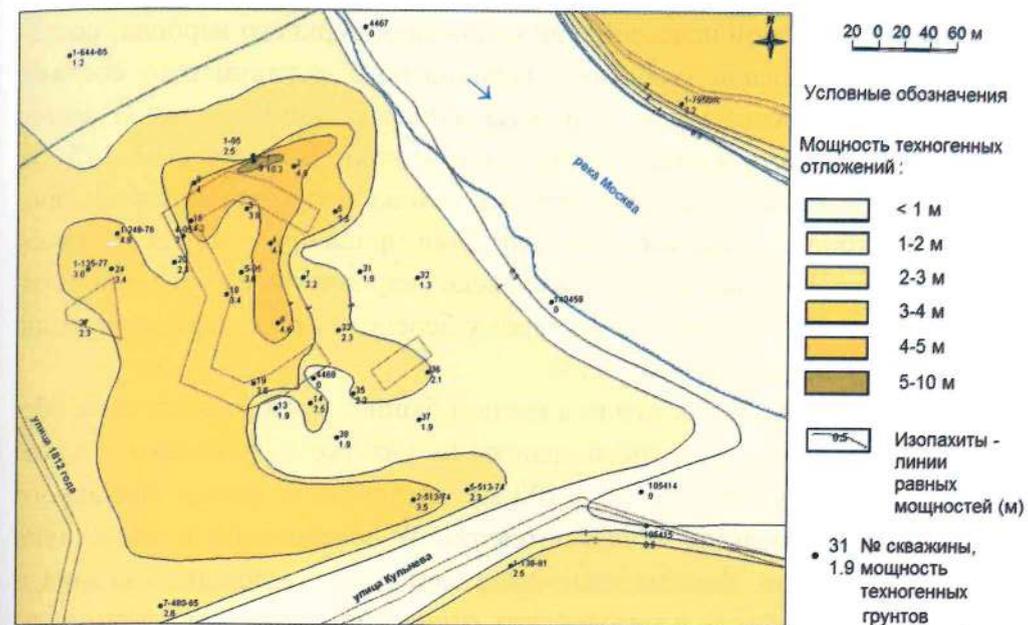


Рис. 4.13. Карта мощности техногенных грунтов

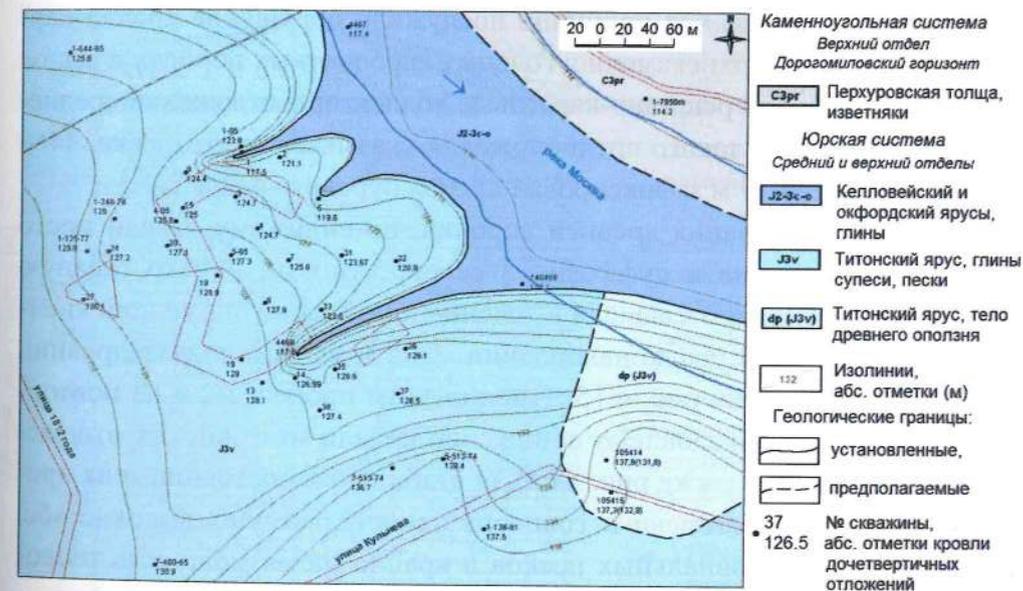


Рис. 4.14. Геологическая карта дочетвертичных отложений с изолиниями кровли

Ниже залегают палеозойские отложения верхнего карбона, состоящие из переслаивающихся толщ карбонатного и глинистого состава. Верхняя перхуровская толща, представленная трещиноватыми и закарстованными известняками, слагает достаточно ровную (111–115 м, рис. 4.15) поверхность с небольшим уклоном на юго-запад в сторону эрозионной ложбины доюрского времени формирования, которая расположена за границами планшета. Перхуровские карбонатные породы подстилают четвертичные отложения по левому берегу реки, где юрские породы полностью эродированы (рис. 4.14).

На рис. 4.15 видно, что под южной башней жилого комплекса абс. отметки кровли перхуровской подсытки на участке с размерами в плане 44×16 м резко падают (111 м → 102 м). В стенках и днище локального понижения палеорельефа обнажаются глины неверовской и известняки ратмировской толщ. Анализ изменения мощности, условий залегания и состояния палеозойских и мезозойских отложений позволяет утверждать, что это – древний провал сложного генезиса, возникший на рубеже палеозоя и мезозоя, когда его глубина составляла примерно 10 м, а ширина – 20–24 м (рис. 4.16).

Представляется, что причиной послужило обрушение кровли карстовых полостей в верхнекаменноугольных карбонатных породах и вынос разрушенных глин в трещинно-карстовые коллекторы отложений среднего карбона. В пользу такого предположения указывает то, что в скв. 4468 на отметках 49,2–48,9 м зафиксирован провал бурового снаряда.

После образования древней воронки, по-видимому, имели место процессы растворения и суффозии в ее окрестности, однако главную роль играла эрозия, протекавшая в течение длительной эпохи континентального перерыва в осадконакоплении. Она и сформировала древний рельеф, показанный на рис. 4.15. Именно этим процессом, а не повторными просадками обусловлено понижение кровли мезозойских отложений на рис. 4.16 (см. также рис. 4.14). О стабильном состоянии тела провала в течение плейстоцена и голоцена свидетельствуют высокие абс. отметки кровли аллювиальных песков и крайне малая мощность техногенных грунтов.

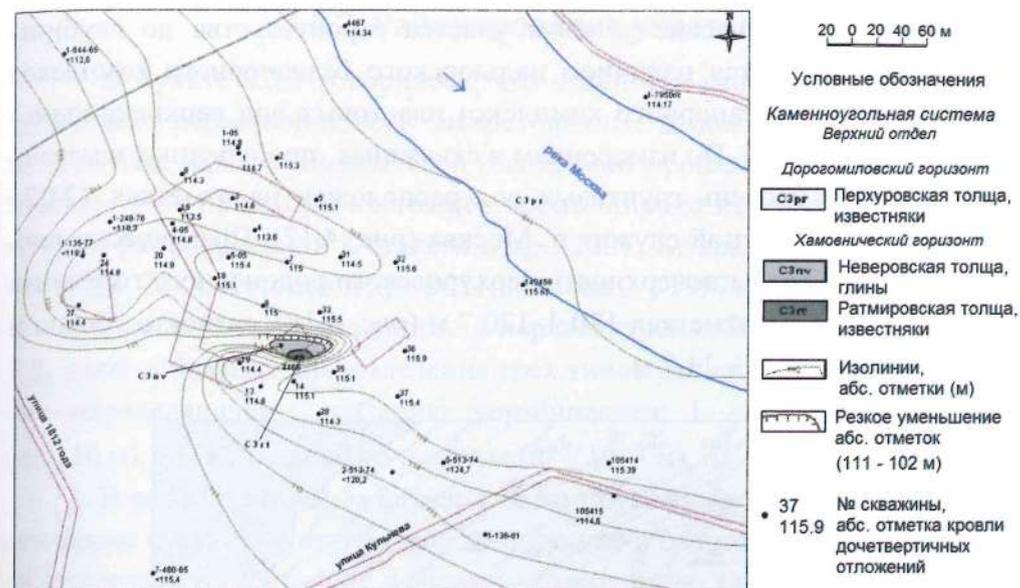


Рис. 4.15. Геологическая карта каменноугольных отложений с изолиниями кровли

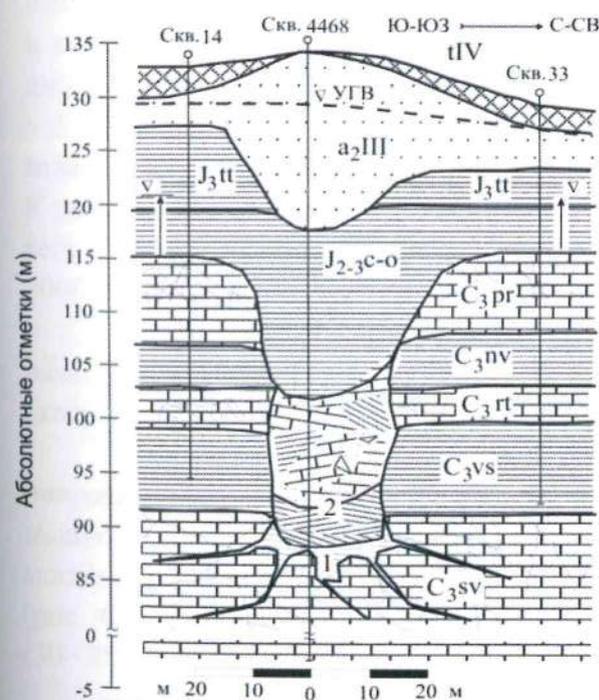


Рис. 4.16. Строение древнего карстового провала под южной башней жилого комплекса: tIV – насыщенные грунты; a₂III – верхнечетвертичные аллювиальные пески второй надпойменной террасы; J₃tt, J_{2-3c-o} – глины титонского и нерасчлененных келловейского и оксфордского ярусов верхней и средней юры; C₃pr, C₃rt, C₃sv – перхуровская, ратмировская и суворовская карбонатные толщи верхнего карбона; C₃nv, C₃vs – верхнекаменноугольные неверовская и воскресенская глинистые толщи; 1 – ослабленный участок растворимых пород, 2 – тело древнего провала. УГВ – уровень грунтовых вод, стрелками показан напор перхуровского водоносного пласта; Скв. 14 – скважина и ее номер

Гидрогеологические условия участка строительства до глубины 35–45 м определяются наличием надбюрского безнапорного комплекса (грунтовых вод) и напорного комплекса пластовых вод верхнекаменноугольных отложений. По измерениям в скважинах, пробуренных в марте–апреле 2007 г., уровень грунтовых вод расположен на отметках 124,7–131,9 м, главной дренажной служит р. Москва (рис. 4.17). Практически ровная пьезометрическая поверхность перхуровского водоносного горизонта устанавливается на отметках 120,4–120,7 м (рис. 4.18), разность уровня и напора составляет 4,3–11,2 м.

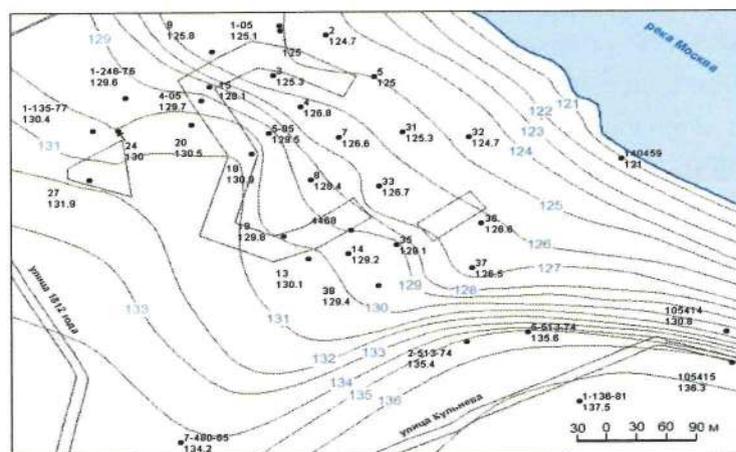


Рис. 4.17. Карта гидроизогипс комплекса грунтовых вод

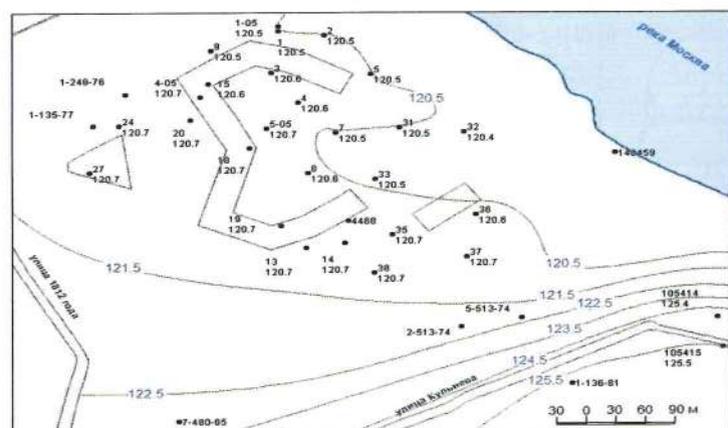


Рис. 4.18. Карта гидроизопьез перхуровского водоносного горизонта

4.4.2. Районирование участка

В пункте 4.3.3 говорилось, что мощность глинистого пласта, разделяющего нерастворимые и закарстованные отложения, служит одним из наиболее важных показателей ожидаемой провальной опасности. Для Москвы этот признак в настоящее время широко используется при оценочном районировании (Аникеев и др., 2007; Козлякова и др., 2000; Кочев и др., 2018; Кутепов и др., 2011; Москва ... , 1997).

Значения m , приведенные в первых строках 2-го столбца таблицы 4.5, дают основания для выделения трех типов районов по мощности глин как определяющему критерию устойчивости: I – неопасные районы ($m \geq 10$ м), II – потенциально-опасные ($m = 10-3$ м), III – опасные ($m < 3$ м).

В рассматриваемом случае к экранирующим грунтам следует отнести также глинистые отложения, залегающие в основании титонского яруса, поскольку их состояние и физико-механические характеристики близки к тем, которыми характеризуются келловей-оксфордские глины. Вместе же они составляют единый пласт в большей части территории (рис. 4.14).

На рис. 4.19 видно, что суммарная мощность глин (0–16 м) уменьшается в СВ направлении. Очевидно, что это обусловлено доледниковой и современной речной эрозией, которая значительно переработала древний рельеф изучаемой территории.

Не менее, а может быть, и более важным критерием провалообразования служит состояние растворимых отложений (см. пункт 4.3.1). К сожалению, при районировании всей территории Москвы этот показатель в настоящее время учитывается только качественно (Козлякова и др., 2000; Кутепов и др., 2011; Москва ... , 1997; Осипов, 2011).

Не в последнюю очередь это обусловлено объективными причинами: чем больше изучаемая территория, тем меньше плотность глубоких скважин и разнороднее получаемая по ним информация.

В соответствии со сказанным в пункте 4.3.1 вторым признаком районирования служило состояние верхней пачки известняков. По отношению мощности прослоев сильнотрещиноватых и закарстованных пород к общей мощности перхуровской толщи выделяются три типа подрайонов (рис. 4.20): А – слабо нарушенных пород (0–30%), В – средней степени (30–70%) и С – сильно разрушенных перхуровских известняков (70–100%).

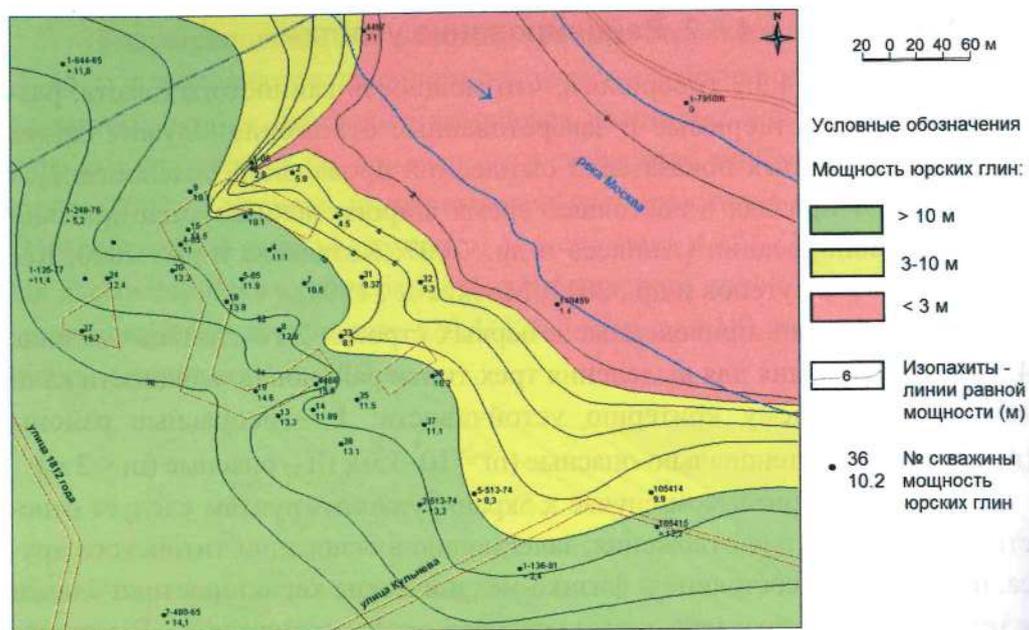


Рис. 4.19. Карта суммарной мощности юрских глин

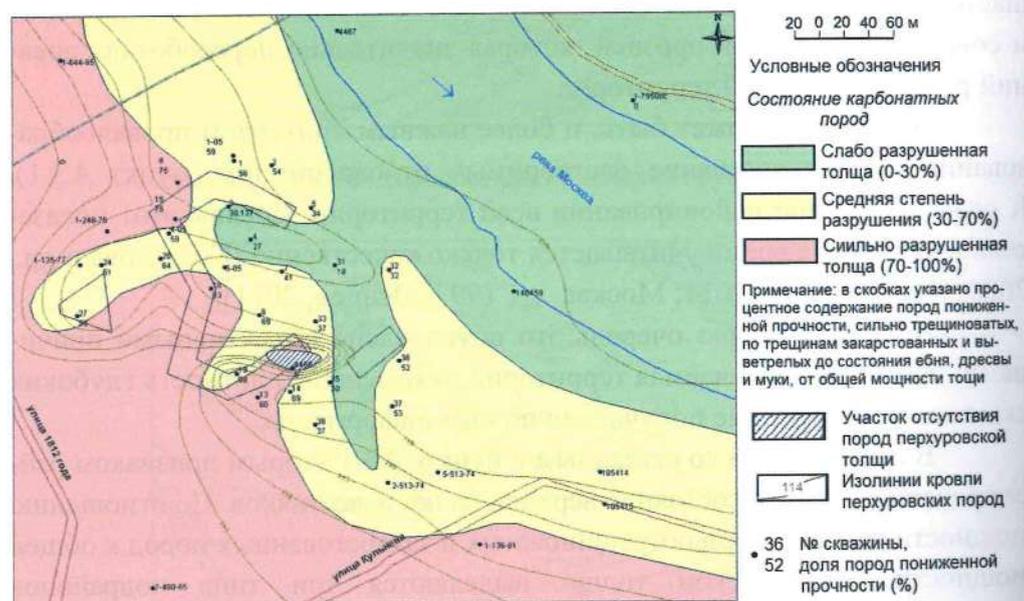


Рис. 4.20. Карта состояния карбонатных пород перхуровской подсвиты

Анализ отображения этого признака на карте показывает (рис. 4.20), что его изменение имеет знак, противоположный знаку изменения первого признака провальной опасности (рис. 4.19). Это говорит о том, что здесь главную роль в формировании инженерно-геологических особенностей карбонатных пород играл доюрский, а не доледниковый эрозионный процесс.

На рис. 4.21 видно, что при движении вправо по строкам и вниз по столбцам легенды к карте районирования карстово-суффозионная опасность увеличивается. Из 9 максимально возможных сочетаний таксонов встречены только семь подрайонов. Наибольшая часть всех проектируемых зданий находится в неопасном районе категории I. Древний провал под южной башней, как следует из анализа динамики его развития (см. рис. 4.16), находится в устойчивом состоянии последние 1,6 млн лет и в настоящее время надежно бронирован мощной (15,5 м) толщей юрских глин. Причем общая мощность покровной толщи достаточно велика: 32 м (см. табл. 4.4).

В районе II наиболее благоприятен для строительства таксон II-A. Причем тот подрайон II-A, в который попадает СВ угол школы и Ю край северной башни следует признать неопасным (рис. 4.21). Действительно, мощность глин здесь вблизи проектируемых зданий составляет 8–10 м (рис. 4.19), то есть ненамного отличается от их мощности в районе I категории, а степень закарстованности известняков минимальная. Градиенты вертикальной фильтрации, вычисленные по данным картографического моделирования (рис. 4.17–4.19), не превышают значений $I = 0,5-0,7$. Поэтому гидродинамическое давление не способно вызвать фильтрационный выпор глин с достаточно высокими физико-механическими характеристиками даже при наличии открытых полостей в известняках.

И уж тем более это невозможно, если таких полостей не обнаружено. Следует также добавить, что мощность перхуровской толщи во всех подрайонах II-A невелика – 6,6–7,8 м, поэтому даже в случае разрушения вышележащих отложений трещинно-поровое пространство известняков окажется закольматированным, и процесс не выйдет на земную поверхность (см. п. 4.3.2).

Таким образом, практический интерес представляют подрайон II-B, в пределах которого находится почти вся северная башня, и расположенный рядом подрайон III-B, который характеризуется наибольшей опасностью появления провалов на земной поверхности (рис. 4.21, б). Для

последнего таксона необходимо выполнить анализ риска потерь земельных угодий. Оценку экономического риска для жилого комплекса в подрайоне II-B следует дать с учетом изменения существующих условий в ходе строительства.

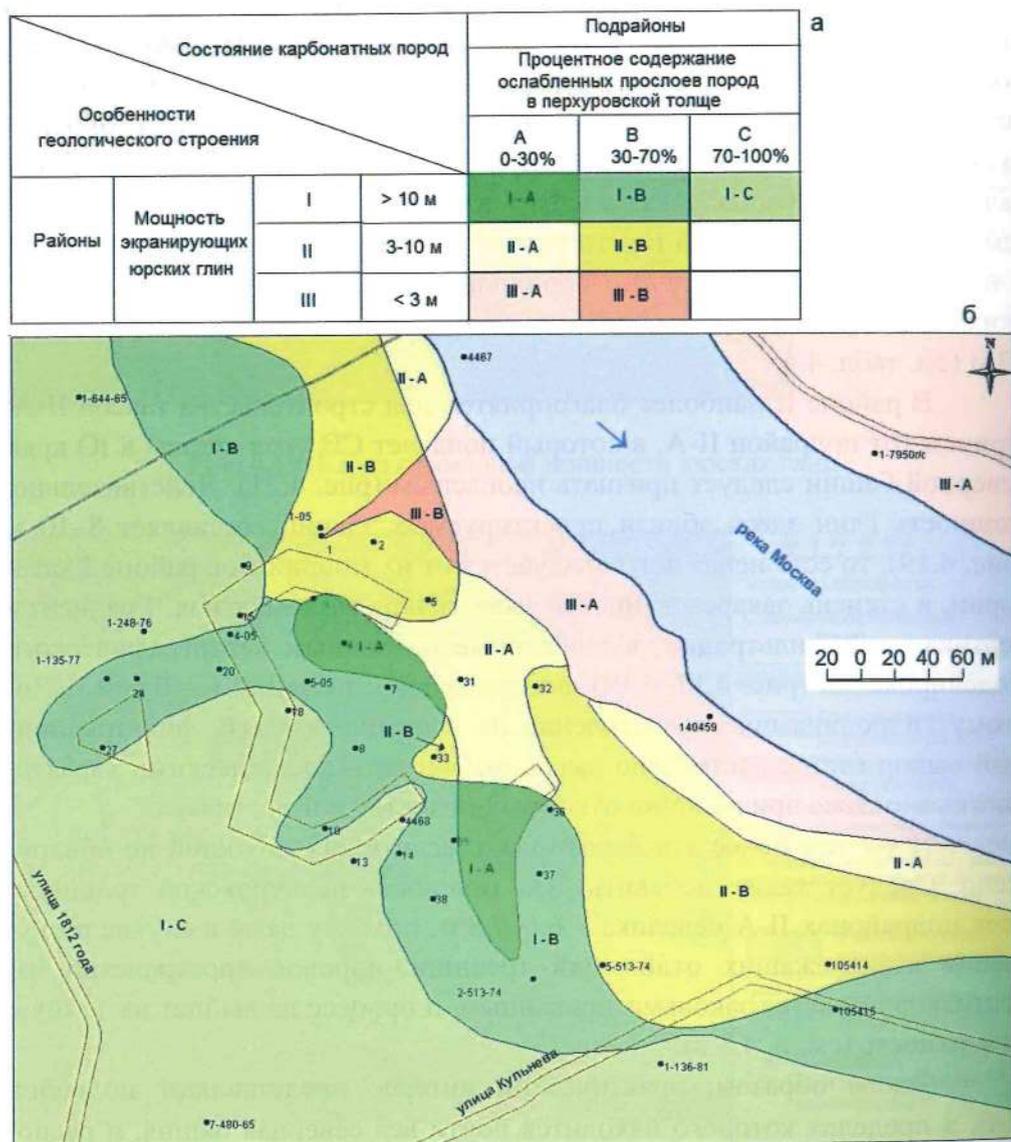


Рис. 4.21. Легенда (а) и карта (б) инженерно-геологического районирования по степени карстово-суффозионной опасности

4.4.3. Расчет диаметра возможных провалов

Поскольку на участке строительства и вблизи него современные карстово-суффозионные воронки отсутствуют (см. п. 4.4.1), единственным способом определения их диаметра является расчетный. На рис. 4.22, а показано схематическое строение массива в подрайоне III-B, отражающее разрез ближайших к нему скважин 1-05, 1, 2 и площадное изменение геологических и гидрогеологических условий на картах (см. рис. 4.12–4.15, 4.17–4.19). Рабочая гипотеза формулируется следующим образом (рис. 4.22, б, в).

При критических значениях ширины ослабленного участка в подошве глин, образовавшегося, например, в результате выноса элювия еС₃ (рис. 4.22, а), устойчивость экранирующего слоя нарушается. Происходить это может в результате смещения глинистых грунтов по круглоцилиндрической поверхности (рис. 4.22, б) или обрушения свода, высота которого не меньше мощности экрана m (рис. 4.22, в). В первом случае, как показано в подразделе 2.1, весомый грунтовый цилиндр 1 испытывает давление от веса свода 2, во втором – блоки, консольно-зависающие над сводообразным вывалом 3, неустойчивы.

Учитывая достаточно высокую плотность аллювиальных песков и их небольшую мощность, а также отсутствие крупных открытых полостей, полагаем, что реализуется первая форма их движения. По сути дела, она состоит в последовательном, снизу вверх, образовании сводчатых структур в границах трубообразного канала (рис. 4.22, б, в). Техногенные грунты в силу их малой прочности не могут противостоять обрушению и выполняют функцию пригрузки. Поэтому цилиндрический канал беспрепятственно достигает земной поверхности, после чего на ней появляется воронка с первоначальным диаметром D_1 , примерно равным критическому диаметру D полости. Поскольку механизм процесса определяется поведением юрских глин и аллювиальных песков, считаем покровную толщу двухслойной (рис. 4.22, б, в).

В первом сценарии провалообразования (рис. 4.22, б) давление на кровлю глин может быть разным в зависимости от относительной мощности верхнего слоя h/D . Этот эффект обусловлен процессом самоорганизации массива пород, о котором говорилось в пункте 4.2.3. Однако заранее диаметр полости мы не знаем, модель Бирбаумера (среза) как раз и направлена на его определение.

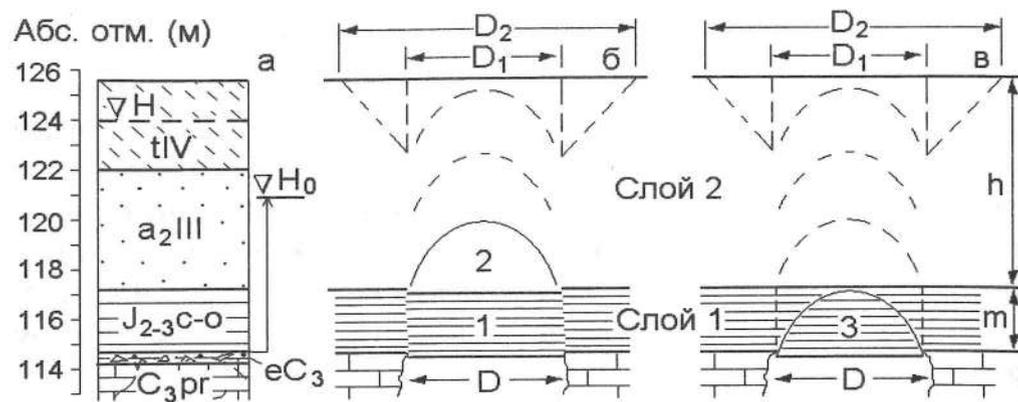


Рис. 4.22. Строение массива пород в подрайоне III-B (а) и сценарии возможного образования провалов (б, в):

eC_3 – элювий карбонатных пород, H, H_0 – уровни грунтовых и трещинно-карстовых вод, 1 – цилиндрический блок, 2, 3 – своды обрушения в песках и глинах, D_1, D_2 – диаметр свежей воронки на земной поверхности и ее диаметр после осыпания и обрушения бортов. Тонкие пунктирные линии показывают развитие поверхностей смещения. Остальные обозначения см. на рис. 4.16

Поэтому считаем сначала, что мощность четвертичных отложений больше высоты зоны разгрузки напряжений: $h > b_2 = D/2\text{tg}(\varphi_2/2)$, и давление на глины определяется формулой (4.15). Если окажется, что это не так, то переходим к условию (4.14), а если и оно не отражает действительность, то – к условию (4.13).

При $h > b_2 = D/2\text{tg}(\varphi_2/2)$ диаметр $D_1 = D$ можно найти, воспользовавшись готовым решением (4.3) из подраздела 2.1. Для удобства приведем его еще раз в виде:

$$D_1 = D = 2Gm[(1 + 2(\gamma_1 * m \text{tg} \varphi_1 \xi_1 + 2c) \text{tg} \varphi_2 / \gamma_2' G^2 m)^{0.5} - 1]. \quad (4.29)$$

Напомним, что $G = (\gamma_1 * \text{tg} \varphi_2 - \gamma_2' \text{tg} \varphi_1 \xi_1) / \gamma_2'$, $\gamma^* = \gamma' + \gamma_w I$ – объемный вес грунта с учетом гидродинамического давления, $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)$ – вес взвешенного в воде грунта ($I = \Delta H / m$ – градиент давления, $\gamma_w \approx 10 \text{ кН/м}^3$ – вес воды). Нижний индекс «1» указывает на принадлежность к нижнему компетентному слою, а «2» – к вышележащим пескам.

В табл. 4.8 приведены результаты вычислений по формуле (4.29). Двухметровая мощность водоупора m и трехметровая разность уровней грунтовых и трещинно-карстовых вод ΔH наблюдаются в подрайоне III-B

вблизи участка строительства (рис. 4.17–4.19), максимальная мощность глин $m = 3 \text{ м}$ характеризует границу районов II и III около северной башни (рис. 4.21). Остальные расчетные показатели, указанные в таблице, приводятся по результатам инженерно-геологических изысканий.

Видно (табл. 4.8), что $h < b_2$ при любой мощности глин, и наша исходная предпосылка ($h > b_2 = D/2\text{tg}(\varphi_2/2)$) неправомерна. Тогда в соответствии с условием (4.14) принимаем, что $D/4\xi_2\text{tg}\varphi_2 \leq h \leq D/2\text{tg}(\varphi_2/2)$ и $\sigma_{св} = \sigma_z = \gamma_2'R/4\xi_2\text{tg}\varphi_2$.

В этом случае диаметр воронки находим из уравнения равновесия (4.1), подставляя в него $\sigma_{св} = \gamma_2'R/4\xi_2\text{tg}\varphi_2$. Запишем решение полученного при этом квадратного уравнения в виде, аналогичном решению (4.29):

$$D = 2Gm[(1 + 2(\gamma_1 * m \xi_1 \text{tg} \varphi_1 + 2c) 2\xi_2 \text{tg} \varphi_2 / \gamma_2' G^2 m)^{0.5} - 1], \quad (4.30)$$

где $G = (\gamma_1 * 2\xi_2 \text{tg} \varphi_2 - \gamma_2' \text{tg} \varphi_1 \xi_1) / \gamma_2'$.

Результаты вычислений приведены в табл. 4.9. Они показывают, что для минимальной мощности глин $m_{\text{min}} = 2 \text{ м}$ допущение $h_{\text{кр}2} \leq h \leq h_{\text{кр}3}$ вполне корректно, а значит, $D_1 = 6,3 \text{ м}$. Но при $m_{\text{max}} = 3 \text{ м}$ $D_1 \neq 8,0 \text{ м}$, так как h заметно меньше $h_{\text{кр}2}$.

В этом случае ($h < h_{\text{ур}2}$) согласно выражению (4.13) для определения диаметра вполне пригодна классическая модель Бирбаумера, о которой говорилось в подразделе 2.3. Пренебрегая для простоты увеличением объемного веса песков в зоне азрации, запишем суммарные сдвигающую F и удерживающую N силы:

$$F = \pi D^2 (\gamma_2' h + \gamma_1 * m) / 4, \quad (4.31)$$

$$N = \pi D (\gamma_2' h^2 \xi_2 \text{tg} \varphi_2 / 2 + \gamma_1 * m^2 \xi_1 \text{tg} \varphi_1 / 2 + mc). \quad (4.32)$$

Равенство этих уравнений дает:

$$D = 2(\gamma_2' h^2 \xi_2 \text{tg} \varphi_2 + \gamma_1 * m^2 \xi_1 \text{tg} \varphi_1 + 2mc) / (\gamma_2' h + \gamma_1 * m). \quad (4.33)$$

Поскольку все входящие в (4.33) параметры ничем не отличаются от тех, что использовались выше, в таблице 4.10 приведен лишь конечный результат. Видно, что, несмотря на уменьшение значений D и $h_{\text{кр}}$ в последней строке таблицы 4.10 по сравнению с той же строкой таблицы 4.9 условие $h < h_{\text{кр}2}$ выполняется, следовательно, решение для случая $m_{\text{max}} = 3 \text{ м}$ верно.

Диаметр возможного провала $D_1 = D$ в подрайоне III-B, полученный с учетом гидродинамического воздействия по расчетной модели (4.29)

Расчетные характеристики грунтов экранирующего слоя (1) мощностью m и песчаной толщи (2) мощностью h										Диаметр полости и критические значения мощности песков (м)		
$m, м$	$h, м$	$\Delta H, м$	$\gamma_{s1}, кН/м^3$	n_1	$\varphi_1, град$	$c, кПа$	$\gamma_{s2}, кН/м^3$	n_2	$\varphi_2, град$	$D, м$	$h_{кр2} = D/4(\xi tg\varphi)_2$	$h_{кр3} = b_2 = D/2tg(\varphi_2/2)$
2	9,5	3	27,4	0,56	17	58	26,5	0,38	32	7,2	9,3	12,5
3	8,5	3	27,4	0,56	17	58	26,5	0,38	32	9,1	11,9	15,9

Примечание. C – сцепление глин; γ_s, n, φ – плотность минеральной части, пористость и угол внутреннего трения грунтов; ΔH – разность напоров подземных вод; $h_{кр2} = D/4(\xi tg\varphi)_2$ – мощность, вблизи которой механизм процесса резко меняется; $h_{кр3} = b_2$ – мощность, равная высоте зоны разгрузки напряжений; ξ – коэффициент бокового давления.

Диаметр провала $D_1 = D$ в подрайоне III-B, полученный по уравнению (4.30)

Расчетные характеристики грунтов экранирующего слоя (1) мощностью m и песчаной толщи (2) мощностью h										Диаметр полости и критические значения мощности песков (м)		
$m, м$	$h, м$	$\Delta H, м$	$\gamma_{s1}, кН/м^3$	n_1	$\varphi_1, град$	$c, кПа$	$\gamma_{s2}, кН/м^3$	n_2	$\varphi_2, град$	$D, м$	$h_{кр2} = D/4(\xi tg\varphi)_2$	$h_{кр3} = b_2 = D/2tg(\varphi_2/2)$
2	9,5	3	27,4	0,56	17	58	26,5	0,38	32	6,3	8,2	11,0
3	8,5	3	27,4	0,56	17	58	26,5	0,38	32	8,0	10,5	14,0

Таблица 4.10

Результаты определения диаметра провалов в подрайоне III-B, полученные с использованием модели среза экранирующего слоя методом последовательных приближений

Мощности глинистого m и песчаного h слоев и номер расчетной зависимости			Диаметр полости D и провала D ₁ = D (м)		Критические значения мощности песков (м)	
m (м)	h (м)	№	D	Средний D _{ср}	h _{кр2} = D/4(ξtgφ) ₂	h _{кр3} = b ₂ = D/2tg(φ ₂ /2)
2	9,5	(30)	6,3	6,8	8,2	11,0
3	8,5	(33)	7,4		9,6	12,9

Таким образом, под действием собственного веса пород и перетекания грунтовых вод диаметр карстово-суффозионных воронок, образование которых возможно в наиболее опасном подрайоне III-B, лежит в пределах 6,3–7,4 м, среднее значение составляет 6,8 м (табл. 4.10). В соответствии с нормативными документами [СП 116.13330.2012 и др.] устойчивость этого подрайона по значениям диаметра провала, полученным с помощью различных модификаций модели среза, относится к категории В (D_{ср} = 3–10 м, см. табл. 4.7).

Для вычисления D₁ по второму сценарию (рис. 4.22, в) воспользуемся моделью (4.5), рассмотренной в подразделе 2.1 и повторно записанной ниже:

$$D_1 \approx D = 2m \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 + c/\sigma_z), \quad (4.34)$$

где $\sigma_z = \gamma_2(h + m - H) + \gamma_2'(H - m) + \gamma_1^*m$, γ_2 – вес влажного песка ниже уровня H (рис. 4.22, а). Будем, как и раньше, считать, что увеличение веса песка в зоне аэрации в силу ее небольшой мощности не изменит кардинально значения $D_1 \approx D$. Иначе говоря, принимаем, что $\sigma_z \approx \gamma_2'h + \gamma_1^*m$. Однако зависимость (4.34) не учитывает увеличения σ_z на кромках карстовой полости, которое, как отмечалось в пункте 4.2.3, может инициировать процесс образования провалов.

Вслед за М.М. Протодяконовым (1933) введем понятие угла «крепости», или лучше – приведенного угла трения связных пород, аналогичного углу Амонтона для несвязных грунтов:

$$\psi = \operatorname{arctg}(\tau/\sigma_z) = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\varphi_1 + c/\sigma_z). \quad (4.35)$$

При этом средневзвешенное значение угла трения для схематизированной покровной толщи, показанной на рис. 4.22 (б, в), составит:

$$\varphi_{срв} = (\varphi_2h + \psi m)/(h + m). \quad (4.36)$$

Теперь мы вправе оценить концентрацию напряжений по формуле (4.16), заменив угол трения на его средневзвешенное значение $\varphi_{срв}$:

$$K_z = 1 + 2(h - b_2)\operatorname{tg}(\varphi_{срв}/2)\sin(\varphi_{срв}/2)/(\varphi_{срв}h), \quad (4.37)$$

где $b_2 = D/2\operatorname{tg}(\varphi_{срв}/2)$ – высота зоны разгрузки напряжений, и переписать расчетную модель (4.34) в виде:

$$D_1 \approx D = 2m \cdot (\operatorname{tg}\varphi_1 + c/K_z\sigma_z). \quad (4.38)$$

Заметим, что введение углов (4.35), (4.36) понадобилось только потому, что рассматриваемый механизм образования окна в водоупоре не позволяет считать цилиндрический блок глины над полостью жестким. И в данном случае зона разгрузки в отличие от первого сценария ($h_{кр3} = b_2$, табл. 4.8–4.10) начинается не от кровли разделяющего пласта, а от кромок карстовой полости.

Подставляя (4.37) в (4.38) приходим к довольно громоздкому квадратному уравнению, которое можно представить следующим образом:

$$D^2E - 2D(1 + EF + EG) + 4(F + EFG + mc/\sigma_z) = 0, \quad (4.39)$$

где $E = 2\sin(\varphi_{срв}/2)/(\varphi_{срв}h')$; $F = m\operatorname{tg}\varphi_1$; $G = h'\operatorname{tg}(\varphi_{срв}/2)$. В этих обозначениях $h' = h + m$. Уравнение (4.39) с учетом механики процесса имеет единственное решение:

$$D = \{(1 + EF + EG) - [(1 + EF + EG)^2 - 4E(EFG + F + mc/\sigma_z)]^{0.5}\}/E. \quad (4.40)$$

Причем коэффициент концентрации в принятых выше обозначениях записывается в виде:

$$K_z = 1 + EG - DE/2.$$

Результаты расчетов, приведенные в табл. 4.11, показывают, что, как и в первом случае (табл. 4.10), главным фактором, влияющим на размер провалов, является мощность разделяющего слоя, что еще раз свиде-

Результаты определения диаметра провалов в подрайоне III-B, полученные на основании модели Протодяконова с учетом силового воздействия подземных вод

Номер уравнения, мощность глин и песков		Новые расчетные характеристики					Диаметр полости D и провала D ₁ = D	
№	m (м)	h (м)	ψ (град.)	φ _{срв} (град)	b ₂ (м)	K _z	D (м)	D _{ср} (м)
(34)	2	9,5	35,5	32,6	0	1	2,9	3,6
	3	8,5	35,8	33,0			4,3	
(38), (40)	2	9,5	35,5	32,6	4,5	1,18	2,6	3,3
	3	8,5	35,8	33,0	6,9	1,12	4,1	

Примечание. ψ – приведенный угол трения глин, φ_{срв} – средневзвешенное значение угла трения всей покровной толщи, b₂ – высота зоны разгрузки напряжений, K_z – коэффициент концентрации вертикальных напряжений на кромках карстовой полости.

4.4.4. Вычисление ущерба

Из формул (4.27), (4.28) пункта 4.3.5 следует, что физический ущерб в результате потери земельных угодий известен, если установлен средний диаметр воронок и определена интенсивность (частота) провалообразования. Причем по отношению к частоте (среднестатистической вероятности провалообразования) в отличие от диаметра воронок (силы их воздействия на окружающую среду) смысл понятий «безопасный» и «устойчивый» совпадает. Весь вопрос в том, как оценить величину λ для районов нереализованной опасности. Сделать это можно, если признать, что первичным вероятностным показателем служит не интенсивность λ, а частота процесса λ* = N/T, не привязанная к площади конкретного района, участка или сооружения [Аникеев, 2016].

Например, в Москве, если придерживаться Рекомендаций (2002), за 30 лет наблюдений зафиксировано появление 42 воронок, и частота равна λ* = 42/30 = 1,4 год⁻¹ несмотря на то, что все эти воронки и образовались на северо-западе города. Принимая λ* = 1,4 год⁻¹ = const и учитывая, что λ* = λS, получим для опасного района Москвы, площадь которого по данным последнего крупномасштабного картографирования территории города составляет S₁ = 10,8 км² (1 %) (Кутепов и др., 2011; Осипов, 2011), значение λ₁ = λ*/S₁ = 0,1295 км⁻²год⁻¹. Для потенциально опасных

тальствует о важности этого критерия и необходимости его учета при оценке риска. По средним значениям D₁, полученным с помощью (4.34), (4.40), подрайон III-B также относится к категории В (D = 3–10 м). Однако при тех же самых инженерно-геологических характеристиках массива вторая модель (табл. 4.11) дает в два раза меньшие значения диаметра, чем первая (табл. 4.10).

Видно также, что с увеличением K_z диаметр провала уменьшается. Разница в значениях D₁, полученных с помощью уравнений (4.34) и (4.38) ≡ (4.40) не превышает 0,3 м (табл. 4.11). В других условиях и, в частности, при (h + m) >> b₂ она может оказаться существенной, но главное не это.

Здесь мы сталкиваемся с очень важным вопросом, который можно сформулировать так: увеличивается или уменьшается карстово-суффозионная опасность с ростом вертикальных напряжений? Или: какой сценарий провалообразования опасней – первый или второй?

Если следовать предписаниям нормативных и методических документов, то модель Бирбаумера предсказывает большую опасность, чем модель Протодяконова, а концентрация напряжений на кромках карстовой полости уменьшает ее. На самом деле все ровным счетом наоборот. По первой расчетной схеме экранирующий слой сохранит устойчивость над карстовой полостью с пролетом D = 6-7 м (табл. 4.10), а по второй – разрушится уже при D ≈ 3,5 м (табл. 4.11). Здесь необходимо принимать во внимание и то, что малые полости в массиве встречаются намного чаще, чем большие, и то, что в иных инженерно-геологических условиях может реализоваться вторая форма движения песков и, следовательно, диаметр свежей воронки D_в = D₁ > D.

Затронутая выше проблема требует, по крайней мере, осмысления и изменения существующих формулировок (см. табл. 4.7). Сейчас же констатируем лишь тот факт, что по отношению к одному из двух главных показателей опасности – диаметру провалов – понятия «опасность» и «неустойчивость» синонимами не являются, и далее будем придерживаться буквы нормативно-методических документов. При этом к средним значениям (D_в)_{ср} = 6,8 м, (D_в)_{ср} = 3,6 м, приведенным в таблицах 4.10, 4.11, следует отнести как к показателям, характеризующим соответственно наихудший (пессимистический) и наилучший (оптимистический) сценарии развития процесса.

районов общей площадью $S_2 = 173,0 \text{ км}^2$ (16 %) (Кутепов и др., 2011; Осипов, 2011), к которым относится и рассматриваемый участок, оно в 16 раз меньше: $\lambda_2 = \lambda^*/S_2 = 0,0081 \text{ км}^{-2}\text{год}^{-1}$. В неопасных районах площадью $S_2 = 897,2 \text{ км}^2$ (83 % площади города без учета площади Новой Москвы) провалы не исключаются, просто их интенсивность крайне мала: $\lambda_3 = \lambda^*/S_3 = 0,0016 \text{ км}^{-2}\text{год}^{-1}$ (см. пункт 4.3.5).

В настоящее время для оценки геологического риска в Москве разными организациями и специалистами широко используется методика, изложенная в Рекомендациях (2002). При этом нередко в качестве расчетных значений плотности карстово-суффозионных воронок и интенсивности их образования принимаются значения, приведенные в Примере 2 этих Рекомендаций (2002, с. 49–52): $N/S = 0,042 \text{ случаев/км}^2$, $\lambda = 0,0014 \text{ случаев/км}^2\text{год}$. Однако последнее значение получено для площади практически всей Москвы ($S \approx 1000 \text{ км}^2$) и по сути дела характеризуют лишь неопасные в провальном отношении районы.

Поскольку интересующий нас подрайон III-B, как и весь участок, расположен на площади потенциально опасных районов Москвы, то $\lambda = \lambda_2 = 0,0081 \text{ км}^{-2}\text{год}^{-1}$. И по этому показателю опасности согласно СП 116.13330.2012 он относится к категории V – относительно устойчивой территории, а с учетом значений $D_{\text{ср}}$, полученных в подразделе 4.3, – к обобщенной категории V-B (см. табл. 4.7). При этом величина удельного физического риска может быть найдена из формулы (4.28) пункта 4.3.5. Запишем ее еще раз в виде:

$$R_f' = \pi \cdot D_{\text{ср}}^2 \cdot \lambda / 4, \quad (4.41)$$

Обычно рассчитываются максимальное и среднее значения риска (Природные опасности России, 2003; Рекомендации..., 2002), а мы оценим пределы его изменения. Подставляя в (4.41) установленные выше значения $(D_{\text{ср}})_{\text{min}} = 3,6 \text{ м}$, $(D_{\text{ср}})_{\text{max}} = 6,8 \text{ м}$, получаем: $(R_f')_{\text{min}} = 0,082 \text{ м}^2/\text{км}^2\text{год}$, $(R_f')_{\text{max}} = 0,298 \text{ м}^2/\text{км}^2\text{год}$.

По величине R_f' А.Л. Рагозин и В.А. Ёлкин выделяют шесть категорий районов – от незначительно опасной I категории до чрезвычайно опасной VI категории (Природные опасности..., 2003, с. 179). Полученные выше предельные значения R_f' попадают в первую ($< 0,1 \text{ м}^2/\text{км}^2\text{год}$) и вторую малоопасную ($0,1–1 \text{ м}^2/\text{км}^2\text{год}$) категории. Таким образом, в существующих условиях физический риск поражения территории строи-

тельства карстово-суффозионными воронками даже в самом опасном по инженерно-геологическим признакам таксоне III-B крайне мал. Это хорошо видно, если его выразить в %/год: $(R_f')_{\text{min}} \cdot 10^{-4} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ %/год}$, $(R_f')_{\text{max}} \cdot 10^{-4} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ %/год}$. То есть ежегодно из оборота может уходить $(0,8–3,0) \cdot 10^{-5} \text{ %}$ полезной площади земель, и за максимальный срок службы сооружений $T_0 = 50$ лет доля потерь земельных угодий составит всего $50 \cdot (R_f') \cdot 10^{-4} = 0,0004–0,0015 \text{ %}$.

Следуя выводам пункта 4.4.2, оценим экономический ущерб от поражения проектируемого здания в подрайоне II-B. Необходимые для этого расчеты диаметра возможных провалов в этом подрайоне с формальной точки зрения правильнее было бы поместить в пункте 4.4.3. Однако для удобства чтения и восприятия материала мы приводим их здесь, так как не только величина ущерба, но и схематизация массива, способ расчета диаметра и значения последнего зависят от изменения существующих условий в ходе строительства и конструктивных особенностей проектируемого сооружения, в данном случае – северной башни жилого комплекса.

Согласно проектным решениям, фундаментом башни служит монолитная железобетонная плита под защитой стены в грунте, опущенной в толщу юрских глин. В подрайоне II-B глубина заложения фундаментной плиты и давление на массив пород под северной башней составляют 14 м и $4–5 \text{ кГ/см}^2$, планировочная отметка – $0,00 = 133,0 \text{ м}$. При этом ситуация схематизируется следующим образом (рис. 4.23).

Считаем давление от веса сооружения, приложенное к целику юрских глин, равномерно распределенным и равным $\sigma_{\text{ф}} = 450 \text{ кПа}$. Стена в грунте исключает перетекание грунтовых вод в перхуровский водоносный горизонт. Пьезометрический уровень последнего находится на отметках $120,4–120,7 \text{ м}$. Суффозия также исключается, поскольку несвязные грунты полностью вынимаются (рис. 4.23).

Таким образом, рассчитывается диаметр провала в основании сооружения, который образуется при смещении юрских глин по круглоцилиндрической поверхности или при обрушении свода высотой $b_1 = m$. Провал происходит под действием веса взвешенных в воде грунтов, равномерно распределенной нагрузки от сооружения и направленного вверх гидродинамического давления. А с учетом знака этого давления объемный вес глин уменьшается: $\gamma_1^* = \gamma_1' - \gamma_w I$.

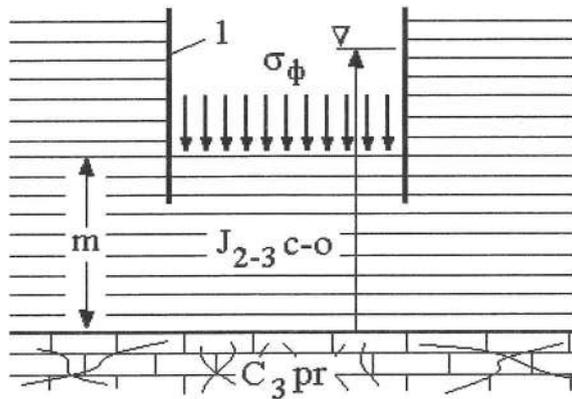


Рис. 4.23. Схема для расчета устойчивости массива пород в измененных при строительстве условиях (подрайон II-B):

1 – стена в грунте, $\sigma_{\phi} = 450$ кПа – давление по подошве фундамента, стрелкой показан избыточный напор трещинно-карстовых вод

По первой схеме диаметр легко находится из уравнения предельного равновесия (4.1) пункта 4.2.1, так как в отличие от давления свода (σ_c) контактное давление (σ_{ϕ}) не зависит от D:

$$D_1 = D = 4m[(\sigma_{\phi} + \gamma^*m/2)\text{tg}\varphi_1\xi_1 + c]/(\sigma_{\phi} + \gamma^*m). \quad (4.42)$$

Мощность m в уравнении (4.42) – это мощность глин под фундаментной плитой.

Поскольку в данном случае концентрация напряжений, как показано в пункте 4.4.3, несильно влияет на устойчивость массива, для вычисления диаметра провала по второй схеме воспользуемся решением (4.5) \equiv (4.34). Сжимающие напряжения принимаем равными $\sigma_z = \sigma_{\phi} + \gamma_1^*m$.

Расчетные характеристики глинистых целиков и результаты вычислений D_1 по формулам (4.34), (4.42) приведены в табл. 4.12. Опорными служили скважины, пробуренные внутри контура будущего здания. Учитывались также значения мощности глин и избыточного напора верхнекаменноугольных вод в ближайших скважинах, а также общие закономерности изменения геологического строения и гидрогеологических условий, установленные в пункте 4.4.1 (см. рис. 4.14, 4.15, 4.17, 4.18).

Видно (табл. 4.12), что близость значений m предопределяет и близость значений D_1 , находящихся в предпоследнем, равно как и в четвертом справа столбце таблицы. Как и следовало ожидать, ширина воронки, вычисленная по модели Бирбаумера, больше той, что найдена с помощью модели Протождяконова ($\Delta D_1 = 1,5$ м). При интенсивности процесса $\lambda = 0,0081$ км²год⁻¹ площадка под северной башней в измененных при строительстве условиях согласно классификациям СП 116.13330.2012 (см. табл. 4.7) принадлежит к категории относительно устойчивых районов V-B.

Дифференцированный экономический риск от так называемых одномоментных геологических опасностей, в том числе и провальной, можно вычислить по формуле (Рекомендации ... , 2002):

$$R_e = P^* \cdot P_s \cdot V_e \cdot D_e, \quad (4.43)$$

где R_e – полный риск потерь за один год; $P^* = \lambda^*$ – частота проявления карсто-суффозионного процесса на земной поверхности; $P_s = S_o/S$ – геометрическая вероятность поражения оцениваемого объекта; S_o – площадь объекта; S – площадь, в пределах которой проявляется опасность; V_e – экономическая уязвимость объекта; D_e – стоимость объекта, которая нам, как правило, не известна и которую удобно и правомерно на локальном уровне считать не в рублях или долларах, а принять равной $D_e = 100$ %.

Таблица 4.12

Результаты определения размеров возможного провала под северной башней с использованием уравнений (4.34) и (4.42)

Номера опорных скважин и расчетные характеристики (m – мощность целика келловей-оксфордских глин под фундаментной плитой; σ_{ϕ} – давление от веса здания; остальные обозначения прежние)								Диаметр провала D_1 , равный критическому диаметру полости D (м)			
								(34)		(42)	
№№ скв.	m, м	ΔH , м	γ_{s1} , кН/м ³	n_1	φ_1 , град	c, кПа	σ_{ϕ} , кПа	D	D_{cp}	D	D_{cp}
9; 3	4,6	6,1	27,4	0,56	17	58	450	4,1	3,9	5,7	5,4
4; 5	4,4	6,2	27,4	0,56	17	58	450	3,9		5,5	
2; 3	4,1	5,6	27,4	0,56	17	58	450	3,6		5,1	

Поскольку $S_o = S_\phi$, а $P^* = N/T$ и, следовательно, $P^* \cdot P_s = S_o N/ST = \lambda S_\phi$, перепишем выражение (4.43) в виде:

$$R_e = S_\phi \cdot \lambda \cdot V_e \cdot D_e \cdot 10^{-6}, \quad (4.44)$$

где $S_\phi = 2200 \text{ м}^2$ – площадь фундамента северной башни; $\lambda = 0,0081 \text{ км}^{-2}\text{год}^{-1}$. Таким образом, все члены уравнения (4.44), кроме V_e , нам известны, и задача оценки экономического ущерба сводится к нахождению уязвимости объекта.

Для определения экономической уязвимости здания удобно воспользоваться таблицей Рекомендаций... (2002, с. 42). Для этого найдем соотношения площадей провалов ($S_b = \pi D_1^2/4$) и фундамента, ориентируясь на значения диаметра $(D_{cp})_{\min} = 3,9 \text{ м}$ и $(D_{cp})_{\max} = 5,4 \text{ м}$, приведенные в табл. 4.12. Получим: $(S_b/S_\phi)_{\min} = 11,76/2200 = 0,0053$, $(S_b/S_\phi)_{\max} = 23,00/2200 = 0,0105$. Поскольку и первое, и второе значения S_b/S_ϕ меньше 0,1, то, согласно Рекомендациям... (2002), уязвимость башни с учетом ее типа (монолитное здание) оказывается равной $V_e = 0,002-0,015$ и не зависит от сценария (расчетной схемы) провалообразования.

Подставляя в (4.44) максимальную величину уязвимости ($V_e = 0,015$) и значения других сомножителей, находим, что $(R_e)_{\max} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ \%/год}$. Принимая срок эксплуатации проектируемого комплекса равным $T_o = 50$ лет, видим, что в течение этого срока доля потерь, связанная с развитием карстово-суффозионного процесса, не превысит $T_o \cdot (R_e)_{\max} = 0,13 \text{ \%}$ от стоимости строительства северной башни. На наш взгляд, полученные результаты свидетельствуют о том, что выполнять геотехнические или конструктивные защитные мероприятия в подрайоне П-В экономически нецелесообразно. Выполнения планировочных и водо-защитных мероприятий более чем достаточно.

Что касается социальных потерь, то за все время многолетних наблюдений в России достоверно установлена гибель лишь одного человека в результате природного карстово-суффозионного провала (Акташский провал в Республике Татарстан, 1939 г. (Ступишин, 1967)). Это с одной стороны, с другой, как показывают исследования В.А. Ёлкина (2004), – социальный ущерб от провалообразования очень плохо поддается учету. Поэтому оценка такого риска, на наш взгляд, представляет сугубо теоретический интерес.

В заключение еще раз отметим, что наиболее актуальной и сложной задачей инженерного карстоведения является прогноз образования воронок провала и оседания в районах покрытого карста. А поскольку характеристики любой опасности могут быть либо статистическими, либо расчетными, и третьего не дано, то на тех участках, где проявления карста на поверхности покровной толщи грунтов отсутствуют, не зарегистрированы или плохо выражены в рельефе, огромное значение приобретает исследование внутренних закономерностей и механизмов формирования воронок, то есть изучение самого процесса провалообразования.

На территории г. Москвы этот процесс называется карстово-суффозионным и представляет собой гравитационное и фильтрационное разрушение покровной толщи закарстованных массивов в результате выноса несвязных и раздробленных связных грунтов в трещинно-поровое пространство каменноугольных отложений. Многообразие его проявлений, которое обычно отождествляется с разнообразием карстово-суффозионных процессов, объясняется разным строением покровной толщи, широким изменением ее мощности и мощности слагающих ее пластов, а также состава, состояния и свойств грунтов, размеров и формы участков ослабления массива. Большое влияние на состояние и свойства массива пород и его напряженное состояние оказывает техногенное изменение рельефа, режима уровней подземных вод и иные виды статического и динамического воздействия.

Процедура локальной оценки карстово-суффозионной опасности и риска на территории Москвы, 16% (173 км²) площади которой приходится на потенциально опасные в провальном отношении районы, состоит из четырех основных стадий, или этапов:

1. На первом – как можно более детально анализируются инженерно-геологические условия участка. Большую помощь в решении этой задачи оказывает картографическое моделирование.
2. На втором – выполняются оценочное районирование и схематизации массива в наиболее опасных таксонах.
3. На третьем этапе, исходя из результатов работ двух первых стадий, формулируется рабочая гипотеза, разрабатываются сценарии процесса. И с использованием двух комплексных моделей поведения связных и несвязных грунтов над «выпускным отверстием» (каким мы его пред-

ставляем – пещера, полость, трещина, каверна и т.д.) в соответствии со схематизированным строением покровной толщи рассчитывается диаметр воронок.

4. На четвертом – определяется интенсивность процесса, и в соответствии с Рекомендациями (2002) вычисляются физический и экономический ущерб. Социальный ущерб от карстово-суффозионных («карстовых») провалов, с одной стороны, очень трудно поддается учету, а с другой – настолько маловероятен, что его определение имеет исключительно академический интерес.

Пример оценки карстово-суффозионной опасности и риска, рассмотренный в пункте 4.4 – это именно пример, претендующий на полноту отражения лишь процедуры такой оценки, но не всех возможных вариантов самой оценки. В иных техноприродных условиях в основу районирования участка могут быть положены иные критерии опасности. Может потребоваться и использование иных расчетных моделей, например, уравнений (4.8), (4.10) или (4.20), (4.21) и тех, о существовании которых в настоящей главе лишь упоминалось.

Глава 5. Оценка опасных экзогенных процессов на техногенно-урбанизированных территориях

5.1. Методологические подходы к оценке и картографированию природных (геологических) рисков от опасных процессов на техногенно-урбанизированных территориях

Проявление опасных природных процессов на техногенно-урбанизированных территориях имеет свои особенности. Промышленные производства, часто являющиеся градообразующими предприятиями небольших по площади городов, оказывают мощное концентрированное техногенное воздействие на окружающую среду, усиливая проявление опасных природных процессов. Интенсивно развиваясь на относительно небольшой площади, эти процессы могут принимать катастрофический характер и приводить к тяжелым экологическим последствиям.

Методы изучения, анализа и оценки опасных экзогенных процессов на промышленных техногенно-урбанизированных территориях позволяют существенно уточнять их особенности и характеристики, а именно: масштабы, повторяемость, длительность воздействия, активность, механизмы и стадии развития, направленность и возможные динамические нагрузки на природные и техногенные объекты. Изучение и оценка влияния техногенных факторов на развитие опасных экзогенных процессов на промышленных и урбанизированных территориях осуществляется, в основном, тремя группами методов: полевыми, камеральными, включая картографические, и аналитическими. Наиболее представительной является группа полевых методов исследований. Она включает: выполнение комплексных геологоразведочных работ с применением бурения, геофизических исследований, лабораторных определений состава и свойств пород; проведение визуальных наблюдений, обследований, опросов местно-

го населения, маршрутных съемок и рекогносцировок с картированием, фотографированием и видеофиксацией участков активного проявления экзогенных процессов.

Важное значение для оценки геологических процессов имеют комплексные натурные мониторинговые наблюдения и измерения, проводимые в течение ряда лет (Дягилев и др., 2013). Обычно осуществляется многолетний постоянный мониторинг опасных геологических процессов с применением визуальных, геодезических, сейсмологических, геофизических, режимных гидрогеологических, почвенных газогеохимических и дистанционных методов исследований. Перечисленные виды мониторинговых работ характеризуются разными задачами исследований, разной детальностью и регламентами наблюдений и измерений. Для разных информационно-измерительных систем мониторинга устанавливаются разные режимы наблюдений: периодические дистанционные съемки и зондирования (с носителей); наземные профильные и стационарные измерения и наблюдения в режиме периодических посещений; непрерывные наблюдения в автоматическом режиме записи сигналов. Большой набор методов мониторинга позволяет на качественном и количественном уровне оценивать ситуацию в целом и по отдельным элементам геологической среды.

Применение современных высокотехнологичных методов, в частности, дистанционного зондирования территории и цифрового картографирования с выделением потенциально опасных зон позволяет не только контролировать, но и прогнозировать ситуацию. Эффективным для урбанизированных и промышленных территорий оказалось применение радарной интерферометрической съемки со спутников, совмещенное с рассмотрением имеющихся картографических материалов: государственной топографической карты масштаба 1:50 000; фондовыми тематическими картами и планами, цифровой моделью рельефа и космofотоснимками. Такой подход позволяет с высокой детальностью контролировать изменения границ и площадей участков с существенным оседанием земной поверхности, а также скорости и амплитуды этих оседаний.

На основе анализа полученных данных составляются оперативные и временные прогнозы развития природно-техногенной обстановки, разрабатываются инженерные и управленческие меры, направленные на минимизацию технологических и социальных рисков.

Результаты полевых работ и мониторинговых исследований существенно дополняются и уточняются комплексом аналитических методов, который включает инженерные расчеты, математическое моделирование на постоянно действующих 3-мерных моделях геологической среды, прогнозные оценки степени опасности и рисков. Аналитические работы на объемных моделях геологической среды позволяют проводить модельные исследования фильтрации, миграции загрязняющих веществ и изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород, а также решать оценочные и прогнозные задачи влияния изменений геодинамических и гидрогеологических условий на активизацию геологических процессов.

Среди камеральных методов анализа и оценки развития опасных эрозионных процессов на промышленных и урбанизированных территориях проверенным и эффективным методом накопления данных, их анализа и прогноза возможного развития опасных геологических процессов является тематическое инженерно-геологическое картографирование, в частности, составление схем зонирования по степени опасности развития геологических процессов (Мамаев, Ястребов, 2017; Осипов и др., 2014). Данная схема предназначена для планирования предупредительных мер, направленных на минимизацию возможных социально-экономических потерь в случае дальнейшего развития опасных геологических процессов. Целью разработки схемы зонирования является выявление природных рискообразующих факторов и установление пространственного положения зон проявления и видов опасных геологических процессов. Это важно для целенаправленного планирования изыскательских и мониторинговых работ и учета планируемого строительства в проектных решениях.

В соответствии с классификацией инженерно-геологических карт данная карта-схема относится к синтетическим (обобщающим) специализированным картам инженерно-геологического районирования оценочно-сравнительного типа. Ее составление осуществляется на основе анализа информации, содержащейся на тематических картах и схемах по исследуемому району: геоморфологической, геологической, структурной, гидрогеологической, инженерно-геологической, функционального зонирования территории и других. Анализируются также данные мониторинговых наблюдений, включая периодические дистанционные съемки.

На карте инженерно-геологического районирования выделяются области, районы и участки. Внутри наиболее крупных таксонов – областей по особенностям геологического строения выделялись инженерно-геологические районы. Критериями их выделения служили особенности геологического разреза коренных пород, а также возраст, генезис, литологический состав и мощности перекрывающих четвертичных отложений. Таким образом, территория подразделяется на несколько типовых районов с многослойной геологической средой. В границах одних районов отмечается активное развитие опасных геологических процессов, в том числе деформаций и провалов земной поверхности, в других – устойчивое состояние геологической среды.

По совокупности геологической и мониторинговой информации о составе, состоянии и свойствах геологической среды, и геологических процессах для каждого типа районов определяются и значками в рамках наносятся на карту: основные (ведущие) природные рискообразующие факторы; установленные и прогнозируемые наиболее опасные инженерно-геологические процессы, которые влияют на устойчивость (безопасность) геологической среды. По совокупности рискообразующих факторов и опасных геологических процессов для выделенных районов экспертным путем устанавливается степень опасности развития геологических процессов. На карте-схеме зонирования территории по степени опасности геологических процессов показывается пространственное положение зон с разной степенью опасности, характеризующихся разным количеством рискообразующих факторов и опасных процессов (Осипов и др., 2014]. Эти зоны показаны разным оттенком серого на карте (рис. 5.7).

Специальными условными знаками на схемах районирования могут быть показаны рискообразующие геологические факторы: линейно вытянутые участки повышенной трещиноватости и дробления коренных пород, приуроченные к тектоническим нарушениям в надсоляной толще пород; сильная полигенетическая трещиноватость коренных терригенно-карбонатных пород и их значительное выветривание; перманентные циклически меняющиеся процессы затопления и подтопления территорий; активная гидравлическая связь разновозрастных водоносных горизонтов; интенсивное выщелачивание горных пород и развитие карстово-суффозионных процессов; закарстованность пород и другие факторы. На карте районирования также значками показываются опасные природные процессы: затоп-

ление низких территорий; подтопление и заболачивание территорий; выпор грунтов в днищах и стенках котлованов, прорывы в них подземных вод и водонасыщенных грунтов; суффозия по трещинам и полостям вблизи выработок и котлованов; неравномерные объемные деформации массивов горных пород (оседания земной поверхности); эрозия русловая и овражная в долинах рек; оползневые смещения на склонах в рыхлых четвертичных отложениях и другие процессы.

Изучение и анализ техногенных факторов развития опасных эрозийных процессов на техногенно-урбанизированных территориях позволяет заключить, что техногенные воздействия, как правило, обуславливают увеличение количества видов возникающих опасных процессов, их масштабов, повторяемости и интенсивности воздействий на природные и техногенные объекты, что усиливает риски социальных и экономических потерь. Рассмотренные выше методы изучения и оценки опасных экзогенных процессов позволяют в комплексе не только уточнить характеристики опасных геологических процессов, а именно: их масштабы, повторяемость, длительность, активность, механизмы и стадии развития, направленность и возможные динамические воздействия на объекты, но и повысить вероятность управления процессами.

5.2. Развитие опасных экзогенных процессов на территории Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации Пермского края

Ярким примером усиления опасных экзогенных геологических процессов на активно развивающихся промышленных и урбанизированных территориях является Пермский край. Данный регион характеризуется разнообразием и сложностью природных условий, масштабностью и комплексностью развития геологических процессов, интенсивностью техногенных преобразований. На территории Пермского края осуществляется эксплуатация промышленных объектов и добыча полезных ископаемых, в том числе железных, хромитовых и медных руд, калийных, магниевых и каменной солей, нефти, газа, минеральных вод, угля, золота, драгоценных камней и др. Это определяет высокий уровень техногенной

нагрузки на природную (геологическую) среду данной территории (Осипов и др., 1999). Здесь активно проявляются опасные процессы: сейсмо-тектонические, суффозионно-карстовые, гидрологические, оползневые, деформационные, связанные с просадочностью грунтов и подработкой территорий, процессы химического и радиационного загрязнения и другие (Геологические памятники ... , 2009; Мамаев, Ястребов, 2016).



Рис. 5.1. Провал в Березниках на БРУ-1.
Источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki>

Техногенез продуцирует две группы факторов, существенно изменяющих природные условия, в том числе обуславливающих развитие опасных геологических процессов. Первая группа – это промышленные объекты: заводы, фабрики, цеха (рис. 5.1), подземные горные выработки, водохранилища, нефтяные и водозаборные скважины и другие объекты, оказывающие непосредственное гидрогеодинамическое воздействие на

строение и состояние массивов пород, изменение характера и величин действующих в них напряжений, гидродинамических режимов подземных вод, газонасыщенности и другие особенности. Вторая группа техногенных факторов связана с геохимическим воздействием действующих промышленных производств на природную (геологическую) среду района. Газовые выбросы, выпуски загрязненных вод, солеотвалы, шламонакопители, полигоны и свалки промышленных отходов способствуют повышению агрессивности природных сред: почв, грунтов, подземных и поверхностных вод, и активизации карстовых процессов. Синергизм воздействий обеих групп техногенных факторов обуславливает многократное увеличение скоростей и масштабов развития опасных экзогенных процессов (Мамаев, Ястребов, 2016).

Территория Соликамско-Березниковской градопромышленной агломерации (СБГПА) расположена в пределах Предуралья в центре крупнейшей в РФ залежи калийных солей, имеющей протяженность с севера на юг 137 км и с запада на восток около 40 км. Промышленная разработка месторождения начата в 1934 г. Шахтные поля отдельных рудников простираются под промышленными зонами и жилыми кварталами городов Березники, Соликамск, поселками, сетями и объектами инженерной и транспортной инфраструктур (Кудряшов, 2013).

Территория СБГПА характеризуется высокой сложностью инженерно-геологических условий. Здесь выделяются две инженерно-геологические области – Камский прогиб с современной долиной р. Камы, расположенной над переуглубленной древней долиной Пра-Камы глубиной более 100 м; и Соликамско-Березниковское поднятие с высотами до 230 м, расчлененное долинами рек – притоков Камы (рис. 5.2). Геологический разрез территории (рис. 5.3) характеризуется пестрым петрографическим составом переслаивающихся толщ пород карбонатной, соляной и терригенной формаций; сложным разломно-блоковым характером их залегания; тесной гидравлической связью поверхностных и подземных вод, имеющих разный химический состав и минерализацию; существенными изменениями состояния и свойств пород в массиве в результате процессов гипергенеза, гидрогеохимического воздействия засоленных подземных вод, а также техногенной нагрузки, обусловленной разработкой и эксплуатацией месторождений калийных солей, углеводородов и пресных подземных вод (Мамаев, Ястребов, 2016; Осипов и др. 2014).

На рассматриваемой территории СБГПА терригенно-карбонатные породы нижней перми мощностью до 240 м залегают с поверхности на мощной (более 400 м) толще каменной соли, в верхней части которой разведана и разрабатывается залежь калийных и магниевых солей мощностью от 40 до 130 м. Именно в надсоляной толще терригенно-карбонатных пород над выработанным подземным пространством рудников отмечаются значительные (до 4-5 м) деформации земной поверхности и происходят провалы больших плановых размеров от 100 м до 400 м в поперечнике. На калийных рудниках СБГПА в 1986, 2007, 2010, 2011, 2014 и 2015 г. происходили техногенные аварии, в отдельных случаях с затоплением выработанного подземного пространства больших объемов (млн м³). Это привело к формированию обширных участков оседания земной поверхности и образованию огромных провалов (Борзаковский и др., 2012). Очевидно, что эти катастрофические явления обусловлены активным проявлением суффозионных и карстовых процессов в зоне гипергенных (вторичных) изменений в верхней части толщи. Их активизации способствуют также процессы разгрузки напряжений, трещинообразования, химического, физического и биологического выветривания, а также выщелачивания и механического выноса грунтовых частиц подземными водами.

На территории СБГПА площадью около 2000 км² находятся два крупных города – г. Соликамск (100 тыс. чел.) и г. Березники (150 тыс. чел.), 12 участков добычи калийных солей, 15 месторождений нефти, 8 водозаборов, действуют более 160 крупных промышленных предприятий с опасным производством и сложной инфраструктурой (Геологические памятники ... , 2009).

Сложность инженерно-геологических условий рассматриваемой территории обуславливается также комплексом опасных геологических процессов, активность которых определяется как природными, так и техногенными факторами.

К группе природных факторов относятся: сейсмические воздействия силой до 4–6 баллов; тектонические движения блоков по зонам тектонических нарушений; гипергенез, включающий выветривание, выщелачивание, разгрузку и трещинообразование в массивах пород; эрозионные и карстово-суффозионные процессы; процессы массопереноса и пелоотложения растворимых пород (Зверев, Костикова, 2015); циклически

повторяющиеся процессы затопления и подтопления территорий паводковыми водами и другие.

Техногенные факторы развития опасных геологических процессов включают:

- строительство подземных выработок (пустот) большого объема и больших площадей, испытывающих значительное давление на кровлю. Это ослабляет массивы пород соляных и надсоляных толщ, повышает их пустотность и проницаемость, изменяет гидродинамические и гидрохимические условия фильтрации подземных вод;

- изменение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород при строительстве и долгой эксплуатации горных выработок (Мамаев, Ястребов, 2016; Осипов и др., 2014);

- постоянное ведение горных работ в подземном пространстве, что создает наведенную техногенную сейсмичность, удары, вибрацию и другие динамические нагрузки;

- создание искусственных поверхностных крупных водных объектов, таких как Камское водохранилище, Семинский и Верхнезырянский пруды и запрудные озера (Борзаковский и др., 2012). Эксплуатация с 1954 г. Камского водохранилища способствует ежегодному циклическому обводнению паводковыми водами грунтовых толщ четвертичных отложений разного генезиса и зон выветривания и повышенной трещиноватости коренных пород. Это ускоряет процесс образования пустот в массивах карстующихся пород за счет их растворения, выщелачивания и механического выноса мелких грунтовых частиц при увеличении объемов и скоростей фильтрации подземных вод. Пространственное распространение подпора водохранилища в береговые массивы может достигать расстояния от 0,5–1 км до 5-6 км от уреза воды и занимать при этом от 20 до 60% площадей подработанных территорий рудников, прилегающих к водохранилищу. Это обуславливает увеличение объемов, напоров, градиентов и скоростей фильтрации подземных вод в массивах пород. При этом возникает дополнительное силовое объемное воздействие вод подпертого горизонта мощностью от 0,5 до 10 м на кровлю нижележащей соляной залежи, включая ее водозащитную толщу, за счет увеличения гидростатических напоров. В процессе зимней сработки объема воды Камского водохранилища на 70–80% существенно (в 1,5–3 раза) увеличиваются градиенты фильтрационных потоков, разгружающихся в водохранилище и

переуглубленную долину Пра-Камы. Это также способствует развитию дополнительного гидродинамического давления и активизации суффозионно-карстовых процессов в массивах пород. Аналогичное влияние оказывают искусственные запрудные водоемы в долинах рек – притоках Камы. Уровни воды в искусственных прудах обычно на несколько метров (4-5 м) превышают нормальный подпертый уровень (НПУ) Камского водохранилища, что обуславливает дополнительную фильтрацию в долину р. Камы;

- влияние ежесуточной откачки больших объемов пресных подземных вод (до 200 тыс. м³/сут) из надсоляного водоносного горизонта на изменение гидродинамического режима подземных вод и активизацию суффозионно-карстовых процессов в приповерхностных сильно выветрелых толщах коренных пород;

- возникновение при авариях и усилении во времени длительной (до 2 лет) вертикальной промывной фильтрации подземных и поверхностных вод через трещиноватые закарстованные породы надсоляной толщи в горные выработки, расположенные на глубинах 200–350 м от поверхности;

- нарушения гидродинамического и гидрохимического режимов подземных вод, обусловленные разрушением (обрушением кровли) затопленных горных выработок и выходом (выдавливанием) в приповерхностную зону высокоминерализованных шахтных вод с большим содержанием загрязняющих веществ, поднимающихся по горным выработкам с разгрузкой в толщи вышележащих выветрелых трещиноватых пород и водоносные горизонты (Борзаковский и др., 2012; Зверев, Костикова, 2015);

- разведка и эксплуатация нефтяных месторождений, залегающих на глубинах 1700–2300 м на рассматриваемой территории, что обуславливает дополнительное газонасыщение массивов пород, залегающих выше, в том числе соляных и надсоляных толщ. Насыщенность толщ горных пород газовыми эманациями метана, диоксида углерода, сероводорода, углеводородных компонентов и других газов, присутствующих в рассеянном, связанном и растворенном видах, обуславливает повышенную агрессивность подземных вод и ускоряет процессы растворения, выщелачивания и массопереноса отдельных элементов в десятки раз. Для территории Верхнекамского месторождения калийных солей основным газом-

индикатором процесса активного газовыделения является метан (СН₄), который обладает высокой миграционной способностью. При диссоциации в воде метан выделяет диоксид углерода (СО₂), способный многократно ускорять процесс растворения в карбонатных породах;

- геохимическое загрязнение окружающей природной среды. Крупные объекты техносферы, связанные с горнодобывающим и горнохимическим производством оказывают значительное геохимическое воздействие на геологическую среду. Газовые выбросы, выпуски загрязненных вод, полигоны и свалки промышленных отходов обуславливают агрессивное воздействие на окружающую природную среду, в том числе почвы, грунты, подземные и поверхностные воды, вызывая активизацию гидрогеохимических процессов в массивах горных пород и, в первую очередь, карста.

Промышленные зоны главных городов СБГПА Соликамска и Березники (рис. 5.4) занимают значительные площади 100 и 140 км² и включают участки около 1200 хозяйствующих субъектов, из которых порядка 150 предприятий имеют до 1800 стационарных источников выбросов, загрязняющих атмосферный воздух (рис. 5.5). Данные предприятия выбрасывают в атмосферу около 160 наименований загрязняющих веществ, химических элементов и их соединений, с наибольшими уровнями загрязнения по: диоксиду азота, диоксиду серы, оксиду углерода, сероводороду, аммиаку, соединениям хлора (хлорид калия, хлорид натрия) и пыли. Валовый объем выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников в год составляет более 15 тыс. тонн. Среднемесячные уровни загрязнения атмосферного воздуха отдельными веществами в промзонах городов превышают санитарно-гигиенические нормы (Гос. доклад). Кроме того, деятельность промышленных горно-химических комплексов, а также жилищно-коммунальных и лесотехнических предприятий оказывает существенное негативное воздействие на экологические условия территории СБГПА из-за накопления огромных объемов промышленных отходов на полигонах и свалках (рис. 5.6).

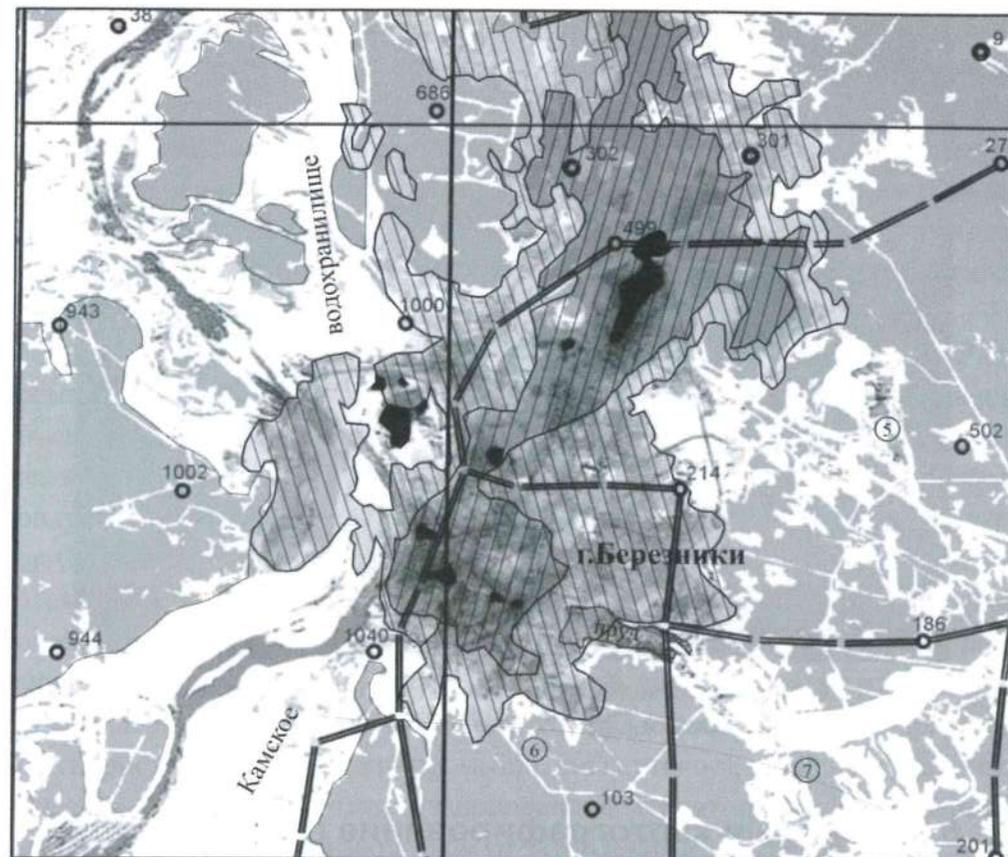
Проникая в почвы, грунты, поверхностные и подземные воды загрязняющие вещества повышают агрессивность природных сред и способствуют усилению растворяющего воздействия на карстующиеся горные породы, формируя на поверхности и внутри массивов горных пород

карстовые формы. В общем, солеотвалами, шламохранилищами, рассолоборниками и свалками на рассматриваемой территории занято около 4,0 тыс. га лесных и сельскохозяйственных территорий, где существенно изменен природный рельеф. В излучинах р. Камы на широкой ровной поверхности первой надпойменной террасы реки возникли обширные спланированные участки, перекрытые техногенными отложениями мощностью от 2 до 18 м, созданы искусственные холмы солеотвалов высотой до 100 м, выкопаны водоемы шламохранилищ и рассолоборников, засыпаны отдельные участки естественных речных долин, что приводит к подтоплению и заболачиванию территорий, прорыты русла каналов – коллекторов для отвода жидких промышленных сбросов.



Рис. 5.4. Промышленная зона с основными объектами техносферы и селитебными районами г. Березники СБГПА (фото из Интернет-ресурса)

Названные выше техногенные воздействия носят накопительный синергетический характер, обуславливающий многократное увеличение скоростей и масштабов развития карстово-суффозионных и других опасных экзогенных процессов на рассматриваемой территории.



Масштаб 1:200000

Условные обозначения:

- Ореолы максимального загрязнения вблизи источников эмиссии (предприятия, ТЭЦ)
- Ореолы рассеивающегося загрязнения над промзоной города
- Ореолы рассеивающегося загрязнения (смог) над городом и прилегающей территорией
- Залесенная территория
- Контуры детально разведанных участков соляной залежи и их номера
- Разведочные скважины на соль
- Разведочные скважины на нефть

Рис. 5.5. Схема загрязнения атмосферного воздуха на территории городского округа Березники СБГПА (по материалам дешифрирования КФС)

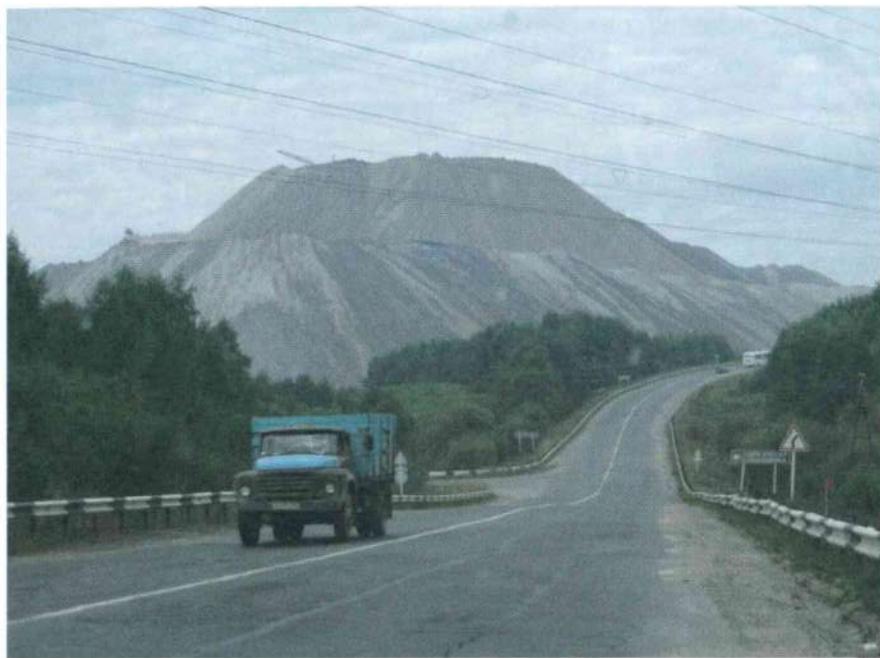


Рис. 5.6. Вид солеотвала калийного рудника в городском округе Березники СБГПА (фото Мамаева Ю.А.)

5.3. Анализ и картографирование геологических рисков от опасных экзогенных процессов на территории СБГПА

Картографирование инженерно-геологических условий и факторов формирования техноприродных рисков выполнялось на подработанной территории Верхнекамского месторождения калийных солей в г. Березники Пермского края, где в границы горного отвода под шахтные выработки Первого Березниковского калийного рудника (БКПРУ-1) попали участки обширной промышленной зоны и городской жилой застройки (рис. 5.7) (Гос. доклад ... ; Дягилев и др., 2013). Территория характеризуется сложными инженерно-геологическими и структурно-тектоническими условиями, а также уникальными объемами и размерами горных выработок, общий объем которых превышал 80 млн м³. Размеры ярусно расположенных подземных выработок составляли от 3–6 до 15 м и более. После прорыва подземных вод в 2006 г. и затопления всего выработанного подземного пространства здесь активизировались геологические процессы чрезвычайного

характера, а именно: значительные оседания поверхности земли от 1,5 до 5,5 м (11 участков) и провалы больших объемов (4 участка) глубиной до 90 м с плановыми размерами в диаметре от 100–115 до 300–400 м. Это привело к деформациям и разрушениям промышленных объектов, административных и жилых зданий, транспортных коммуникаций и других объектов. В связи с этим возникла необходимость изучения, оценки, прогнозирования и картографического отображения степени опасности геологических процессов, уязвимости объектов и рисков на территории города.

В составе многолетних работ, выполненных институтом ИГЭ РАН совместно с Горным институтом УрО РАН и ПАО «Уралкалий», на данном объекте были разработаны легенды, макеты и пояснительные записки инженерно-геологических карт: опасности экзогенных геологических процессов (рис. 5.7), уязвимости отдельных территорий и промышленных объектов (рис. 5.8) и рисков (рис. 5.9) от опасных геологических процессов. На рассматриваемой территории городского округа Березники к объектам высокой степени опасности отнесены объекты шахтной добычи солей; обогащения полезных ископаемых; химической промышленности; хранения промышленных отходов (отвалы горных пород, хвосто- и шламохранилища, гидроотвалы, накопители промышленных стоков); земляные гидротехнические дамбы и плотины, защищающие территории промышленных объектов с опасным производством от затопления и другие объекты.

При составлении *карты уязвимости* применялся метод суперпозиции (наложения) информационных слоев двух карт одного масштаба: инженерно-геологических опасностей и расположения наиболее ответственных объектов промышленного, транспортного, административного и селитебного назначения [9]. В соответствии с методикой составления карт рисков осуществляется наложение информационных слоев двух рассмотренных выше карт: зонирования по степени опасности и уязвимости, что позволяет выделить участки территории с определенными ассоциациями опасных процессов и значимых социальных и экономических объектов, характеризующихся разной степенью возможных ущербов, то есть полной или частичной потерей способности реализации своих функций. На итоговой *карте рисков* с учетом возможных сценариев развития событий и экспертных оценок показываются территории с разной степенью рисков (возможных ущербов), более подробная описательная характеристика которых дается в пояснительной записке к карте (Осипов и др., 2014).

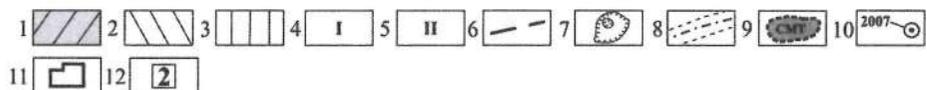
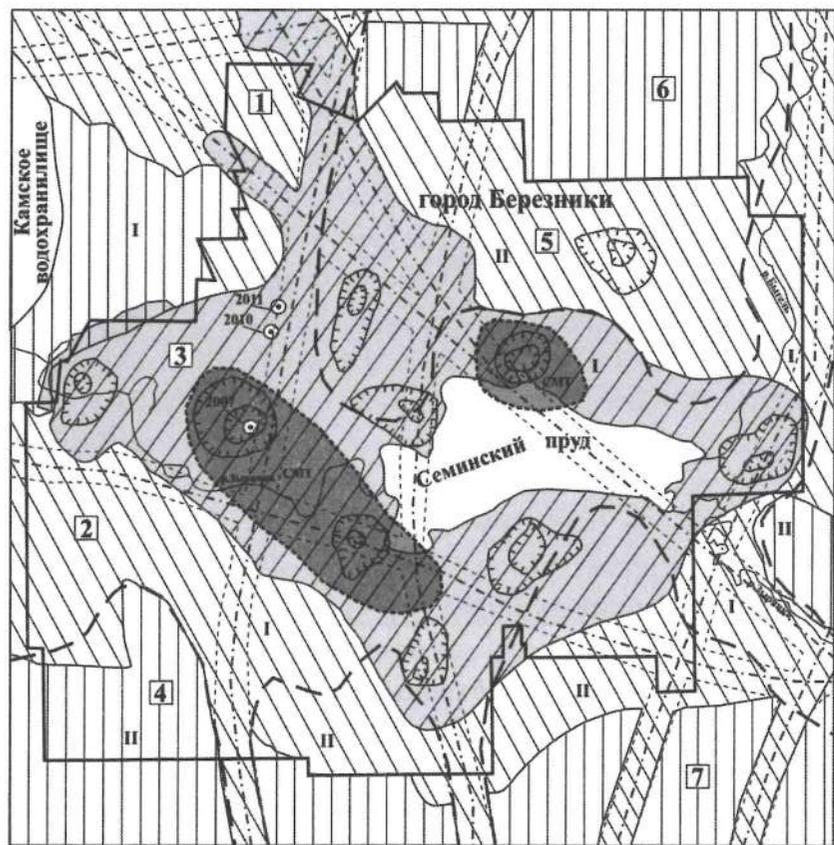


Рис. 5.7. Фрагмент карты зонирования территории г. Березники по степени опасности развития геологических процессов. Участки территории с разной степенью опасности геологических процессов:

1 – высокой; 2 – средней; 3 – низкой; Инженерно-геологические области: 4 – область долин рек Камы и ее притоков; 5 – область водораздельных массивов коренных пород (терригенно-карбонатной толщи); 6 – границы инженерно-геологических областей; 7 – участки со значительными (0,7-5,5 м) оседаниями земной поверхности; 8 – зоны тектонических нарушений в надсолевой толще пород; 9 – границы участков с близким к поверхности залеганием пород соляно-мергельной толщи (СМТ); 10 – участки провалов земной поверхности; 11 – граница выработанного подземного пространства шахтного поля БКПРУ-1; 12 – номера участков

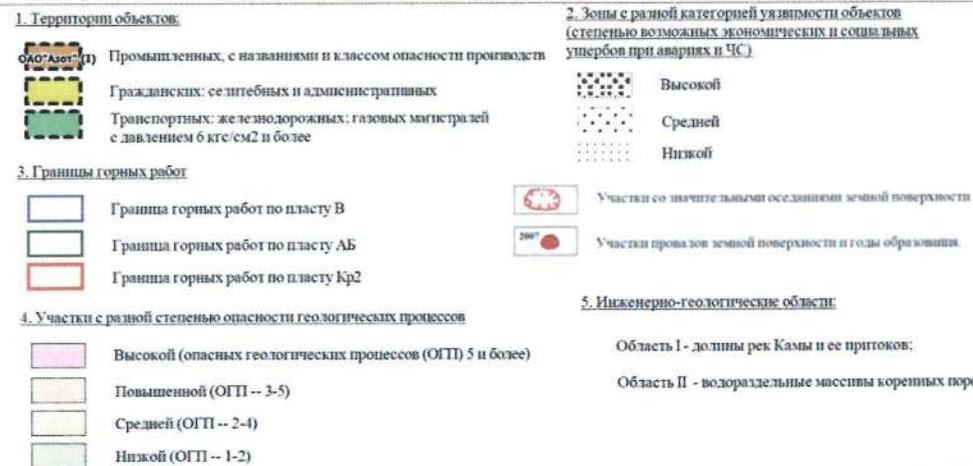
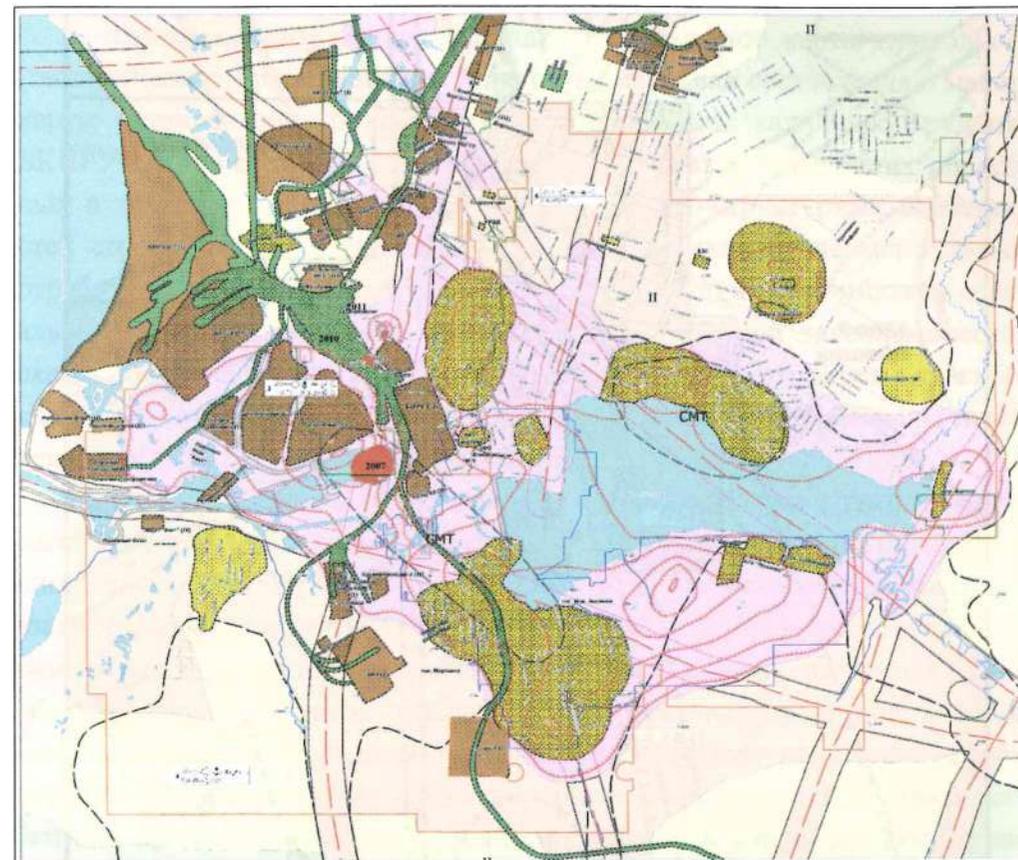


Рис. 5.8. Карта уязвимости территорий и объектов городского округа Березники СБГПА в составе материалов для оценки геологических рисков

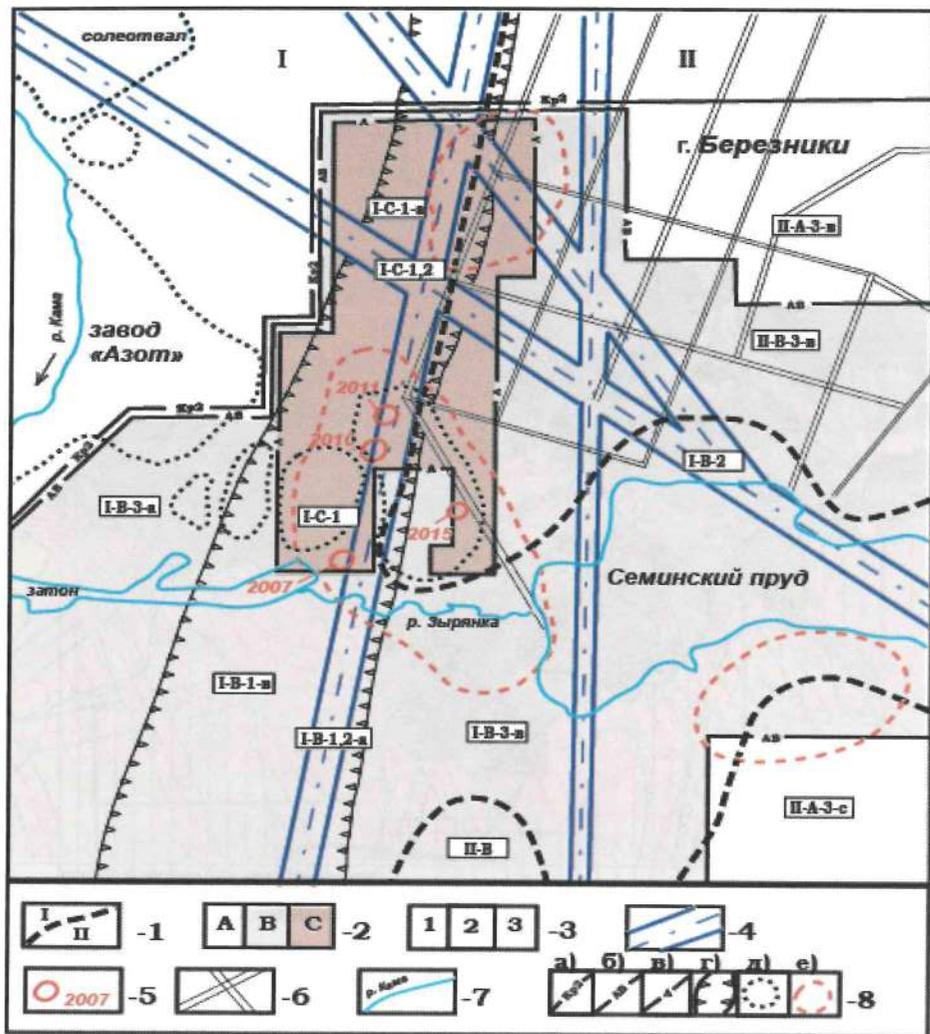


Рис. 5.9. Фрагмент схемы зонирования территории г. Березники по моделям природно-техногенных условий, обуславливающих экономические риски (моделям рисков). Условные обозначения: 1 – Инженерно-геологические области: I – Долина р. Кама и ее притоков; II – Березниковское поднятие; 2 – Природно-техногенные зоны: А – одноуровневая; В – двухуровневая; С – трехуровневая; 3 – Структурно-тектонические районы, соответствующие: 1 – зонам региональных надвигов; 2 – тектоническим нарушениям; 3 – сохранному строению массивов пород; 4 – Зоны тектонических нарушений; 5 – Провалы земной поверхности и годы их образования; 6 – Улицы города; 7 – Водные объекты; 8 – Границы: а) выработок по горизонту Кр2; б) выработок по горизонту АВ; в) выработок по горизонту А; г) зоны надвига; д) крупных промышленных объектов; е) зон деформация земной поверхности

Примером еще одного подхода к составлению карты природного (геологического) риска является разработка методики составления и макета карты зонирования подработанной территории калийного рудника БКПРУ-1 в г. Березники с последовательным учетом важнейших природных и техногенных факторов, а именно: геолого-структурных особенностей строения рассматриваемой территории и технологических приемов отработки толщи калийных солей, обуславливающих в комплексе социально-экономические риски. На основе разработанной таксономической схемы зонирования территории горного отвода Первого Березниковского калийного рудника (БКПРУ-1) были выделены и охарактеризованы инженерно-геологические области, зоны, районы и участки (рис. 5.9).

Наиболее изученные и детальные таксоны: районы и участки могут рассматриваться как модели природно-техногенных условий, определяющих экономические риски (модели рисков). Сочетание и синергетическое взаимодействие геологических и техногенных факторов, действующих в разных частях территории горного отвода БКПРУ-1, обуславливает разнообразие условий развития опасных техно-природных процессов, которые могут приводить к авариям на производстве, потерям в социальной сфере, нарушениям транспортных и инженерных сетей и другим негативным событиям, прогнозируемый (условно реализованный) ущерб от которых является риском. Таксономическая схема зонирования основывается на актуализированной методике инженерно-геологического районирования и включает следующие соподчиненные территориальные выделы: области, зоны, районы, участки. Области выделяются по комплексной оценке инженерно-геологических условий крупных субрегиональных структурно-геоморфологических элементов, а именно: I – долины рек Камы и ее крупных притоков; II – Березниковское поднятие.

В пределах областей по технологическим особенностям отработки калийной залежи выделяются зоны: А – одноуровневой отработки, В – двухуровневой отработки, С – трехуровневой отработки. Внутри зон по особенностям геологического строения массивов, точнее, по наличию крупных дизъюнктивных тектонических структур, выделяются районы: 1 – зоны надвигов, 2 – зоны крупных тектонических нарушений, 3 – зоны с сохранным геологическим строением массивов пород. Участки на схеме зонирования обособляются по видам техногенного наземного строительного

хозяйственного освоения территории: а – промышленные объекты, в – жилищная застройка, с – неосвоенные земли. Выделение участков является важным моментом, так как позволяет учесть в моделях рисков обособляемых территорий фактор уязвимости объектов – степень их возможных потерь (ущербов) от опасных процессов. Установлено, что уязвимость и ущербы промышленных объектов, особенно с опасными видами производства, могут в несколько раз превышать уязвимость и потери гражданских и жилых объектов. Природно-техногенные особенности строения и освоения (использования) районов и участков будут являться детальными моделями формирования рисков.

Наибольшей степенью опасности (вероятности) развития деформаций и провалов земной поверхности на рассматриваемой территории характеризуются участки, расположенные в зонах В и С, соответственно с двух- и трехуровневыми условиями отработки калийной залежи и попадающие в районы развития крупных тектонических нарушений (районы 1 и 2). Именно здесь в предыдущие годы (2007-2015 гг.) произошли крупные провалы земной поверхности и продолжают формироваться мульды оседания с максимальными величинами деформаций земной поверхности до 5,5 м. Следовательно, и риски возможных экономических потерь от разрушений промышленных и жилых объектов, транспортных и инженерных сетей и других сооружений предполагаются наибольшими.

Сравнительно меньшими рисками характеризуются территории в границах подработанного пространства (зоны А, В, С), но расположенные в районе 3, т.е. вне зон крупных тектонических структур. Здесь отмечаются значительно меньшие величины деформаций земной поверхности (от 0,3 до 1,0 м), и, следовательно, ожидаются меньшие возможные экономические потери.

Наименьшим риском экономического ущерба характеризуются участки, расположенные в пределах инженерно-геологической области II, вне границ подработанного пространства, а также в районе 3 с относительно сохранным геологическим строением массивов. Аналогичные территории, расположенные в инженерно-геологической области I, все же подвергаются опасности затопления, подтопления, заболачивания, сильной эрозии и других экзогенных процессов. Они заняты преимущественно объектами промышленной зоны города с предприятиями, имеющими

опасные виды производств, и поэтому обладают определенным риском экономических и социальных потерь.

Составление специальных инженерно-геологических карт опасности, уязвимости и рисков (Мамаев, Ястребов, 2017; Осипов и др., 2014; Осипов и др., 2014а) для анализа и оценки природных и техногенных факторов, определяющих условия развития опасных геологических процессов и обусловленных ими рисков на той или иной территории, позволяет установить основные элементы рисков; дать их качественную или количественную оценку; разработать защитные мероприятия и накопить силы и средства для их реализации в случае необходимости. Информация на этих картах должна пополняться, уточняться и корректироваться в связи с изменяющимися природными, техногенными и экологическими условиями рассматриваемой территории. Для этих целей перспективными являются компьютерные карты, созданные на основе ГИС-технологий.

Анализ и оценка природных и техногенных факторов, определяющих условия развития опасных техно-природных процессов и обусловленных ими рисков на той или иной территории, позволяет установить основные элементы рисков; дать их качественную или количественную характеристику; получить по аналогам или установленным ущербам стоимостные и временные параметры реализации рисков.

Просчитать риски от опасных природных, техноприродных и производственных процессов – значит дать их приближенную стоимостную оценку, а также примерные временные рамки реализации опасности, восстановления и ликвидации последствий. Главной особенностью экономических рисков на урбанизированных территориях является их масштабность, т. е. вероятность очень больших ущербов. Тем более это относится к территориям, подработанным горными выработками, что можно проиллюстрировать на примере аварии 2006 г. на руднике БКПРУ-1 в г. Березники. В соответствии с актом Ростехнадзора от 2009 г. по расследованию причин аварии, произошедшей на Первом Березниковском руднике ОАО «Уралкалий» в период с 17 по 28 октября 2006 г. (Поручение Правительства РФ от 29.10.2008 г. № ИС-П9-51 пр.), прямой ущерб от аварии и прекращения работы рудника составил 3 млрд рублей. Сюда вошли убытки от затопленных проходческих комбайнов, специального автотранспорта, транспортных комплексов, многокилометровых кабельных линий, вентиляционных воздухопроводов, другого шахтного оборуду-

дования, а также финансовые потери от недополученной продукции. Что касается временного фактора, то активная стадия аварии с затоплением всего выработанного пространства рудника продолжалась два года – с 2006 по 2008 гг., с образованием в 2007 г. в границах подработанной территории огромного провала земной поверхности. Аналогичные провалы произошли на рассматриваемой территории в 2010, 2011 и 2015 годах, а мутьды оседания продолжают формироваться на дневной поверхности до настоящего времени, т.е. в течение 16 лет. Деформации и провалы земной поверхности привели к разрушению зданий и сооружений: горно-обогатительной фабрики, шахтного комплекса № 3, администрации рудника БКПРУ-1, института «Галургия», шахтно-строительного управления № 1, школы № 20, а также около 30 жилых зданий 2- и 5-этажной застройки. Были разрушены и деформированы значительные участки железной и автомобильных городских дорог. При оценке ущерба здесь необходимо принимать во внимание не только стоимость строительства самих зданий и сооружений, но и затраты на их демонтаж, снос, ремонт, благоустройство, переселение людей и др., что составляет сотни миллионов рублей. Благодаря заблаговременным мониторинговым и охранным мероприятиям удалось избежать человеческих жертв. Но социальное и психологическое состояние населения, проживающего в районе активного развития деформаций земной поверхности, остается напряженным.

Глава 6. Интегральная оценка и картографирование риска экзогенных геологических процессов (на примере Москвы)

6.1. Особенности инженерно-геологических условий территории г. Москвы

Московский мегаполис представляется идеальным полигоном для разработки и совершенствования методологии оценки и картографирования геологического риска. Москва принадлежит к числу интенсивно развивающихся мегаполисов, в пределах которого строятся уникальные сооружения, здания повышенной ответственности, реализуются наиболее современные архитектурные проекты, применяются новейшие строительные технологии по освоению надземного и подземного пространства. Территория города характеризуется чрезвычайной сложностью инженерно-геологических условий и одновременно очень хорошей изученностью. Комплексные инженерно-геологические и геоэкологические исследования г. Москвы в течение многих лет проводились учеными разных поколений: Б.Н. Даньшиным, Е.М. Сергеевым, Г.А. Голодковской, В.И. Осиповым, В.М. Кутеповым, Г.Л. Коффом, Э.А. Лихачевой и др. (Кофф, 2006; Голодковская, 1984; Кутепов и др., 2009; Осипов, 2008; Сергеев, 1982).

К настоящему времени выполнен всесторонний анализ геологического строения и инженерно-геологических условий территории города на геоинформационно-картографической основе с учетом требований наземного и подземного строительства. Результатом такого анализа стал комплект тематических геологических карт территории г. Москвы в масштабе 1:10 000, составленных в 2008-2009 гг. ИГЭ РАН и НПП «Георесурс» под руководством ГУП «Мосгоргеотрест». Подобная работа является инновационной, поскольку помимо анализа огромного фактического материала содержит теоретические и научно-методические разработки, реализованные на основе последних достижений фундаментальной науки

и применении современных геоинформационных технологий. В комплект вошло 12 крупномасштабных карт, среди которых «Геологическая карта каменноугольных отложений» и «Геологическая карта дочетвертичных отложений», составленные на основе обработки данных более чем 80 000 скважин, вошедших в оцифрованную базу геологических данных по г. Москве (рис. 6.1) (Кутепов и др., 2011). На основе интеграции всех данных о структурно-динамическом, геоморфологическом и геологическом строении, гидрогеологических условиях, распространении опасных природных и инженерно-геологических процессов была составлена итоговая «Карта инженерно-геологического районирования территории г. Москвы» (Осипов и др., 2011).

Москва расположена в пределах трех физико-географических районов центральной части Русской платформы: Смоленско-Московской возвышенности (северо-запад); Мещерской низменности (восточная часть); Теплостанской возвышенности (юго-запад и юг). Долины рек Москвы и Яузы являются естественными границами между этими районами. В пределах долины р. Москвы и ее притоков выделяются пойма и три надпойменные аллювиальные террасы.

История города Москвы насчитывает более 850 лет со времени, когда князь Юрий Долгорукий основал небольшую крепость у впадения речки Неглинной в Москву-реку на месте, где сейчас расположен Московский Кремль. За это время на территории города происходили многочисленные планировки и перестройки. Рельеф городской территории претерпел значительные техногенные изменения. Многие мелкие реки и ручьи убраны в подземные коллекторы. Овраги засыпаны. Изменена конфигурация береговой линии, глубина и ширина русла рек Москвы и Яузы; уровень воды в Москве-реке поднят на 5 м выше Перервенской плотины и на 11 м – выше Карамышевской; изменены абсолютные отметки и относительные превышения террасовых и пойменных поверхностей за счет площадных подсыпок. Пойма частично затоплена.

Подземное пространство в центральной, наиболее старой части Москвы представляет собой сложно построенный неоднородный массив, включающий наряду с горными породами в естественном залегании невыдержанные по мощности и составу техногенные образования, множество подземных сооружений различного назначения, глубины заложения и времени постройки.

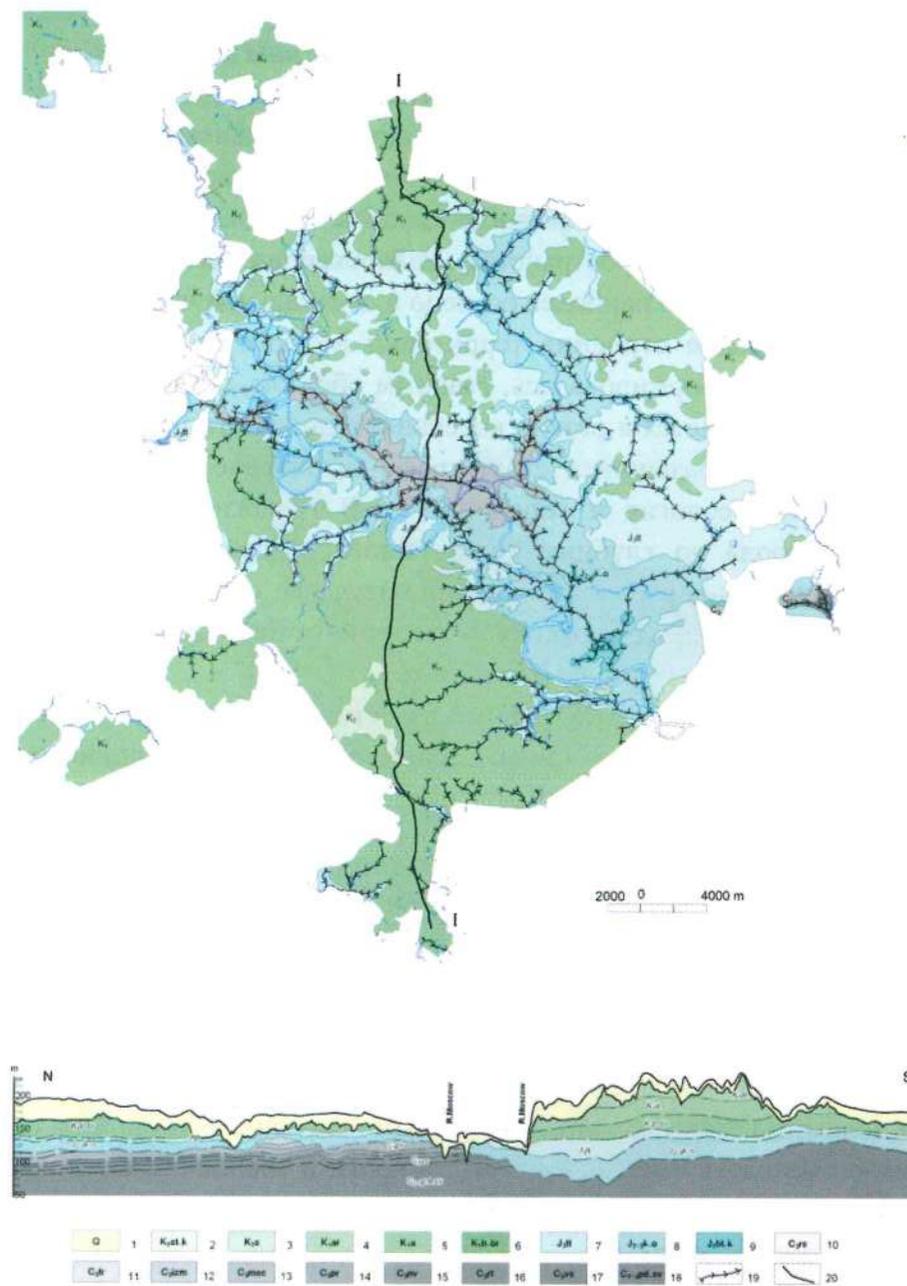


Рис. 6.1. Геологическая карта территории г. Москвы.
Условные обозначения см. на рис. 6.3

В силу исторических традиций старая часть города продолжает оставаться культурным и административным центром Московского мегаполиса. Несмотря на сложные геологические условия, здесь строятся новые автомобильные тоннели и эстакады, дополнительные линии метрополитена, высотные сооружения с фундаментами глубокого заложения, происходит реконструкция старинных зданий с использованием верхних горизонтов подземного пространства. В Москве на сегодняшний день подземное пространство наиболее освоено в центральной части города.

Геологическое строение территории Москвы очень изменчиво. Эта изменчивость сформировалась, главным образом, под влиянием речной эрозии и выражается в резких колебаниях мощности и большом разнообразии состава различных стратиграфо-литологических комплексов пород (Москва. Геология и город, 1997). В геологическом строении территории города до глубины техногенного воздействия принимают участие терригенно-карбонатные каменноугольные отложения, песчано-глинистые мезозойские отложения и песчано-глинистые четвертичные отложения различного генезиса (рис. 6.1–6.3).

Средне-верхнекаменноугольные известняки, доломиты, мергели и глины залегают на глубине 5–150 м. Карбонатные породы трещиноваты и закарстованы. Встречаются раздробленные зоны, сложенные обломками известняков и доломитов и известковой мукой. Каменноугольные известняки, доломиты, мергели и глины залегают под мезо-кайнозойскими песчано-глинистыми отложениями. На дочетвертичную поверхность каменноугольные породы выходят в тальвегах и склонах доледниковых и современных речных долин. В инженерно-геологическом отношении каменноугольные глины и мергели могут служить хорошим основанием сооружений, так как обладают высокой плотностью и прочностью. Известняки и доломиты также являются надежным основанием, но при их освоении надо оценивать степень закарстованности и трещиноватости, и при необходимости использовать предварительную цементацию или другие мелиоративные мероприятия.

Мезозойские отложения представлены среднеюрскими континентальными породами батского и келловейского ярусов, морскими песчано-глинистыми средне-верхнеюрскими отложениями келловейского, оксфордского и титонского ярусов, морскими, преимущественно песчаными, отложениями меловой системы. Породы батского и келловейского ярусов –

это темно-серые и бурые пески, суглинки и супеси с углистыми включениями, прослоями и линзами песка. Иногда это глины голубовато-серые и бурые, плотные с прослоями песка. Мощность отложений бат-келловей редко превышает 10 м. Они залегают на каменноугольных породах в понижениях их кровли и перекрываются средне-верхнеюрскими келловей-оксфордскими глинами или на небольших участках – четвертичными песками, супесями и суглинками.

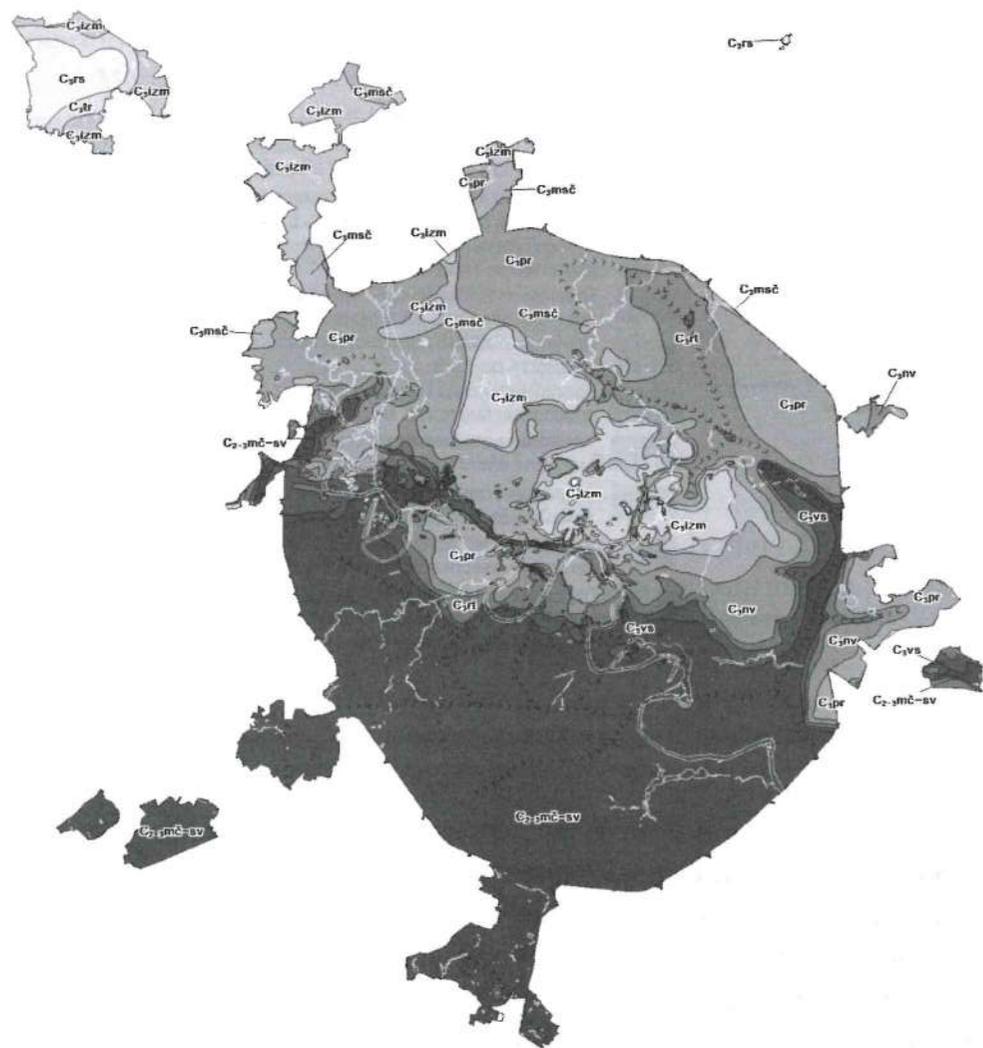


Рис. 6.2. Геологическая карта каменноугольных отложений г. Москвы.
Условные обозначения см. на рис. 6.3

Стратиграфические комплексы.

система	отдел	ярус		
меловая	верхний	свнтонский	Пески, песчаники, трепел. Мощность до 10 м.	
		коньянский		
		сеноманский		
	нижний	альбский	Пески, глины, алевроиты. Мощность до 35 м.	
		аптский		
		барремский	Пески, алевроиты. Мощность до 44 м.	
		готеривский		
юрская	верхний	титонский	Пески и глины. Мощность до 30 м.	
		оксфордский		
	средний	келловейский	Глины. Мощность до 54 м.	
		батский		
	каменноугольная	верхний	гмелеский	Добрятинский горизонт. Русавкинская толща. Известняки с прослоями мергелей. Мощность до 4 м.
				Яузский горизонт. Трошковская толща. Глины, мергели, прослои известняков. Мощность до 6 м.
				Яузский горизонт. Измайловская толща. Известняки с прослоями мергелей. Мощность до 12 м.
				Дорогомилловский горизонт. Мещеринская толща. Глины. Мощность до 10 м.
				Дорогомилловский горизонт. Перхуровская толща. Известняки с прослоями мергелей. Мощность до 18 м.
				Хамовнический горизонт. Неверовская толща. Глины, мергели, прослои известняков. Мощность до 15 м.
			Хамовнический горизонт. Ратмировская толща. Известняки с прослоями доломитов и мергелей. Мощность до 10 м.	
			Кревякинский горизонт. Воскресенская толща. Глины, мергели, прослои известняков. Мощность до 12 м.	
			Подольский, мячковский горизонты и суворовская толща кревякинского горизонта. Известняки, доломиты, прослои мергелей и глин. Мощность до 90 м.	
			касимовский	
средний	московский			

Рис. 6.3. Стратиграфические комплексы, показанные на геологических картах дочетвертичных и каменноугольных отложений территории г. Москвы

Глины келловея и оксфорда являются отложениями юрского моря, которое покрывало всю территорию Москвы. После отступления моря они залежали сплошным чехлом на каменноугольных отложениях и породах бат-келловея и были размыты в кайнозой в пределах речных долин. Мощность этих пород очень изменчива. Она колеблется в зависимости от доюрского рельефа и в центральной части Главной Московской ложбины на юге Москвы достигает 50 м, а на доюрских водоразделах в северной части города редко превышает 10 м. Это темно-серые и черные однородные, плот-

ные слюдистые глины с обломками фаунистических остатков. Келловей-оксфордские глины на доледниковых водоразделах перекрываются морскими песчано-глинистыми отложениями волжского яруса, а в доледниковых долинах залегают под ниже-среднечетвертичными аллювиальными и водно-ледниковыми песками. Келловей-оксфордские глины являются хорошим основанием для инженерных сооружений. Они не могут использоваться как основание только в бортах речных долин и оврагов, так как обладают свойством ползучести и являются основным деформирующим горизонтом для большинства глубоких оползней в долине р. Москвы.

Морские пески и глины титонского яруса сохранились только на доледниковых водоразделах. Они с размывом залегают на келловей-оксфордских глинах. Мощность титонской толщи колеблется от 0-1 м на бровке склонов доледниковых долин до 10-30 м на доледниковых водоразделах. Максимальную мощность они имеют на юго-западе города в пределах Теплостанской возвышенности. Здесь титонские отложения полностью сохранились от кайнозойского размыва и перекрыты нижнемеловыми песками. На остальной территории они залегают под четвертичными отложениями.

Меловые породы сохранились от размыва преимущественно на юге и юго-западе Москвы, где они слагают водоразделы дочетвертичного-современного возраста. Это морские отложения мощностью до 40 м, которые залегают на верхнеюрских породах титонского яруса. Низы толщи сложены бурыми, темно-серыми и серыми с зеленоватым оттенком песками и песчаниками со слоем фосфоритовых галек в основании. Вверх по разрезу они замещаются черными и темно-серыми глинами, над которыми залегают светлые желто-серые мелкозернистые пески с редкими тонкими прослоями рыхлого песчаника. Отложения мелового возраста перекрыты четвертичной толщей. Меловые пески, верхнеюрские пески и глины титонского яруса, бат-келловейские песчано-глинистые породы не могут служить надежным основанием, так как часто обладают тиксотропными и пльвунными свойствами и способны разжижаться при динамических воздействиях.

Четвертичные отложения представлены моренными суглинками окского, днепровского и московского оледенений, межледниковыми преимущественно песчаными отложениями, аллювиальными песками трех

надпойменных террас и поймы р. Москвы и ее притоков и неоднородными техногенными образованиями. Мощность четвертичных отложений изменяется от первых метров до 40–50 м. Она максимальна на Теплостанской возвышенности, где влияние современной речной эрозии незначительно. Большой мощностью четвертичная толща характеризуется в пределах глубоких доледниковых долин, заполненных водно-ледниковыми песками. Техногенные образования распространены на территории города практически повсеместно. Их мощность достигает 15–20 м. Как правило, это насыпные песчано-глинистые грунты, содержащие обломки, строительный мусор, остатки обуглившейся древесины. Повышенная (более 5 м) мощность насыпи четко прослеживается по долинам засыпанных рек, ручьев и оврагов, и в пределах поймы р. Москвы. В прирусловой части р. Москвы мощность техногенных образований часто превышает 10 м. Среди четвертичных отложений надежным основанием инженерных сооружений служат среднечетвертичные моренные суглинки, представляющие плотные и прочные грунты, как правило, туго пластичной консистенции. В качестве основания могут использоваться и аллювиальные верхнечетвертичные пески, слагающие надпойменные террасы р. Москвы и ее притоков. Это плотные однородные пески средне- и мелкозернистые, редко включающие маломощные прослойки супесей и суглинков. Наиболее сложными в освоении являются отложения современного аллювия поймы и среднечетвертичные водно-ледниковые отложения, в разрезе которых встречаются значительные по мощности прослойки сильносжимаемых глинистых пород, обладающих способностью к разжижению при динамических воздействиях.

Особенности распространения, мощность и глубина залегания литолого-стратиграфических комплексов на территории города во многом определяются влиянием древней и современной речной эрозии. На территории г. Москвы выделяются три разновозрастные генерации речных долин, эрозионная деятельность которых обусловила строение современного и древнего рельефа. Доюрские эрозионные врезы прослеживаются на поверхности терригенно-карбонатных отложений каменноугольного возраста, в их центральных частях юрские песчано-глинистые породы характеризуются повышенной мощностью (рис. 6.2). Доледниковые эрозионные врезы выделяются на дочетвертичной поверхности и заполнены вод-

но-ледниковыми песчаными отложениями четвертичного возраста (рис. 6.1). На территории города развита довольно разветвленная современная речная сеть, представленная рекой Москвой и ее притоками. Взаимное расположение разновозрастных эрозионных врез является одним из ведущих факторов формирования инженерно-геологических условий на территории мегаполиса (Кутепов и др., 2006). В зоне влияния подземных сооружений могут находиться породы всех трех комплексов (табл. 6.1).

Вертикальное зонирование подземного пространства Московского мегаполиса определяется тремя основными уровнями – 10, 20, 40 м (рис. 6.4). До глубины 10 м расположены фундаменты большинства зданий с подземной частью, подземные пешеходные переходы, подземные торговые комплексы, коллекторы подземных коммуникаций мелкого заложения, подземные автомобильные парковки. Строительство подземных сооружений на этом уровне осуществляется практически всегда открытым способом. До глубины 20 м расположены автотранспортные тоннели, станции и тоннели метро мелкого заложения, коллекторы подземных коммуникаций глубокого заложения, фундаменты крупных многофункциональных комплексов. До глубины 40 м расположены автотранспортные тоннели, станции и тоннели метро глубокого заложения, фундаменты отдельных уникальных зданий. Глубже 40 м расположены отдельные наиболее глубокие тоннели метро.

Сложность освоения геологической среды во многом определяется инженерно-геологическими особенностями пород, залегающих в основании проектируемого сооружения или являющихся вмещающей средой. В зависимости от того, какие породы будут служить основанием или вмещателем подземных сооружений можно оценить степень благоприятности той или иной части территории города для подземного строительства (табл. 6.1).

Подземные воды на территории Москвы приурочены к четвертичным и мезозойским песчаными и песчано-глинистым отложениям и каменноугольным карбонатным отложениям. При наличии в толще четвертичных отложений слабопроницаемых слоев моренных суглинков выделяются надморенный безнапорный грунтовый водоносный горизонт, межморенные и подморенные часто напорные воды. В районах, где морена отсутствует, четвертичный водоносный горизонт, как правило, не обладает напором и является грунтовым.

Разновозрастной эрозионный рельеф и строение подземного пространства Москвы

Взаимное расположение элементов разновозрастного эрозионного рельефа	Дююрские водоразделы		Дююрские водоразделы	
	Главная Московская дююрская ложбина и долины её крупных притоков	Доледниковая долина р. Москвы и её крупные притоки	Склоны и водоразделы доледниковой долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков
Глубина освоения подземного пространства	Склоны и водоразделы современной долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы современной долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы современной долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы современной долины р. Москвы и её крупных притоков
	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков
	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков
	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков	Склоны и водоразделы долины р. Москвы и её крупных притоков
0 - 10 м	а III-IV	а III-IV	а III-IV	а III-IV
10 - 20 м	f, g II-III	f, g II-III	f, g II-III	f, g II-III
20 - 40 м	J-K	J	J	J
Глубже 40 м	C	J-K	C	C

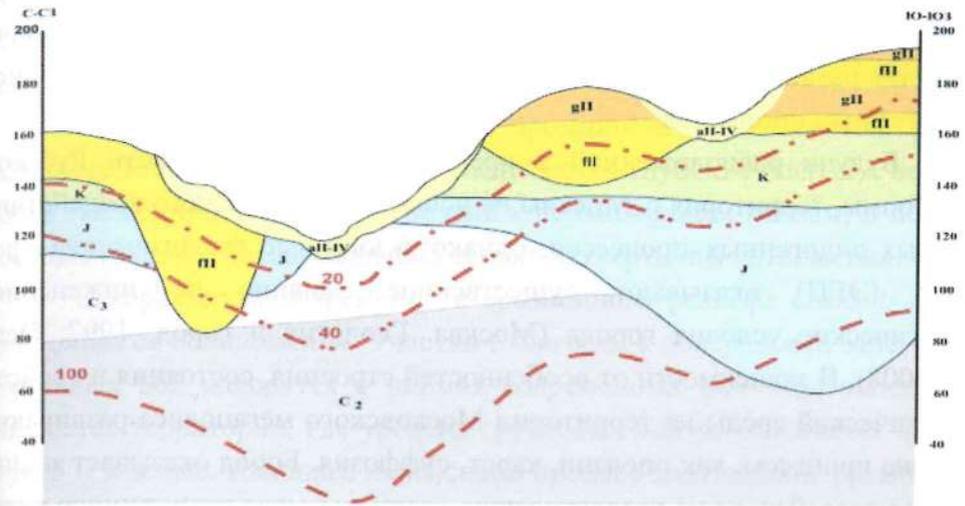


Рис. 6.4. Схема строения подземного пространства г. Москвы

Мезозойские пески, залегающие под четвертичными, составляют с ними единый водоносный горизонт, водоупором для которого служат мезозойские или каменноугольные глины. В толще верхнеюрских отложений титонского яруса и средне-верхнеюрских бат-келловейских отложений встречаются водонасыщенные песчаные прослои, воды которых часто обладают достаточно высоким напором над кровлей.

Трещинно-карстовые воды каменноугольных карбонатных толщ в начале XX века в Москве были практически всегда напорные за исключением долины р. Москвы и некоторых ее притоков, где эти породы залегают под песчаным аллювием и содержат грунтовые воды. Интенсивные откачки воды привели к тому, что напор над кровлей каменноугольных водоносных горизонтов значительно снизился и в настоящее время верхние горизонты трещинно-карстовых вод в отдельных районах города – безнапорные. В то же время встречаются каменноугольные подземные воды с напором до 25 м. Наличие напорных подземных вод в основании проектируемого сооружения является осложняющим фактором и требует предварительного водопонижения,

гидроизоляции строительного котлована или других мероприятий, предшествующих строительству. Такие мероприятия могут изменить гидродинамическую обстановку на прилегающей территории и повлечь за собой развитие или активизацию опасных природных и природно-техногенных процессов.

Будучи расположенной в пределах центральной части Русской платформы, территория г. Москвы не испытывает серьезного воздействия опасных эндогенных процессов, однако экзогенные геологические процессы (ЭГП) оказывают существенное влияние на инженерно-геологические условия города (Москва. Геология и город, 1997; Осипов, 2008). В зависимости от особенностей строения, состояния и свойств геологической среды на территории Московского мегаполиса развиваются такие процессы, как оползни, карст, суффозия. Город оказывает значительное воздействие на геологическую среду, вызывая техногенную активизацию этих процессов.

Карстово-суффозионные процессы развиваются на участках, где закарстованные и трещиноватые каменноугольные карбонатные породы залегают под четвертичными песками или отделяются от них слабопроницаемым слоем юрских и/или каменноугольных глин небольшой мощности. Это тальвеги и склоны доледниковых долин, где верхнеюрские глины маломощны или полностью размыты. При определенных гидродинамических условиях может произойти разрушение глинистого слоя и начаться суффозионный вынос четвертичных песков в карстовые каверны и трещины в известняках, что вызовет провал на земной поверхности. При отсутствии разделяющего слоя глин суффозионный вынос отдельных песчаных фракций в известняки происходит на большой площади и сопровождается разуплотнением песчаной толщи и мультислойными оседаниями на поверхности.

Наиболее интенсивно карстово-суффозионные процессы проявляются в местах наложения доюрских и доледниковых врезов (Кутепов, Кожевникова, 2009; Кутепов и др., 2011). Известняки здесь характеризуются повышенной закарстованностью, а перекрывающие их мезозойские отложения частично или полностью размыты. К таким территориям относится северо-запад Москвы, где известны 42 провальные карстовые во-

ронки. Деятельностью современных рек и выходами подземных вод на склонах вызвана суффозия в бортах речных долин. Такая суффозия способствует разуплотнению четвертичной песчаной толщи и образованию воронок и оседаний на поверхности речных террас.

Развитие оползней связано с эрозионной деятельностью современной р. Москвы и ее притоков. Выделяются глубокие оползни, поверхность смещения которых приурочена к верхнеюрским глинам, и поверхностные оползни, захватывающие только четвертичные отложения.

С характером современного эрозионного рельефа связано *развитие процесса подтопления*. Участки с близким к поверхности залеганием грунтовых вод находятся в поймах современных рек. Подтопленными считаются территории, где уровень грунтовых вод располагается на глубине 3 м и менее. Наиболее интенсивно процесс подтопления развивается в поймах рек и в районах, где близко от земной поверхности залегает слабопроницаемый слой морены или верхнеюрских глин. На водораздельных территориях, где сохранились от размыва моренные суглинки, может формироваться техногенный горизонт «верховодки».

6.2. Картографирование опасных экзогенных процессов территории г. Москвы

Для территории мегаполиса составлены крупномасштабные карты оценочного районирования по отдельным процессам, карта геоэкологического состояния территории по совокупности экзогенных геологических опасностей, а также интегральная карта районирования по сложности инженерно-геологических условий для всей территории города (Кутепов и др., 2011; Kozliakova et al., 2016; Osipov, 2014). Как указано выше, на территории г. Москвы к опасным экзогенным процессам относят оползни, карстово-суффозионный процесс и подтопление. При картографировании каждый из этих процессов ранжируют по степени опасности и составляют карты отдельных опасностей. Такие карты в масштабе 1:50 000 приведены в монографии «Москва. Геология и город» (Москва. Геология и город, 1997). В 2009 г. в рамках работ по проекту «Крупномасштабное тематическое геологическое картирование территории города Москвы» бы-

ли составлены карты экзогенных геологических опасностей в масштабе 1:10 000 на основе анализа описаний разрезов более 85 000 архивных буровых скважин и аналитических карт (Осипов, Антипов, 2012).

Карта оползневых явлений и подтопления подземными водами составлена в НПП «Георесурс». Ее описание и анализ приведены в статье (Осипов, Антипов, 2012). Основным природным фактором для оползней Москвы является эрозионная деятельность рек, в том числе, боковая и речная эрозии. Они связаны с весенним подъемом уровня рек и с миграцией речных наносов. Как подробно описано в главе 3, оползни на территории Москвы по масштабам проявления подразделяются на два типа – глубокие, характеризующиеся площадью 0,8–1,0 км² с глубиной захвата пород до 100 м, и поверхностные, мелкие – площадью 0,002 км² с глубиной захвата пород преимущественно 1–5, реже 10–15 м. Глубокие оползни выявлены в настоящее время на 11 участках долины реки Москвы и на 3-х – в долине реки Сходни. По своему механизму они относятся к оползням выдавливания или сдвига. Они развиты на склонах высотой 15–70 м, крутизной 9–17°. Протяженность оползневых участков от 0,5 до 3,0–3,5 км. Это длительно развивающиеся (100–400 лет) стадийные процессы. Подготовительные стадии проходят очень медленно и незаметно. Стадия основного смещения длится несколько суток.

В геологическом строении оползневых склонов принимают участие породы четвертичной, меловой, юрской и каменноугольной систем, в коренном залегании располагающиеся почти горизонтально. Отложения каменноугольной системы, представленные карбонатными породами, и преимущественно песчаные отложения бат-келловейского яруса юрской системы в оползневом процессе участия не принимают и являются всегда подстилающей толщей для оползающих пород. Вышележащие глины келловейского яруса на ряде участков могут быть вовлечены в смещение. Основным деформирующимся горизонтом являются глины оксфордского яруса юрской системы. Эти глины склонны к деформации ползучести и снижению прочности во времени, что определяет их основную роль в оползневом процессе. Вышележащие пески юрской и меловой систем, а также песчано-глинистые отложения четвертичной системы называются перекрывающей толщей, так как смещаются вследствие деформирования подстилающих их пород.

Поверхностные и мелкие оползни развиваются на склонах реки Москвы, ее притоках, в бортах оврагов и балок. Оползни этого типа относятся к оползням скольжения и течения, иногда встречаются суффозионные оползни, обусловленные механическим выносом материала подземными водами, разгружающимися на склоне. Большинство оползней имеет четкие очертания – оползневую нишу, сформировавшуюся на склоне после смещения материала, и сместившиеся грунты у базиса оползания.

Процесс подтопления территории города подземными водами имеет самое широкое распространение. Подтопленными считаются территории, в пределах которых уровень грунтовых вод залегает на глубинах 3 м и менее, т.е. достигает глубин расположения основной части городских подземных коммуникаций, подвалов зданий и сооружений. Региональное положение поверхности грунтовых вод на территории города обусловлено двумя основными факторами. Первым из них является питание грунтовых вод, вторым – их разгрузка в нижележащие водоносные горизонты и речную сеть. Эти два региональных фактора формируют две основные статьи подземного водного баланса, от соотношения которых, в первую очередь, зависит как регресс, так и прогресс подтопления. Если естественный сток грунтовых вод затруднен, – формируется подтопление территории.

При застройке или при реконструкции старых районов, как правило, наблюдается изменение питания грунтового водоносного горизонта, причем чаще всего – его увеличение. Основным фактором являются утечки из водонесущих коммуникаций (водопровода и канализации). Большую роль играет интенсивное освоение подземного пространства, особенно в центральных частях города. На многих участках г. Москвы подземные сооружения расположены ниже уровня грунтовых вод и являются, по существу, «плотинами», вызывающими подтопление близлежащих городских территорий. Процесс подтопления, как правило, вызывает активизацию других процессов, которые могут привести к аварийным и катастрофическим ситуациям.

Прямым следствием подтопления является повышение коррозионной активности грунтов, лежащих в основании зданий и сооружений. Это происходит повсеместно за счет того, что грунтовые воды являются химически загрязненными.

При картировании подтопленных территорий они разделяются на постоянно подтопленные и периодически подтапливаемые за счет колебаний уровня грунтовых вод. Эти территории различаются по уровню инте-

гральной опасности для городской застройки. В настоящее время в постоянно подтопленном состоянии находится около 30% городской территории, 20–25% территории г. Москвы периодически подтапливается грунтовыми водами, т.е. в пределах этих территорий среднесрочное положение уровня поверхности грунтовых вод – от 3,0 до 4,0–5,0 м, но с учетом амплитуд сезонных колебаний в отдельные периоды уровень грунтовых вод залегает на глубинах менее 3 м. Таким образом, можно говорить о том, что в настоящее время около 50% территории г. Москвы находится в постоянно подтопленном состоянии или подтапливается периодически.

Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов составлена в ИГЭ РАН и представляет собой графическое отображение в масштабе 1:10 000 распространения на территории г. Москвы опасностей, обусловленных наличием закарстованных карбонатных пород каменноугольного возраста (Кутепов и др., 2011). На карте показаны различные категории опасности древних карстовых форм (штриховка) и категории опасности современных карстово-суффозионных процессов (цвет) (рис. 6.5 и 6.6).

Основой для составления карты являлись рабочие аналитические материалы, представленные в виде отдельных тематических слоев: литологический состав верхнего горизонта пород каменноугольного возраста; возраст и литологический состав отложений, залегающих на закарстованных и трещиноватых карбонатных породах; тальвеги и центральные части доюрских и доледниковых эрозионных врезов.

Критериями выделения категорий опасности древних карстовых форм являются длительность и интенсивность карстового процесса, степень закарстованности карбонатных пород. Опасная категория выделяется в центральных частях доледниковых эрозионных врезов, где карбонатные породы разрушены, в них встречаются полости – открытые или заполненные терригенным материалом. Потенциально опасная категория выделяется на участках доюрских эрозионных врезов, где карбонатные породы залегают под мезозойскими отложениями; в них встречаются каверны и трещины, измененные карстом. К неопасной категории отнесены участки, где карбонатные породы залегают под глинами каменноугольного возраста, они не подвергались прямому воздействию эрозионных процессов, слабо трещиноваты и характеризуются незначительной кавернозностью.

Блок-схема составления карты опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов территории г. Москвы

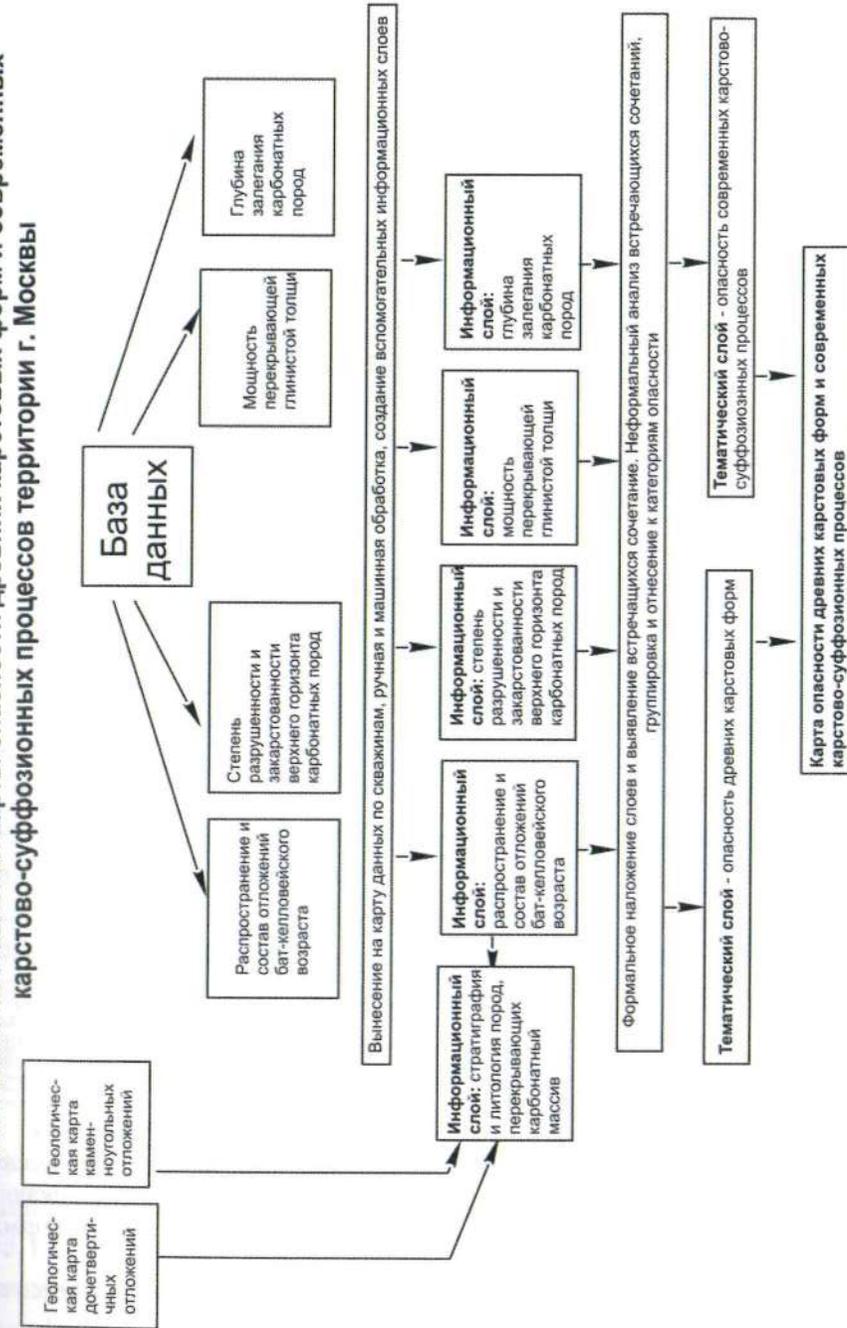


Рис. 6.5. Блок-схема составления карты опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов территории г. Москвы



Рис. 6.6. Карта опасности древних карстовых форм и современных карстово-суффозионных процессов территории г. Москвы (и ее фрагмент (на врезке), северо-западная часть, район станции метро «Полежаевская»).
 Условные обозначения. Категории опасности древних карстовых форм:
 1 – неопасная, 2 – потенциально опасная, 3 – опасная.
 Категории опасности современных карстово-суффозионных процессов:
 4 – неопасная, 5 – потенциально опасная, 6 – опасная; тальвеги погребенных эрозионных врезов: 7 – доледникового возраста, 8 – доюрского возраста; 9 – линия геологического разреза

На территории г. Москвы наиболее распространены участки потенциально опасной категории опасности древних карстовых форм (77% площади города). Территории опасной категории занимают наименьшие площади, преимущественно в центральной части города (2%). К неопасной категории опасности древних карстовых форм отнесен 21% городской территории.

Критериями выделения опасности современных карстово-суффозионных процессов являются: наличие закарстованных и трещиноватых карбонатных пород, наличие современных проявлений карстово-суффозионных процессов на земной поверхности, особенности строения терригенной толщи над карбонатным массивом (Инструкция ... , 1984).

Опасная категория современных карстово-суффозионных процессов выделяется в северо-западной части города, где зафиксированы современные карстово-суффозионные провалы и оседания земной поверхности. Эта категория занимает менее 1% площади города. К потенциально опасной категории относятся участки, где четвертичные пески залегают на карбонатных породах каменноугольного возраста или мощность слабопроницаемого слоя глин, отделяющего воды четвертичных отложений от трещинно-карстовых вод каменноугольных карбонатных пород, не превышает 10 м. Такие участки приурочены к центральным частям доплейстоценовых (доледниковых) и современных речных долин и занимают около 16% площади города. Они прослеживаются преимущественно в пределах надпойменных террас рек Москвы и Яузы. К неопасной категории отнесены участки, где карбонатные породы перекрыты глинами каменноугольного и юрского возраста мощностью более 10 м – это доледниковые и современные водораздельные поверхности и их склоны. Неопасная категория современных карстово-суффозионных процессов занимает около 83% городской территории.

Результаты интегральной оценки опасности ЭГП представлены на «Карте геоэкологического состояния территории г. Москвы (оценка опасных природных процессов)» (рис. 6.7-6.8). Эта карта составлена в масштабе 1:50 000 в ИГЭ РАН в 2007 г. под руководством В.М. Кутепова и актуализирована в соответствии с картами геологических опасностей проекта Крупномасштабного геологического картирования территории г. Москвы в 2009-2012 гг. (Осипов, Антипов и др., 2012).

Природные и природно-техногенные процессы	Оползни	Карстово-суффозионные процессы	Карст	Подтопление
Благоприятное	Нет	Неопасная категория	Малоопасная категория	Отсутствует
Условно благоприятное			Опасная категория	
Условно неблагоприятное			Опасная или малоопасная категория	Постоянное
Неблагоприятное			Опасная или малоопасная категория	Периодическое
Весьма неблагоприятное	Есть	Потенциально опасная категория	Опасная категория	
Весьма неблагоприятное				

Рис. 6.7. Категории геоэкологического состояния территории г. Москвы (по оценке опасных геологических процессов).
 Легенда к карте масштаба 1:50 000

Интегральная оценка геоэкологического состояния территории для наземного строительства сводится к выявлению степени возможных негативных изменений городской среды и осложнения строительства и эксплуатации зданий и сооружений на участках развития отдельных видов ЭГП или их сочетаний и типизации территории по степени благоприятности. Наиболее опасными процессами на территории города являются оползни, прежде всего глубокие, а также карстово-суффозионные провалы и оседания. Эти процессы вызывают повреждение или разрушение зданий и могут иметь катастрофические последствия. Менее опасен для зданий и сооружений процесс подтопления. Однако подтопление, являясь постоянно действующим фактором и имея значительную площадь распространения, наносит значительный экономический ущерб городскому хозяйству. На карте выделены 5 категорий от благоприятной до весьма неблагоприятной.

Карты отдельных опасных процессов, а также интегральная карта геоэкологического состояния территории г. Москвы необходимы при составлении рекомендаций на ранних стадиях проектирования строительного освоения наземного и подземного пространства города. Они также использованы при составлении итоговой карты инженерно-геологического районирования, на которой дана предварительная оценка территории города на основе комплексного анализа всех инженерно-геологических условий.

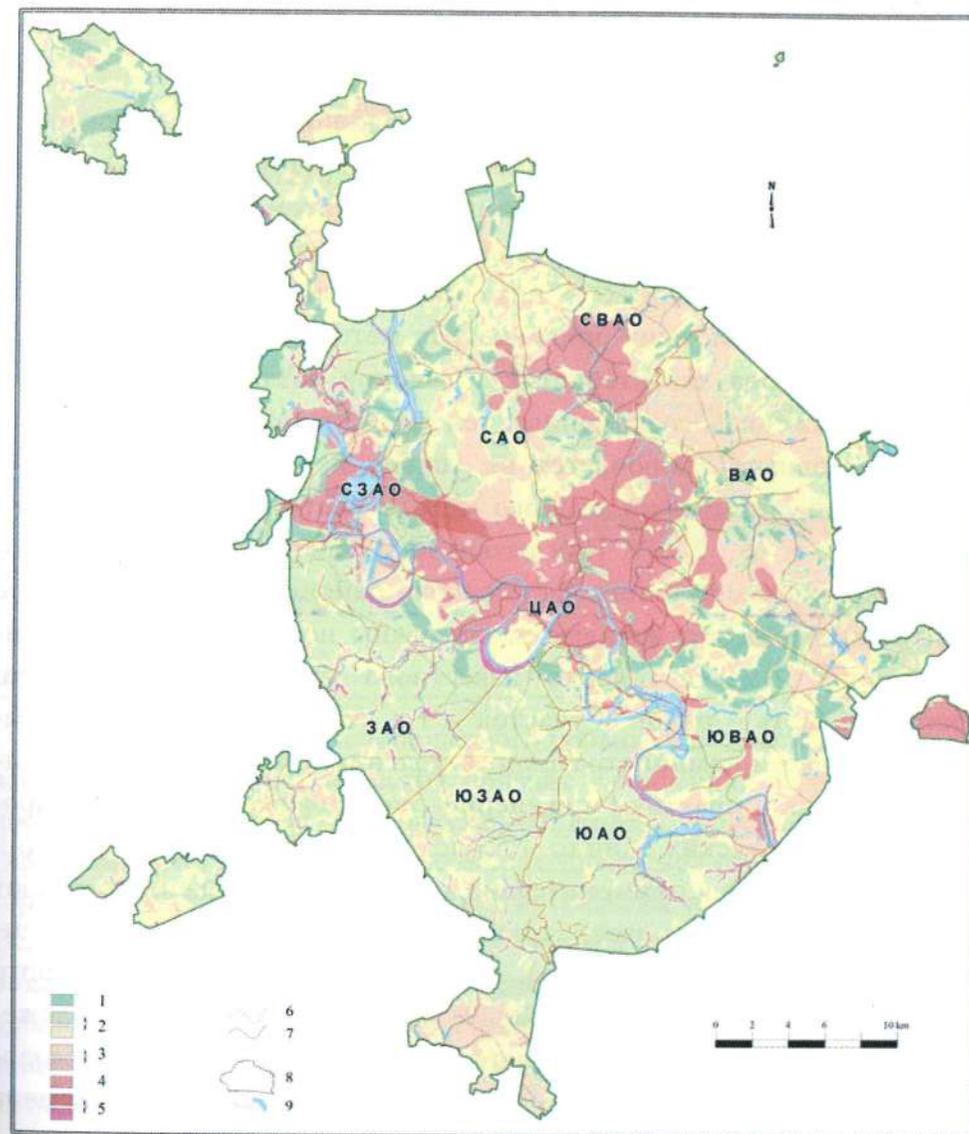


Рис. 6.8. Карта геоэкологического состояния территории г. Москвы (оценка опасных геологических процессов).
 Условные обозначения см. на рис. 6.7

6.3. Инженерно-геологическое районирование г. Москвы и его применение

Карта инженерно-геологического районирования территории г. Москвы (масштаб 1:10 000) составлена в ИГЭ РАН на основе интеграции данных о структурно-динамическом, геоморфологическом и геологическом строении, гидрогеологических условиях, распространении опасных природных и инженерно-геологических процессов. В основу карты положена оригинальная методика с использованием индексного метода характеристики таксонов различного ранга, что является отражением современных тенденций в развитии инженерной геологии. Новизна заключается не только в разработке логически обоснованной системы индексного метода картографирования (Осипов, Антипов и др., 2012). При развитии и совершенствовании методологии крупномасштабного (детального) районирования на примере территорий г. Москвы впервые реализованы новые подходы классифицирования. Вместо широко известного набора таксонов типа: регион – область – район – участок и т.д. (совпадающими по названию с единицами административного деления) обоснована необходимость введения в практику инженерно-геологического картографирования таксономических единиц – геологических массивов. С позиций системного анализа и применительно к целевой направленности работ геологические массивы рассматриваются как ведущие элементы земной коры (геологической среды), находящиеся в сфере техногенного воздействия (Антипов, Осипов, 2009). Детально обосновано положение о том, что для существующего разнообразия инженерно-геологических обстановок на территории Москвы использование термина «геологический массив» в наибольшей степени соответствует целям и задачам проведенного инженерно-геологического картографирования. В итоге с учетом ведущих признаков выделения таксонов разработана следующая иерархическая система таксономических единиц для целей крупномасштабного инженерно-геологического районирования г. Москвы (таблица 6.2).

Таблица 6.2

Система таксономических единиц геологических тел, выделяемых на территории г. Москвы при инженерно-геологическом районировании

Название таксона	Ведущие признаки выделения
Мегамассив (Регион) ↓	Структурно-геодинамический
Макромассив (Область) ↓	Геоморфологический
Мезомассив (Район) ↓	Литолого-стратиграфический
Инженерно-геологический массив (Участок)	Инженерно-геологический

Для выделения таксонов первого уровня (мегамассивов) использован структурно-геодинамический признак – тенденция территории к относительному поднятию или опусканию. Второй уровень районирования (макромассивы) характеризует геоморфологическое строение территории города, отражающее историю развития рельефа в четвертичное время. Основные геоморфологические единицы деления мегамассивов на макромассивы – типы и подтипы аккумулятивных равнин ледникового комплекса (подтипы: моренные, водно-ледниковые, моренно-водно-ледниковые; озерные и озерно-болотные) и эрозионно-аккумулятивных равнин аллювиального комплекса (подтипы: разноуровенные террасы р. Москвы и ее притоков). Мезомассивы выделяются в границах макромассивов (третий уровень районирования) по типу геологического строения, т.е. по наличию сочетаний в разрезе до глубины картируемой толщи литолого-стратиграфических комплексов (четвертичного, мелового, юрского, верхнекаменноугольного). Четвертый уровень районирования соответствует выделению в пределах мезомассивов оценочных таксонов – инженерно-геологических массивов (ИГМ).

Сложность инженерно-геологических условий (ИГУ) оценивалась по наличию опасных природных и инженерно-геологических процессов, техногенных, слабых, специфических грунтов и др. Инженерно-геологические массивы (ИГМ) подразделяются на три категории сложности – низкую, среднюю, высокую, с присвоением соответствующего цвета и индекса. В границах выделенных инженерно-геологических массивов на карте приводится условная формула, показывающая принадлежность этой территории к конкретным уровням районирования (рис. 6.9). На карте цветом выделены участки различной категории сложности по инженерно-геологическим условиям: высокой (11% территории города), средней (45%) и низкой (44%).

На карте детально отражена специфика пространственного разнообразия инженерно-геологических условий (ИГУ) с оценкой их сложности, что позволяет использовать ее для различных видов хозяйственной деятельности в г. Москве. Карта районирования с практической точки зрения является важнейшим документом, она должна приниматься во внимание при разработке Генплана города, порайонной и более детальной планировки, а также при решении других вопросов развития города. Эта карта может рассматриваться как базовый документ оценки инженерно-геологических условий г. Москвы, основание для разработки различных проектных, строительных, геоэкологических и кадастровых задач, программ детальных инженерно-геологических изысканий на строительных площадках. Кроме того, она может использоваться при освоении подземного пространства, управлении городскими землями, инженерной защите территорий, мониторинге геологической среды, для оперативных экспертных оценок и прогноза возможной реакции геологической среды при возникновении аварийных ситуаций.

Ниже рассмотрим некоторые возможные аспекты применения данной интегральной карты для оценки геологического риска на урбанизированной территории и, в частности, для участка Покровское-Стрешнево Северо-Западного административного округа г. Москвы (рис. 6.10).

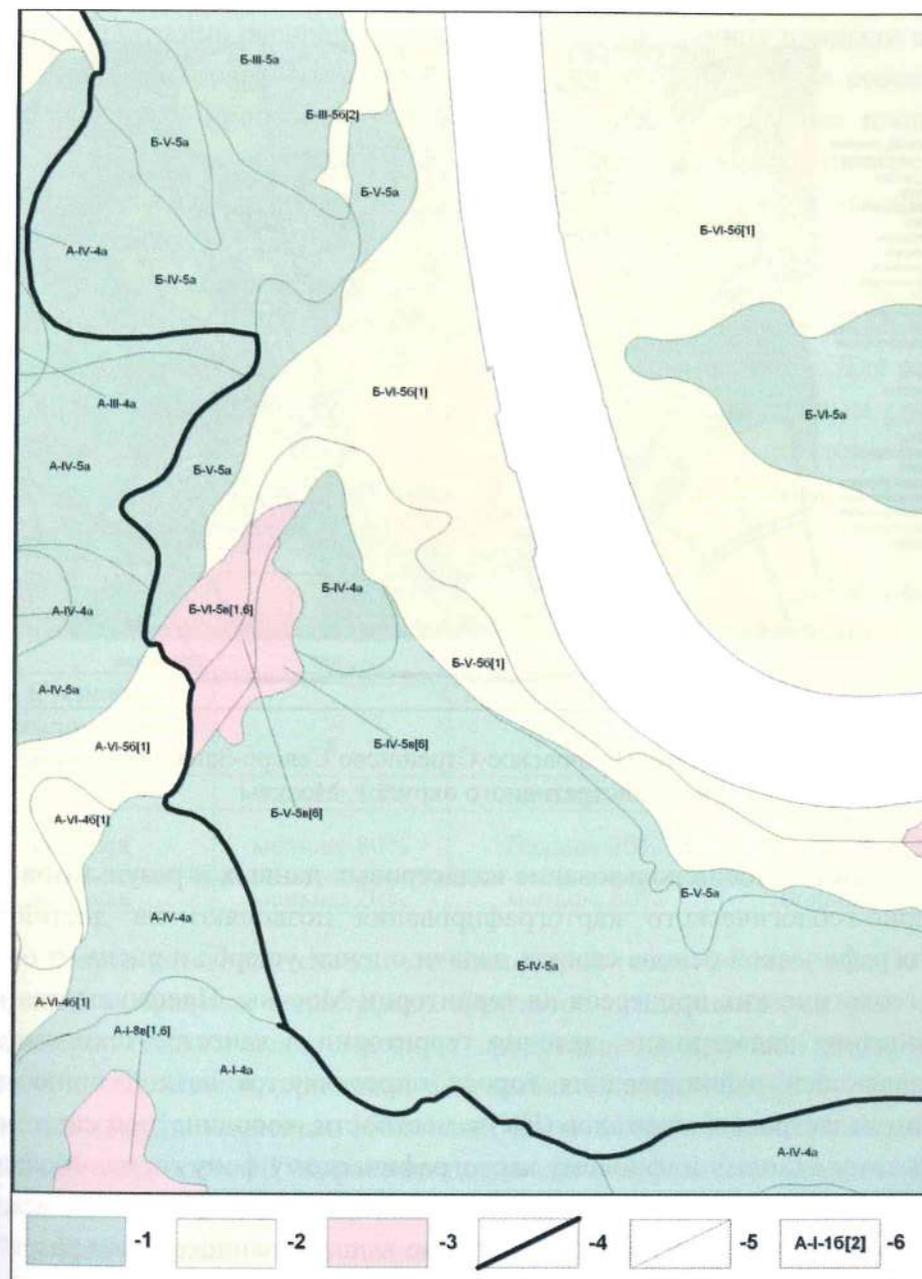


Рис. 6.9. Фрагмент карты инженерно-геологического районирования территории г. Москвы (масштаб 1:10 000).
Условные обозначения. Категории сложности: 1 – низкая (а), 2 – средняя (б), 3 – высокая (в), 4 – граница между мегамассивами, 5 – границы между мезомассивами, 6 – индексы инженерно-геологических массивов

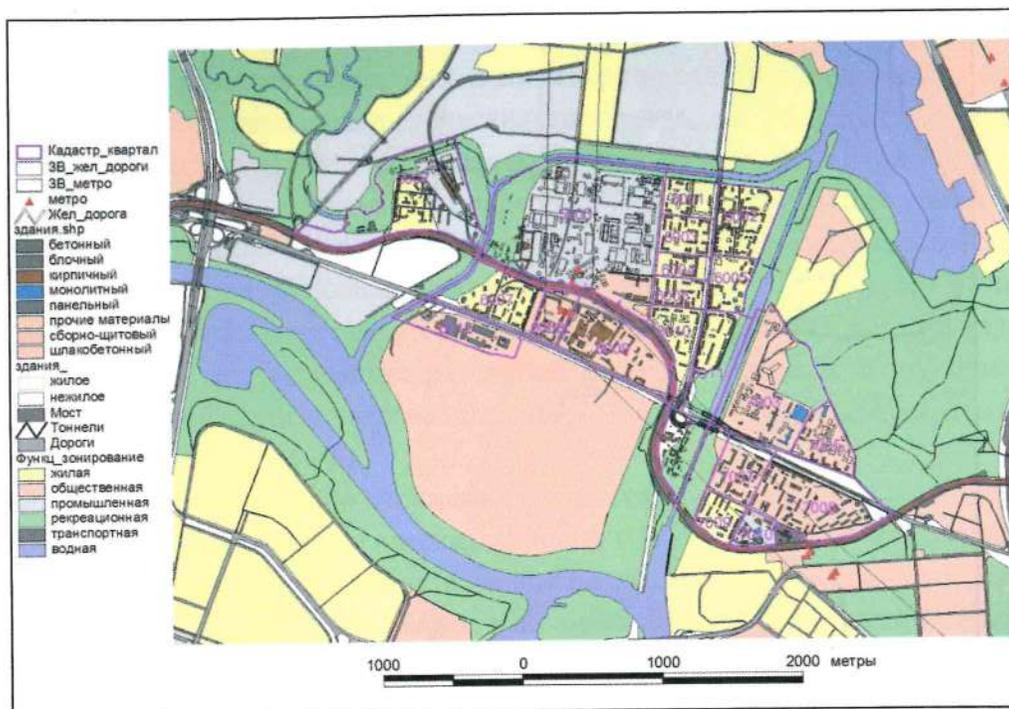


Рис. 6.10. Район Покровское-Стрешнево Северо-Западного административного округа г. Москвы

Совместное использование кадастровых данных и результатов инженерно-геологического картографирования позволяют на достойной фактографической основе ставить задачи оценки ущерба и риска от опасных геологических процессов на территории Москвы. Преимущества использования кадастрового деления территории в качестве техногенной составляющей районирования города определяются четкой привязкой границ кадастровых кварталов (КК) к местности, координатной системе и открытому единому цифровому картографическому фону города Москвы, что удобно на практике для дальнейшего использования создаваемых картографических материалов. На основе вышесказанного были разработаны подходы к решению задачи комплексной оценки геоэкологической сложности для кадастровых кварталов с использованием карты инженерно-геологического районирования территории г. Москвы.

На первом этапе в границах кадастровых кварталов выбраны инженерно-геологические массивы (ИГМ) по категориям сложности и рас-

считаны плотность распределения числа ИГМ на единицу площади квартала. Для кадастрового квартала рассчитаны площади, занятые опасными геологическими процессами и абсолютные и относительные площади трех категорий сложности ИГМ в соответствии с картой инженерно-геологического районирования (а – низкая сложность инженерно-геологических условий; б – средняя; в – высокая).

На втором этапе рассчитываются сводные оценки сложности инженерно-геологических условий по ведущим природным и инженерно-геологическим показателям, или геоэкологической сложности. Для расчета сводных территориальных оценок по выбранным кадастровым кварталам использовалась система классификации территории по степени геоэкологической сложности (таблица 6.3) (Осипов В.И., Бурова В.Н., Карфидова Е.А, 2015).

Таблица 6.3

Классификация сложности геоэкологической ситуации

Степень геоэкологической сложности	Степень сложности ИГУ		
	а	б	в
слабая	больше 80%	меньше 20%	0
средняя	меньше 80%	больше 20%	меньше или равно 20%
высокая	меньше 20%	меньше 80%	больше 20%

Карта категории сложности инженерно-геологических массивов в границах выбранных кадастровых кварталов представлена на рис. 6.11. Инженерно-геологические массивы представлены цветовой шкалой по категории сложности, при этом: а – слабая (зеленый цвет), б – средняя (желтый цвет), в – высокая (болотный цвет). Столбчатые диаграммы показывают плотность ИГМ, рассчитанную как отношение количества ИГМ к площади кадастрового квартала.

Полученные карты позволяют получить информацию и сопоставлять территории по природным условиям и техноприродному состоянию как лицам, принимающим решения (муниципальные органы власти, страховые компании и т.п.), так и простым гражданам, приобретающем жилье в определенных районах города с учетом технических характеристик КК.

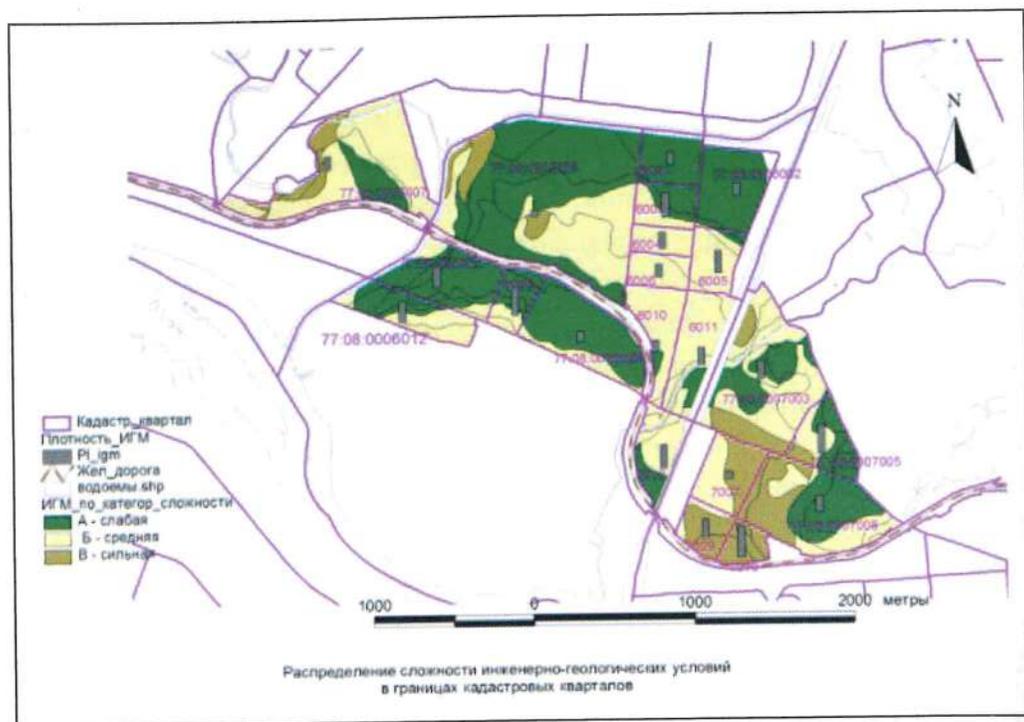


Рис. 6.11. Распределение сложности инженерно-геологических условий в пределах кадастровых кварталов

На рис. 6.12 представлена карта сводных территориальных оценок геоэкологической сложности, которые отображены следующим образом: зеленый цвет – слабая, оранжевый – средняя, коричневый – высокая. Круговые диаграммы показывают удельные веса площадей ИГМ различной категории сложности (размер окружности нормализован по площади кадастрового квартала).

Карты геоэкологической сложности кадастровых кварталов могут служить основой для оценок возможных потерь (рисков), выраженных в баллах. КК характеризуются большим количеством технических параметров – инженерно-конструктивных, стоимостных и многих других. На рассматриваемом участке выделены следующие функциональные зоны (таблица 6.4):

- 1) жилой застройки (J);
- 2) общественно-деловые (O);
- 3) промышленные (P);

- 4) рекреационные (R);
- 5) транспортные (T);
- 6) расположения водных объектов (V).



Рис. 6.12. Карта сводных территориальных оценок геоэкологической сложности кадастровых кварталов

Эти зоны разделены на 21 кадастровый квартал. Наибольшая площадь в пределах выделенных кадастровых кварталов относится к зоне жилой застройки, затем к зонам общественного использования и промышленным. Рекреационные зоны, транспортные и зоны водных объектов имеют подчиненное значение и занимают в пределах кварталов не более 20% от общей площади. Соответственно наибольшие потери (ущербы) от проявления опасных геологических процессов связаны с нарушениями функционирования таких реципиентов как здания (капитальные строения) в пределах трех функциональных зон: жилой, общего назначения и промышленной.

Таблица 6.4

Характеристика техногенной нагруженности кадастровых кварталов района Покровское-Стрешнево Северо-Западного административного округа г. Москвы

№ пп	№КК	Площадь КК*, кв. м	Площадь кап. стр., м²	Плотность застройки	Гр. ** КК	Функциональные зоны (ФЗ)***						Варианты (В) ФЗ	Сочетание В и Гр.
						J	O	P	T	R	V		
1	77:08:0007009	89339	13088	0,15	2	+						1	1-2
2	77:08:0006008	89584	14723	0,16	2		+		+			2	2-2
3	77:08:0006003	104198	17909	0,17	2	+						1	1-2
4	77:08:0007010	64896	11877	0,18	3			+	+			2	2-3
5	77:08:0006004	65376	1184	0,02	1	+						1	1-1
6	77:08:0006006	80639	22516	0,28	3	+						1	1-3
7	77:08:0006005	115899	15458	0,13	2	+						1	1-2
8	77:08:0006001	124343	17156	0,14	2	+				+	+	2	2-2
9	77:08:0006013	138444	13163	0,10	2	+			+	+	+	2	2-2
10	77:08:0007005	141420	32395	0,23	3		+					1	1-3
11	77:08:0006011	222631	14250	0,06	1	+			+	+	+	2	2-1
12	77:08:0006007	236960	19483	0,08	1	+	+		+	+	+	3	3-1
13	77:08:0006010	144423	15794	0,11	2	+			+			2	2-2
14	77:08:0007007	150238	19048	0,13	2	+	+		+			3	3-2
15	77:08:0006012	175169	34763	0,20	3		+	+	+	+	+	3	3-3
16	77:08:0006002	210495	32116	0,15	2	+						1	1-2
17	77:08:0007008	399012	41137	0,10	2	+	+		+			3	3-2
18	77:08:0006009	300926	55462	0,18	3		+		+			2	2-3
19	77:08:0007003	511006	34529	0,07	1		+			+	+	2	2-1
20	77:08:0005007	495049	61530	0,12	2	+		+	+	+		3	3-2
21	77:08:0005005	1065589	300735	0,28	3		+	+	+	+	+	3	3-3

* КК – кадастровый квартал; ** Гр. – группа плотности застройки; *** J – жилая зона, O – зона общего назначения, P – промышленная зона, T – транспортная зона, R – рекреационная зона, V – зона водных объектов.

Следует отметить, что на рассматриваемом участке выделены кадастровые кварталы как с моноструктурой, когда кадастровый квартал расположен в пределах одной функциональной зоны, а также кадастровые кварталы, занимающие территории функциональных зон в различном их сочетании (рис. 6.10). Всего 7 кадастровых кварталов отнесены к моноструктурам, все остальные – к смешанным структурам.

Анализ встречаемости функциональных зон в пределах кадастровых кварталов позволил выделить три различных варианта сочетаний функциональных зон в пределах кадастровых кварталов (табл. 6.5).

Таблица 6.5

Сочетания вариантов и групп КК (по их количеству)

Группы по плотности застройки	Варианты встречаемости функциональных зон в КК		
	1 (J или O)	2 (J + T, R, V или O + T, R, V или P + T, R, V)	3 (J + O + T, R, V; J + P + T, R, V или O + P + T, R, V)
1 (менее 0,08)	1	2	1
2 (0,08–0,18)	4	4	3
3 (более 0,18)	2	2	2

Первый вариант (1) – кадастровый квартал относится к одной из основных функциональных зон (жилой или общего назначения (J или O)). Второй вариант (2) – кадастровый квартал относится к одной из основных функциональных зон (жилой, общего назначения или промышленной (J, O или P)) и ряду неосновных функциональных зон (транспортной, рекреационной и водных объектов (T, R, V)). Третий вариант (3) – отвечает следующему сочетанию функциональных зон в пределах кадастровых кварталов – это жилая зона и зона общего назначения (J + O) и транспортная, рекреационная зоны и зона водных объектов (T, R, V); зона общего назначения и промышленная зона (O+P) или жилая зона и промышленная зона (J + P) с зонами транспортной, рекреационной и водных объектов (T, R, V). В индексном обозначении эти зоны имеют следующее выражение: 1 – J или O; 2 – J + T, R, V или O + T, R, V или P + T, R, V; 3 – J + O + T, R, V; J + P + T, R, V или O + P + T, R, V.

Для уточнения характеристики техногенной нагруженности кадастровых кварталов была проанализирована плотность застройки (площадь застроенной части территории к общей площади кадастрового квартала). Для этого были составлены диаграммы плотности застройки по кадастровым кварталам. Удельный вес застройки определялся как отношение площади застроенной территории к площади квартала.

По плотности застройки при равномерном делении интервала его значений можно выделить три группы кадастровых кварталов: 1 – до 0,08; 2 – 0,08–0,18; 3 – свыше 0,18. Как видим, распределение достаточно неравнозначное, но так как любая классификация относительна и, как правило, является предметом договоренности, такое деление принципиально допустимо. Самой многочисленной является группа кварталов со средней плотностью застройки от 0,08 до 0,18 (ее количество равно 11), с плотностью застройки более 0,18 встречается 6 кадастровых кварталов и менее 0,08 – 4 кадастровых квартала (см. таблицу 6.4). Т.е. 52% рассматриваемой территории относится к группе со средней плотностью застройки.

Наибольшая плотность застройки характерна для функциональных зон общего назначения и промышленных зон, и только один квартал с большой плотностью застройки расположен в жилой зоне. Средняя плотность застройки характерна в основном для жилой зоны и в некоторых случаях – это территории, относящиеся к жилой зоне и зоне общего назначения. Проанализированы данные по количеству кадастровых кварталов, отнесенных к различным вариантам техногенной нагруженности по сочетанию функциональных зон и относящихся к различным группам по плотности застройки (табл. 6.5).

Как видим, плотность застройки достаточно равномерно соотносена со всеми выбранными вариантами сочетания функциональных зон в пределах кадастровых кварталов. Кроме перечисленных характеристик (сочетания функциональных зон в пределах кадастровых кварталов и плотности застройки), уточнение техногенной нагруженности территории и ее типизация требуют определения еще целого ряда параметров.

Сопоставление карты сводных территориальных оценок геоэкологической сложности и технических характеристик кадастровых кварталов позволяет оценить возможные негативные последствия в пределах кадастровых кварталов при определенных сочетаниях природных и техногенных (технических) факторов. При этом каждому критерию, являющемуся характеристикой природной и технической составляющих КК, присваивается балл. Природная составляющая КК оценена следующим образом. КК, расположенным в пределах территорий, отвечающих слабой степени геоэкологической сложности, присваивается 1 балл, сред-

ней – 2 балла и высокой – 3 балла (табл. 6.6). Техническая оценка КК складывается из характеристик плотности застройки (1 балл – до 0,08; 2 балла – 0,08–0,18; 3 балла – более 0,18 (см. табл. 6.4, 6.5)), вариантов встречаемости функциональных зон (1 балл – 1 вариант, 2 балла – 2 вариант и 3 балла – 3 вариант (табл. 6.4)).

Таблица 6.6

Результаты оценки природно-технической сложности КК

№ п/п	№ КК	Геоэкологическая сложность КК, баллы	Техническая характеристика КК, баллы	Суммарная характеристика, баллы
1	77:08:0007009	3	3	6
2	77:08:0006008	2	4	6
3	77:08:0006003	2	3	5
4	77:08:0007010	3	5	8
5	77:08:0006004	2	2	4
6	77:08:0006006	2	4	6
7	77:08:0006005	2	3	5
8	77:08:0006001	1	4	5
9	77:08:0006013	2	4	6
10	77:08:0007005	2	4	6
11	77:08:0006011	2	3	5
12	77:08:0006007	1	4	5
13	77:08:0006010	2	4	6
14	77:08:0007007	3	5	8
15	77:08:0006012	1	6	7
16	77:08:0006002	2	3	5
17	77:08:0007008	3	5	8
18	77:08:0006009	1	5	6
19	77:08:0007003	2	3	5
20	77:08:0005007	2	5	7
21	77:08:0005005	2	6	8

Сумма всех баллов определяет возможности оценки ущербов по КК (таблица 6.6). Сумма этих баллов меняется от 4 до 8. Эти значения можно поделить на соответствующие интервалы, отвечающие степени природно-технической сложности КК: 4 – низкая, 5-6 – средняя, 7-8 – высокая. Как видим, полученные данные весьма отличаются от карты сводных территориальных оценок геоэкологической сложности. Во многих КК общая природно-техническая сложность увеличилась.

Результаты пробных расчетов показали, что развитие исследований в плане оценки возможного ущерба и риска от опасных геологических процессов целесообразно строить на использовании данных карты инженерно-геологического районирования в сочетании с данными кадастра недвижимости, который в настоящий момент является единственным легитимным источником экономической характеристики территории.

6.4. Особенности формирования геологического риска на урбанизированных территориях

Урбанизированная территория – сложная природно-техническая система, характеризующаяся взаимодействием природной и техногенной составляющих, оказывающих друг на друга существенное влияние. На территории крупных городов геологическая среда претерпевает значительные изменения в результате воздействия на нее высоких техногенных нагрузок вследствие концентрации промышленного, гражданского, административного, транспортного строительства и т.д., что, в свою очередь, приводит к значительным социально-экономическим потерям.

Природным источником опасности являются опасные геологические и инженерно-геологические процессы, развивающиеся на территории крупных городов. Следует отметить существенные отличия опасных геологических процессов (ОГП), проявляющихся на урбанизированных территориях и в ненарушенных человеком условиях, которые связаны с обусловленностью первых процессов не только естественными природными, но и техногенными факторами. Именно техногенные факторы определяют большую (как правило, по сравнению с природными анало-

гами) активность этих процессов во времени и, самое главное, – в пространстве.

Более высокая повторяемость или скорость развития большинства техноприродных процессов обусловлена наличием на урбанизированных территориях множества дополнительных, возбуждающих эти процессы, факторов. К ним, прежде всего, относятся: утечки из водонесущих коммуникаций, достигающие в некоторых городах России 50% и более; вибрационные воздействия транспорта (наземного и подземного); статические и динамические нагрузки от зданий и сооружений; электромагнитные поля, определяющие повышенную коррозионную активность грунтов; площадные аномалии теплового режима городов и других поселений; повышенная на 2–7 °С среднегодовая температура воздуха урбанизированных территорий (на широте Москвы) по сравнению с окружающей местностью, что определяет существенно большую продолжительность нахождения грунтов в талом состоянии и, следовательно, увеличение периода развития экзогенных ОГП. Указанное увеличение может составлять от 10–20 дней в парках и скверах до всего зимнего периода – в пределах отапливаемых зданий и отдельных сооружений (теплотрассы, автомобильные дороги и т.п.). Это далеко не полный перечень техногенных факторов, влияющих на развитие опасных процессов.

Еще одно отличие состоит в существенно большей опасности рассматриваемых процессов и величин, наносимых ими, социальных, экономических и других потерь на урбанизированных территориях из-за большей здесь плотности населения и национального богатства (высокой стоимости городских земель объектов недвижимости) по сравнению с менее освоенными участками Земли.

Перечисленные выше основные техногенные факторы, влияющие на интенсивность опасных геологических процессов, развивающихся на урбанизированных территориях, также оказывают существенное влияние и на техногенные объекты (реципиенты опасности). Все это определяет в настоящее время значительные методические трудности, а также повышенную ответственность за результаты прогнозирования геологических опасностей и обусловленных ими рисков потерь на урбанизированных территориях.

Основная трудность связана с тем, что невозможно определить прямое воздействие опасного природного процесса на техногенный объект. Согласно нормативным документам, любое строительство должно осуществляться с проведением защитных мероприятий от опасных природных процессов и соответствующих им проектных решений. Исходя из этого положения, следует, что все объекты должны быть защищены от опасных природных процессов и на протяжении заданного срока эксплуатации должны находиться в нормальном или работоспособном техническом состоянии, не требующем дополнительных обследований объектов в результате их внезапного деформирования и (или) разрушения. Но данное положение далеко не всегда работает и, к сожалению, известно много случаев разрушений зданий и сооружений на урбанизированных территориях, которые связаны с самыми разнообразными причинами как природного, так и техногенного характера. Таким образом, следует понимать, что все потери в пределах урбанизированных территорий нужно относить к природно-техногенным и, соответственно, рассчитывать природно-техногенные риски в пределах природно-техногенных систем.

В подтверждение того, что невозможно установить прямую зависимость воздействия опасных процессов на объекты, был проведен анализ состояния однотипных зданий, расположенных в различных природных условиях. В анализе были использованы данные Мосгоргеотреста по обследованию состояния (наличие трещин различного размера) более 250 зданий, расположенных в центральной части города Москвы. Была проведена привязка этих зданий к карте инженерно-геологического районирования территории города, что позволило оценить инженерно-геологические условия расположения каждого обследованного дома (рис. 6.13).

Для анализа отобраны 55 однотипных 3-4-этажных кирпичных зданий возрастом 70–100 лет. Размер трещин в них изменяется от незначительных (менее 5 мм) до весьма ощутимых (более 15 мм). По интенсивности трещиноватости здания распределяются следующим образом: здания с трещинами менее 5 мм – 51%; здания с трещинами от 5 до 15 мм – 24%; здания с трещинами более 15 мм – 25%.

Выбранные здания расположены в различных инженерно-геологических условиях (в соответствии с картой инженерно-геологического районирования территории г. Москвы, масштаба 1:10 000), характеризующихся соответствующими категориями сложности: низкой (а),

средней (б) и высокой (в) (Осипов, Бузова и др., 2011). Все здания расположены в пределах структурного прогиба Московско-Мещерской морено-флювиогляциальной равнины и аллювиальной террасированной равнины, испытывающей относительное опускание земной поверхности.

Высокой категории сложности инженерно-геологических условий в пределах территорий анализируемой выборки отвечают следующие 2 типа (а, б) территорий, выделенных по сочетаниям структурно-геодинамических, геоморфологических, литолого-стратиграфических и инженерно-геологических факторов:

– (а) вторая надпойменная терраса (IV)¹ и пойма реки Москвы (VI), сложенные четвертичными отложениями, подстилаемыми верхнекарбонными известняками (3), относящиеся к потенциально опасным карстово-суффозионным территориям [3], с присутствием в разрезе техногенных образований мощностью более 6 м [3] и частично подтопленным [1];

– (б) вторая (IV) и третья (III) надпойменные террасы и пойма (VI) реки Москвы, сложенные четвертичными отложениями, подстилаемыми верхнекарбонными известняками (3), местами под четвертичными отложениями залегают маломощные толщи юрских отложений (2), относящиеся к потенциально опасным карстово-суффозионным [3] и подтопленным территориям [1].

Средней категории сложности инженерно-геологических условий также отвечают два типа территорий (с, д):

– (с) первая (V), вторая (IV) и третья (III) надпойменные террасы и пойма (VI) реки Москвы, сложенные четвертичными отложениями, подстилаемыми верхнекарбонными известняками (3), местами под четвертичными отложениями залегают маломощные толщи юрских отложений (2), относящиеся к потенциально опасным карстово-суффозионным территориям [3];

– (д) подтопленные [1] нерасчлененные моренные, водно-ледниковые и моренно-водно-ледниковые равнины (I), третья надпойменная терраса (III) и пойма (VI) реки Москвы, в разрезе которых четвертичные отложения подстилаются маломощными толщами юрских отложений и верхнекарбонными известняками (2).

¹ Индексы соответствуют условным обозначениям к карте инженерно-геологического районирования территории г. Москвы, масштаба 1:10 000.

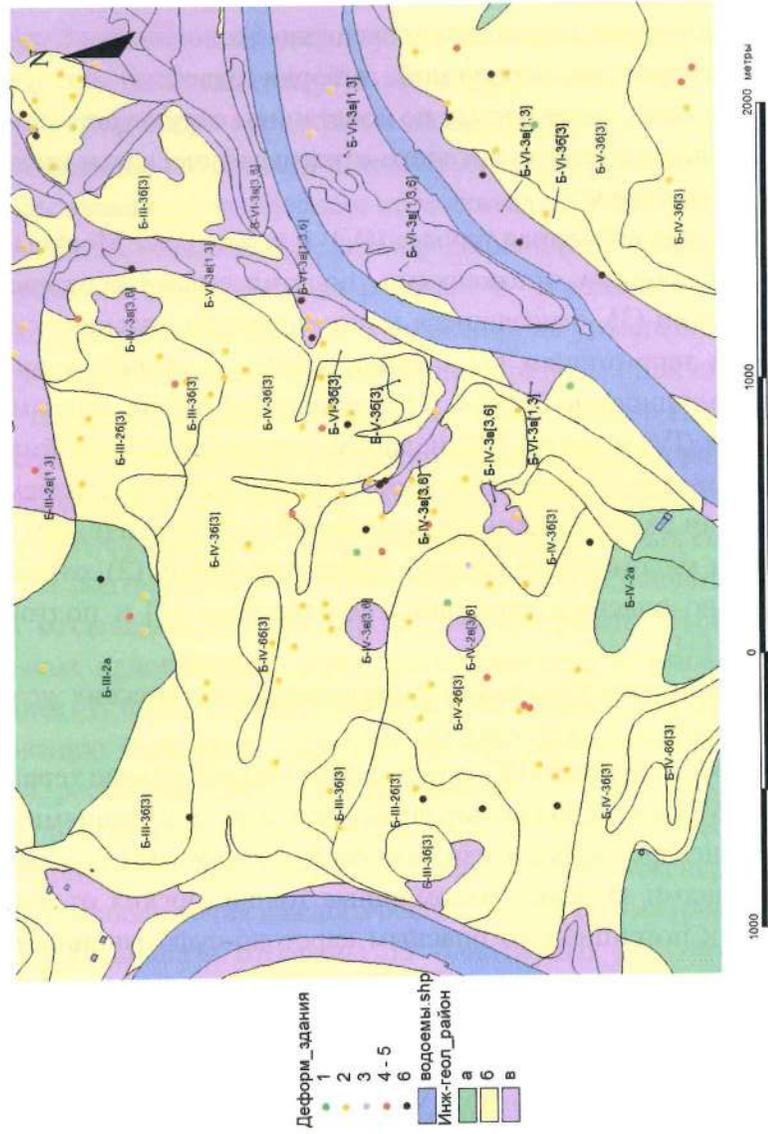


Рис. 6.13. Фрагмент карты инженерно-геологического районирования г. Москвы со зданиями с различной трещиноватостью: 1, 2, 3 – здания с трещинами менее 5 мм; 4-5 – здания с трещинами 5-15 мм; 6 – здания с трещинами более 15 мм

Низкая категория сложности характерна для одного типа (е) – нерасчлененных моренных, водно-ледниковых и моренно-водно-ледниковых равнин (I), третьей надпойменной террасы (III) реки Москвы, в разрезе которых четвертичные отложения подстилаются маломощными толщами юрских отложений и верхнекарбонowymi известняками (2), в пределах которых не развиваются опасные геологические процессы.

Распределение зданий в пределах различных категорий сложности инженерно-геологических условий и типов с характеристикой интенсивности трещиноватости представлены в таблицах 6.7 и 6.8.

Анализ этих таблиц позволил выделить некоторые общие тенденции в изменении состояния (их деформированности) однотипных зданий, расположенных в различных природных условиях. Как видим, здания, подвергшиеся деформациям, с трещинами больше 15 мм, преимущественно расположены в пределах территорий, характеризующихся сложными инженерно-геологическими условиями. 57% зданий с трещинами более 15 мм, 8% зданий с трещинами от 5 до 15 мм и 28% зданий с трещинами менее 5 мм расположены в указанных выше условиях (табл. 6.7).

Также следует отметить преимущественное расположение зданий со значительными деформациями (размер трещин превышает 15 мм) в пределах территорий, в разрезе которых отсутствуют юрские отложения. В процентном отношении это выглядит следующим образом: трещины более 15 мм – 72%; трещины от 5 до 15 мм – 46% и трещины менее 5 мм – 64% (табл. 6.8).

Если рассмотреть распределение зданий с размером трещин менее 5 мм по сложности инженерно-геологических условий и факторам их формирования, то логического распределения заметить невозможно, что еще раз подчеркивает многофакторность их проявления. Совершенно очевидно, что на такое образование трещин значительное влияние оказывают техногенные факторы, такие как функциональное назначение, прохождение линий метрополитена, плотность застройки и т.п.

Но основной вывод из данного анализа следующий: в условиях урбанизированных территорий невозможно выявить влияние одного природного или иного фактора на состояние зданий и сооружений (возможность деформирования и (или) разрушения). Оно определяется сочетанием природных и техногенных факторов. Соответственно и формирование природного риска зависит напрямую от «степени изменения» природных условий в системе урбанизации.

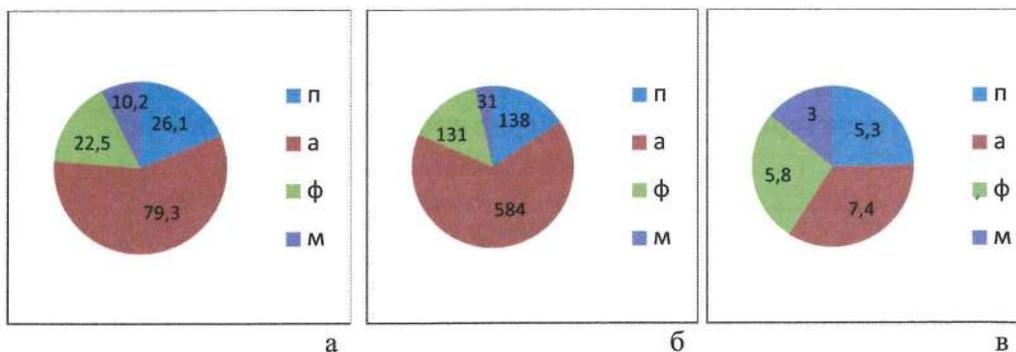


Рис. 6.14. Распределение деформированных зданий в пределах комплексов пород в основании фундаментов:

а – площадь комплексов пород, км²; б – количество деформированных зданий в пределах выделенных комплексов пород; в – количество деформированных зданий в пределах км² (плотность деформирования)

На основании такого распределения сделан вывод о том, что наибольшей деформации подвержены здания, расположенные на аллювиальных (террасовых) комплексах пород. Такое утверждение весьма сомнительно в силу того, что в анализ включены здания различного назначения (жилые, административные, промышленные) разного возраста, разных конструктивных характеристик и материала строительства.

Из анализа данных следует, что из обследованных 884 зданий не деформированы 100, следовательно, 88,7% всех зданий деформированы. Если рассмотреть, как распределено соотношение деформированных зданий к обследованным по выделенным комплексам пород в основании фундамента, то получится совершенно другая картина.

В пределах террасового и флювиогляциального комплекса пород деформированы 89% зданий, на пойменном – 87% и на моренном – 84%, что, на наш взгляд, не дает однозначной преимущественной картины (рис. 6.15, а, б).

Как видим, на рис. 6.15, б, не видно явного преимущества соотношения деформированных зданий к обследованным в каком-либо из комплексов пород в основании фундаментов зданий. Такие результаты анализа подтверждают правильность вывода о крайней сложности оценок риска на городских территориях от отдельных опасных природных процессов, так как эта территория представляет природно-техническую систему со своими мало предсказуемыми и сложными закономерностями развития.

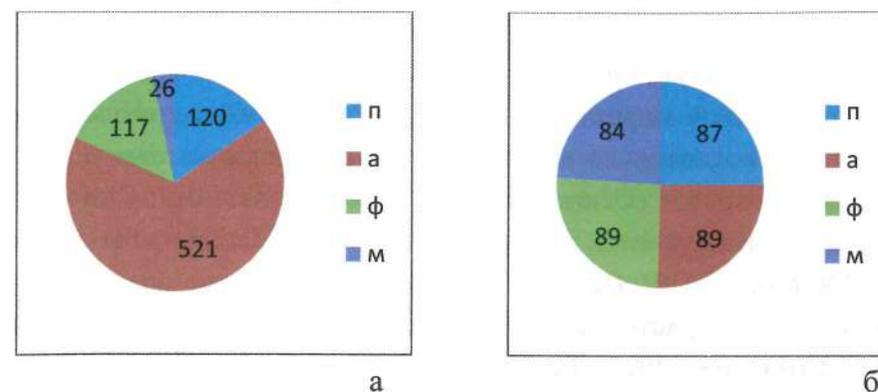


Рис. 6.15. Распределение деформированных и обследованных зданий в пределах комплексов пород в основании фундаментов:
а – количество деформированных зданий; б – процентное соотношение

6.5. О проблемах картографирования геологического риска

С понятием геологического риска в той или иной степени знаком каждый специалист, работающий в области инженерно-геологических изысканий, поскольку требование его оценки записано в Федеральном законе № 384-ФЗ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (Статья 15, п. 6). В Москве при проектировании отдельных зданий и сооружений геологический риск оценивают в соответствии с «Рекомендациями по оценке геологического риска на территории г. Москвы» (2002) (Рекомендации ... , 2002).

В итоге получают величину вероятного ущерба от геологических опасностей за срок службы сооружения в денежном выражении или в процентах от его стоимости. Второй характеристикой риска служит снижение срока службы сооружения без капитального ремонта.

Разработка методики и процедуры оценки рисков опасных геологических процессов представляет собой наиболее актуальную задачу. Практически все исследователи, как в России, так и за рубежом, для предварительной оценки геологического риска на территории городов идут по пути совмещения карт опасных природных процессов с картами уязвимости городской инфраструктуры. Однако эта задача на количе-

ственном уровне в силу неопределенностей геологической информации и сложности оценки уязвимости объектов городской инфраструктуры не решена еще нигде в мире. Несмотря на то, что проблеме геологического риска посвящено довольно много работ, в ней остается еще достаточно нерешенных вопросов (Осипов, Еремина, Козлякова, 2017; Clayton, 2009; Kalsnes, 2010; Kozlyakova, Eremina, et al., 2016; Marchiori-Faria, Ferreira, et al., 2009; Mora, 2010). Особенно остро стоит проблема оценки уязвимости городской инфраструктуры для геологических опасностей (Осипов, Еремина, Козлякова, 2017). Если для характеристики опасности чаще всего традиционно используют качественную сравнительную оценку, то для инфраструктуры не выработано единого мнения о способах оценки.

Картографирование риска применяется намного реже, чем картографирование опасностей. Главная проблема связана с трудностями в оценке уязвимости объекта риска, то есть городской инфраструктуры и территории. Для Москвы известны, пожалуй, только две карты геологического риска. Первая составлена в масштабе 1:50 000 в 1996 г. в рамках программы «Безопасность Москвы» (авторы: В.И. Осипов, В.М. Кутепов, О.К. Миронов). Карта подробно описана в книге «Москва. Геология и город» (Москва. Геология и город, 1997, с. 382–390). На карте выделены районы распространения пяти категорий риска: от неопасной до чрезвычайно опасной. Категории выделяются в зависимости от распространения опасных процессов (оползни, карстово-суффозионный процесс и подтопление) или их сочетаний. Для каждой категории в легенде к карте даются рекомендации по использованию территории и снижению геологического риска. Городская инфраструктура на этой карте никак не оценена. Фактически здесь картографировалась интегральная опасность, а не риск.

Вторая карта – карта геологического риска ущерба составлена в масштабе 1:25 000 под руководством Г.Л. Коффа в 2006 г. Методология работы над ней подробно изложена в монографии «Геоэкология Москвы: методология и методы оценки состояния городской среды» (Кофф, Лихачева, 2006). Авторы попытались тщательно проанализировать основные возможные причины аварий и деформаций зданий и сооружений жилищно-гражданского назначения и реализовать полученные оценки в виде карт.

Оценка степени опасности и риск ущерба от природных и природно-техногенных процессов оценивается через два понятия: опасность и уязвимость. Под опасностью (I) в данной работе понимается экспертная оценка сравнительной вероятности последствий набора геологических и инженерно-геологических процессов в данной области геологического пространства применительно к устойчивости зданий и сооружений. Под уязвимостью (V) – экспертная оценка степени возможного повреждения объектов под действием геологических и инженерно-геологических процессов. Уязвимость определяется числом потерь и характеризуется отношением состояния объекта после воздействия к первоначальному состоянию. А геологический риск – как потенциальный ущерб, наносимый со стороны геологических процессов территории или объекту. Риск (R) рассчитывается по формуле:

$$R = V * I$$

Итог такой оценки риска, которая носит не абсолютный, а скорее относительный характер, – карта геологического риска ущерба при застройке разного вида.

Оценка риска ущерба осуществлялась авторами методики в несколько этапов (Кофф и др., 2006). На первом этапе проводилось:

- классифицирование территории (водоохранные, транспортные зоны и т.д.) и оконтуривание выделов по функциональному назначению;
- оценка геологических факторов и выбор наиболее опасных;
- экспертная оценка опасных геологических и инженерно-геологических процессов;
- экспертная оценка потенциального вклада процессов в интегральную опасность;
- определение величин геологической опасности для каждого выдела.

В результате экспертной оценки выявлено, что наиболее распространены карстово-суффозионные и оползневые процессы, подтопление, техногенное оседание, эрозия и заболачивание с различной потенциальной опасностью.

Для следующих геологических факторов было оценено удорожание строительства и эксплуатации зданий: слабые грунты, залегающие

на глубинах 2–10 м и 2–5 м, оползневые явления, высокое стояние грунтовых вод, рельеф с уклонами 5–10% или 10–20%, закарстованные или заболоченные территории. Для всех факторов проводилась классификация по категориям: отсутствие фактора; фактор, наносящий незначительный ущерб; средний ущерб и значительный ущерб. Типы инженерно-геологических районов были распределены по трем категориям для каждого инженерно-геологического фактора: условно благоприятные, среднеблагоприятные и малоблагоприятные. По степени опасности развития инженерно-геологических процессов участки также были разделены на благоприятные, среднеблагоприятные и малоблагоприятные. В итоге подсчитывалась интегральная оценка геологической опасности и проводилось ее ранжирование. Такая оценка выполнена для каждого выдела.

Методика определения уязвимости объектов и территорий (Кофф, Лихачева, 2006) состоит из расчета степени уязвимости ($V_e(H)$), то есть отношения стоимости восстановления ($П_e$) после воздействия опасного процесса к его первоначальной стоимости ($П$):

$$V_e(H) = П_e / П.$$

Наиболее полно уязвимость можно выразить через балансовую стоимость объектов, стоимость продукции, аренды или услуг, доход от деятельности объекта и коэффициенты дисконтирования. Различают несколько типов уязвимости: вещественную, социальную и экономическую. С другой стороны, уязвимость может быть одномоментная и замедленная. Углубленная оценка уязвимости должна учитывать технические характеристики объекта, квалификацию инженерных факторов, факторов, связанных со строительством и эксплуатацией объекта.

Оценка уязвимости состоит из следующих этапов:

1. Классификация объектов по их внутренним свойствам, определяющим степень реакции на воздействие;
2. Паспортизация объектов на заданной территории, т.е. отнесение каждого объекта к тому или иному классу, оценка его стоимости и т.д.;
3. Определение функций уязвимости для каждого класса объектов, т.е. оценка соотношения между воздействием и степенью ущерба.

Внутренние свойства, используемые при классификации объектов на первом этапе, следующие:

- функциональное использование;
- плотность застройки;
- принадлежность к инженерно-геологической области.

В результате классификации каждый выдел получил трехчленный код. А затем была проведена экспертная оценка степени уязвимости территорий Москвы к опасным геологическим воздействиям.

Исходя из полученных степени интегральной опасности и уязвимости, для каждого выдела выполнялась обобщенная оценка риска ущерба от воздействия опасных процессов. На основании проведенных расчетов выделяется 5 уровней прогнозируемого ущерба: катастрофический, опасный, предупреждающий, корректирующийся и нормативный. Эти результаты позволяют построить карту геологического риска ущерба, которая позволит повысить надежность проектирования, строительства и эксплуатации в различных инженерно-геологических условиях.

Карта геологического риска ущерба, составленная Г.Л. Коффом и соавторами, – это уже реальное пространственное отображение уровня геологического риска на территории города. Но эта карта, к сожалению, не нашла должного применения ни при инженерно-геологических изысканиях, ни при градостроительном планировании. Причина в том, что она оказалась крайне перегруженной многочисленными кодами, баллами и прочей информацией в числовом выражении, за которой потерялся физический смысл выделенных районов. Карта оказалась совершенно непонятной и геологам, и проектировщикам, и руководящим городским органам. Может быть, качественная оценка риска ущерба была бы более востребованной.

6.6. Картографирование геологического риска в масштабе 1:25 000 – 1:50 000 и мельче

В основе методики картографирования риска в масштабе 1:25 000 – 1:50 000, разработанной авторами данной монографии, лежит его качественная сравнительная оценка. Карты такого масштаба предназначены для использования на предпроектной стадии изысканий. В своих исследова-

дованиях мы рассматриваем геологический риск как комплексную меру величины и вероятности ущерба, обусловленного экзогенными геологическими процессами. В таком понимании геологический риск на урбанизированной территории можно оценивать с двух позиций:

1. Для всей территории города или её части с существующей городской инфраструктурой – геологический риск оценивается как интегральная характеристика вероятного ущерба, обусловленного геологическими опасностями, а также степенью и характером техногенной нагрузки территории. В этом случае важнейшее значение приобретает комплексная оценка опасности экзогенных процессов с точки зрения их воздействия на существующую инфраструктуру. Основной целью картографирования риска при этом является определение территорий, для которых необходимо устанавливать специальные требования к составу и объему инженерных изысканий, запреты и ограничения градостроительной деятельности.

2. Для перспективного строительства при проектировании конкретного сооружения – как величину вероятного ущерба за срок его эксплуатации при использовании конкретных проектных решений и защитных мероприятий в условиях существующих геологических опасностей. Геологический риск в этом случае оценивается количественно в виде экономических потерь от геологических опасностей за срок службы сооружения в денежном выражении или в процентах от общей стоимости объекта. Карты риска в этом случае позволяют провести сравнение альтернативных вариантов проектных решений с позиций минимизации экономических потерь от геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения (рис. 6.16).

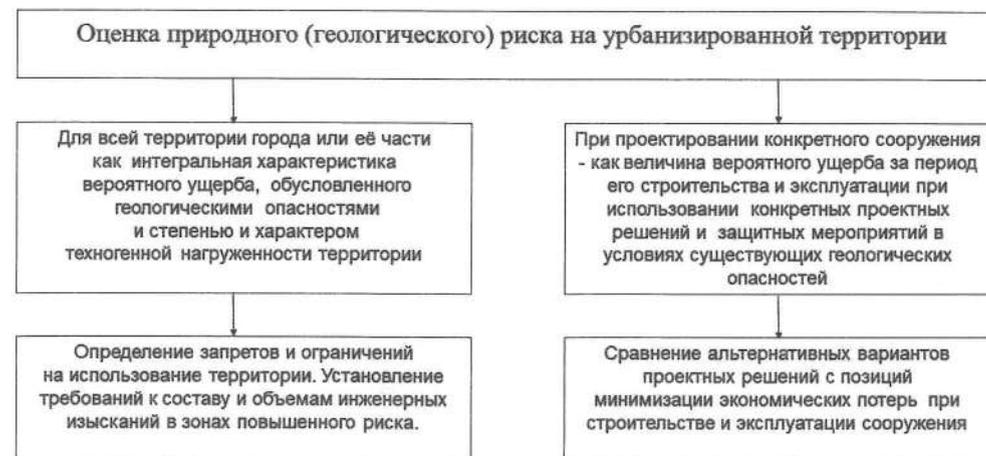


Рис. 6.16. Два подхода к оценке природного (геологического) риска на урбанизированной территории

6.6.1. Оценка и картографирование геологического риска урбанизированных территорий для существующей инфраструктуры

При картографировании геологического риска территории города с существующей наземной инфраструктурой в масштабе 1:50 000 риск рассматривается авторами как сравнительная интегральная качественная характеристика вероятного ущерба, обусловленного геологическими опасностями, а также степенью и характером техногенной нагрузки территории. Процедура картографирования риска включает основные этапы:

- оценка и картографирование экзогенных геологических процессов по степени их опасности;
- оценка и картографирование уязвимости городской среды для этих процессов (под городской средой понимается территория города с наземной инфраструктурой);
- выделение категорий риска посредством анализа воздействия опасных геологических процессов на элементы наземной инфраструктуры и территорию;

- составление карты риска посредством наложения интегральной карты опасности экзогенных процессов и карты уязвимости городской среды (рис. 6.17).



Рис. 6.17. Концептуальная модель картографической оценки геологического риска территории города с существующей наземной инфраструктурой

Качественная сравнительная оценка и картографирование геологического риска выполняются на основе интегральной оценки опасности ЭГП, с одной стороны, и укрупненного функционального зонирования – с другой. Интегральная оценка опасности ЭГП сводится в этом случае к выявлению степени возможных негативных изменений городской среды и осложнения строительства и эксплуатации зданий и сооружений на участках развития отдельных видов процессов или их сочетаний и типизации территории по степени благоприятности. За основу при этой оценке взята «Карта геозеологического состояния территории Москвы» масштаба 1:50 000, составленная в ИГЭ РАН под руководством В.М. Кутепова на основе комплексного учета степени опасности проявления трех основных ЭГП на территории города: оползневого и карстового-суффозионного

процессов, подтопления (Кутепов и др., 2009). Наиболее опасными процессами на территории города, обуславливающими ее геозеологическое неблагополучие, являются оползни, прежде всего глубокие, а также карстово-суффозионные провалы и оседания. Эти процессы вызывают повреждение или разрушение зданий и могут иметь катастрофические последствия. Менее опасен для зданий и сооружений процесс подтопления. Однако подтопление, являясь постоянно действующим фактором и имея значительную площадь распространения, наносит значительный экономический ущерб городскому хозяйству. В легенде к карте выделены 5 категорий интегральной оценки геозеологического состояния территории г. Москвы в результате проявления опасных ЭГП: от благоприятной до весьма неблагоприятной (рис. 6.7).

Оценка уязвимости городской среды как объекта риска представляет собой наиболее сложный этап в оценке геологического риска. Неоднозначность и разнообразие подходов к такой оценке затрудняет количественную оценку риска в целом (Осипов, Бутова, Карфидова, 2016). В качестве критерия уязвимости можно выбрать укрупненное функциональное зонирование территории г. Москвы, т.е. дифференциацию территории города на структурные зоны по характеру и типу ее использования, принятую в Генеральном плане города. Укрупненное функциональное зонирование территории Москвы включает 5 типов функциональных зон: транспортные, рекреационные, промышленные, общественные, жилые. Функциональное зонирование определяет плотность наземной капитальной застройки, которая увеличивается от рекреационных зон к транспортным, промышленным, общественным и, наконец, к жилым, где она, как правило, максимальная. Такой подход дает ориентировочное представление об уязвимости отдельных частей города по отношению к проявлению опасных ЭГП.

Категории риска выделяются в зависимости от размеров возможного ущерба в результате развития отдельных видов процессов или их сочетаний (рис. 6.18). За основу выделения категорий риска взята, с одной стороны, плотность наземной капитальной застройки, а с другой – сила и характер воздействия ЭГП на городскую среду.

На основании взаимного наложения и анализа карты геозеологического состояния (оценка опасных ЭГП), укрупненного функционального зонирования территории и выделенных категорий риска можно получить первоначальное представление об уровне геологического риска территории города (рис. 6.19, 6.20).



Рис. 6.18. Содержание категорий риска на карте-схеме геологического риска г. Москвы

К зонам весьма высокого и высокого риска относятся территории распространения оползней и карстово-суффозионного процесса в пределах общественных и жилых зон города, где их проявления на поверхности могут приводить к деформациям и разрушению зданий и сооружений. К зонам малого риска можно отнести территории развития процесса подтопления в пределах рекреационных, промышленных и транспортных зон, где негативное воздействие подтопления на фундаменты сооружений не приводит к большому ущербу из-за низкой плотности капитальной застройки.

Характеристика уязвимости городской среды только на основании функционального зонирования, конечно, является неточной. Поэтому здесь можно говорить лишь о карте-схеме риска. Дальнейшая разработка процедуры анализа уязвимости должна включать оценку плотности, типа, возраста наземной капитальной застройки и характера воздействия опасных процессов на городскую среду.

Условные обозначения к «Принципиальной схеме геологического риска г. Москвы»

Геологическое состояние (оценка ОГП)	Функциональные зоны		
	Рекреационные	Промышленные, транспортные	Общественные, жилые
Благоприятное	Риск отсутствует		
Условно благоприятное	■	■ Малый риск	■ Умеренный риск
Условно неблагоприятное	■ Умеренный риск	■ Высокий риск	■ Весьма высокий риск
Неблагоприятное	■ Умеренный риск	■ Высокий риск	■ Весьма высокий риск
Весьма неблагоприятное	■ Умеренный риск	■ Высокий риск	■ Весьма высокий риск

Рис. 6.19. Легенда карты-схемы геологического риска г. Москвы (масштаб – 1:50 000)

6.6.2. Оценка и картографирование геологического риска для перспективного подземного строительства

Геологический риск как качественная или количественная мера геологической опасности или совокупности опасностей, установленная для определенного объекта в виде возможных абсолютных или относительных экономических потерь (ущерба), – это функция величины воздействия опасностей и уязвимости сооружения. Сравнительный анализ риска ущерба для конкретного сооружения при его строительстве и эксплуатации можно проводить на основании оценки воздействия геологических опасностей на сооружении для различных типов инженерно-геологических условий территории, поскольку уязвимость сооружения для геологических опасностей в этом случае величина постоянная. Показателем риска служит качественная характеристика возможного ущерба от геологических опасностей в пределах распространения территорий с определенным типом инженерно-геологических условий. Процедура оценки и картографирования риска при таком подходе сводится к следующему:

- на основе трехмерной модели геологической среды определяется геологическое строение и гидрогеологические условия в подошве, стенках и кровле тоннеля для конкретного уровня его заложения;

- проводится типизация инженерно-геологических условий и анализ воздействия геологических опасностей на сооружение для каждого типа инженерно-геологических условий;

- выявляются возможные ущербы в период строительства и эксплуатации;

- выделяются и обосновываются сравнительные качественные категории риска;

- составляется карта риска.

Выделено 7 типов инженерно-геологических условий в зависимости от строения подошвы и стенок тоннеля (таблица 6.9).

В основу типизации положены три основных группы грунтовых условий.

1. Пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезокайнозойского возраста (четвертичные, меловые и юрские). Породы преимущественно водонасыщенные. Подземные воды напорно-безнапорные.

2. Глины юрского возраста слабопроницаемые.

3. Терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста. Известняки, доломиты, мергели, глины. Неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты.

Оценка возможных ущербов проводилась на основании анализа воздействия на строительные конструкции таких опасностей как прорыв подземных вод и плавунных песков в котлован, суффозия, карстово-суффозионные процессы. Предполагалось, что строительство будет вестись открытым способом с использованием защитных ограждающих конструкций. В результате выделено и обосновано четыре категории риска: весьма высокий, высокий, умеренный и малый. Весьма высокий геологический риск характерен для строительства и эксплуатации тоннелей в водонасыщенных песчаных грунтах, что подтверждается многими негативными примерами из практики строительства тоннелей мелкого заложения в Москве. Малый риск характерен для тоннелей, заложенных в слабопроницаемых юрских глинах (таблица 6.10).

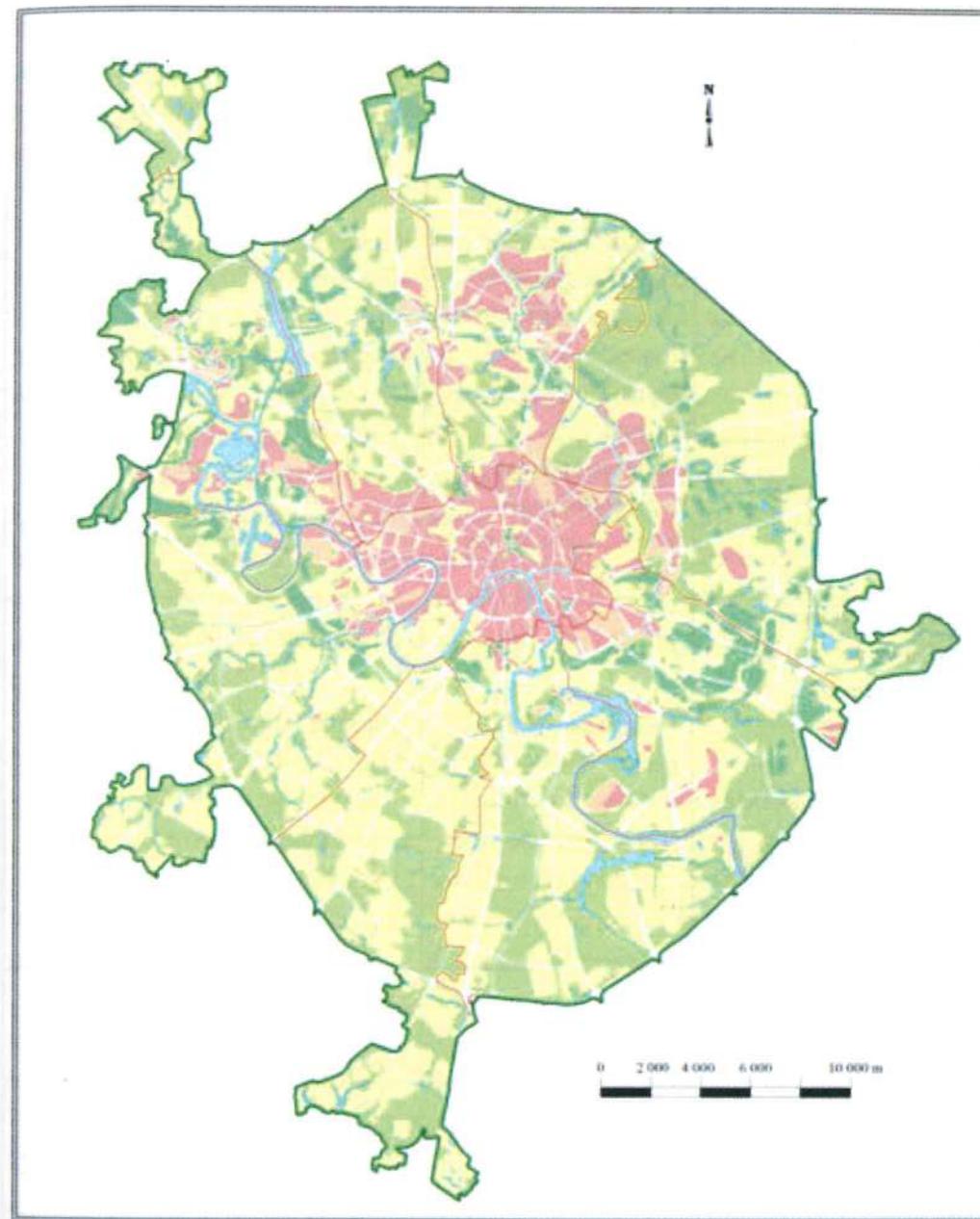


Рис. 6.20. Карта-схема геологического риска г. Москвы (масштаб – 1:50 000).
Условные обозначения см. на рис. 6.19

Таблица 6.9

**Легенда к карте геологического риска для строительства
и эксплуатации тоннелей мелкого заложения (уровень 20 м)**

Грунты в стенках и кровле тоннеля	Пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезозой-кайнозойского возраста. Породы преимущественно водонасыщенные. Подземные воды напорно -безнапорные (Q, K, J)	Глины юрского возраста слабо проницаемые (J)	Терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста. Известняки, доломиты, мергели, глины. Неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты. (С).
Грунты в подошве тоннеля			
Пески с прослоями и линзами супесей и суглинков мезозой-кайнозойского возраста. Породы преимущественно водонасыщенные. Подземные воды напорно-безнапорные (Q, K, J)	Весьма высокий риск	Высокий риск	
Глины юрского возраста слабо проницаемые (J)	Высокий риск	Малый риск	
Терригенно-карбонатные породы каменноугольного возраста. Известняки, доломиты, мергели, глины. Неравномерно обводненные, включающие напорные водоносные горизонты. (С).	Высокий риск	Умеренный риск	Умеренный риск

Такие карты могут быть составлены для различных уровней заложения тоннеля, что позволит на стадии обоснования инвестиций сравнить альтернативные варианты проекта с точки зрения их безопасности и экономической эффективности.

Нами составлена карта геологического риска для строительства и эксплуатации тоннелей мелкого заложения (уровень 20 м) в масштабе 1:100 000. В качестве репрезентативной взята территория Москвы в пределах МКАД, для которой создана трехмерная модель геологической среды, позволяющая анализировать геологическое строение территории на любом заданном уровне до глубины 100 м от поверхности.

Предполагается, что при реализации проекта будет проводиться выемка грунта из котлована, при этом определенный объем грунта будет замещен технической конструкцией. Для определения риска конкретного проекта анализируются инженерно-геологические условия на подошве и стенках проектируемого объекта. Информация о геологическом строении подошвы и стенок берется из 3-мерной геологической модели геологической среды (рис. 6.21).

Согласно приведенной выше методике, карта риска освоения подземного пространства зависит от 2 параметров:

- глубина заложения основания сооружения, м (D);
- вертикальный размер сооружения, м (H).

При составлении карт геологического риска используется растровый формат представления данных. В каждой точке равномерной сетки, покрывающей картируемую область, определяются инженерно-геологические условия, предусмотренные в таблице 6.10, и затем по правилу, заданному в таблице 6.10, – категория риска. Дальнейшее составление карты риска (векторизация растрового представления риска, оформление карты и т.д.) проводится стандартными средствами компьютерной картографии.

Инженерно-геологические условия в подошве сооружения получают из среза 3-мерной геологической модели на глубине D. Состав геологических тел (легенда) 3-мерной модели достаточен для использования в данной задаче.

Таблица 6.10

Содержание категорий риска

Категории риска	Инженерно-геологические условия.	Возможные проявления геологических опасностей.	Экономические потери из-за проявлений геологических опасностей в период строительства и эксплуатации.
Малый	В стенках и подошве тоннеля слабопроницаемые глины.	При использовании ограждающих конструкций, негативные проявления геологических процессов практически исключаются.	При надлежащем соблюдении строительных технологий ущерб от проявлений геологических опасностей практически исключен.
Умеренный	В стенках и подошве тоннеля известняки, содержащие напорные воды. В подошве тоннеля известняки, содержащие напорные воды, в стенках слабопроницаемые глины (или известняки и глины). В подошве тоннеля пески водонасыщенные (воды напорные), в стенках слабопроницаемые глины.	При аварийном нарушении ограждающих противofiltrационных конструкций при проходке тоннеля возможны прорывы подземных вод в тоннель.	Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства.
Высокий	В подошве тоннеля известняки, в стенках пески (или известняки и пески). Породы водонасыщенные. Воды напорные и безнапорные. В подошве тоннеля известняки, в стенках глины и пески. Известняки и пески содержат напорно – безнапорные подземные воды. В подошве тоннеля слабопроницаемые глины, в стенках пески водонасыщенные (или глины и пески).	При аварийном нарушении ограждающих противofiltrационных конструкций при проходке тоннеля возможны прорывы подземных вод в тоннель. В стенках тоннеля возможен прорыв водонасыщенных песков или песчано – глинистого заполнителя закарстованных зон в известняках.	Экономические потери могут быть связаны с оседаниями и провалами земной поверхности над зонами разуплотнения вблизи тоннеля, протечками воды из-за дефектов ограждающих конструкций. Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства.

Весьма высокий	В подошве тоннеля пески водонасыщенные. В стенках пески водонасыщенные (или пески и глины). Воды напорно-безнапорные.	При аварийном нарушении ограждающих противofiltrационных конструкций при проходке тоннеля возможен прорыв подземных вод и водонасыщенных песков в тоннель как в подошве, так и в его стенках и формирование зон разуплотнения в грунтовом массиве в окрестностях тоннеля.	Экономические потери могут быть связаны с оседаниями и провалами земной поверхности над зонами разуплотнения вблизи тоннеля, протечками воды из-за дефектов ограждающих конструкций. Нельзя исключить деформации обделки тоннеля над зонами разуплотнения под его днищем. Дополнительные затраты на ликвидацию последствий аварий и ремонт ограждающих конструкций в период строительства.
----------------	---	---	--

Для определения инженерно-геологических условий в стенках и на кровле сооружения необходимо в каждой точке равномерной сетки определить перечень геологических тел, встречающихся в интервале глубин от (D-H) до D. Далее из полученного перечня следует выбрать наименее благоприятный, согласно схеме на рис. 6.21, вариант.

Последующее районирование по сочетанию свойств на срезах разной глубины выполняется с помощью стандартной операции пересечения зональных карт (оверлей) в ГИС-технологии.

В качестве примера для Москвы на рисунках 6.23, 6.24 и 6.25 показаны наиболее характерные фрагменты карт геологического строения на глубинах 14, 20 и 45 м. Условные обозначения к картам геологического строения показаны на рис. 6.22. Фрагмент карты риска неглубоких сооружений, составленной по описанным выше правилам, для параметров D=20 м (глубина основания) и H=6 м (высота) показан на рис. 6.24. Дополнительно на картах показаны существующие и строящиеся станции метро.

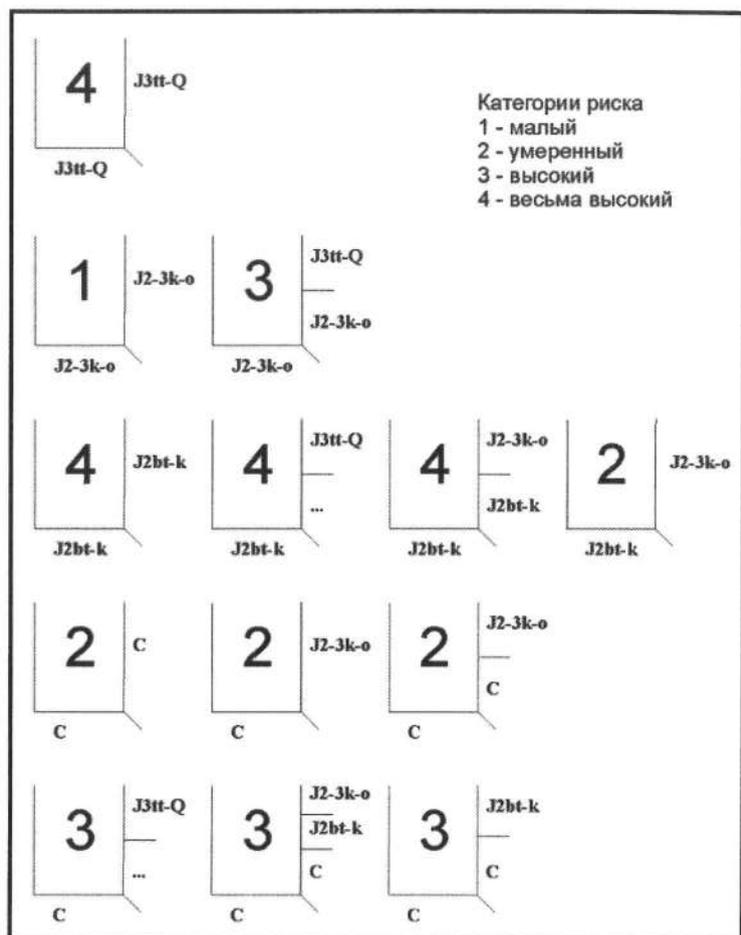


Рис. 6.21. Схема определения геологического риска в зависимости от состава отложений на подошве и стенках конструкции

Описанная технология составления карт риска могла бы быть включена в общегородскую информационную систему. Алгоритм составления карт допускает несложную программную реализацию, позволяющую в интерактивном режиме составлять карты риска для любых сочетаний уровней заложения и высот подземных сооружений. Задачей дальнейших работ является развитие информационной технологии использования оценок геологического риска для строительства подземных сооружений в Москве с переходом к количественным оценкам риска.

Карты геологического риска для перспективного строительства предназначены для использования при планировании и на начальных стадиях реализации крупных строительных проектов как, например, строительство новых линий метро в Москве. В крупных городах уменьшить геологический риск за счет переноса сооружения из зоны развития опасных процессов крайне проблематично. Если говорить о метро (или других протяженных транспортных сооружениях), то новые объекты, во-первых, размещают в районах города, где они необходимы жителям, во-вторых, привязывают к уже функционирующим трассам.

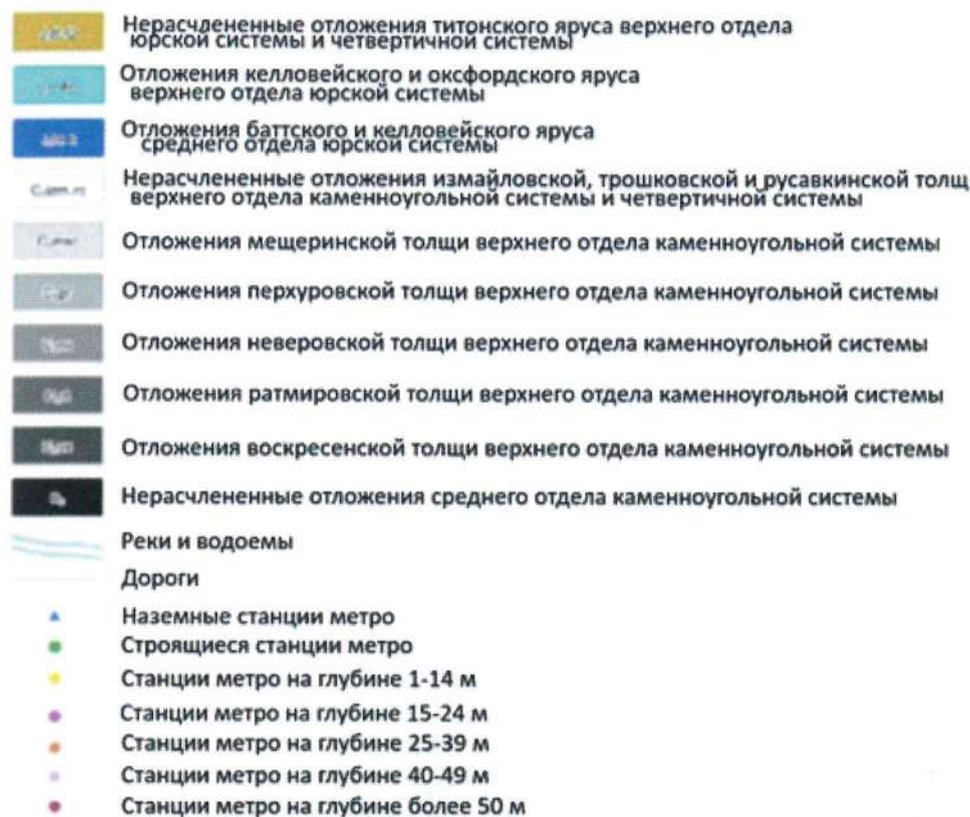


Рис. 6.22. Условные обозначения к картам геологического строения на заданной глубине

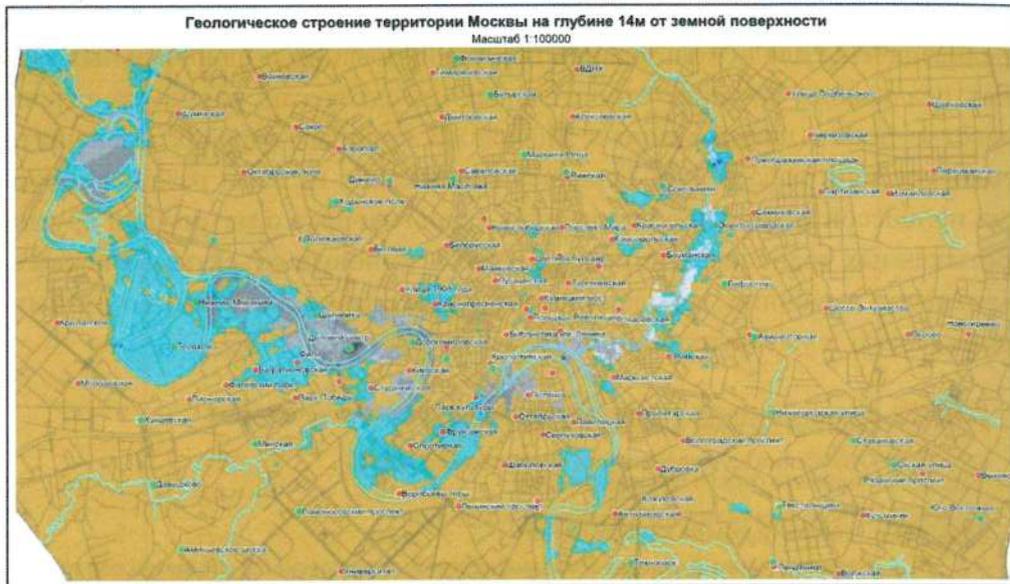


Рис. 6.23. Фрагмент карты геологического строения Москвы на глубине 14 м



Рис. 6.24. Фрагмент карты геологического строения Москвы на глубине 20 м

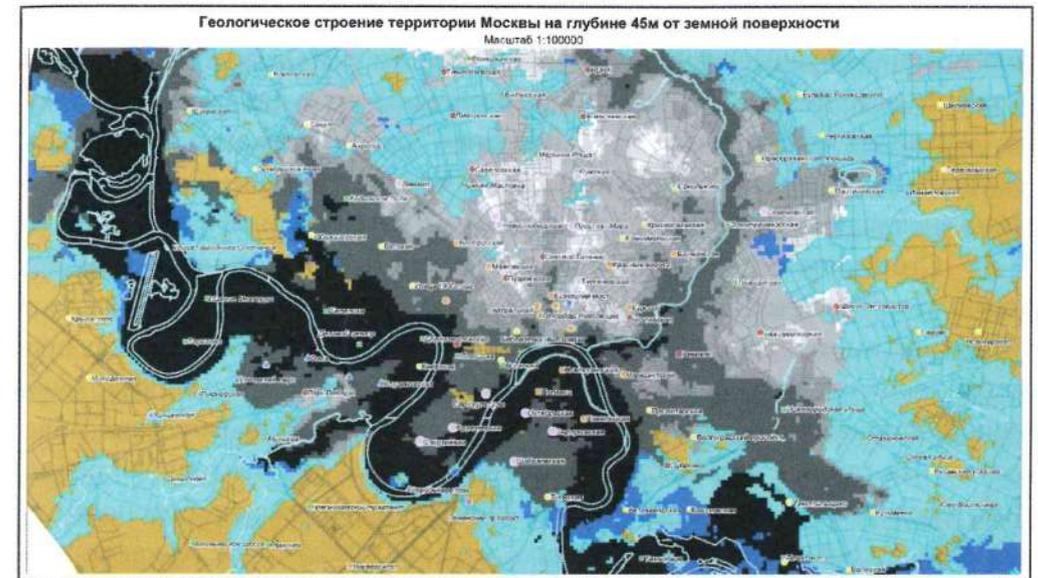


Рис. 6.25. Фрагмент карты геологического строения Москвы на глубине 45 м

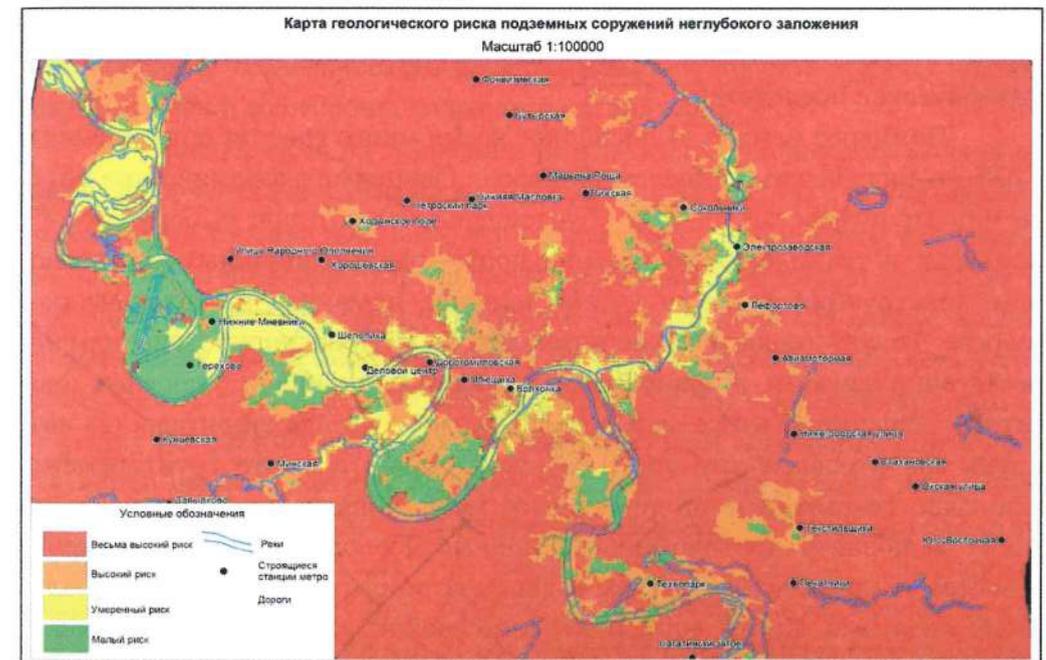


Рис. 6.26. Фрагмент карты геологического риска для подземных сооружений мелкого заложения; глубина подошвы сооружения – 20 м, высота сооружения – 6 м

То есть переместить сооружение как по глубине, так и по простиранию можно на очень ограниченное расстояние, и уйти из зоны повышенного риска часто нельзя. Остается минимизировать риск или, другими словами, управлять риском через обоснованное прогнозирование проявлений опасных процессов, оптимизацию оценок возможных ущербов, использование специальных строительных технологий и инженерной защиты.

Стоимость строительства может изменяться значительно в зависимости от геологических условий. Эти изменения определяются необходимым объемом инженерно-геологических изысканий, стоимостью проектных решений и защитных мероприятий, обеспечивающих безопасное функционирование сооружения при существующих геологических опасностях. На стадии разработки проектно-сметной документации необходимо представлять, в какой степени влияют геологические опасности на подземные сооружения на различных глубинах заложения, и какие конструктивные решения и защитные мероприятия необходимо использовать для обеспечения безопасности. Необоснованное усиление конструкций и применение инженерной защиты ведет к бессмысленному удорожанию строительства. А недоучет геологических опасностей может иметь катастрофические последствия.

Примеров немало. В последнее время много говорят о проблемах с Алабяно-Балтийским тоннелем в Москве. Основные экономические потери при строительстве тоннеля обусловлены тем, что при выборе способа проходки и технологии возведения противодиффузионных ограждающих конструкций не было учтено наличие пливунов в геологическом разрезе. То есть геологические опасности были проигнорированы или недостаточно изучены, а приоритетным стал выбор наиболее дешевых проектных решений. В итоге практически с самого начала строительства возникли значительные трудности, обусловленные тем, что грунтоцементные сваи, создаваемые по технологии Jet-grouting, в пливунах часто не могут выполнять противодиффузионные функции. Стоимость строительства увеличилась более чем в два раза по сравнению с первоначальными оценками. Кроме того, изменение свойств вмещающего массива в результате прорывов грунтов в тоннель и создание депрессионной воронки при водопонижении влечет за собой дополнительные геологические риски при эксплуатации тоннеля. Сейчас после завершения строительства можно сказать, что закрытый способ проходки или сооружение «стены в

грунте» в данных геологических условиях представляются более надежными с точки зрения предотвращения проявлений опасных процессов во время строительства. Опрометчивый выбор проектных решений только на основании их относительно невысокой стоимости в результате привел к очень большому ущербу. Оценка геологического риска для альтернативных вариантов проектных решений, возможно, позволила бы избежать таких экономических потерь.

Большинство проектов проходят сейчас процедуру тендера. Именно на стадии прохождения тендера возможно сравнение альтернативных вариантов проекта с позиций минимизации риска. Карта позволяет ориентировочно предположить, какая часть проектируемого сооружения расположена в зонах повышенного риска, в пределах которых требуется увеличение объемов инженерных изысканий, использование специальных строительных технологий, способов инженерной защиты и системы мониторинга.

Если такая карта получит статус документа, обязательного к использованию в градостроительной практике, уже нельзя будет игнорировать проблему геологического риска при выборе проекта как со стороны заказчика, так и со стороны подрядной организации.

Таким образом, на основании результатов исследований по оценке риска экономического ущерба от воздействия экзогенных геологических опасностей в Москве показано, что оценка должна проводиться отдельно как для всей территории города с существующей инфраструктурой, так и для объектов планируемого городского строительства. В основе картографирования риска в масштабе 1:25 000 – 1:50 000 (100 000) лежит его качественная сравнительная оценка. Карты такого масштаба предназначены для использования на предпроектной стадии изысканий. Для существующей инфраструктуры основная цель картографирования геологического риска – выделение территорий, в пределах которых необходимо устанавливать специальные требования к составу и объему инженерных изысканий, а также вводить запреты и ограничения градостроительной деятельности. Для конкретных объектов перспективного строительства карты риска позволяют провести сравнение альтернативных вариантов проектных решений с позиций минимизации экономических потерь от геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения.

6.7. Детальное картографирование геологического риска (в масштабе 1:10 000 и крупнее)

Как отмечалось выше, урбанизированная территория – сложная природно-техническая система, в пределах которой невозможно выявить влияние какого-либо одного природного или техногенного фактора на состояние зданий и сооружений, провоцирующего их возможные негативные последствия. Эти последствия определяются сочетанием природных и техногенных факторов, характером взаимодействия этих факторов, которые и обосновывают формирование риска и его значение.

Оценка геологического риска урбанизированных территорий в масштабе 1:10 000 и крупнее осуществляется согласно общей методологии, представленной в главе 1. Исходя из разработанной методологии оценки риска, при любых уровнях исследования в первую очередь необходимо иметь четкое представление об источниках и реципиентах опасности, что позволяет выделить однотипные модели формирования риска, соответственно характеризующиеся сопоставимыми потерями в пределах оцениваемых территорий.

Природным источником опасности являются опасные геологические и инженерно-геологические процессы, развивающиеся на территории крупных городов. Реципиенты опасности на урбанизированной территории – объекты промышленного, гражданского, административного, транспортного строительства и т.д.

Основные экономические ущербы и риски потерь от проявления опасных процессов на урбанизированных территориях приурочены, как правило, к застроенным и транспортным зонам. Формирование риска в этих зонах происходит по сложным сценариям взаимодействия природных (опасные геологические и инженерно-геологические процессы) и техногенных (реципиенты опасности – объекты строительства) факторов. Определение этих сценариев связано, в первую очередь, с идентификацией источников и реципиентов опасности (основных объектов, на которые воздействуют опасные природные и природно-техногенные процессы и которые, в свою очередь, провоцируют их развитие).

Совершенно очевидно присутствие огромного многообразия как техногенных, так и природных факторов, обуславливающих риски потерь

на территории городов. Поэтому одной из главных задач является осуществление унификации факторов и доказательности их влияния на формирование риска в обеих средах (природной и техногенной).

Первый этап, согласно общей методологии оценки природных рисков на урбанизированных территориях и вышеобозначенным положениям формирования риска, связан с проведением районирования по основным природным и техногенным факторам с целью обособления территорий (конечных таксонов), в пределах которых риск формируется по определенным сценариям. Под сценариями в данном случае понимается возможность развития определенных опасных геологических и инженерно-геологических процессов и их взаимодействий с конкретным техногенным типом (реципиентом опасности), которые приводят к потерям, чаще всего в виде деформирования и разрушения зданий и сооружений в соответствующих показателях риска.

Районирование, являющееся основой для оценок риска, предполагает последовательное разделение территории города на относительно однородные части с использованием, как правило, одного признака для выделения этих частей на каждом уровне районирования как по природным, так и техногенным факторам. Конечные таксоны районирования обособляются путем наложения друг на друга двух независимых и индивидуальных (иерархических) по содержанию подсистем районирования по основным природным и техногенным факторам, характеризующим инженерно-геологические условия и степень техногенной нагруженности территории (Бурова, 2019). Таким образом, достигается, с одной стороны, последовательность деления общего на части для каждой из двух групп факторов, а с другой – учитываются разнообразные сочетания этих факторов при обособлении типологических конечных таксонов.

6.7.1. Районирование по природным факторам

При районировании урбанизированных территорий по природным факторам для выделения конечных таксонов оценки первым уровнем деления территории (регион) является структурно-геодинамический, учитывающий современную геодинамику земной поверхности (табл. 6.11). В настоящее время результаты геодезического мониторинга подтверждают наличие современных вертикальных движений земной коры в пределах территории

**Схема районирования урбанизированных территорий
по природно-техногенным обстановкам (факторам)
формирования риска (в масштабе 1:10 000)**

г. Москвы. Эти движения в основном зафиксированы в разделяющих современные блоки земной коры разломных геодинамических зонах. Подобные исследования имеют не только научный интерес, но и диктуются практическими потребностями, и, в первую очередь, в градостроительстве. Анализ этих исследований показал, что земная поверхность на территории Москвы испытывает разновеликие и разнонаправленные вертикальные смещения. Примечательно, что в пределах блоков в соответствии с неотектонической картой отмечены опускания земной поверхности на общей тенденции этого блока к поднятию (Певнев, Черников, 2010).

И наоборот, в пределах опускающихся блоков, расположенных в наиболее опущенной части долины р. Москвы, некоторые участки испытывают поднятия. Т.е. инструментально обнаружены такие аномальные зоны, на которые, по нашему мнению, необходимо обращать внимание при районировании территорий для оценки инженерно-геологических условий при градостроительстве и дальнейшего анализа риска.

Области выделяются по геоморфологическим критериям, отвечающим современным формам рельефа. В пределах областей обособляются районы, соответствующие различным сочетаниям комплексов пород. Самый низкий иерархический уровень (участок) – территории, в пределах которых проявляются разные опасные геологические и инженерно-геологические процессы различной интенсивности (табл. 6.11). Следует отметить, что районирование по природным критериям является наиболее разработанной и общепринятой частью рассматриваемого деления территорий.

В пределах территорий, характеризующихся низкой категорией сложности ИГ условий (а), все перечисленные параметры отсутствуют. На территориях со средней категорией сложности (б) отмечено наличие критериев 1, 2 или 3, с высокой категорией сложности – критерии 4–7, либо различное сочетание критериев 1–7.

Анализ распространения ИГМ на территории Москвы позволил выделить 10 вариантов природной составляющей, отличающихся по количеству критериев, определяющих категорию сложности ИГ условий (табл. 6.12). Каждому варианту присвоен соответствующий код – Пр₁-Пр₁₀. Как видим, количество критериев меняется от их отсутствия до 4, причем с самым различным сочетанием критериев, отнесения территорий к определенной сложности инженерно-геологических условий.

Таксоны индивидуального районирования и критерии их выделения		
Природные	Техногенные	
Регион (структурно-геодинамический – современные движения земной коры)	Провинции (период освоения территории, годы – I-...IV)*	
	Зоны (функциональное использование территорий)	
Область (геоморфологический – современные формы рельефа)	Первого порядка	Второго порядка
	Застроенные (З)	жилые (ЗЖ)
		историко-культурного наследия (ЗИ-К)
		промышленные (ЗП)
	прочие (ЗПр)	
	реорганизации и реконструкции (ЗРР)	
Район (литолого-стратиграфический – различные сочетания комплексов пород)	Транспортные (Т)	метрополитен (ТМ)
		автомагистрали (ТА)
		железные дороги (ТЖД)
		транспортные узлы (ТУ)
	прочие (ТПр)	
Участок (инженерно-геологический – распространение и интенсивность опасных геологических и инженерно-геологических процессов и т.д.)	Рекреационные (Р)	природные территории (Рп)
		особо охраняемые (Рпоо)
	Водных объектов (В)	
	Неиспользуемые (Н)	
	Сельскохозяйственные (С)	
	Округа (плотность застройки, м ³ /ед. площади): высокая – (в), средняя – (с), низкая – (н)	
	Ареалы: тип застройки (ЗЖ _{ТК} -а(3) ... Ж _{ИПР} -а(3)); тип метрополитена (ТМ1 ... Т-М3(4)); тип автодорог (ТА1... Т-А[3][4](3 и >)); тип железных дорог (Т-ЖД1... Т-ЖД[2](1))	
Таксоны перекрестного двухрядного районирования		

* Периоды освоения территории I-IV: I – до 1909 г. (окружная железная дорога); II – 1909-1962 гг. (МКАД – Московская кольцевая автомобильная дорога); III-1962-2012 гг. (присоединение территорий на северо-западе и юго-западе Москвы); IV – 2012 г. – наст. время (новая Москва).

Критериям 1, 2 и 3, соответствующих наличию процесса подтопления территории (глубина залегания грунтовых вод менее 5 м), неглубоких оползней, потенциальной карстово-суффозионной опасности присваивается 1 балл. Критериям 4, 5, 6 и 7 (актуальная карстово-суффозионная опасность; глубокие блочные оползни; техногенные грунты мощностью более 6 м; неоднородная толща в разрезе оцениваемой территории с включением слабых и (или) специфических грунтов (торф, ил) мощностью более 2 м) – 2 балла. Все встреченные варианты соотношения критериев оцениваются различными значениями – от 0 (их отсутствие) до 25 баллов (табл. 6.12).

Таблица 6.12

Характеристика природной составляющей конечных таксонов районирования (ИГМ)

Варианты (коды)	Количество критериев		Условные баллы
	категория (б)	категория (в)	
Пр ₁	–	–	–
Пр ₂	1	–	1
Пр ₃	–	1	2
Пр ₄	2	–	4
Пр ₅	1	1	6
Пр ₆	–	2	8
Пр ₇	3	–	9
Пр ₈	2	1	12
Пр ₉	1	2	15
Пр ₁₀	2	2	25

6.7.2. Районирование по техногенным факторам

Крупные города застраивались на протяжении многих сотен лет, в их пределах сформировалась достаточно сложная по своей структуре застройка, оказывающая влияние на природные условия городов и испытывающая на себе их воздействие. Весьма логично районирование крупных городов по техногенным факторам начинать с выделения провинций (I...IV), отвечающих времени освоения и застройки территории (времени нарушения естественных природных условий) (табл. 6.11). Здесь необходимо выделить основные периоды освоения, которые, в свою очередь, определяют приоритетные направления и характеристики застройки. Совершенно очевидно, что территории, схожие по природным условиям, но подвергающиеся техногенному воздействию в течение времени, отличающемуся на порядок, будут характеризоваться различными природно-техногенными условиями и, соответственно, сценариями формирования риска.

По функциональному делению территории городов подразделены на *зоны первого и второго порядка* (см. табл. 6.11). Среди зон первого порядка рекомендуется выделять застроенные (З), транспортные (Т), рекреационные (Р), водных объектов (В), зоны, подлежащие реорганизации и реконструкции (РР) (в настоящее время в пределах городов происходит

массовая реконструкция промышленных зон в жилые или какие-то иные), неиспользуемые (Н) и сельскохозяйственные (С).

Застроенные зоны подразделяются на зоны второго порядка – жилые (ЗЖ), историко-культурного наследия (ЗИК), промышленные (ЗП) и прочие (ЗПр). К прочим отнесены административно-деловые, учебно-образовательные, культурно-просветительские, торгово-бытовые, лечебно-оздоровительные, спортивно-рекреационные, учебно-воспитательные зоны и т.п.

Транспортные зоны также разделяются на зоны второго порядка. Это линии метрополитена (ТМ), автомагистрали и автодороги (ТА), железные дороги (ТЖД), транспортные узлы (ТУ) и прочие (ТПр) (продуктопроводы, магистральные трубопроводы инженерной инфраструктуры и др.).

Следующим важным фактором районирования нам представляется характеристика плотности застройки (см. табл. 6.11). В рамках районирования по данному критерию обособляются *округа* с различной плотностью застройки. Интервалы значений градаций: высокая (*в*), средняя (*с*) и низкая (*н*), определяются из существующей плотности застройки в городах. При этом рекомендуется использовать объемно-площадные характеристики, наиболее четко отражающие техногенные нагрузки на природную среду в пределах исследуемой территории ($m^3/ед. площади$) и численность населения. Следует отметить, что в данной критерии районирования в косвенном виде учитывается и инженерная инфраструктура городов, и ее влияние на инженерно-геологические (природно-техногенные) условия. Подразумевается, что плотность застройки напрямую определяет и количество, и плотность инженерной инфраструктуры и, соответственно, предполагает зависимость между плотностью, возрастом застройки и утечками из коммуникаций, приводящим к подтоплению территорий.

Следующим критерием деления урбанизированной территории для обособления *ареалов* (см. табл. 6.11) предлагается использовать различные типы реципиентов опасности в пределах застроенных и транспортных зон.

Совмещение площадных и линейных образований, выделенных по предложенным критериям (в соответствии с табл. 1) второй индивидуаль-

ной иерархической подсистемы перекрестного двухрядного районирования урбанизированных территорий позволяет выделить конечные таксоны данного районирования, имеющие определенные индексы. Например, таксон I-3Жт(3)-ТА(2)-а – территория начала осваиваться до 1949 г., сейчас относится к застроенной жилой зоне, плотность застройки низкая. В пределах этой территории расположена автодорога, относящаяся ко 2-му типу (дорога проходит по мосту), преобладающий тип застройки – типовые 5-этажные кирпичные здания. Такая характеристика таксона соответствует определенной степени техногенной нагруженности, которая может быть выражена через количественные и качественные параметры с соответствующим буквенно-цифровым индексом.

Характеристика и оценка техногенной составляющей. Выделение реципиентов опасности проведено для застроенной жилой (ЗЖ) и транспортной (Т) зон на основе унификации данных об объектах этих зон с присвоением каждому реципиенту соответствующего балла.

Застроенная жилая зона. Как правило, большая часть территории крупных городов отведена под жилую застройку, которая в большей степени подвержена воздействию опасных процессов, а также оказывает наибольшее влияние на окружающую среду.

Типизация застроенной зоны проводится с использованием параметров, характеризующих тип здания. Это материал и технологии строительства, этажность, время застройки (возраст), принадлежность к типовому или специальному проектам. Т.е. выбираются параметры, определяющие состояние здания в определенный временной период. Типовая застройка определяет материал и технологию строительства, время ее возведения, что позволяет оценивать износ зданий. Этажность зданий, особенно серийных, и время их строительства определяет тип фундамента. Учет всех этих данных и их генерализация позволяют выделить преобладающие типы жилой застройки для урбанизированных территорий (Бурова, 2019). Можно предложить следующую обобщенную типизацию жилой застройки: по материалам возведения несущих и наружных ограждающих конструкций и технологии строительства, по типовым и специальным проектам и соответствующим им временным периодам их возведения и этажности зданий (табл. 6.13).

Таблица 6.13

Типизация жилой застройки урбанизированной территории

Тип здания*	Этажность	Типовая жилая застройка (Жт)						Индивидуальная жилая застройка (Жи)					
		Возраст зданий, годы**						Возраст зданий, годы**					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Кирпичные (К)	5 и < (а)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	6-12 (б)				16	17		19	20	21			24
	12-17 (в)				28					33			
	> 17 (г)									45			
Блочные (Б)	5 и < (а)				52	53							
	6-12 (б)					65							
	12-17 (в)				76	77							
	> 17 (г)											95	
Панельные (П)	5 и < (а)				100	101							
	6-12 (б)				112	113	114						
	12-17 (в)				124	125	126						
	> 17 (г)											143	
Монолитные (М)	5 и < (а)												
	6-12 (б)						162						168
	12-17 (в)												180
	> 17 (г)												192
Прочие (Пр)	5 и < (а)							199	200	201			
	6-12 (б)												
	12-17 (в)												
	> 17 (г)											239	

Согласно этой типизации, в пределах урбанизированных территорий формально можно выделить 240 различных типов строений. В результате анализа жилой застройки г. Москвы выделено порядка 35 различных наиболее характерных типов, отличающихся по перечисленным выше параметрам, которые отражены в таблице 3 с формальным номером. Остальные виды застройки подразделяются на различные типы аналогично про-

веденной типизации для жилой застройки с использованием тех же параметров. Их количество и номерной фонд могут меняться со временем.

Тип застроенной жилой зоны или реципиент опасности выделяется в том случае, если он составляет не менее 25% по площади от всех типов застройки в пределах оцениваемой территории.

Застроенная зона подразделяется на различные основные типы (реципиенты опасности) по различным параметрам. Дополнительно в качестве реципиентов в пределах жилой застройки учитываются уникальные объекты, историко-культурные и архитектурные памятники (у. об.), а также точечная застройка (т. ст.) в пределах старой на месте снесенных зданий. Сочетание различных типов застройки жилой зоны теоретически позволяет выделить 12 возможных различных комплектаций основных и дополнительных реципиентов.

Исходя из положения о том, что основной тип (реципиент) определяется в том случае, если он занимает не менее 25% площади застройки на оцениваемой территории, и анализа практического распространения реципиентов в застроенной жилой зоне, принято условие об использовании не более 3 типов реципиентов (основных и вспомогательных) на оцениваемой территории. Таким образом, для территории г. Москвы были использованы 8 преобладающих комплектаций указанных реципиентов, которые учитывались при оценках риска [ЗЖ1 – ЗЖ8].

ЗЖ1 – застроенная жилая зона с одним типом жилых зданий, занимающих более 75% оцениваемой территории;

ЗЖ2 – застроенная жилая зона с двумя типами жилых зданий, занимающих более 75% оцениваемой территории;

ЗЖ3 – застроенная жилая зона с одним типом жилых зданий, занимающих не менее 75% оцениваемой территории и уникальными объектами;

ЗЖ4 – застроенная жилая зона с одним типом жилых зданий, занимающих более 75% оцениваемой территории, в пределах которой осуществляется точечное строительство;

ЗЖ5 – застроенная жилая зона с тремя типами жилых зданий, занимающих более 75% оцениваемой территории;

ЗЖ6 – застроенная жилая зона с двумя типами жилых зданий, занимающих не менее 75% оцениваемой территории и уникальными объектами;

ЗЖ7 – застроенная жилая зона с двумя типами жилых зданий, занимающих не менее 75% оцениваемой территории, в пределах которой осуществляется точечное строительство;

ЗЖ8 – застроенная жилая зона с одним типом жилых зданий, занимающих более 75% оцениваемой территории и уникальными объектами, в пределах которой осуществляется точечное строительство.

Преобладающее число комплектаций относится к сочетанию основных типов реципиентов. Характеристика всех этих комплектаций реципиентов представлена в таблице 6.14.

Таблица 6.14

Характеристика различных сочетаний реципиентов риска в жилой застройке

Реципиенты риска			Условные баллы	Код сочетаний реципиентов
основные	дополнительные	количество		
1	-	1	1	ЗЖ1
1+1	-	2	4	ЗЖ2
1	(у. об.)	2	6	ЗЖ3
1	(т. ст.)	2	8	ЗЖ4
1+1+1	-	3	9	ЗЖ5
1+1	(у. об.)	3	12	ЗЖ6
1+1	(т. ст.)	3	15	ЗЖ7
1	(у. об.) + (т. ст.)	3	18	ЗЖ8

Для интегральной оценки выделенных сочетаний типов застройки и дальнейшей оценки риска также были использованы баллы для каждого выделенного типа. Балл назначался на основании экспертных заключений, исходя из сложности оценки уязвимости, основанной на учете не только реакции объекта на воздействие опасности, но и взаимодействие объектов. Жилым зданиям различных типов присвоен 1 балл, уникальным объектам – 2 балла, реципиентам точечной застройки – 3 балла.

Транспортная зона. Типизация транспортной зоны осуществлена с использованием данных по расположению и сочетанию различных видов транспорта. В частности, метрополитен подразделяется по глубине станций и перегонов и соотношению перегонов и станций в различных высотных поясах. В качестве примера рассмотрен метрополитен (табл. 6.15). По глубине перегоны и станции подразделяются на:

- наземные – станции эстакадные, наземные, наземные части линий метрополитена (метромосты) (1);
- мелкие – подземные станции, подземные части линий метрополитена, глубина заложения до 15–20 метров (2);

- глубокие – подземные станции, подземные части линий метрополитена, глубина заложения от 15–20 до 50–60 метров (3);
- очень глубокие – подземные станции, подземные части линий метрополитена, глубина заложения более 50–60 метров (4).

По виду и пересечению объектов следует выделить (см. табл. 6.15):

- станции и перегоны в одном высотном поясе [1];
- пересечение 2 перегонов в разных высотных поясах [2];
- 2-3 станции и прилегающие перегоны в разных высотных поясах [3].

Таблица 6.15

Типизация метрополитена по глубине и соотношению в различных высотных поясах

Сочетание параметров (Т–М)			
Глубина	Вид и пересечение объектов		
	[1]	[2]	[3]
Наземные (1)	1	[2](1)(2)	[3](1)(2)
Мелкие (2)	[1](2)	2(3)	[3](2)(3)
Глубокие (3)	[1](3)	[2](3)(4)	3(4)
Очень глубокие (4)	[1](4)	-	-

Автодороги также подразделяются по месту их прохождения и расположению в различных высотных поясах. Железные дороги подразделяются на различные типы по количеству путей, их примыканию к сортировочно-маневровым зонам и вокзалам, а также по расположению в высотных поясах. Отдельно выделяются транспортные узлы (ТУ), состоящие из пересечения или совместного расположения линий метрополитена, автомобильных и железных дорог:

- сочетание автодороги, железной дороги и метрополитена в одном высотном поясе;
- сочетание автодороги, железной дороги и метрополитена в 2–3 высотных поясах;
- сочетание транспортной автомобильной развязки, железной дороги и метрополитена в 3 и более высотных поясах.

Выделенным реципиентам транспортной зоны присвоены соответствующие баллы с учетом подходов их типизации. В местах проложения трасс метрополитена и автодорог отмечаются аномальные значения величин оседания поверхности земли и плотности деформированных зданий.

В районах сосредоточения центральных пересадочных пунктов метро и прохождения главных наземных магистралей величины осадок достигают 4 мм/год (при среднем значении 1-2 мм/год), а плотность деформаций – до 12 зд/км² (при среднем значении 3 зд/км²). Таким образом, наличие автомагистралей и метрополитена в пределах жилой застройки увеличивает число деформированных зданий от 2 до 4 раз. Это использовано при присваивании баллов различным типам транспортных зон.

Таким образом, определились 12 типов реципиентов транспортной зоны, характеризующихся значениями баллов от 1 до 5, которые могут располагаться в пределах зон жилой застройки и оказывать воздействие на ее реципиентов (табл. 6.16). В дальнейших расчетах риска используется один из приведенных кодов реципиентов транспортной зоны.

Таблица 6.16

Характеристика реципиентов риска транспортных зон

Коды реципиентов транспортной зоны	Условный балл
М1А1 Жд1	1
А2 Жд2	2
М3 А3 ТУ3	3
М4 А4 ТУ4	4
ТУ5	5

В пределах жилой застроенной зоны теоретически могут быть встречены самые различные сочетания реципиентов транспортной зоны, но на самом деле в этой зоне по генплану города не предусмотрено расположение крупных транспортных наземных узлов. Все выделенные коды метро могут встречаться в пределах всех сочетаний типов жилой застройки. Также расчеты осуществлялись из положения о том, что если в пределах оцениваемой территории расположено несколько кодов реципиентов транспортных зон, расчеты осуществляются по наихудшему сценарию, т.е. учитывается присвоенное наибольшее значение баллов.

6.7.3. Оценка и картографирование риска

Оценка и ранжирование риска по категориям были проведены на основе матрицы возможных сочетаний природных и техногенных факторов (схем их взаимодействия) в пределах конечных таксонов районирования территории. Такие сочетания (комплектации) выделены для трех различных вариантов:

1. ЗЖПр – это 80 теоретически возможных комбинаций для 8 различных кодов реципиентов опасности застроенной жилой зоны (ЗЖ), расположенных в различных природных условиях (Пр), отличающихся по количеству и значимости критериев.

2. ТПр – это 50 теоретически возможных комбинаций для 5 реципиентов опасности транспортной зоны (Т), также расположенных в различных природных условиях (Пр), отличающихся по количеству и значимости критериев.

3. ТЗЖПр – комбинации из первых двух вариантов, отвечающие 400 различным значениям взаимозависимости указанных параметров (рис. 6.27).

Таким образом, было получено 530 различных комбинаций (схем) взаимовлияния природных и техногенных факторов, т.е. моделей формирования риска потерь на урбанизированных территориях.

Каждая схема (из 530 возможных) характеризуется определенным количеством баллов в зависимости от числа факторов (природных и техногенных), их значения в баллах, а также количества связей (взаимовлияний) между факторами и их значения в баллах. Каждый фактор из этих схем влияет на все остальные и получает также ответное воздействие. Условно эти взаимодействия равны сумме баллов факторов каждого такого взаимовлияния. Количество факторов в схемах изменяется от 2 до 8, а количество связей между ними – от 1 до 28. Количество связей строго определяется количеством факторов. Максимальное количество факторов равно 8, которое складывается из 4 природных факторов (Пр₁₀) и 4 техногенных (разные сочетания из реципиентов ЗЖ и Т зон). Техногенные факторы, участвующие в этих схемах, следующие: ЗЖ5, ЗЖ6, ЗЖ7, ЗЖ8 и М1, А1, Жд1, А2, Жд2, М3, А3, ТУ3, М4, А4, ТУ4, ТУ5) (см. табл. 6.11–6.13).

Анализ всех возможных 530 сочетаний природных и техногенных факторов в соответствии с матрицей (рис. 6.27) позволил выделить 7 моделей формирования риска, характеризующихся определенным количеством факторов, их связью, значимостью и балльной оценкой. Первая модель формирования риска характеризуется 2 природно-техногенными факторами и 1 связью между ними. Вторая модель предполагает 3 фактора и 3 связи, третья – 4 фактора и 6 связей, четвертая – 5 факторов и 10 связей, пятая – 6 факторов и 15 связей, шестая – 7 факторов и 21 связь и седьмая – 8 факторов и 28 связей.

Код техногенной характеристики, в скобках условные баллы	Код природной характеристики конечного таксона районирования, в скобках условные баллы										
	Пр ₁ (-)	Пр ₂ (1)	Пр ₃ (2)	Пр ₄ (4)	Пр ₅ (6)	Пр ₆ (8)	Пр ₇ (9)	Пр ₈ (12)	Пр ₉ (15)	Пр ₁₀ (21)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	T1 (1)	1	4	6	9	12	15	16	20	24	28
2	ЗЖ1 (1)	1	4	6	9	12	15	16	20	24	28
3	T2 (2)	2	6	8	12	15	18	20	24	28	40
4	T3 (3)	3	8	10	15	18	21	24	28	32	45
5	ЗЖ2 (4)	4	9	12	16	20	24	25	30	35	48
6	T1ЗЖ1 (4)	4	9	12	16	20	24	25	27	28	47
7	T4 (4)	4	10	12	18	21	24	28	32	36	48
8	T2ЗЖ1 (6)	6	11	15	20	24	28	30	35	38	54
9	ЗЖ3 (6)	6	12	15	20	24	28	30	35	41	54
10	T5 (5)	5	12	14	21	24	27	32	36	40	53
11	ЗЖ4 (8)	8	15	18	24	28	32	35	40	45	50
12	T3ЗЖ1 (8)	8	15	18	24	28	32	35	42	45	60
13	T1ЗЖ2 (9)	9	16	20	23	28	32	36	41	50	63
14	ЗЖ5(9)	9	16	20	25	30	35	36	42	51	63
15	T4ЗЖ1(10)	10	18	21	28	32	36	40	45	50	66
16	T5ЗЖ1 (12)	12	20	24	30	35	40	42	48	54	70
17	ЗЖ6 (12)	12	20	24	30	35	40	43	50	55	70
18	T1ЗЖ3 (12)	12	20	24	30	35	40	42	48	54	70
19	T2ЗЖ2 (12)	12	20	24	30	35	40	42	48	54	70
20	T3ЗЖ2 (15)	15	24	28	35	40	45	48	54	60	77
21	ЗЖ7 (15)	15	24	28	35	40	45	48	54	60	77
22	T2ЗЖ3 (15)	15	24	28	35	40	45	48	54	60	77
23	T1ЗЖ4 (15)	15	24	28	35	40	45	48	54	60	77
24	T1ЗЖ5 (16)	16	25	30	36	42	48	49	54	60	79
25	T2ЗЖ4 (18)	18	28	32	40	45	50	57	61	66	84
26	T3ЗЖ3 (18)	18	28	32	40	45	50	57	61	66	84
28	T4ЗЖ2 (18)	18	28	32	40	45	50	57	61	66	84
28	T2ЗЖ5 (20)	20	30	35	42	48	50	54	55	65	80
29	T1ЗЖ7 (20)	20	30	35	42	48	50	54	55	65	80
30	ЗЖ8 (18)	18	28	32	40	45	50	55	60	66	85
31	T1ЗЖ6 (17)	17	30	35	42	48	54	56	61	70	85
32	T5ЗЖ2 (21)	21	32	36	45	50	55	60	66	72	92
33	T4ЗЖ3 (21)	21	32	36	45	50	55	60	66	72	92
34	T3ЗЖ4 (21)	21	32	36	45	50	55	60	66	72	92
35	T5ЗЖ3 (24)	24	36	40	48	56	60	63	70	77	97
36	T4ЗЖ4 (24)	24	36	40	48	56	60	63	70	77	97
37	T3ЗЖ5 (24)	24	36	40	48	56	60	63	70	77	97
38	T2ЗЖ6 (24)	24	36	40	48	56	60	63	70	77	97
39	T5ЗЖ4 (28)	28	40	45	54	60	66	70	77	84	104
40	T3ЗЖ6 (28)	28	40	45	54	60	66	70	77	84	104
41	T2ЗЖ7 (28)	28	40	45	54	60	66	70	77	84	104
42	T1ЗЖ8 (28)	28	40	45	54	60	66	70	77	84	104
43	T4ЗЖ5 (28)	28	40	45	54	60	66	70	77	84	104
44	T5ЗЖ5 (32)	32	45	50	60	66	72	77	84	91	112
45	T3ЗЖ7 (32)	32	45	50	60	66	72	77	84	91	112
46	T4ЗЖ7 (32)	32	45	50	60	66	72	77	84	91	112
47	T2ЗЖ8 (32)	32	45	50	60	66	72	77	84	91	112
48	T4ЗЖ6 (32)	32	45	50	60	66	72	77	84	91	112
49	T5ЗЖ6 (36)	36	50	55	66	72	77	84	91	98	120
50	T3ЗЖ8 (36)	36	50	55	66	72	77	84	91	98	120
51	T5ЗЖ7 (40)	40	55	60	72	78	83	99	104	111	126
52	T4ЗЖ8 (40)	40	55	60	72	78	83	99	104	111	126
53	T5ЗЖ8 (44)	44	60	65	78	84	90	98	105	112	133

Рис. 6.27. Матрица соотношений кодов техногенной (ТЗЖ) и природной (Пр) составляющих конечных таксонов районирования

Далее показаны некоторые примеры схем формирования риска. На рис. 6.28 представлен пример одной из возможных схем сочетания природных и техногенных факторов (моделей формирования риска). Балльная оценка данной схемы-модели в соответствии с (1) равна 24. Данная схема-модель характеризуется сочетанием 1 природного фактора с 1 баллом (Пр₂) (см. табл. 6.11) с 3 техногенными факторами с баллами 1, 1 и 3, что отвечает ЗЖ7. Соответственно количество связей в этой схеме равно 6. Код данной схемы: Пр₂ЗЖ7 (см. рис. 6.27, табл. 6.11, 6.12), что означает – оцениваемая территория относится к средней категории сложности инженерно-геологических условий, относится к застроенной жилой зоне с двумя типами жилых зданий, занимающих не менее 75% оцениваемой территории, в пределах которой осуществляется точечное строительство.

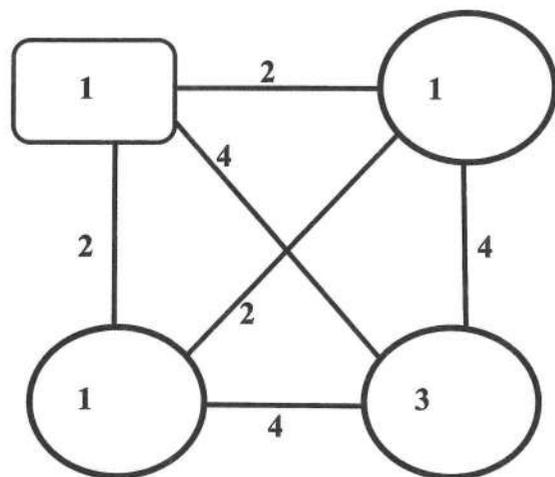


Рис. 6.28. Схема модели формирования риска: овалный прямоугольник – природный фактор с соответствующими баллами; круги – техногенные факторы с соответствующими баллами; цифры у линий – баллы, характеризующие связи (взаимовлияние) между факторами

На рис. 6.29 изображена схема-модель формирования риска возможного конечного таксона районирования урбанизированной территории с наибольшим возможным количеством факторов и связей между ними (8 факторов и 28 связей – модель 7).

Интегральная сумма баллов (\sum_o) для каждой схемы состоит из суммы всех факторов и суммы всех связей между факторами и определяется по формуле:

$$\sum_o \sum_{i=1}^n (a_i + \dots + a_n) + \sum_{j=1}^m (b_j + \dots + b_m), \quad (1)$$

где a – фактор (природный или техногенный, с определенным количеством баллов, в соответствии с табл. 1-3); n – количество факторов; b – связи (взаимовлияние) между факторами (каждое значение равно сумме баллов факторов); m – количество связей.

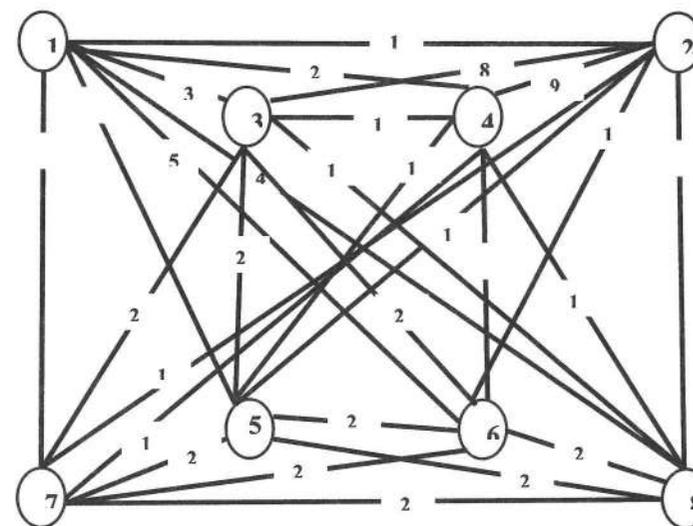


Рис. 6.29. Схема-модель № 7 формирования риска (8 природных и техногенных факторов и 28 связей между ними)

Суммарная балльная оценка схем-моделей формирования риска изменяется от 4 до 133 баллов. Максимальное значение баллов для вариантов 2 и 1 соответственно составляет 85 и 53. Эти данные были использованы для ранжирования полученных балльных оценок по категориям риска на основе деления ряда значений по плотности их распределения. Выделены четыре категории риска: низкая – территории, в пределах которых значение риска (количество баллов) менее 20, средняя – 20–53, высокая – 54–85 и очень высокая – более 85 (рис. 6.28).

6.7.4. Допустимый уровень риска

Упорядочение хозяйственной деятельности и рациональное использование урбанизированных территорий является наиболее эффективным способом снижения природно-техногенных рисков. Использование допустимых (приемлемых) значений рисков будет способствовать решению данной задачи.

Допустимый (приемлемый) риск – это условно безопасная величина риска. Как правило, его значение устанавливается государством и определяется уровнем его развития. Она может быть договорная, нормированная или узаконенная.

В настоящее время сложились представления о величинах приемлемого (допустимого) и неприемлемого рисков. В основном это касается социального риска. Считается, что 10^{-3} смертей/чел. год – это неприемлемо высокий риск, а 10^{-6} смертей/чел. год – это приемлемый риск гибели человека для обычных общих условий деятельности.

Данный уровень риска соответствует риску смерти от природных факторов и принят в нашей стране и ряде других стран в качестве нормативного.

Допустимый (приемлемый) риск объединяет природные, техногенные, экономические, социальные и политические аспекты и является определенным компромиссом между уровнем безопасности и возможностями его достижения. Для урбанизированных территорий определение допустимого значения риска требует специального подхода. Очень важным моментом является определение сферы выражения как вообще риска, так и его допустимого (приемлемого) значения. Совершенно очевидно, что на урбанизированных территориях в большинстве случаев не приемлемо использование риска гибели людей за исключением городов, расположенных в сейсмоопасной зоне.

В частности, для отдельных регионов и городов разработаны нормативные документы, в основном связанные с загрязнением окружающей среды, в которых обозначены их допустимые значения. Разработан Национальный стандарт Российской Федерации «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Требования к расчету уровня безопасности, риска и ущерба от подтопления градопромышленных территорий» (ГОСТ Р 22.8.09-2014) и некоторые другие нормативные документы.

Несомненно, что для лиц, принимающих решения, в частности отвечающих за строительство в пределах урбанизированной территории, наиболее понятным и приемлемым представляется стоимостное выражение, характеризующее территории с расположенным (строящимся) в ее пределах объектом. Анализ кадастровой стоимости объектов капитального строительства и земельных участков, расположенных в разных частях города Москвы, показал огромные расхождения в их значениях по территории Москвы, что говорит о нецелесообразности и нерациональности использования этих показателей в определении допустимого уровня риска. Использование данных стоимостных значений предполагает учет социально-политических тенденций, что не отражает адекватной природно-техногенной сути риска на урбанизированных территориях.

Риск, оцениваемый в условных баллах, включающих характеристики природных и техногенных факторов, обуславливающих формирование риска по определенным схемам-моделям, на наш взгляд, является наиболее удобным и достаточно конкретно и четко отражающим современную совокупность природно-техногенных условий территории. Вполне логично использование полученных значений риска в условных баллах для определения допустимого их значения на примере г. Москвы.

Предлагается рассмотреть два варианта определения допустимого значения риска.

1. Так как допустимый риск имеет договорное значение, то вполне разумно использовать нижнюю границу значений, характерных для очень высокого риска, как допустимое значение. Это значение равно 85 условным баллам.

2. На основании анализа матрицы соотношений кодов основной типизированной техногенной (Т – транспортной и ЗЖ – застроенной жилой зон) и природной (Пр) составляющих конечных таксонов районирования выявить соотношения различных схем-моделей со значениями риска в условных баллах (табл. 6.17).

По категориям риска количество схем его формирования распределяется следующим образом: в низкой категории – 87; в средней – 228; в высокой – 173 и в очень высокой – 42. Наибольшие значения риска тяготеют к схемам 6, 7 и они характеризуются самым сложным сочетанием и взаимовлиянием природных и техногенных факторов формирования риска. Интер-

валы значений риска по этим схемам изменяются следующим образом: значение риска, формируемого по схеме 6, меняется от 63 до 112 баллов, а по схеме 7 – от 79 до 133 баллов (см. табл. 6.17). Так как схема 7 формирования риска является самой сложной как по количеству параметров (природных и техногенных), так и по их взаимосвязи, предлагается в качестве допустимого уровня риска принять значение, равное 79 условным баллам.

Таблица 6.17

Соотношение различных схем-моделей со значениями риска в различных сочетаниях природных и техногенных факторов (кодов)

Схема-модель формирования риска	Категории риска, условные баллы											
	Низкая, менее 20			Средняя, 21-53			Высокая, 54-85			Очень высокая – более 85		
	Соотношение техногенных и природных кодов, кол-во и интервал значений											
	ТПр [27]*	ЗЖПр [27]	ТЗЖ Пр [33]	ТПр [23]	ЗЖПр [43]	ТЗЖ Пр [162]	ТПр [-]	ЗЖПр [10]	ТЗЖ Пр [163]	ТПр [-]	ЗЖПр [-]	ТЗЖ Пр [42]
первая	11 (1-10)**	6 (1-8)	5 (4-12)									
вторая	12 (9-18)	13 (9-18)	18 (9-20)	1 (21)		7 (21-28)						
третья	4 (16-20)	8 (16-20)	10 (16-20)	11 (21-32)	12 (24-32)	55 (21-45)						
четвертая				9 (28-45)	22 (25-50)	83 (23-50)			17 (54-65)			
пятая				2 (48-53)	9 (26-51)	17 (36-48)		6 (54-66)	92 (54-84)			
шестая								4 (63-84)	52 (63-84)			23 (91-112)
седьмая									2 (79-80)			16 (85-133)

* Общее количество схем моделей в конкретном сочетании природных и техногенных факторов.

** Интервал значений риска.

Значения риска 79 и более встречается и для условий формирования риска по схемам 5 и 6, включающих 64 варианта различных взаимодействий природно-техногенных факторов. Самые неблагоприятные природно-техногенные условия формирования риска со значением 133 условных балла отвечают коду Т53Ж8 Пр₁₀. Такой код соответствует территориям со сложными инженерно-геологическими условиями, обусловленными четырьмя критериями (2 – категории б и 2 – категории в) природных условий, на которых расположен сложный транспортный узел, уникальные объекты, ведется точечная застройка и имеется один тип жилой застройки.

Таким образом, на основе разработанных подходов к определению моделей формирования риска и проведенному ранжированию полученных значений (баллов) рассчитаны значения риска для участка Покровское-Стрешнево Северо-Западного округа г. Москвы (рис. 6.24).

В пределах оцениваемой территории выделены два ИГМ, отличающихся сложностью инженерно-геологических условий (Пр₁) и (Пр₂). Техногенная составляющая таксона Пр₂ полностью относится к ЗЖ₇ – застроенной жилой зоне, в пределах которой выделены 3 разных типа реципиентов (два типа жилых зданий, занимающих не менее 75% оцениваемой территории, в пределах которой также осуществляется точечное строительство).

Следовательно, на данном участке риск формируется по модели 3, т.е. в ней задействованы 4 параметра (Пр₂ и ЗЖ₇ – два типа жилых домов и точечное строительство –1+1+т.ст.) с разной значимостью и 6 различных взаимодействий. Интегральное значение всех этих факторов и взаимодействий составляет 24 балла, и соответственно этот участок отнесен к средней категории риска (рис. 6.30).

В пределах таксона, характеризующегося низкой категорией сложности инженерно-геологических условий (Пр₁), выделяется 3 участка с различной степенью техногенной нагруженности – ЗЖ₁ (застроенная жилая зона с одним типом реципиента), ЗЖ₇ (застроенная жилая зона с тремя типами реципиентов) и Т43Ж3 (застроенная жилая зона с двумя типами жилых домов, в пределах которой расположена транспортная зона с двумя типами реципиентов).

Формирование риска в пределах первого участка (ЗЖ1Пр1) происходит по модели 1 и соответствующее ей количество баллов равно 4 (низкая категория риска). Второй участок (ЗЖ7Пр1) отвечает модели 3 с суммой баллов 15 и также относится к низкой категории риска. Третий участок (Т43Ж3) в пределах этой зоны отнесен к средней категории риска, в модели (4 модель) формирования которого задействованы 5 факторов и 10 связей. Итоговая балльная оценка равна 23.

Полученные данные о балльной оценке риска урбанизированных территорий (Покровское-Стрешнево Северо-Западного административного округа г. Москвы) позволяют оценить современное состояние конкретной территории (наличие и степень опасности инженерно-геологических процессов, техногенную нагруженность – сочетание реципиентов опасности и их балльное значение) и выбрать наиболее благоприятные участки для строительства и другие варианты использования территории.

Предложенные подходы и полученные результаты сопоставимы с работами других российских и зарубежных авторов в плане учета большого разнообразия факторов формирования риска и применения метода многокритериального анализа (Калманова В.Б., 2015; Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В., 2017; De Mulder E.F.J.&Pereira, J.J., 2009). Но, как правило, во всех этих работах основной упор сделан на оценку геоэкологических последствий, выраженных через загрязнение городской среды или оценку проблемы, связанную с развитием конкретного процесса (Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В., 2017; Legget, R.F., 1973), либо с проблемами создания «умного города» (Paliaga G., Faccini F., Luino F., Turconi L., 2018). В основном рассматриваются экономические возможности городов, связанные с улучшением ситуации относительно загрязнения окружающей среды.

Полученные результаты являются конкретными и необходимыми не только для лиц, принимающих решения, но и для специалистов, занимающихся данной проблемой во всем мире, так как интегрируют в себе огромную информацию о природной и техногенной составляющих урбанизированной территории.



Рис. 6.30. Фрагмент карты-схемы оценки риска участка Покровское-Стрешнево. Категории риска: 1 – низкая; 2 – средняя; 3 – код природно-техногенных условий. Границы между: 4 – ИГМ; 5 – типами техногенной нагруженности

На наш взгляд, такой подход весьма уместен и перспективен для создания схем территориального планирования и развития, вполне вписывается в мировую политику изучения и использования урбанизированных территорий и даже способен конкурировать в плане универсальности и достаточной простоты использования предложенного алгоритма оценки состояния (риска) урбанизированных территорий.

Полученные результаты оценок риска участка Покровское-Стрешнево могут быть рекомендованы городским органам управления для разработки программ безопасного использования и/или застройки и реконструкции района.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель оценки природных рисков на урбанизированной территории – обеспечение ее устойчивого развития, которое может быть достигнуто только в том случае, если будет стабильно функционировать существующая инфраструктура, а новое строительство будет вестись с минимальными ущербами как для строящихся объектов, так и для зданий и сооружений в зоне влияния строительства.

Существует много исследований и проектов, посвященных определению главных направлений, обеспечивающих устойчивое развитие городских территорий. Как правило, в них говорится о междисциплинарном подходе, учитывающем очень многие критерии комфортного проживания людей – от социальной инфраструктуры до благоприятной природной обстановки. Геологические опасности и величина их возможного воздействия на городскую инфраструктуру – один из таких критериев. Он требует специального анализа. В нашем исследовании мы постарались показать методические принципы оценки и картографирования геологического риска, характеризующего возможные ущербы от геологических опасностей.

Проблема анализа природных рисков разноплановая. В ней еще много нерешенных вопросов. Именно поэтому проводились исследования, направленные как на разработку методологии оценки опасности и риска отдельных опасностей, так и на интегральную оценку и картографирование геологического риска городов. Ниже приводятся основные результаты выполненных работ.

Показано, что при хозяйственном освоении склоновой оползнеопасной территории необходимо проводить исследование оползневой опасности и риска для контроля эффективности принимаемых защитных мероприятий. Основные трудности при строительстве сооружений на оползневой территории, в частности в Москве, связаны с оценкой опасности и выявлением особенностей развития глубоких подвижек по меха-

низму сжатия-выдавливания. Строительные работы могут вызывать активизацию глубоких оползневых смещений, приводить к образованию нового оползневого блока с проявлением разрушительных оползневых деформаций на склоне, приводящих к существенным ущербам для строящихся и существующих сооружений. При этом на склонах и откосах могут возникать и поверхностные оползни, от которых также требуется защита инженерного сооружения.

Мониторинг оползневого процесса занимает важное место в системе изучения оползней и является элементом для управления оползневым риском, отражая реальное поведение оползней во времени под действием природных и техногенных факторов и обеспечивая информацией, необходимой для оценки состояния оползнеопасного склона (или оползня), прогнозирования его развития и разработки управляющих воздействий по его стабилизации, а также мероприятий по защите проектируемых объектов.

На примере территории покрытого карбонатного карста г. Москвы разработана процедура локальной оценки опасности и риска провалообразования. Рассмотрены основные механизмы развития процесса и количественные критерии оценки устойчивости районов нереализованной карстово-суффозионной опасности. В качестве расчетных способов определения диаметра воронок предложены модифицированные модели среза пласта по круглоцилиндрической поверхности и обрушения параболического свода. Рассмотрены некоторые эффекты самоорганизации грунтовой толщи в окрестности ослабленных участков массива и способы их учета в расчетных моделях, а также зональное строение области влияния карстовой полости. На конкретном примере раскрыто содержание работ и охарактеризованы задачи каждого из четырех выделенных этапов оценки карстово-суффозионной опасности и риска, показаны пути и методы их решения.

Предложена методика оценки уязвимости техногенно-урбанизированных территорий для опасных геологических процессов. Выполнен анализ результатов комплексных геологических и мониторинговых исследований на территории г. Березники Пермского края, который позволил выявить большой комплекс природных и техногенных факторов формирования геологических опасностей и обусловленных ими рисков.

Данные факторы требуют учета при современной оценке природной и техногенной опасности территории г. Березники и анализе причин образования провалов земной поверхности. Составлен макет карты уязвимости промышленных и гражданских объектов г. Березники масштаба 1:10 000. Карта уязвимости объектов г. Березники относится к новому поколению инженерно-геологических карт и отображает положение зон и участков с разной степенью возможных потерь (ущербов) при воздействии опасных геологических процессов применительно к конкретным объектам, имеющим разные категории (классы) ответственности.

Показано, что методология интегральной оценки риска от воздействия экзогенных геологических процессов в городах зависит от масштаба исследований.

При исследованиях в масштабах 1:25 000 – 1:50 000 и мельче такая оценка может проводиться отдельно для существующей инфраструктуры и для планируемого строительства. При картографировании в обоих случаях дается качественная сравнительная оценка геологического риска. Для существующей инфраструктуры зоны повышенного риска – это участки развития опасных процессов в пределах районов с высокой плотностью капитальной застройки. Для территории перспективного строительства риск оценивается для конкретного сооружения или типа сооружений с определенной глубиной его заложения или заложения его фундамента. В этом случае к зонам повышенного риска надо относить территории, где при использовании данных проектных решений можно ожидать большие экономические потери от проявлений геологических опасностей при строительстве и эксплуатации сооружения.

При оценке и картографировании геологического риска на урбанизированных территориях наиболее сложной задачей является оценка уязвимости инфраструктуры и территории. В данном исследовании показана качественная сравнительная оценка уязвимости на основании укрупненного функционального зонирования, при которой используется общая характеристика территории города и наземной инфраструктуры, объединенная понятием «городская среда». Необходимо понимать, что если мы даем качественную и достаточно приблизительную оценку геологических опасностей, то как бы детально и даже количественно не была охарактеризована инфраструктура, оценка риска будет также приблизительной.

Для масштаба 1:25 000 – 1:50 000 вполне достаточно характеризовать уязвимость городской среды на основании качественного анализа плотности, возраста, функционального назначения, архитектурной и исторической ценности зданий и сооружений.

Для более крупных масштабов исследования (1:10 000 и крупнее) разработанные методические подходы оценки риска для застроенной жилой и транспортных зон урбанизированных территорий включают в себя выбор и обоснование природных факторов формирования риска в пределах конечных таксонов районирования оцениваемой территории по природно-техногенным условиям; выбор и обоснование техногенных факторов (реципиентов опасности) застроенной жилой зоны (определение типов жилой застройки на основе принципа об однородности типов застройки, исходя из принятого положения о том, что тип застройки выделяется в том случае, если он составляет не менее 25% всех типов застройки в пределах оцениваемой территории); выбор и обоснование техногенных факторов (реципиентов опасности) транспортной зоны (определение типов транспортной зоны по аналогии с определением типов жилой застройки); присвоение баллов каждому типу природных факторов и реципиентов на основе экспертной оценки, учитывающей влияние выделенных типов на объекты (реципиенты) риска; составление матриц возможных сочетаний природных и техногенных факторов, оценка интегральных значений, ранжирование по категориям риска; картографирование оцениваемой территории по категориям риска (баллы).

Дальнейшее развитие научных исследований оценки риска урбанизированных территорий в крупном масштабе видится в следующих основных направлениях: а) соотнесение балльных оценок риска с экономическими эквивалентами, т.е. в приравнивании 1 балла определенным экономическим потерям на основе эмпирических, статистических и/или данных моделирования взаимодействия и взаимовлияния природных факторов (опасностей) и техногенных объектов (реципиентов опасности); б) создание унифицированной методики оценки риска мегаполисов.

Проведенные исследования по оценке и картографированию геологического риска в Москве показывают, насколько разнообразным может быть применение инструмента риск-анализа в инженерной геологии урбанизированных территорий. Для территории города результатом тако-

го анализа чаще всего будет зонирование территории по уровню риска. Уровень геологического риска трудно оценить количественно, тем более для всей территории города. Но качественная сравнительная оценка тоже очень важна. Она позволит выделять участки города, где необходимо вводить ограничение на использование территории из-за высокого уровня риска для существующей инфраструктуры или сравнивать альтернативные варианты протяженных транспортных проектов (например, метро) для того, чтобы избежать значительных экономических потерь из-за геологических опасностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абатурова И.В., Емельянова И.А., Ковязин И.Г.* Лито-техническая система «город – геологическая среда» и нарушение ее функционирования в результате развития природных и природно-техногенных процессов / В сборнике: Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. 2015, с. 463–468.
2. *Абдрахманов Р.Ф., Мартин В.И., Попов В.Г. и др.* Карст Башкортостана. Уфа: Информреклама, 2002. 383 с.
3. *Адерхольд Г.* Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий / Пер. с нем. В.В. Толмачева. Под ред. Е.В. Копосова. Нижний Новгород: Изд-во НГАСУ, 2010. 112 с.
4. *Альбов С.В.* Объяснение происхождения провалов и просадок поверхности теорией горного давления (по материалам карста низовьев левого бережья р. Оки) // Карстоведение. Тр. Молотовской карстовой конференции (26 февраля – 1 января 1947). Вып. 4. Молотов: Изд-во Молотовского гос. ун-та, 1948. С. 23–36.
5. Анализ и оценка природных рисков в строительстве. Материалы международной конференции / Под ред. С.И. Полтавцева и А.Л. Рагозина. М.: ПНИИИС, 1997. 173 с.
6. *Андрейчук В.Н.* Провалы над гипсовыми пещерами-лабиринтами и оценка устойчивости закарстованных территорий. Черновцы: Изд-во «Прут», 1999. 52 с.
7. *Аникеев А.В.* Методика моделирования устойчивости покровной толщи закарстованных массивов с помощью водонасыщенных эквивалентных материалов. М.: ЦП НТГО, 1987. 36 с.
8. *Аникеев А.В.* О двух формах разрушения связных грунтов над полостью // Геоэкология. 1993. № 2. 1993, с. 124–132.
9. *Аникеев А.В.* Особенности разрушения влажных и водонасыщенных песков покровной толщи в карстовых районах // Геоэкология. 1995. № 1, с. 72–79.
10. *Аникеев А.В.* О причинах провалов и локальных оседаний земной поверхности в Москве // Геоэкология. 2002. № 4, с. 363–374.
11. *Аникеев А.В.* Суффозия. Механизм и кинематика свободной суффозии // Геоэкология. 2006. № 6, с. 544–553.
12. *Аникеев А.В.* Об использовании модели Бирбаумера в инженерном карстоведении // Сергеевские чтения. Вып. 11. М.: ГЕОС, 2009, с. 257–262.
13. *Аникеев А.В.* Оценка устойчивости карстовых районов на основе представлений об аккумуляционной емкости массива // Сергеевские чтения. Вып. 17. Материалы годичной сессии Научного совета РАН ... (23–24 марта 2015 г.). М.: Изд-во РУДН, 2015, с. 219–225.
14. *Аникеев А.В.* Опасность и риск образования воронок провала и оседания в карстовых районах: основные показатели, подходы и способы оценки // Инженерная геология. 2016, № 5, с. 10–18.
15. *Аникеев А.В., Калинин Э.В., Тараканов С.И.* Определение напряженного состояния грунтовой толщи над карстовой полостью // Инженерная геология. 1991. № 5, с. 64–70.
16. *Аникеев А.В., Рагозин А.Л., Селезнев В.Н.* Оценка геологического риска на участке городского строительства // Геоэкология. № 6. 2007, с. 547–560.
17. *Антипов А.В., Осипов В.И.* Принципы инженерно-геологического районирования территории Москвы // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2009. № 1, с. 3–13.
18. Безопасность России. Словарь терминов и определений. Издание 2-е дополненное. М.: МГФ «Знание», 1999. 368 с.
19. *Безуглова Е.В.* Оценка и управление оползневым риском транспортных природно-технических систем черноморского побережья Кавказа.

- Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Краснодар, 2014.
20. *Божинский А.Н., Лосев К.С.* Основы лавиноведения. Л.: Гидрометеодиздат, 1987. 280 с.
 21. *Борзаковский Б.А., Мараков В.Е., Теннисон Л.О.* Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» на городскую и промышленную застройку г. Березники // Горный информ.-аналит. бюллетень. 2009. № 7, с. 381–396.
 22. *Бурова В.Н.* Особенности районирования урбанизированных территорий для оценок риска от опасных природных процессов // Геоэкология. 2019, № 6, с. 106–111.
 23. *Быков А.А., Мурзин Н.В.* Проблемы анализа безопасности человека, общества и природы. СПб.: Наука. 1997. 247 с.
 24. Бюллетень городов России 2017. № 3. 57 с.
 25. *Галицкий В.Г., Галкин В.А.* Структурная организация геологической среды и некоторые закономерности ее динамических перестроек // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1997. № 3, с. 12–17.
 26. Геологические памятники Пермского края. Энциклопедия. Пермь, ИПК «Звезда», 2009 г., 616 с.
 27. *Гинзбург Л.К.* Рекомендации по выбору методов расчета коэффициента устойчивости и оползневого давления. М.: Центр. бюро научн.-техн. инф., 1986.
 28. *Голодковская Г.А., Лебедева Н.И.* Инженерно-геологическое районирование территории Москвы // Инженерная геология. 1984. № 3. С. 87–102.
 29. *Горбунова К.А.* Карстоведение. Вопросы типологии и морфологии карста. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1985. 88 с.
 30. ГОСТ РФ Р 22.0.11-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Предупреждение природных чрезвычайных ситуаций. Термины и определения. Москва, 1999. 8 с.
 31. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2013 году. Министерство природных ресурсов и

- экологии РФ. Официальный сайт: <http://www.mnr.gov.ru> (дата обращения: 15.09.2014).
32. *Гулакян К.А., Кюнтцель В.В.* Классификация оползней по механизму их развития // Вопр. изуч. оползней и факторов, их вызывающих. М.: ВСЕГИНГЕО, 1970. Вып. 29.
 33. *Гурлев И.В., Матвеевский А.С.* Обеспечение комплексной безопасности человека // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. Москва. Вып. 1. 1996. С. 69–80.
 34. Деловая газета. Путеводитель международного бизнеса. № 120/121. Октябрь-ноябрь, 2016.
 35. *Демин А.М.* Оползни в карьерах: анализ и прогноз. М.: ГЕОС, 2009. 79 с.
 36. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н.* Карст мира. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2007. 331 с.
 37. *Дублянский В.Н., Дублянская Г.Н., Катаев В.Н. и др.* Карстоведение. Ч. 3. Инженерное карстоведение: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2011. 288 с.
 38. *Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Верхоланцев А.В., Глебов С.В.* Мониторинг сейсмических процессов в калийных рудниках: результаты наблюдений и перспективы развития / Горный журнал № 6, 2013.
 39. *Елкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска (на примере Республики Татарстан): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004. 158 с.
 40. *Емельянова Е.П.* Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
 41. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С.* Геоэкологические ограничения при проектировании реорганизации городского пространства // Геоэкология, 2017, № 4, с. 82–96.
 42. *Заиканов В.Г., Минакова Т.Б., Булдакова Е.В., Сависько И.С.* Геоэкологическая безопасность городов в горнопромышленных и техногенно нагруженных районах / В сборнике: Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Пермь, 2019. С. 179–183.

43. *Зверев В.П.* Гидрогеохимические исследования системы «гипсы – подземные воды». М.: Наука, 1967. 97 с.
44. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. М.: Научный мир, 2006. 256 с.
45. *Зверев В.П., Костикова И.А.* О связи изменений химического состава подземных вод территории г. Березники с развитием провальных процессов // *Геоэкология*. 2015. № 6 С. 505–513.
46. *Зорина Е.Ф.* Прогноз количества и длины оврагов в пределах балочного водосбора // *Эрозия почв и русловые процессы*. Вып. 8. М.: МГУ, 1981. С. 81–90.
47. *Измалков В.И., Измалков А.В.* Техногенная и экологическая безопасность и управление риском. СПб.: Изд-во Петро-РИФ, 1998. 482 с.
48. *Ильин А.Н., Капустин А.П., Коган И.А., Попов И.В. и др.* Карстовые явления в районе г. Дзержинска Горьковской области. Тр. Лаборатории гидрогеологических проблем им. Ф.П. Саваренского АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 121 с.
49. Инструкция по проектированию зданий и сооружений в районах г. Москвы с проявлением карстово-суффозионных процессов. М.: Картолитография, 1984. 15 с.
50. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Республики Татарстан за 2006 год. Вып. 7 / Министерство природных ресурсов РФ. Казань, 2007. С. 375–398.
51. *Кавеев М.С.* Карстово-суффозионные явления в левобережной части долины Волги в пределах Татарской АССР // *Известия ВГО*. 1956. Т. 88, N 5. С. 61–66.
52. *Казанов С.С.* Геоэкологическое обеспечение безопасности освоения городских овражно-балочных территорий / автореферат канд. дис., 2004.
53. *Казеев А.И.* Оползневая опасность и риск в зарубежной теории и практике (по семинару «LARAM», г. Равелло, Италия, 2008) // Матер. междунар. научн.-практич. конф. «Геориск-2009». 2009. Т. 2. С. 348–353.

54. Как разработать Климатический план города? Опыт Москвы. Базовые рекомендации по адаптации и снижению воздействия. Москва, 2017. <http://ecoline.ru/wp-content/uploads/how-to-develop-a-climate-plan-for-the-city.pdf>.
55. *Калманова В.Б.* Геоэкологическое картографирование урбанизированных территорий (на примере г. Биробиджана) // Материалы Междунар. конф. «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2015. 21(1). pp. 566-574. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2015-1-21-566-574>.
56. *Клейн Р.Г.* Строительная механика сыпучих тел. М.: Стройиздат, 1977. 249 с.
57. *Ковалева Т.Г.* Методические основы оценки карстоопасности на ранних стадиях прогноза устойчивости территорий (на примере районов развития карбонатно-сульфатного карста Предуралья). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2015. 140 с.
58. *Кожевникова В.Н.* О роли динамики и режима подземных вод в формировании карстово-суффозионных процессов (на примере некоторых районов г. Москвы) // *Инженерные изыскания при строительстве*. Вып. 5(33). Сер. 2. М.: Стройиздат, 1974, с. 22–27.
59. *Козлякова И.В., Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., И.А. Кожевникова.* Оценка карстово-суффозионной опасности в Москве для управления карстовым риском в масштабе города // *Оценка и управление природными рисками: Материалы Общероссийской конференции «Риск-2000»*. М.: Анкил, 2000, с. 205–207.
60. *Козлякова И.В., Еремина О.Н., Миронов О.К.* Геологический риск урбанизированных территорий (оценка и картографирование на примере г. Москвы) // *Геоэкология*, 2018, № 5, с. 53–65.
61. *Короткевич Г.В.* О карстово-суффозионных формах и мерах предупреждения их развития при строительстве // *Грунтоведение и инженерная геология*. Л.: ЛГУ, 1964. С. 155–160.
62. *Кофф Г.Л.* Экономико-геологическая оценка техногенных изменений геологической среды урбанизированных территорий. Т. II. М.: Институт литосферы АН СССР, 1990. 128 с.

63. Кофф Г.Л., Петренко С.И., Лихачева Э.А., Котлов В.Ф. Очерки по геоэкологии и инженерной геологии Московского столичного региона. М.: Изд-во РЭФИА, 1997. 185 с.
64. Кофф Г.Л., Лихачева Э.А., Тимофеев Д.А. Геоэкология Москвы: методология и методы оценки состояния городской среды. М.: Изд-во «Медиа-пресс», 2006. 200 с.
65. Кочев А.Д., Чертков Л.Г., Зайонц И.Л. Карстово-суффозионные процессы на территории г. Москвы и проблема оценки их опасности // Инженерная геология. 2018, № 6. С. 24–32.
66. Крамаджян А.А., Линдквист П.-А., Мансон А. и др. О формах областей течения в сыпучих материалах при выпуске // ФТПРПИ. 1994. № 2, с. 34–46.
67. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е издание. М.: Эпсилон плюс, Фонды ОАО «Уралкалий», 2013. 368 с.
68. Кузьмин И.И., Махутов Н.А., Хетагуров С.В. Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты. СПб.: Изд-во СПб ГУЭФ, 1997. 164 с.
69. Кулыгин В.В. Подход к оценке рисков опасных природных явлений в морехозяйственных системах // Геоэкологические и геополитические риски. Проблемы анализа риска, том 14, 2017, № 2, стр. 64–73.
70. Курбатова А.С., Мягков С.М., Шныпарков А.Л. Природный риск для городов России. М.: НИИПИ экологии города, 1997. 240 с.
71. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Козлякова И.В., Кожевникова И.А. Влияние эрозионных врезов на особенности строения геологической среды и развитие опасных геологических процессов в столичном мегаполисе // Уникальные и специальные технологии в строительстве. 2006. № 1(4). С. 32–37.
72. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. Опасные геологические процессы и геоэкологическое состояние территории г. Москвы // Эколого-геологические проблемы урбанизированных территорий: матер. Второй Всерос. науч.-практ. конф., 26-27 ноября 2009, г. Екатеринбург 2009. С. 194–196.
73. Кутепов В.М., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А., Козлякова И.В. Карта дочетвертичных отложений как основа крупно-

- масштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология, 2011, № 5. с. 399–410.
74. Кутепов В.М., Кожевникова В.Н. Устойчивость закарстованных территорий. Наука, 1989, 151 с.
75. Кутепов В.М., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Оценка карстовой и карстово-суффозионной опасности в проекте крупномасштабного геологического картирования г. Москвы // Геоэкология, 2011, № 3, 217–228.
76. Кухаренко А. Подземный город для пешеходов PESO // Подземный эксперт. Информационный Портал о подземном строительстве, декабрь 2014 <https://undergroundexpert.info/opyt-podzemnogo-stroitelstva/realizovannye-proekty/stroitelstvo-podzemnogo-goroda-monrealya-reso/>.
77. Левченко А.Н. Обоснование методологии и разработка инновационных технических решений освоения подземного пространства мегаполисов – Автореферат дисс. на соиск. доктора техн. наук, Москва. – 2009.
78. Леггет Р. Города и геология. Пер. с англ., М., изд-во «Мир», 1976, 559 с.
79. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.: ил.
80. Лыкошин А.Г. Вопросы изучения фильтрационных деформаций и неоднородности водопроводимости горных пород // Тр. института «Гидропроект». Сб. 48. 1976, с. 61–72.
81. Лыкошин А.Г., Молоков Л.А., Парабучев И.А. Карст и строительство гидротехнических сооружений. М.: Гидропроект, 1992. 323 с.
82. Мавлянова Н.Г., Козлякова И.В., Анисимова Н.Г., Еремина О.Н., Кожевникова И.А. Проблемы освоения подземного пространства урбанизированных территорий // Сергеевские чтения, выпуск 17, Москва, РУДН, 2015, стр. 159–165.
83. Макеев З.А. Принципы инженерно-геологического районирования карстовых областей // Карстоведение. Вып. 4. Тр. Молотовской карст.

- конф. (26 янв. – 1 февр. 1947 в г. Молотов). Молотов: Изд-во Мол. гос. ун-та, 1948. С. 43–45.
84. *Максимович Г.А.* Основы карстологии. Т. 1. Вопросы морфологии, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь: Перм. книжное изд-во, 1963. 444 с.
85. *Максимович Н.Г.* Безопасность плотин на растворимых породах (на примере Камской ГЭС). Пермь: ООО ПС «Гармония», 2006. 212 с.
86. *Мамаев Ю.А., Ястребов А.А.* Влияние техногенеза на активизацию суффозионно-карстовых процессов в надсоляных толщах калийных месторождений в Пермском крае РФ «Сергеевские чтения». Вып. 18, 2016, с. 314–319.
87. *Мамаев Ю.А., Ястребов А.А.* Инженерно-геологическое районирование территории Соликамских рудников в Пермском крае РФ для оценки условий строительства и эксплуатации наземных капитальных объектов. «Сергеевские чтения». Вып. 19, 2017, с. 523–529.
88. *Мацуй С.И., Безуглова Е.В., Плешаков Д.В.* Оценка оползневой опасности транспортных сооружений. Краснодар: КубГАУ, 2015. 120 с.
89. *Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С.* Концепция комплексного освоения подземного пространства Москвы на современном этапе. Подземный эксперт. Информационный портал о подземном строительстве. undergroundexpert.info, 2013 г.
<https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/nauchnye-stati/kontseptsiya-osvoeniya-podzemnogo-prostranstva-moskvy/print/>
90. *Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Конюхов Д.С.* Управление геотехническими рисками в подземном строительстве // Метро и тоннели. 2013. № 6, с. 36–39.
91. Методические указания по оценке рисков земляного полотна. РУТ (МИИТ), Москва, 2018. 47 с.
92. Москва. Геология и город. Под ред. Осипова В.И. и Медведева О.П. М., Московские учебники и картолитография. 1997, 400 с.
93. *Мягков С.М.* География природного риска. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
94. *Огильви Н.А.* Карст, его значение для эксплуатации угольных месторождений в Подмосковном бассейне и пути его изучения // Карстование. Вып. 4. Тр. Молотовской карст. конф. (26 янв. – 1 февр. 1947 в г. Молотов). Молотов: Изд-во Мол. гос. ун-та, 1948, с. 37–43.
95. ОДМ 218.2.030-2013 «Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах». Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). Москва, 2014.
96. *Осипов В.И.* Геологические условия градостроительного развития г. Москвы. М.: ЗАО «Мир», 2008. 36 с.
97. *Осипов В.И.* Крупномасштабное геологическое картирование территории г. Москвы // Геоэкология. 2011, № 3, с. 195–197.
98. *Осипов В.И.* Биосфера и экологическая безопасность. М.: РУДН, 2017, 136 с.
99. *Осипов В.И., Антипов А.В. и др.* Инновационный проект по крупномасштабному специализированному геологическому картографированию территории города Москвы. В сборнике «Практика и опыт ГУП «Мосгоргеотрест», М., 2012, с. 150–176.
100. *Осипов В.И., Барях А.А., Санфиоров И.А., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А.* Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // Геоэкология, 2014, № 4, с. 356–361.
101. *Осипов В.И., Бурова В.Н., Заиканов В.Г., Молодых И.И., Пырченко В.А., Сависько И.С.* Карта крупномасштабного (детального) инженерно-геологического районирования территории г. Москвы // Геоэкология. 2011, № 4, 306–318.
102. *Осипов В.И., Бурова В.Н., Карфидова Е.А.* Формирование сведений о геоэкологических условиях в границах кадастрового деления территории г. Москвы. – Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. – Москва: РУДН, 2015. – С. 76–82.
103. *Осипов В.И., Бурова В.Н., Карфидова Е.А.* Методические основы оценки уязвимости объектов капитального строительства урбанизированных территорий от опасных геологических процессов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016, № 6, с. 32–36.

104. *Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В.* Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // *Геоэкология*. 2017, № 3, с. 3–16.
105. *Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А.* Зонирование территории г. Березники Пермского края РФ по степени опасности развития геологических процессов // *Геоэкология*, 2014, № 6, с. 518–525.
106. *Осипов В.И., Махутов Н.А., Проценко А.Н., и др.* Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф. М.: МГФ «Знание», 1999, 667 с.
107. *Осипов В.И., Суцев С.П., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Кожаринов С.В., Барская Т.В.* Оценка сейсмического риска территории г. Б. Сочи // *Геоэкология*. 2015. № 1. С. 5–21.
108. *Осипов Ю. Б., Чертков Л. Г.* Методика инженерно-геологического изучения карстовых и суффозионных явлений в условиях крупного города // *Инженерная геология*, 1986, № 5, С. 72–84.
109. *Парфенов С.И.* Карстово-суффозионные явления на Ходыньском поднятии в г. Москве // *Новые методы изучения инженерно-геологических условий*. М.: Наука, 1981. С. 34–38.
110. *Певнев А.К., Черников А.Я.* Современное тектоническое строение территории города Москвы по данным геодезического мониторинга // *Геодезия и картография*. 2010. № 3. С. 40–50.
111. *Петров Н.Ф.* Оползневые системы. Простые оползни (аспекты классификации). Кишинев: Изд-во «Штиинца», 1987. 161 с.
112. *Печеркин А.И.* Геолого-структурные закономерности развития карста и их инженерно-геологическое значение: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Пермь, 1989. 454 с.
113. *Печеркин И.А., Максимович Г.А., Саваренский И.А. и др.* Проблемы инженерного карстования // *Вопросы изучения инженерно-геологических процессов*. М.: Стройиздат, 1984. С. 43–50.
114. *Попов И.В.* Инженерная геология. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1959. 512 с.
115. *Порфирьев Б.Н.* Государственное управление в чрезвычайных ситуациях. М.: Наука. 1991. 137 с.
116. *Постоев Г.П.* Глубокие блоковые оползни на урбанизированных территориях // *Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий*. Материалы междунар. симпоз. Екатеринбург: АКВА-ПРЕСС, 2001. Т. 1. С. 335–342.
117. *Постоев Г.П.* К вопросу количественной оценки оползневых рисков // *Риск-2003: Материалы Всеросс. конф.* М.: Изд-во РУДН. 2003. Том II. С. 48–50.
118. *Природные опасности России. Оценка и управление природными рисками. Тематический том / Под ред. А.Л. Рагозина.* М.: Изд. фирма «КРУК», 2003. 320 с.
119. *Природные опасности России. Экзогенные геологические опасности. Тематический том / Под ред. В.М. Кутепова, А.И. Шеко.* М.: Изд. фирма «КРУК», 2002. 348 с.
120. *Проект цифровизации городского хозяйства «Умный город»;* Минстрой РФ, 2019 <https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/>.
121. *Протодьяконов М.М.* Давление горных пород и рудничное крепление. Давление горных пород. Изд. 3-е. М.: Госгориздат, 1933. Ч. 1. 127 с.
122. *Прядко И.А.* Экономический механизм обоснования экологически устойчивого развития городских территорий. Ростов на Дону: Ростиздат, 2009. 144 с.
123. *Рагозин А.Л.* Общие положения оценки и управления природным риском // *Геоэкология*. 1999, № 5, с. 417–429.
124. *Рагозин А.Л., Ёлкин В.А.* Региональная оценка карстовой опасности и риска // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2003, № 4, с. 33–52.
125. *Ревуженко А.Ф., Стажневский С.Б.* Об учете дилатансии в основных справочных формулах механики сыпучих сред // *ФТПРПИ*. 1986. № 4. С. 13–16.

126. *Ревуженко А.Ф., Стажневский С.Б., Шемякин Е.И.* Задачи механики сыпучих сред в горном деле // ФТПРПИ. 1982. № 3. С. 19–25.
127. *Ревуженко А.Ф., Стажневский С.Б., Шемякин Е.И.* О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах // ФТПРПИ. 1974. № 3. С. 130–133.
128. Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы / Под ред. А.Л. Рагозина. Москомархитектура, ГУ ГО ЧС г. Москвы. М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 59 с.
129. Рекомендации по проведению инженерных изысканий, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области / Департамент градостроительного развития Нижегородской обл. Нижний Новгород, 2012. 140 с.
130. *Родионов Н.В.* Карст Европейской части СССР, Урала и Кавказа. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 174 с.
131. *Русин Е.П., Стажневский С.Б., Хан Г.Н.* Геомеханические аспекты генезиса экзо- и эндокарста // ФТПРПИ. 2007. № 2. С. 10–20.
132. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий [Decisionmaking.Method of hierarchyanalysis]. Пер. с англ. М., изд-во «Радио и связь», 1993, 278 с.
133. *Саваренский И.А., Миронов Н.А.* Руководство по инженерно-геологическим изысканиям в районах развития карста / ПНИИИС Госстроя России. М., 1995. 167 с.
134. *Саваренский Ф.П.* Избранные сочинения. Отв. ред. Н.Н. Славянов. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 412 с.
135. *Сафронов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А.* Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. 207 с.
136. *Сергеев Е.М.* Геологический фундамент Москвы // Город, природа, человек. М.: Мысль, 1982, с. 109–142.
137. *Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др.* Грунтоведение. 3-е изд., перераб. и доп. // Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1971. 595 с.

138. Словарь русского языка: в 4-х т. / АН СССР, Ин-т рус. яз. // Под ред. А.П. Евгеньевой – 3-е изд. М.: Русский язык, 1985–1988.
139. СНиП 02-96. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
140. СНиП 22-02-2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. М.: Федеральное агентство по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству, 2004. 42 с.
141. *Соколов Д.С.* Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
142. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 / Министерство регионального развития РФ. М., 2012. 65 с.
143. *Стажневский С.Б.* О первой форме течения сыпучих материалов в бункерах // ФТПРПИ. 1983. № 3. С. 14–21.
144. *Стажневский С.Б.* О второй форме течения сыпучих материалов в бункерах // ФТПРПИ. 1985. № 5. С. 3–16.
145. *Ступишин А.В.* Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. Казань: Изд-во Казанского университета, 1967. 291 с.
146. *Терцаги К.* Строительная механика грунтов на основе его физических свойств. Пер. с нем. под ред. Н.М. Герсеванова. М.–Л.: Госстройиздат, 1933. 392 с.
147. *Тихвинский И.О.* Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 144 с.
148. *Тихвинский И.О.* Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. – М.: Стройиздат, ПНИИИС, 1984. 80 с.
149. *Толмачев В.В., Ройтер Ф.* Инженерное карстоведение. М.: Недра, 1990. 152 с.
150. *Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П.* Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. М., 1986. 176 с.

151. *Трофимов В.Т.* О необходимости совершенствования и аккуратного развития понятийно-терминологической базы инженерно-геологического изучения современных геологических процессов и явлений // Тр. Межд. науч. конф. (Москва, геол. ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова. 29–30 января 2009 г.). Под ред. В.Т. Трофимова и В.А. Королева. М.: Изд. МГУ, 2009. С. 7–9.
152. *Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г.* Экологическая геология. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. 415 с.
153. ТСН 11-301-2004 По. Инженерно-геологические изыскания для строительства на закарстованных территориях Пермской области. Пермь: Администрация. 2004. 122 с.
154. ТСН 22-308-98 НН. Инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений на закарстованных территориях Нижегородской области. Нижний Новгород, 1999. 72 с.
155. ТСН 302–50–95 РБ. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях / Госстрой Республики Башкортостан. Уфа, 1996. 41 с.
156. *Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В.* Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1977. 503 с.
157. *Хоменко В.П.* Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. М.: Наука, 1986. 97 с.
158. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
159. *Хоменко В.П.* Карстово-обвальные провалы «сложного» типа: физическое моделирование // Инженерная геология. 2009. № 3. С. 34–41.
160. *Хоменко В.П.* Карстовое провалообразование: механизм и оценка опасности // Экологическая безопасность строительства в карстовых районах: материалы международного симпозиума / Под ред. В.Н. Катаева, Д.Р. Золотарева, С.В. Щербакова, А.В. Шиловой; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. С. 50–60.
161. *Чалов Р.С.* Географические исследования русловых процессов / М.: Изд-во МГУ, 1995. 157 с.

162. *Шахунянц Г.М.* Земляное полотно железных дорог. Вопросы проектирования и расчета. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.
163. *Шеко А.И., Постоев Г.П., Кюнцель В.В. и др.* Оползни и сели. / Гл. ред. Козловский Е.А. М.: Произв.-изд. комбинат ВИНТИ, 1984, Т. 1. 352 с.
164. *Шеко А.И.* Основные положения оценки опасности и риска экзогенных геологических процессов // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. М.: ПНИИИС, 1995, с. 56.
165. *Шеко А.И.* Прогноз активности экзогенных геологических процессов, оценка опасности и риска в системе обеспечения безопасности // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. М.: ПНИИИС, 1997. С. 76–77.
166. *Шойгу С.К., Болов В.Р.* Теоретические предпосылки оценки опасности территорий и рисков чрезвычайных ситуаций // Анализ и оценка природного и техногенного риска в строительстве. М.: ПНИИИС, 1997. С. 74–75.
167. *Шойгу С.К., Шахрамьян М.А., Кофф Г.Л. и др.* Анализ сейсмического риска, спасение и жизнеобеспечение населения при катастрофических землетрясениях (сейсмические, методологические и методические аспекты). М.: ГКЧС РФ, 1992. Ч. 1. 176 с., ч. 2. 295 с.
168. *Щербаков С.В.* Интегральная оценка карстоопасности районов развития карбонатно-сульфатного карста на примере Среднего Предуралья: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь, 2013. 273 с.
169. *Щербаков С.В., Катаев В.Н.* К оценке морфометрических характеристик карстовых форм // Инженерная геология. 2013. № 1, с. 56–64.
170. *Юганова Т.И.* Выбор участков для размещения объектов обращения с отходами на основе методов многокритериального принятия решений / Геоэкология, 2019, № 4, с. 79–93.
171. *Admiraal H., Cornaro A.* Why underground space should be included in urban planning policy – And how this will enhance an urban underground future // Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, no. 55, pp. 214–220.
172. *Andreychouk V., Tys A.* Karst hazards // Encyclopedia of Natural Hazards / Edited by P.T. Bobrowsky. Springer, 2013. P. 571–576.

173. *Blong R.* A new damage index // *Natural Hazards*, 2003, № 30(1), pp. 1–23.
174. *Bobylev N.* Mainstreaming sustainable development into a City's Master Plan: a Case of Urban Underground Space Use // *Land Use Policy*, 2009, № 26 (4), pp. 1128–1137.
175. *Bobylev, N.* Comparative analysis of environmental impacts of selected underground construction technologies using analytic network process // *Automat. Constr.* 2011, № 20(8), 1030–1040.
176. *Bobylev N.* Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface // *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 55, May 2016, pp. 40–51.
177. *Bobylev N.* Transitions to a High Density Urban Underground Space // *Procedia Engineering*, 2016, vol.165, pp. 184–192.
178. *Bobylev N., Sterling R.* Urban underground space: a growing imperative. Perspectives and current research in planning and design for underground space Use. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 55, pp. 1–5.
179. *Brennard T.A.* Urban geology note: Oshawa Ontario. In: P.F. Karrow & O.L. White (eds.), *Geological Association of Canada, special paper 42: Urban Geology of Canadian Cities*, 1998, p. 353–364.
180. *Brikmann J.* Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications // *Environment Hazards*, 2007. № 7, pp. 20–31.
181. *Campbell D. et al.* Transforming the relationships between geoscientists and urban decision-makers: European cost sub-urban action (TU1206) // *Procedia Engineering*, 2017, no. 209, pp. 4–11.
182. *Carmody, J., Sterling, R.* *Underground Space Design: A Guide to Subsurface Utilization and Design for People in Underground Spaces.* Van Nostrand Reinhold, New York. 1993.
183. *Cavaleiro, V.M., Rodrigues-Carvalho, J.HA & Gomes, L.F.* Geotechnical mapping in the area of Covilha, Portugal. A method using GIS // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) *Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publication*, 2009, 22, on CD-rom insert, paper 211.

184. *Chen J., Beck B.F.* Qualitative modelling of the cover-collapse process // *Engineering and environmental impacts of sinkholes and karst: Proc. of the 3d Multidisc. Conf. (St. Petersburg, Florida, October 2–4, 1989)* Rotterdam: Balkema, 1989. P. 89–95.
185. City Prosperity Initiative – Perception Index, UN-Habitat. 2016. <http://cpi.unhabitat.org/>.
186. *Clayton, C.R.I.* *Managing geotechnical risk.* Thomas Telford, London, 2001, 80 pp.
187. *Clayton, C.R.I.* Urban site investigation // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) *Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publication*, 2009, 22, pp. 125–141.
188. *Cruden D.M., Varnes D.J.* Landslide type sand processes. In: Turner A.K.; Shuster R.L. *Landslides: Investigation and Mitigation: Transportation Research Board, US National Research Council.* Washington, D.C., 1996. Spec. Rep. No. 247. P. 36–75.
189. *Culshaw, M.G., Price, S.J.* The 2010 Hans Cloos Lecture. The contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment.* 2011, Vol. 70, No. 3, pp. 333–376.
190. *Culshaw, M.G., Reeves H.J., Jefferson, I., & Spink, T.W.* (eds.) *Engineering geology for tomorrow's cities.* Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publications.* 22, 2009, 315 p.
191. *Cutter S.* *American hazardscapes: the regionalization of hazards and disasters.* Josef Henry Press, Washington. 2001.
192. *Dearman, W.R.* *Engineering geological mapping.* Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1991.
193. *Dermentzopoulos Th., Katsaridis P.* Engineering geological data management for urban planning GIS: A case study from Piraeus, Greece) // *Engineering Geology and the Environment. Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and the Environment, Greece, 23–27 June 1997.* Marinos, P.G., and Koukus, G.C., the Editors. Balkema, Rotterdam, 1997, vol. 2, pp. 1225–1228.

194. *Dong M., Hui Hu, Riqing Xu, Xiaonan Gong.* A GIS-based quantitative geo-environmental evaluation for land-use development in an urban area: Shunyi New City, Beijing, China // *Bull EngGeol Environ.* 2018, № 77, pp. 1203–1215.
195. *Dunčková L., Bednarik M., Krčmář D., Marschalko M., Tornyai R.* GIS-based multicriteria evaluation of foundation conditions // *Bull EngGeol Environ.* 2019, no. 78, pp. 2903–2917.
196. *El May M., Dlala M., Chenini I.* Urban geological mapping: geotechnical data analysis for rational development planning. *Eng Geol.*, 2010, № 116(1–2), pp. 129–138.
197. EM-DAT. The international disasters database. Available at: <http://www/emdat.be>.
198. *Fell R., Ho K., Lacasse S., Leroi E.* A framework for landslide risk assessment and management. 2005.
199. *Forster A., Culshaw M.G., Gunn D.A., Jackson P.D.* The mitigation of secondary seismic hazards in urban areas through the planning process with examples from Tangshan and Beijing, China // *Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 4–242.
200. *Gencer, E.A.* Natural disasters, urban vulnerability, and risk management: a theoretical overview // *In The Interplay Between Urban Development, Vulnerability, and Risk Management: A Case Study of the Istanbul Metropolitan Area.* Edited by E.A. Gencer. New York: Springer, 2013, pp. 7–43.
201. *Genske D.D., Ruff A.* Expanding cities, shrinking cities, sustainable cities: challenges, opportunities and examples. *Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, 2009, paper no. 82.
202. *Grecchi R.C., Pejon O.J.* Geoenvironmental mapping of region of Piracicaba, Sao Paulo, Brazil, using GIS // *Eighth International Congress International Association for engineering geology and the environment, Proceedings, vols. 1-5.* 1998. pp. 2591–2597.
203. *Gu D.* Exposure and vulnerability to natural disasters for world's cities // *UN Department of Economic and Social Affairs. Population Division Technical Paper No. 2019/4* December 2019.

204. *Gu D., Gerland P., Pelletier F., Cohen B.* Risks of exposure and vulnerability to natural disasters at the city level: A global overview. Technical report No. 2015/2. New York: United Nations. 2015.
205. *Guan D., Watari K., Fukahori H., Gao W.* Assessment of eco-environment vulnerability in Karst region // *REAL CORP 008: Mobility nodes as innovation hubs. Proceedings.* Editors: Manfred Schrenk, Vasily V. Popovich, Dirk Engelke, Pietro Elisei / *Tagungsband Vienna, May 19-21 2008*, pp. 191–200.
206. *Gutiérrez F., Parise M., De Waele J., Jourde H.* A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst // *Earth-Science Reviews.* 2014, No 138, pp. 61–88.
207. *Hack R.* Advances in the use of geodata for the urban environment // *In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) Engineering Geology for Tomorrow's Cities.* Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publication*, 2009, 22, pp. 201–207.
208. *Hobbs P.R.N. et al.* Improved modelling and communication of urban risks: case studies from the UK and South-East Asia. *In: Proceedings of II European Conference of IAEG, Madrid, Spain, 15-19 September 2008 "Cities and their Underground Environment"*, 2008, CD-rom.
209. *Hungr O., Leroueil S. and Picarelli L.* The Varnes classification of landslide types, an update // *Landslides*, 2014, vol. 11, issue 2, pp. 167–194.
210. ITACUS, 2010. ITA Committee on Underground Space White Paper № 2. *Planning the Use of Underground Space.* Available at: <https://tunnel.ita-aites.org/media/k2/attachments/public/itacus-wp-2-eng.pdf>.
211. *Jia L., Li L., Meng Y., Wu Y., Pan Z., Yin R.* Responses of cover-collapse sinkholes to groundwater changes: a case study of early warning of soil cave and sinkhole activity on Datansha Island in Guangzhou, China // *Environmental Earth Sciences.* 2018, no 77:488, 11 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7603-3>.
212. *Kalsnes B., Nadim F., Lacasse S.* Managing geological risk. *In: Geologically active, Williams et al. (Eds.). Proceedings of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010, Taylor & Francis group, London, 2010*, pp. 111–126.

213. *Karrow P.F. and White O.L.* (eds). Urban Geology of Canadian Cities. Geological Association of Canada Special Paper 42. Geological Association of Canada, 1998. 500 p.
214. *Knill J.* Core values: the first Hans-Cloos lecture // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2003, vol. 62, No. 1, pp. 1-34.
215. *Kozlyakova I., Eremina O., Anisimova N., and Kozhevnikova I.* Study of geology and Carboniferous subcrop topography upon engineering geological mapping of Moscow territory. In: Developments in Engineering Geology. Eggers, M.J., Griffiths, J.S., Parry, S., Culshaw, M.G. (eds.). Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2016. V. 27. P. 45-53.
216. *Kozlyakova I.V., Mironov O.K., Eremina O.N.* Engineering Geological Zoning of Moscow by the conditions for subsurface construction // In: Proc. 12th IAEG Congress, Turin, Italy. Springer, 2015. Vol. 5, pp. 923-926.
217. *Lateef A. S. A., Fernandez-Alonso M., Tack L., Delvaux D.* Geological constraints on urban sustainability, Kinshasa City, Democratic Republic of Congo // Environmental Geosciences. 2010, 17 (1). pp. 17-35.
218. *Lee E.M., Doornkamp J.C., Griffiths J.S., Tragheima D.G.* Environmental geology mapping for land use planning purposes in the Torbay area. In: Proceedings of the Ussher Society, 1988, no. 7, pp. 18-25.
219. *Legget R.F.* Cities and geology, New York, McGraw-Hill Book Co., 1973
220. *Legget R.F.* The value of geology in planning. In: Culshaw, M.G., Bell, F.G. Cropps, J.C., & O'Hara, M. (eds.) Planning and Engineering geology. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 4, 1987, pp. 53-58.
221. *Lei M., Gao Y., Jiang X., Hu Y.* Experimental study of physical models for sinkhole collapse in Wuhan, China // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Geotechnical Special Publ. No. 144. ASCE, 2005. P. 91-100.
222. *Li X, Hui X., Congcong L., Liping S., Rui W.* Study on the demand and driving factors of urban underground space use, Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, vol. 55, pp. 52-58.

223. *Lollino G., et al.* (Eds.) Engineering geology for society and territory- volume 5, Springer International Publishing, Switzerland, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-09048-1.
224. *Long J., Yan M, Zhen-de G., Li-Peng L.* Numerical simulation for evolution of cover-collapse sinkholes // Carsologica Sinica. 2016, vol. 35. pp. 131-136.
225. *Lotfi A. Zadeh.* Foreword – Recognition Technology and Fuzzy Logic // IEEE Transaction On Fuzzy System, Vol. 9, No. 1, February 2001.
226. *Makana L.O., I. Jefferson D.V.L. Hunt C.D.F. Rogers.* Assessment of the future resilience of sustainable urban sub-surface environments // Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, Vol. 55, May 2016, pp. 21-31.
227. *Marchiori-Faria D.G., Ferreira, C.J. et al.* Hazard mapping as part of civil defence preventive and contingency actions: a case study from Diadema, Brazil // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, CD-rom, paper no. 154.
228. *Marker B.R.* Geology of megacities and urban areas // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) Engineering Geology for Tomorrow's Cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication 22, 2009, pp. 33-48.
229. *Marker B.R.* Urban planning: the geoscience input // In: In: Eggers, M.J., Griffiths, J.S., Parry, S & Culshaw, M.G. (Eds.). Developments in Engineering Geology. Geological Society, London. Engineering Geology Special Publication, 27, 2016, pp. 35-43.
230. *Marschalko M., Bednarik M., Yilmaz I.* Evaluation of engineering geological conditions for conurbation of Ostrava within GIS environment // In: Environ Earth Sci., 2012, no. 67(4), pp.1007-1022.
231. *Marschalko M., Juriš P.* Task of engineering geology in land-use planning on the example of four selected geofactors // In: Acta Montan Slovaca, 2009, no. 14(3), pp. 275-283.
232. *Martinez-Fernandez C., Audirac I., Fol S., Cunningham-Sabot E.* Shrinking cities: urban challenges of globalization // In: International journal of urban and regional research, 2012, 36.2, pp. 213-225.

233. *McGill J.T.* Growing importance of urban geology. Circular 487. United States Geological Survey, Reston, Virginia, 1964.
234. *McHarg I.* Design with nature. Natural History Press for the American Museum of Natural History. New York, 1969.
235. *Meisina C.* Engineering geological mapping for urban areas of the Oltrepavese plain, northern Italy // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) Engineering Geology for Tomorrow's Cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, 22, on CD-rom insert, paper 188.
236. *Meisina C.* PSinSAR technique for detecting and monitoring ground deformations in urban areas In: Proceedings of II European Conference of IAEG, Madrid, Spain, 15-19 September 2008 "Cities and their Underground Environment", 2008, CD-rom.
237. *Meng Y., Li Z. and Jia L.* An Analysis of Allowable Groundwater Drawdown and Pumpage from a Karst Aquifer to Prevent Sinkhole Collapses in the Pearl River Delta, China // Water Resources. 2020, Vol. 47, No. 4, pp. 530–536.
238. *Merkin V.E., Zertsalov M.G., Konyukhov D.S.* The concept of complex development of the Moscow subsurface at the present stage. 2013. Available at: <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/nauchnye-stati/kontseptsiya-osvoeniya-podzemnogo-prostranstva-moskvy/print/>.
239. *Milanović P.T.* Geological Engineering in Karst: dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling. Belgrade: Zebra, 2000. 347 p.
240. *Mimouni O., Djafri F.W.* Use of GIS for Geotechnical and geological major risks mapping of Bab-Ez-Zouar, OuedSmar, dar-El-Beida, Rouiba and Hamiz areas. In: Proceedings of II European Conference of IAEG, Madrid, Spain, 15-19 September 2008 "Cities and their Underground Environment", 2008, CD-rom.
241. *Mora S.* Disasters should not be protagonists of Disaster Risk // In: Geologically active, Williams et al. (eds.). Proc. of the 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010, Taylor & Francis group, London, 2010. P. 89–110.
242. *Mulder de E.F.J.* Sustainable development and management of the subsurface // Геоэкология, 2004, № 1, с. 13–15.
243. *Mulder de E.F.J.* Geoproblems in urban centers in EU countries and Norway // In: Geologiadel' Ambiente, SIGEA, 1998, 4, pp. 2–3.
244. *Mulder de E.F.J., McCall G.J.H., Marker B.R.* Geosciences for urban planning and management // In: Marinos, P.G., Koukis, G.C., Tsiambaos, G.C., Stoutnaras, G.C. (Eds.) Proceedings of the International Symposium on "Engineering geology and the Environment", Athens, 2001, Swets&Zeitlinger B.V., Lisse, the Netherlands. 4, pp. 3417–3438.
245. *Mulder de E.F.J., Pereira J.J.* Earth Science for the city. In: Culshaw, M.G., Reeves H.J., Jefferson, I., & Spink, T.W. (eds.) Engineering geology for tomorrow's cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 22, 2009, pp. 25–31.
246. *Newton J.G.* Development of Sinkholes Resulting From Man's Activities in the Eastern United States: U.S. Geological Survey Circular 968. Denver, 1987. 54 p.
247. *Oliveira, de R.A., De Lollo J.A.* Soil collapse risk map for IlhaSolterira, Brazil // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 4–196.
248. *Osipov V.I.* Large-scale thematic geological mapping of Moscow area // Engineering Geology for Society and Territory. G. Lollino et. al. (eds.). Springer International Publishing Switzerland, 2014, vol. 5, pp. 11–16.
249. *Paliaga G., Faccini F., Luino F., Turconi L.* A spatial multicriteria prioritizing approach for geohydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins // Nat. HazardsEarthSyst. Sci. Discuss. <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-100>.
250. *Parry S. Ruse M.E., Ng K.C.* Assessment of natural terrain landslide risk in Hong Kong: an engineering geological perspective // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 3–299.
251. *Pereyra F.X., Rimoldi H.* Geological and environmental aspects of the development of megacities: the case of Buenos Aires metropolitan area (AMBA), Argentina // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2003, Vol. 62, No. 4, pp. 431–351.

252. *Petley D.N.* On the impact of urban landslides // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) Engineering Geology for Tomorrow's Cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication 22, 2009, pp. 83–99.
253. *Poland J.F.* Subsidence in United States due to ground-water withdrawal // J. Irrig. and Drain. Div. 1981, vol. 107, no. 2, pp. 115–135.
254. *Price S.J. Ford J.R., Cooper A.H., Neal C.* Humans as major geological and geomorphological agents in the Anthropocene: the significance of artificial ground. Philosophical Transactions of the Royal Society, A, 369, 2011, pp.1056–1084.
255. *Price S.J., Ford J.R., Campbell S.D.G., Jefferson I.* Urban futures: the sustainable management of the ground beneath cities // In: Eggers, M.J., Griffiths, J.S., Parry, S & Culshaw, M. G. (Eds.). Developments in Engineering Geology. Geological Society, London. Engineering Geology Special Publication, 27, 2016, pp. 19–33, <http://doi.org/10.1144/EGSP27.2>.
256. *Pusch C.* Preventable losses: saving lives and property through hazard risk management: a comprehensive risk management framework for Europe and Central Asia. Disaster risk management working paper, series 9. World Bank, Washington, 2004.
257. *Quan Luna B., Blahut J., Westen C.J., Sterlacchini S., Asch T.W.J., Akbas S.O.* The application of numerical debris flow modelling for the generation of physical vulnerability curves // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2011, no. 11, pp. 2047–2060.
258. *Ragozin A.L., Yolkin V.A.* Geological risks, formation and assessment in urbanized areas in Russia // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 4–282.
259. *Rai K.L.* Geological and geo-environmental constraints in small-scale mining of Himalayan mineral-deposits – selected case-studies // Small-scale mining: a global overview. Calcutta, India. 1994. pp. 51–64.
260. *Rauh F. Neumann P., Bauer M.* Practical experience with geological and geotechnical risks in urban areas – insights from case studies // In: Proceedings of II European Conference of IAEG, Madrid, Spain, 15-19 September 2008 “Cities and their Underground Environment” (124).

261. *Rees J.G., Gibson A.D., Harison M., Hughes A., Walsby J.C.* Regional modeling of geohazard change // In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J. Jefferson, I. and Spink, T.W (eds.) Engineering Geology for Tomorrow's Cities. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication, 2009, 22, pp. 49–63.
262. *Richards N.P.* The development of a national geohazards programme for South Africa: why, how, and when? // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 4–410.
263. *Rodriguez V.S., Mokrova N.V.* Multi-criteria assessment of territorial planning alternatives using geographic information system technologies for dam construction. Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling, [online] 1(7). (2020). Available at: <https://resources.today/PDF/11INOR120.pdf>.
264. *Rogers C.D.F.* Substructures, underground space and sustainable urban environments // Engineering Geology for Tomorrow's Cities. In: Culshaw, M.G., Reeves, H.J., Jefferson, I., Spink, T.W. (Eds.), Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 2009, no. 22, pp. 177–188.
265. *Rooy J.L. van, Stiff J.S.* Guidelines for urban engineering geological investigations in South Africa// Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2001, vol. 59, no. 4, pp. 285–295.
266. *Saaty T.L.* Decision making with dependence and feedback. The Analytic Network Process. RWS Publications, 2001, 370 p.
267. *Saaty T.L.* Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, 2008, vol. 1. no. 1, pp. 83–98.
268. *Salvati R., Tharp T.M., Capelli G.* Conceptual model for geotechnical evaluation of sinkhole risk in the Latium Region // Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology / B.F. Beck, J.G. Herring (eds). Lisse: Swets & Zeitlinger, 2001. P. 163–167.
269. *Sheng Z., Helm D.C.* Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas Valley, Nevada, USA // Land Subsidence. Proc. of the 5-th Int. Symp. (The Hague, Netherlands, 16–20 October 1995) / F.B.J. Barends, F.J.J. Brouwer, F.H. Schröder (eds). Rotterdam: Balkema, 1995. P. 27–34.

270. Sterling R., Admiraal, H., Bobylev, N., Parker, H., Godard, J.P., Vähäaho, I., Rogers, C.D.F., Shi, X., Hanamura T. Sustainability Issues for Underground Space in Urban Areas. Proceedings of the ICE – Urban Design and Planning, 2002, vol. 165, issue 4, December 2012. Pp. 241–254 (14).
271. Sterling R. Going under to stay on top, revisited: results of a colloquium on underground space utilization. Tunn. Undergr. Space Technol. 1996, no. 11 (3), pp. 263–270.
272. Sterling R. Underground technologies for liveable cities. Tunn. Undergr. Space Technol. 1997, no. 12 (4), pp. 7–8.
273. Sustainable development goals, UNEP; Национальный проект РФ «Жилье и городская среда», 2018; <https://minstroyrf.gov.ru/trades/natsionalnye-proekty/natsionalnyy-proekt-zhilye-i-gorodskaya-sreda/>.
274. Taselaar F.M., Kamphuis A. Spatial planning and the use of the underground in The Netherlands In: Proceedings of II European Conference of IAEG, Madrid, Spain, 15-19 September 2008 “Cities and their Underground Environment” CD-rom, paper no. 070.
275. Tharp T.M. Cover-collapse sinkhole formation and soil plasticity // Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst: Geotechnical Special Publ. No. 122 / ASCE, 2003, pp. 110–123.
276. Tharp T.M. Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes // Engineering Geology. 1999., no. 52, pp. 23–33.
277. Tharp T.M. Poroelastic analysis of cover-collapse sinkhole formation by piezometric surface drawdown // Environmental Geology. 2002. No. 42. P. 447–456.
278. Thierry P., Vinet L. Mapping an urban area prone to slope instability: Greater Lyons // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2001, vol. 62, no. 2, pp. 135–143.
279. Tsangaratos P., Rozos D., Ilija I., and Markantonis K. The use of a spatial multi-criteria technique for urban suitability assessment, due to extensive mass movements. The case study of Vitalavillage, Kimi, Euboea, Greece// Proceedings XII IAEG Congress, 2014, Torino, vol. 5, pp. 339–345.
280. United Nations International Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Risk and Poverty in a Changing Climate: Invest Today for a

- Safer Tomorrow. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. 2009. Geneva, Switzerland: UNISDR.
281. United Nations International Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Local Governments and Disaster Risk Reduction: Good Practices and Lessons Learned. 2010. Geneva, Switzerland: UNISDR.
282. United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT). Planning Sustainable Cities: Global Report on Human Settlements 2009. London: Earthscan. 2009.
283. United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT). Global Report on Human Settlements: Cities and Climate Change. London: Earthscan. 2011.
284. United Nations International Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2015). Making Development Sustainable: The Future of Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland: UNISDR. 2015. Available at: www.preventionweb.net/english/hyogo/gar/2015/en/home/index.html.
285. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2019). The 2018 Annual Report. Geneva, Switzerland, United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Available at <https://reliefweb.int/report/world/unisdr-annual-report-2018>.
286. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and Subsidence. Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Berlin: Springer, 2005. 383 p.
287. Wende W., Huelsmann W., Marty M., Penn-Bressel G., Bobylev N. Climate protection and compact urban structures in spatial planning and local construction plans in Germany. Land Use Policy, 2010, vol. 27, issue 3, pp. 864–868.
288. Westen van C.J. and Georgiadou Y. Spatial data requirements and infrastructure for geological risk assessment; 2001; available at: <https://www.researchgate.net/publication/228713171>.
289. Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis I. At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters. 2004, 2nd edn. Routledge, London.

290. *Xiao H., Kim Y. J., Nam B. H., Wang D.* Investigation of the impacts of local-scale hydrogeologic conditions on sinkhole occurrence in East-Central Florida, USA // *Environmental Earth Sciences*. 2018, no 75:1274, 16 p. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6086-3>.
291. *Zhang F., Yang Q., Jia X., Liu J., Wang B.* Land-use optimization by geological hazard assessment in Nanjing City, China // *Engineering Geology for Tomorrow's Cities*. IAEG 2006, 6-10 Sept. 2006, CD-rom, paper no. 4-324.
292. *Zhou W., Beck B.F.* Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications // *Environmental Geology*. 2008, vol. 55, pp. 837–851.

Научное издание

Осипов Виктор Иванович
Аникеев Александр Викторович
Бурова Валентина Николаевна
Козлякова Ирина Владимировна
Постоев Герман Павлович
Еремина Ольга Николаевна
Мамаев Юрий Александрович
Казеев Андрей Игоревич
Булдакова Екатерина Валентиновна
Стольников Полина Викторовна
Кучуков Марат Мухамедович

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Издание подготовлено в авторской редакции

Технический редактор *Е.Н. Собанина*
Компьютерная верстка *А.В. Арианов*
Дизайн обложки *Ю.Н. Ефремова*

Для заметок

Подписано в печать 22.12.2020 г. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 25,7. Тираж 500 экз. Заказ 1366.

Российский университет дружбы народов
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. 952-04-41

