

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»**

На правах рукописи

Потапова Елена Владимировна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ
ОБОСНОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА
ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА**

Специальность 2.8.8. – «Геотехнология, горные машины»

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель,
профессор,
доктор технических наук**

Куликова Елена Юрьевна

Москва, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	9
РИСКАМИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	9
1.1 Развитие вопроса управления рисками в	9
строительстве.....	9
1.2 Проблема геотехнических рисков при строительстве.....	17
объектов метрополитена.....	17
1.3 Выводы (постановка задач исследования).....	27
2. ТИПОЛОГИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА ДЛЯ ОЦЕНКИ	
ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ	30
2.1 Подходы к определению составляющих геотехнических рисков и	
целесообразность их адаптации для строительства метрополитена	30
2.2 Обоснование выделения основных типов сооружений метрополитена на	
этапе сооружения	33
2.3. Выводы по главе 2.....	60
3. КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ	63
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА.....	63
3.1 Классификация рискообразующих факторов	63
3.2 Классификация проявлений рисковых ситуаций	76
3.3 Классификация последствий проявления рисковых ситуаций	84
3.4 Обобщенные модели развития каскада геотехнических рисков.....	88
и геотехнического риска.....	88
3.5 Выводы по главе 3	91
4. АНАЛИЗ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРТНО-	
СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА	94
4.1 Принципы развития рисковых ситуаций.....	94
4.2 Информационный ресурс в управлении геотехническими рисками	106

4.3 Обоснование методики оценки геотехнических рисков на основании экспертно-статистического подхода	107
4.4 Методика анализа геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена	133
4.5 Реализация компонентов методики анализа геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена.....	150
4.5.1 Анализ рисковой ситуации взаимного смещения блоков обделки (образование уступов) при проходке перегонного тоннеля метрополитена..	150
тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК)	150
4.5.2 Анализ рисковой ситуации и каскада геотехнических рисков.....	156
с потерей гидропригруза при проходке вертикального ствола метрополитена	
стволопроходческим механизированным комплексом (СПМК)	156
4.6 Выводы по главе 4.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	168
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	170
Приложение № 1.....	192
Приложение № 2.....	220
Приложение № 3.....	221
Приложение № 4.....	244

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Теория риска и риск-ориентированный подход стали неотъемлемой частью организации функционирования в различных сферах деятельности, в том числе в капитальном строительстве, как отрасли создания основных фондов экономики, и, в частности, в строительстве объектов метрополитена. Вопрос управления рисками при строительстве объектов метрополитена, с учетом наращивания темпов строительства метрополитенов (в 2011-22 гг. темпы строительства метрополитена в Москве увеличены в 2 раза по сравнению с предыдущими периодами), является весьма актуальным.

Проблемой управления рисками за рубежом стали заниматься с 50-х годов 20 века Г. Марковиц, В. Снайдер, Р. Мейер, Б. Хеджес, Н. Кроуфорд. Временной период 2001-09 гг. в мировой практике характеризуется выделением ветви изучения рисков в строительстве тоннелей и метростроении, а также определения геотехнических рисков, как специфических рисков в процессе строительства подземных сооружений. Пионерные работы по тематике геотехнических рисков опубликованы в 80-х годах 20-го века Р.В. Уитманом, Т. Телфордом, Б.К. Маконом, Г.Б. Бахером. В отечественной практике об управлении рисками при строительстве подземных сооружений начинают говорить Б.А. Картозия, Е.В. Петренко, Д.Г. Малюженец. В работах Е.Ю. Куликовой, Л.Л. Кауфмана, Б.А. Лысикова, Г.А. Фентона, Д.В. Гриффитса, Зерцалова М.Г., Д.Ю. Чунюка, С.Н. Власова, Л.В. Маковского, В.Е. Меркина, Д.С. Конюхова даны определения строительной георискологии и геотехнических рисков, предложены классификации рисков при строительстве подземных сооружений, определены элементы риска, предложен методический инструментарий стратегии управления рисками, выполнен обзор и анализ аварий при строительстве тоннелей и метрополитенов.

Вместе с тем обращает на себя внимание ограниченное количество работ, отражающих конкретные цифры и причинно-следственный анализ нештатных ситуаций в геотехническом строительстве. Отсутствует учет и своевременное сообщение об авариях и инцидентах. Результаты при ликвидации, в большинстве

случаев, не подвергаются архивации, анализу и формализации. В отечественном нормативном поле отсутствует пошаговый алгоритм управления геотехническими рисками при строительстве объектов метрополитенов на основе системного подхода, в том числе с учетом каскадного сценария развития рисков ситуации. Не разработаны методики сопоставления полученных количественных результатов оценки рисков со статистическими архивными данными. Не сформирована система сбора, учета, анализа информации по рискам (архив рисков) для получения статистических данных, в том числе весьма ограниченное использование современным информационных технологий для получения информации о фактах проявлении геотехнических рисков. Не разработаны методики обоснования эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена с учетом эскалации рисков ситуаций по каскадному сценарию.

В этой связи научное обоснование прогноза, моделирования, подходов к анализу и оценке геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена для повышения безопасности строительства и эффективности параметров технологий определяет цель, задачи, научную новизну и практическую значимость данного исследования и является весьма актуальным.

Цель работы: научное обоснование прогноза и моделирования геотехнических рисков для обоснования эффективности выбора технологических решений строительства сооружений метрополитена на основе разработанной обобщенной модели геотехнических рисков, позволяющей прогнозировать каскадный сценарий развития аварийных ситуаций на сооружениях метрополитена.

Задачи исследования:

1. Исследование геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, определение составляющих геотехнического риска, разработка обобщенной модели геотехнического риска.

2. Исследование сценариев развития рисков ситуации при строительстве объекта метрополитена, возможности каскадного сценария развития рисков ситуации, разработка обобщенной модели каскада геотехнических рисков.

3. Обоснование типологии сооружений метрополитена на основании технологических, объемно-планировочных и конструктивных особенностей. Разработка классификаций геотехнических рисков на основании составляющих геотехнического риска при строительстве объектов метрополитена, позволяющие прогнозировать каскадный сценарий развития рисковых ситуаций.

4. Обоснование подхода к анализу геотехнических рисков и разработка методики оценки геотехнических рисков.

5. Обоснование эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена с учетом геотехнических рисков и разработка мероприятий по снижению последствий проявления рисков.

Идея работы заключается в определении критериев целесообразности анализа конкретных рисков в зависимости от условий строительства отдельного объекта и функционально-технологической группы и выработке рекомендаций по обоснованию эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена с учетом геотехнических рисков.

Научная новизна работы состоит в:

- создании типологии сооружений метрополитена с учетом технологии строительства, объемно-планировочных и конструктивных особенностей,
- установлении составляющих геотехнических рисков (фактор, проявление, последствие) при строительстве объектов метрополитена, подлежащих идентификации для пяти типов сооружений метрополитена,
- разработке классификаций составляющих геотехнических рисков на основании составляющих геотехнического риска при строительстве объектов метрополитена, позволяющих прогнозировать каскадный сценарий развития рисковых ситуаций,
- разработке методики оценки геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена на основании экспертно-статистического подхода, предложении критерия достоверности оценки риска,
- разработке концептуальной схемы и алгоритма анализа геотехнических рисков на сооружениях метрополитена с возможностью графоаналитического

анализа структуры каскада геотехнических рисков по различным сценарным траекториям.

Практическая значимость работы состоит в разработке методики оценки геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена на основании экспертно-статистического подхода, предложении критерия достоверности оценки риска. Результаты работы могут использоваться в проектных, строительных, инвестиционных и страховых организациях.

Методы исследований базируются на использовании комплекса методов, включающий обобщение результатов ранее выполненных исследований, методы системного анализа, вероятностно-статистические методы, теорию рисков, метод экспертных оценок, моделирование, теоретические основы, методы и практическое применение технологий строительства объектов метрополитена.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Типологическая кластерная модель, устанавливающая основные признаки многомерных данных однородных подмножеств и выделяющая их в основные группы (типы) объектов метрополитена, позволяет определить основание первого уровня классификации геотехнических рисков для их дальнейшей идентификации.

2. Оценка последствий рискованных ситуаций применительно к конкретному подземному объекту или его участку должна производиться на основе прогноза каскадного сценария развития аварий, где породный массив является основным звеном, распространяющим и преобразовывающим составляющие геотехнического риска. Через породный массив фундаменты зданий и сооружений, эксплуатируемые подземные объекты и инженерные коммуникации испытывают влияние риска и становятся следующим элементом каскада. Применение данной модели позволяет оценить последствия рискованных ситуаций применительно к конкретному подземному объекту или его участку.

3. Повышение точности оценки геотехнических рисков достигается при использовании предложенного критерия достоверности, базирующегося на реализации алгоритма анализа рисков с сопоставлением результатов групповой экспертной оценки и статистических данных о рискованных ситуациях.

Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций подтверждается корректной постановкой задач исследования, сходимостью полученных результатов с фактическими данными из практики, применением апробированных классических методов теории вероятностей и математической статистики, кластерного анализа, имитационного моделирования, современных достижений вычислительной математики, объемом проанализированных статистических данных по рисковым ситуациям при строительстве объектов метрополитена и транспортных тоннелей (231 рисковая ситуация) и характеристикам построенных и проектируемых объектов метрополитена города Москвы (40 объектов), объемом экспертных оценок 33-х экспертов по теме диссертационного исследования, подтверждающих теоретические результаты.

Апробация работы. Основные теоретические и методические положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: «International Student Science» (НИТУ МИСиС, Москва, 2019 г.), «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (ЮУрГУ, Сочи, 2020 г.), «Неделя горняка-2021» (НИТУ МИСиС, Москва, 2021 г.), заседаниям кафедры Строительства подземных сооружений и горных предприятий (СПСиГП) Горного института НИТУ МИСиС (2019, 2020, 2021, 2022 гг.).

Реализация результатов работы. Разработанная методика предполагает внедрение в виде стандарта предприятия АО «Мосинжпроект».

Публикации. Основные выводы и результаты диссертации отражены в 7 публикациях автора в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ, а также индексируемых в наукометрической базе Scopus.

Структура и объем работы. Работа включает введение, четыре главы, выводы и рекомендации, библиографический список из 186 источников. Объем работы составляет 244 страницы машинописного текста, в том числе 28 таблиц и 37 рисунков, 4 приложения.

1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

1.1 Развитие вопроса управления рисками в строительстве

Теория риска, зародившись и сформировавшись параллельно со становлением экономической мысли и развитием рыночной экономики, постепенно вошла во все сферы человеческой деятельности в современном мире. *Риск-ориентированный подход* становится неотъемлемой частью организации функционирования целых отраслей народного хозяйства. На него активно переходят в сфере экономики, энергетики, использовании атомной энергии, инвестиционно-строительной сфере, страховании, кредитно-банковской системе, медицине, горнодобывающей промышленности, надзорной деятельности при обеспечении промышленной безопасности [1,2,4,8]. Ориентация на управление и учёт риска приняты на уровне государственного регулирования в Российской Федерации и в международной практике [3,5,7,11]. В ряде отраслей (в основном речь идет о государственных корпорациях) управление рисками соответствует мировому уровню. В частности, в ГК «Росатом» утверждены все основные нормативные документы, которые отвечают за планирование рисков, сформирован штат контролеров, введена система постановки рисков по 44 критериям с ориентацией на цели организации, внедрена единая система оценки выявленных отклонений, которая позволяет оценить качество риск-ориентированного планирования [6]. В ПАО «Газпром нефть» введена политика в области управления рисками, которая включает внедрение риск-ориентированного подхода во все аспекты производственной и управленческой деятельности, систематический анализ выявленных рисков, систему контроля рисков и мониторинга эффективности деятельности по управлению рисками, обязательное понимание всеми работниками базовых принципов и подходов к управлению рисками [9, 10]. В разрезе данного тренда возросший интерес к

управлению рисками и риск-ориентированному подходу в капитальном строительстве, как отрасли производственной деятельности по созданию основных фондов экономики, является естественным и обоснованным.

Осознанно проблемой управления рисками за рубежом стали заниматься начиная с 50-х годов 20 века. Нил Кроуфорд, в своей статье 1982 года [12], посвященной истории развития риск-менеджмента, отмечает, что «...риск-менеджмент уже на протяжении 30 лет является общепринятым термином,...». Основными вехами в возникновении принципиально нового подхода к принятию решений и формированию риск-ориентированного мышления принято считать: создание в 1952 году Гарри Марковицем методики и математической модели формирования оптимального портфеля инвестиций на основании соотношения «доходность (ожидаемая доходность)»/«риск (отклонение доходности)» [13], введение в употребление в 1956 году В. Снайдером термина «риск-менеджмент» [14], издание в 1963 году Робертом Мейером и Бобом Хеджесом первой книги по комплексному управлению рисками [15] и, наконец, утверждение в 1965 году Институтом страхования США первой программы подготовки специалистов по риск-менеджменту (Associate in Risk Management) [12]. В отличие от западноевропейских стран и США в России исследованиями по тематике риска стали заниматься относительно недавно. Изучение рисков долгое время не входило в ряд актуальных тем. Это связано с продолжительным периодом времени, когда развитие нашего государства происходило в рамках директивно-плановой экономики, тогда как теория риска берет свое начало именно из природы рыночных отношений и предпринимательской деятельности. На рисунке 1.1 представлена статистика развития интереса на примере роста числа отечественных диссертационных исследований, полностью или частично посвященных изучению риска в экономике, технике и науках о Земле.

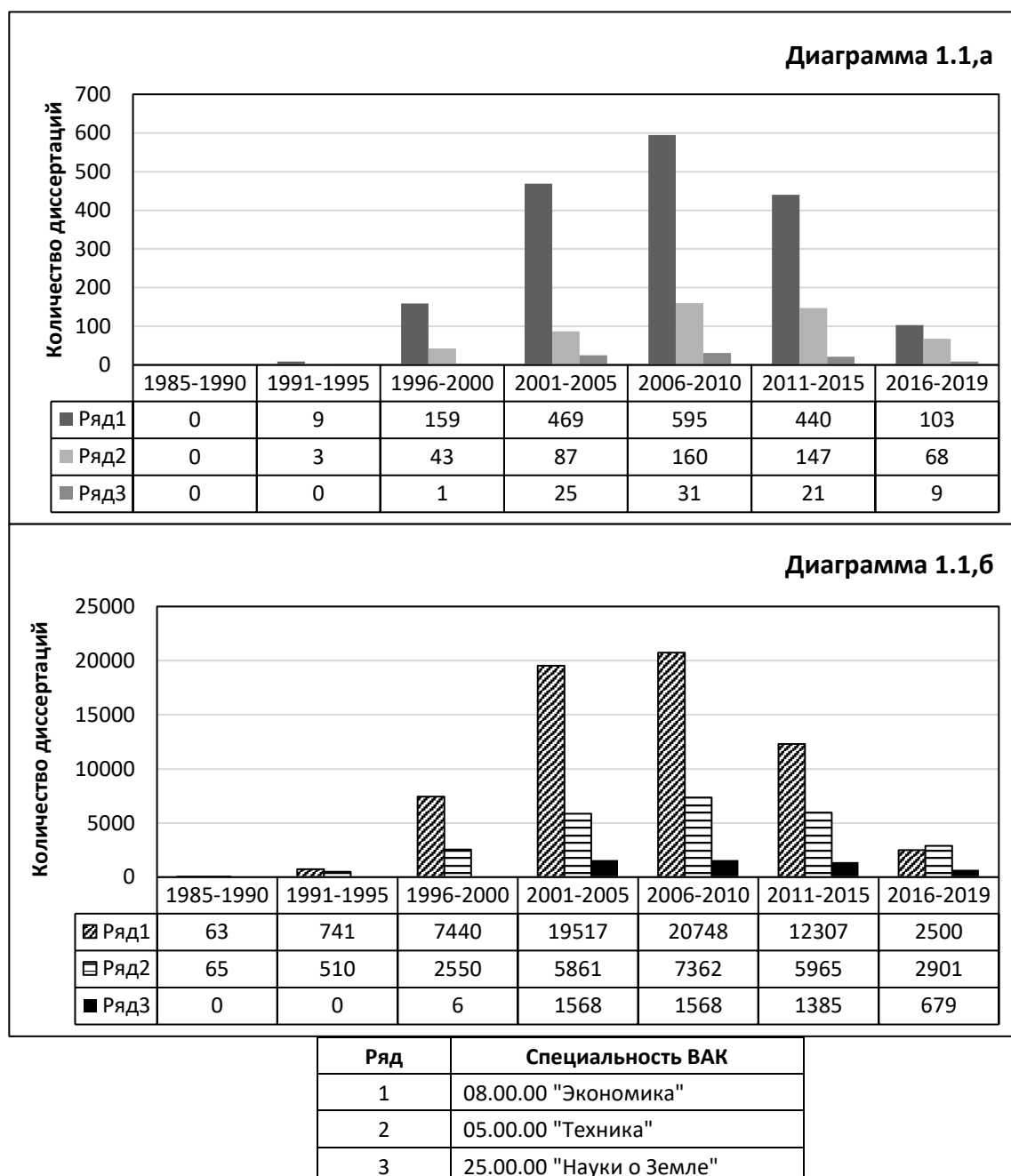


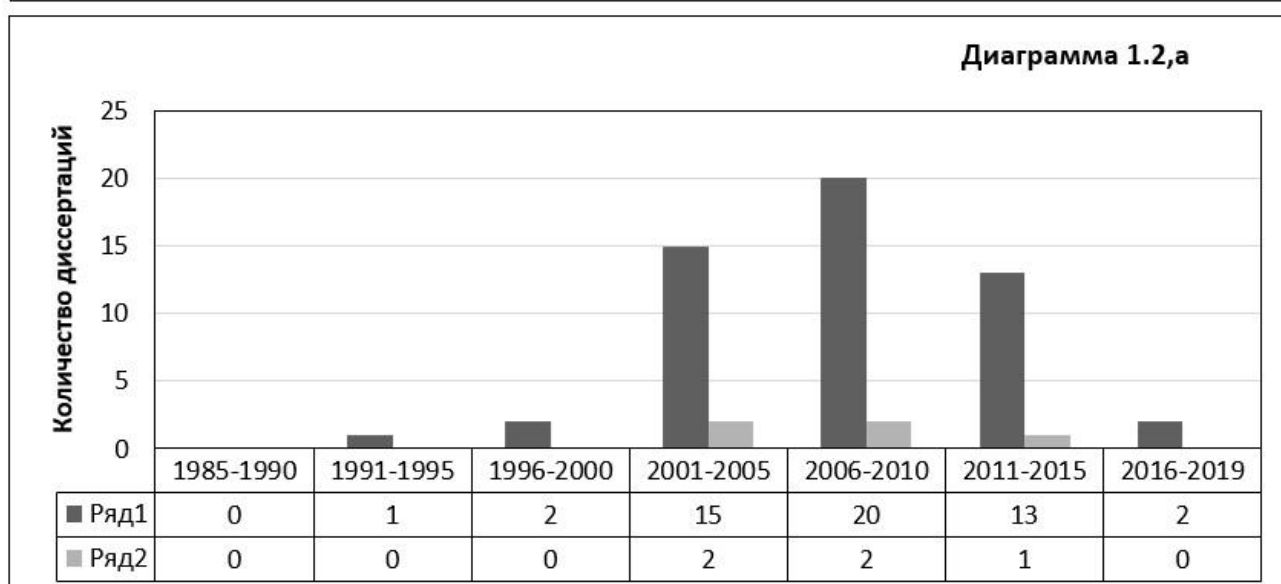
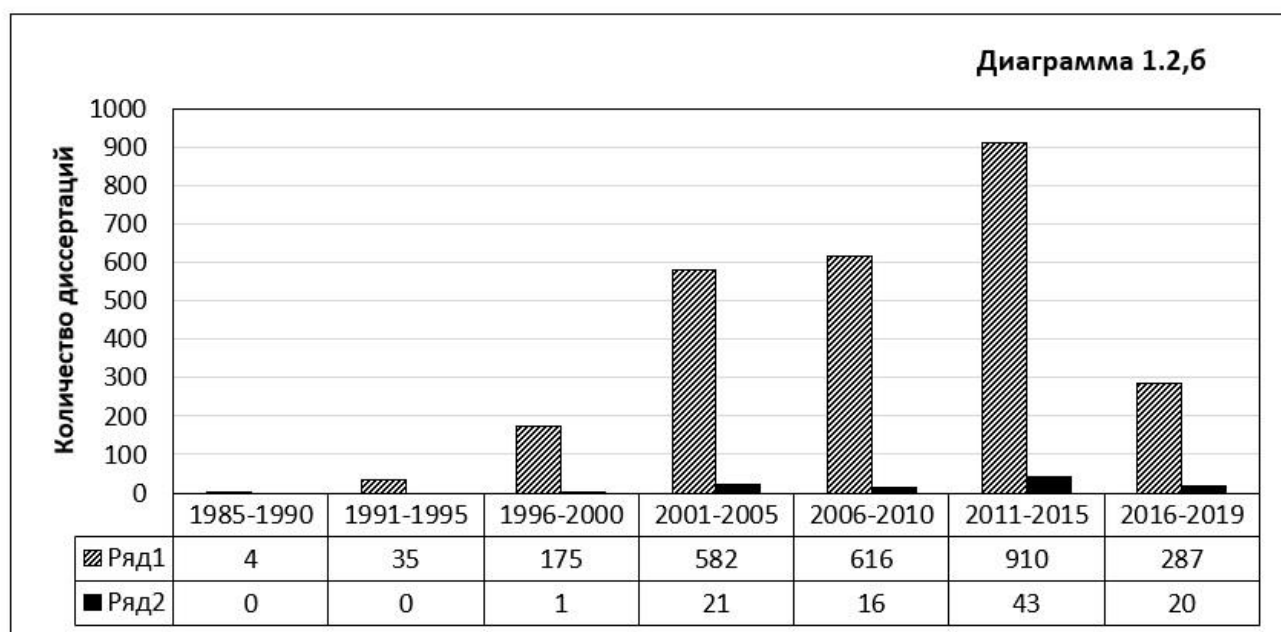
Рис. 1.1 Статистика по количеству диссертационных исследований в области рисков в экономике, технике и науках о Земле в России с 1985 по 2019 гг. (по данным фонда диссертаций Российской государственной библиотеки)

На диаграмме 1.1,а представлена статистика исследований, непосредственно посвященных теме рисков. На диаграмме 1.1,б приведено количество работ, авторы

которых в той или иной степени изучали феномен риска в процессе основного исследования.

Как видно из диаграммы, до конца 90-х годов количество работ, связанных с рисками, было незначительным. При этом не наблюдался разрыв между экономическими и техническими науками. По мере перехода на рыночный механизм в исследовательских работах по экономике риск начинает рассматриваться все чаще. Всплеск исследований, связанных с рисками, зафиксирован в период 1996-00 гг., который характеризовался реформированием экономики и переходом на международные стандарты. Далее исследования приобретают массовый характер. Также логичным выглядит пик интереса в период 2006-2010 гг. Это годы экономического подъема и последовавшего за ним кризиса, когда вопросы управления рисками и их прогнозирования вышли на передний план. В 2011-19 гг. количество работ постепенно уменьшается. Данную тенденцию можно связать с общим сокращением числа защищаемых диссертаций целом за рассматриваемый период, а не с падением интереса к отдельной тематике и снижением ее актуальности.

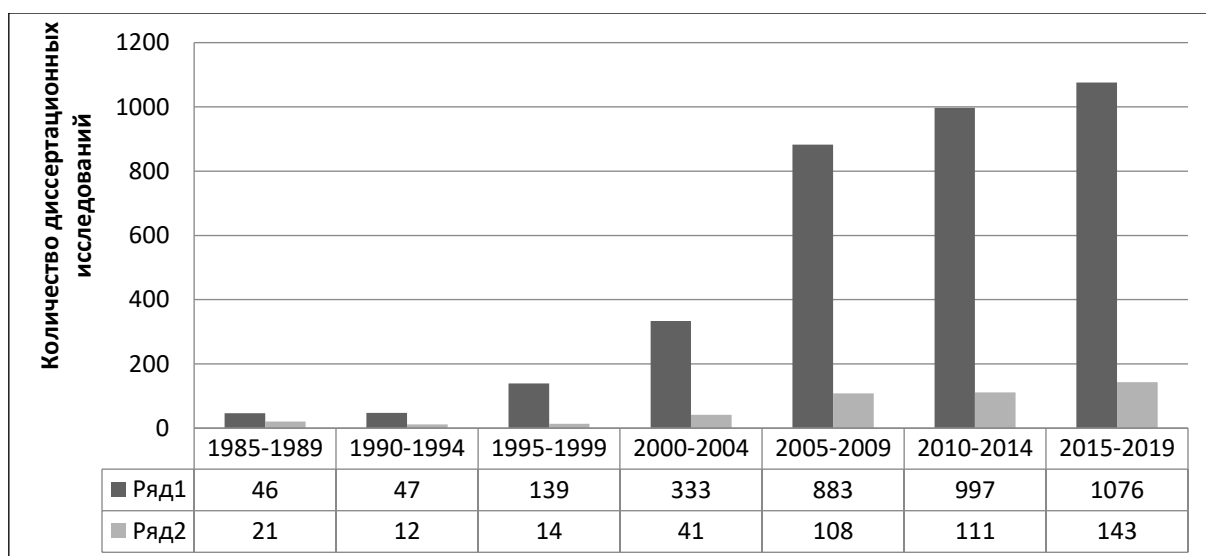
Вопросам риска в технике также стало уделяться гораздо больше внимания. Это связано с переходом на рыночные отношения и деловую конкуренцию с одной стороны, и необходимостью соответствовать международным стандартам качества и безопасности – с другой. При этом обращает на себя отставание исследований в области рисков в науках о Земле, промышленно-гражданском строительстве, строительстве тоннелей, метростроении и геотехнологии (рисунок 1.2: на диаграмме 1.2,а представлена статистика исследований, непосредственно посвященных теме рисков; на диаграмме 1.2,б приведено количество работ, авторы которых в той или иной степени изучали феномен риска в процессе основного исследования). Данное отставание можно отследить, во-первых, на фоне статистики отечественных исследований по тематике рисков в строительстве по сравнению с общим количеством работ по рискам (см. рисунок 1.1). Статистику мировой исследовательской активности и рост актуальности темы демонстрирует рисунок 1.3.



Ряд	Специальность ВАК
1 (включает статистику по ряду 2)	05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог"
	05.23.00 "Строительство и архитектура"
	25.00.19 "Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ"
	25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)"
2	25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)"
	05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" * *- учтены работы только в области строительства метрополитенов и транспортных тоннелей.

Рис. 1.2. Статистика исследований в области рисков в строительстве и геотехнологии в России с 1985 по 2019 гг. (по данным фонда диссертаций Российской государственной библиотеки)

Вместе с тем диаграммы на рисунках 1.2 и 1.3 позволяют нам отметить один важный факт. Тематика рисков, ранее предлагающая общие эталонные подходы к управлению рисками для всех областей знаний, начинает смещаться в сторону большей детализации и дифференциации. До этого момента мы наблюдали долгий период принятия риска в качестве понятия и феномена, создание методического аппарата, осознание необходимости кадровой подготовки специалистов по данному вопросу, создание нормативной базы. Именно временной период 2001-09 гг. возможно назвать периодом выделения из тематики рисков специализированной ветви изучения рисков в строительстве, метростроении, а также определения геотехнических рисков, как специфических рисков, возникающих в процессе строительства подземных сооружений.



Ряд	Область знаний
1	Гражданское строительство и архитектура
	Строительные технологии и дизайн
	Управление недвижимостью
	Управление строительством
	Проектирование строительных конструкций
	Строительство тоннелей и метрополитенов
2	Геотехнология, геотехническое строительство, геотехнические риски

Рис. 1.3. Статистика исследований РФ, США, Бразилии, Канады, Германии и Франции (учтены работы на соискание степени доктора наук (PhD)) в области рисков 1985 по 2019 гг. согласно международной базе данных OATD (Open Access Theses and Dissertations)

Менеджмент рисков в строительстве начал оформляться в качестве самостоятельной области знаний на стыке управления рисками в инвестиционной сфере, страхования и оценки рисков надежности технических систем. В нашей стране проблему рисков в строительстве начали изучать позднее, чем в США и странах Западной Европы. Первые попытки сформировать нормативно-правовое поле для компенсации потерь от возможных рискованных ситуаций были предприняты еще в советский период в первой половине 20-го века. Как отмечает в своей статье [16] Е.С. Фидря: «...преобладал домодернистский «страховочный» подход к риску». Риск при этом воспринимался как внешняя угроза с единственной задачей страхования потенциального ущерба от наступления негативного события. В частности, в 1925 году принимается «Положение о государственном страховании СССР» от 18.09.1925 г. В дальнейшем понятие риск постепенно усложняется, принимает на себя специфические особенности рассматриваемой области деятельности. Однако нормативная и законодательная базы все ещё не достигают «предиктивного» уровня, а больше являются откликом на уже проявившиеся угрозы. Примером могут выступать нормативные документы для объектов использования атомной энергии после аварии на Чернобыльской АЭС. Таким образом, ключевая идея, сформулированная Р. Мейером и Б. Хеджесом ещё в 1963 году, о том, что риском необходимо комплексно управлять, а не страховать деятельность от его последствий, долго не находит отражения в нормативной базе в доперестроечный период. Определённым этапом формирования отдельного подхода к учёту рисков в строительстве в 90-е годы 20-го века можно считать принятие закона РФ от 27.11.1992 N 4015-1 «Об организации страхового дела в Российской Федерации» и «Положения о лицензировании строительной деятельности», утвержденного постановлением Правительства РФ от 25 марта 1996 г., в котором упоминается справка страховой компании о страховании строительных рисков. Основная деятельность по нормативному обеспечению управления рисками связана с переходом на международные стандарты и адаптацией зарубежной базы Международной организации по стандартизации

ИСО (International Organization for Standardization, ISO). Однако, даже после этого риски в строительстве не были названы и выделены в отдельную область, и долгое время учитывались «интуитивно» в составе нормативов по безопасности опасных производственных объектов (№116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», ПП-279 от 11.03.1999 «Об утверждении Положения о расследовании и учете несчастных случаев на производстве»). Отметим, что особенностью данных документов являлось сосредоточение на локализации и ликвидации аварий, а также процессе расследования их причин. То есть упускалась важнейшая прогностическая функция риск-менеджмента. В общем виде принципы и методики, связанные непосредственно с рисками, появляются в нормативах по безопасности машин [85]. Иницирующим этапом в оформлении управления рисками технологических систем и опасных производственных объектов (к которым относятся в том числе объекты геотехнического строительства), как неотъемлемой части нормативного регулирования в отечественной практике, стало введение РД-03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов» (01.09.2001) и ГОСТ Р 51901.1-2002 «Менеджмент рисков. Анализ риска технологических систем» (01.09.2003). Необходимо отметить, что в настоящий период времени отечественная нормативная и законодательная база по анализу рисков технологических систем прошла адаптационный период и вступила в фазу дифференциации по отраслям производства. Эта тенденция отражается в принятии специализированных законодательных актов и нормативных документов в нефтегазовой отрасли, надзорной деятельности, атомной промышленности и т.д. В то же время большинство документов до сих пор содержат общие указания, а методики носят рекомендательный характер.

В результате проведенного анализа отмечается потребность в нормативных документах и законодательных актах, определяющих деятельность по управлению рисками при строительстве в целом и геотехническом строительстве в частности, регламентирующих методики анализа и прогнозирования рисков, а также практические подходы к организации риск-менеджмента в строительной отрасли.

1.2 Проблема геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена

Тематикой геотехнических рисков в мировой практике подземного строительства занимаются уже более 30-ти лет. Пионерные работы по данному вопросу опубликованы зарубежными авторами в 80-х годах 20-го века [17÷21]. Также в этот период начинают издаваться специализированные зарубежные журналы для публикаций исследований по тематике геотехнических рисков. Таким образом, учитывая данные рисунка 1.3, можно утверждать, что проблемами геотехнических рисков в мире занимаются достаточно давно, и актуальность темы только возрастает.

В отечественной практике о необходимости управления рисками при строительстве подземных сооружений впервые упоминается в работах [22, 23] с позиции наличия коммерческого и инвестиционного риска, а также риска подрядчика. Вместе с тем авторы указывают, что методология проектирования подземных сооружений должна включать «...исследования технико-экономической целесообразности строительства подземного сооружения с учетом возможных рисков» [22]. Это является важным шагом в понимании необходимости создания методологических основ по анализу рисков, как неотъемлемой части процесса строительства подземных сооружений. Говорить о необходимости решения проблемы риска в подземном строительстве начинают Б.А. Картозия и Д.Г. Малюженец [24, 25]. Рост интереса к изучению вопроса можно связать со множеством факторов: расширение границ освоения подземного пространства городов, повышенное внимание к экологическому аспекту, появление новых инструментов изучения системы «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» [27], включение отечественной экономики в рыночный механизм. Процессы создания подземных сооружений сопряжены с проблемами, научное обеспечение которых осуществляет наука «строительная геотехнология» [26]. Освоение городского подземного пространства характеризуется многочисленными формами риска, которые можно разделить на два крупных

направления с позиции стадий жизненного цикла объекта: риски в процессе геотехнического строительства и риски в процессе эксплуатации. В настоящей работе рассматриваются проблемы управления рисками в процессе геотехнического строительства объектов метрополитена.

Состояние и результаты исследований проблемы рисков при строительстве подземных сооружений представлены в работах [27÷79]. Нормативная литература по рассматриваемой тематике, включает источники [2,3,8,80÷84]. Изученность проблемы рассматривается ниже по наиболее представительным источникам.

В первую очередь необходимо отметить монографию [27], в которой впервые дано определение нового раздела строительной геотехнологии – **строительной георискологии**. В монографии обобщены труды профессоров Московского государственного горного университета и сформированы основы стратегии управления рисками в городском подземном строительстве. В частности, на основе работ Е.Ю. Куликовой, впервые выполнена подробная классификации рисков при строительстве городских подземных сооружений, а также определены элементы риска, как комбинации вероятности и последствий нанесения ущерба. Приведена классификация рискообразующих факторов и выделены факторы, определяющие уровень риска. Разработан методический инструментарий стратегии управления рисками и предложена концептуальная модель управления. Исследования продолжаются в работах [34÷36,74] в области рисков финансирования подземного строительства и применения специальных способов.

Монография Л.Л. Кауфмана и Б.А. Лысикова [28] посвящена проблеме геотехнических рисков подземного строительства. В работе широко используется термин **«геотехнические риски»** применительно к рискам подземного строительства. Авторами выполнен обзор зарубежного опыта управления геотехническими рисками, а также детальный анализ последствий (аварийных ситуаций) от их проявления. Это очень важный пример источника получения информации для идентификации рисков и рискообразующих факторов. Описывается качественная составляющая анализа геотехнических рисков, в том числе высказывается предположение о приоритетности экспертной оценки:

«Хорошо документированная оценка экспертов обычно более надежна, чем только расчетные методы, по крайней мере, в геотехнической области» [28]. Авторами предлагается обобщенная классификация геотехнических рисков в зависимости от выбранного способа сооружения объекта, а также дано определение геотехнического риска.

С позиции исследований в области количественного анализа рисков отдельно необходимо отметить работу зарубежных ученых [37]. Профессорами Г.А. Фентоном и Д.В. Гриффитсом представлен расширенный анализ различных методик оценки рисков в геотехническом строительстве, охватывающий весь диапазон от установленных аналитических до передовых численных методов. Работа содержит развернутое обоснование теоретических основ по применению вероятностно-статистических методов с более, чем 100 примерами для их понимания, а также практические примеры использования численных инструментов для оценки геотехнических рисков при проектировании подземных сооружений (вертикальные стены, фундаменты, дамбы, шахтные стволы и т.д.)

Необходимо отметить вклад в отечественной практике изучения проблемы геотехнических рисков Д.Ю. Чунюка. Ему принадлежит более 35-ти работ по данной тематике. В ходе целенаправленного исследования автор предложил классификацию геотехнических рисков [53], выделил их составляющие [50,55,60,61,71], описал применение некоторых методик качественного и количественного анализа [45,46,49,58,59,64]. Особое внимание автор уделяет проблеме экспертной оценки геотехнических рисков с точки зрения применения методов нечисловой статистики для обработки результатов [51,52,65]. В ряде работ им предлагаются стратегии управления геотехническими рисками при строительстве городских подземных сооружений, обсуждаются возможные способы снижения и их эффективность на конкретных примерах [44,47,54,56,62,63,67÷69,72,73]. Отмечается широкий спектр рассматриваемых автором областей городского подземного строительства: глубокие котлованы, тоннели, траншейная «стена в грунте», шпунтовые ограждения, здания с развитой подземной частью. Важным пунктом исследований является предложенное

определение геотехнического риска [53], как специфического риска при в процессе строительства подземных сооружений.

Обзор последствий проявления геотехнических рисков (инциденты и аварии) описан в работах [28,38,48,70,75÷79]. Ценную информацию по статистике аварийных ситуаций в подземном строительстве (в том числе для определения так называемых фоновых рисков) содержат ежегодные годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [79]. Указанным проблемам посвящен труд С.Н. Власова, Л.В. Маковского и В.Е. Меркина [75]. В работе выполнен обширный обзор и детальный анализ аварий при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов, проанализированы причины и сформулированы рекомендации по прогнозированию и предупреждению аварий. Работа отражает многообразие проявлений геотехнических рисков и важность их идентификации. Анализ инцидентов и аварий при строительстве объектов метрополитена позволил выявить ряд специфических особенностей, связанных с тем, что последствие риска может становиться отдельным риском уже со своей группой событий. Это можно увидеть на примере риска разрушения и деформации обделки ствола метрополитена, которое может привести к затоплению ствола водой, далее к поломке горнопроходческого оборудования и т.д. Присоединение внешних техногенных факторов (неудовлетворительное состояние фундаментов зданий и подземных сетей) провоцирует дальнейшую эскалацию и развитие ситуации по каскадному сценарию. Объекты геотехнического строительства целесообразно относить к отдельной группе систем, где значительное влияние на характер протекания каскадного сценария проявления рисков будут оказывать особенности природно-технической геосистемы (ПТГС) [27]. В отличие от аварии в условно-замкнутом пространстве завода, либо площадки добычи или переработки полезных ископаемых, где существует возможность предусмотреть изоляцию аварийных участков, отключение оборудования, отсутствие персонала в наиболее опасных точках, в случае проявления геотехнических рисков в метростроении в условиях плотной городской застройки, близости автодорог и разветвленной сети подземных

коммуникаций скорость развития инцидента (аварии), направление данного процесса в пространстве и параллельный рост ущерба приобретают характер трудно локализуемых событий. Учет данной специфики означает необходимость введения в алгоритм анализа возможности проявления каскада геотехнических рисков [126]. В этой связи обращает на себя внимание ограниченность работ по данной тематике, отражающая конкретные цифры и причинно-следственный анализ инцидентов в отечественном геотехническом строительстве. В частности, [79] указывается на отсутствие учета инцидентов и несвоевременное сообщение об авариях. В работе [75] указан факт отсутствия фиксации данных по авариям в отечественном тоннелестроении после распада СССР. Если во время строительства объекта происходит нештатная ситуация по причине недостаточной оценки геотехнических рисков, то результаты, полученные при её ликвидации, в большинстве случаев, не подвергаются архивации, анализу и формализации. В конечном итоге происходит потеря бесценной практической информации, необходимой в процессе анализа риска.

Таким образом, положение в части исследований по рассматриваемой тематике не позволяет охарактеризовать проблему как малоизученную в зарубежной и отечественной практике. Можно предположить, что накопленные знания дают возможность: разработать методики анализа геотехнических рисков, учитывающие специфику строительства подземных объектов в условиях плотной городской застройки; предложить удобный и эффективный методический аппарат для практической реализации управления геотехническими рисками; создать нормативную базу на основе данного аппарата для использования всеми участниками реализации инвестиционного проекта геотехнического строительства. Стоит отметить, что нефтегазовый комплекс, атомно-энергетический комплекс, авиационная промышленность уже располагают подобными документами. Однако отечественное нормативное поле не содержит соответствующих документов по управлению геотехническими рисками в отличие от зарубежной практики [80,81,83]. Наиболее близкими данной тематике документами на данный период времени представляются [8] и [82]. Рассмотрим

схемы анализа риска, приведенные в данных документах. На рисунке 1.4 [82] изображен обобщенный алгоритм процесса управления рисками для систем, содержащих строительные конструкции. При подробном анализе документа возникает множество вопросов о возможности применения положений настоящего норматива для управления геотехническими рисками в метростроении, в частности:

- алгоритм не учитывает особенности процесса строительства (область применения – стадия проектирования строительных конструкций и стадия эксплуатации);

- процесс анализа не заканчивается обязательным пунктом об архивации полученных данных, а также данных по проявлению геотехнических рисков (инцидентов/аварий) для использования качественных и статистических данных на этапе «Идентификация опасностей и последствий»;

- рекомендации по обработке экспертных оценок не содержат методики определения и учета фактора компетентности экспертов, а также снижения влияния фактора субъективности суждений (требуется формализация метода экспертной оценки);

- невозможность учёта специфики геотехнического строительства и выделения основных типов сооружений метрополитена;

- документ содержит только общие указания без четких методик оценки величины вероятности риска и величины последствий.

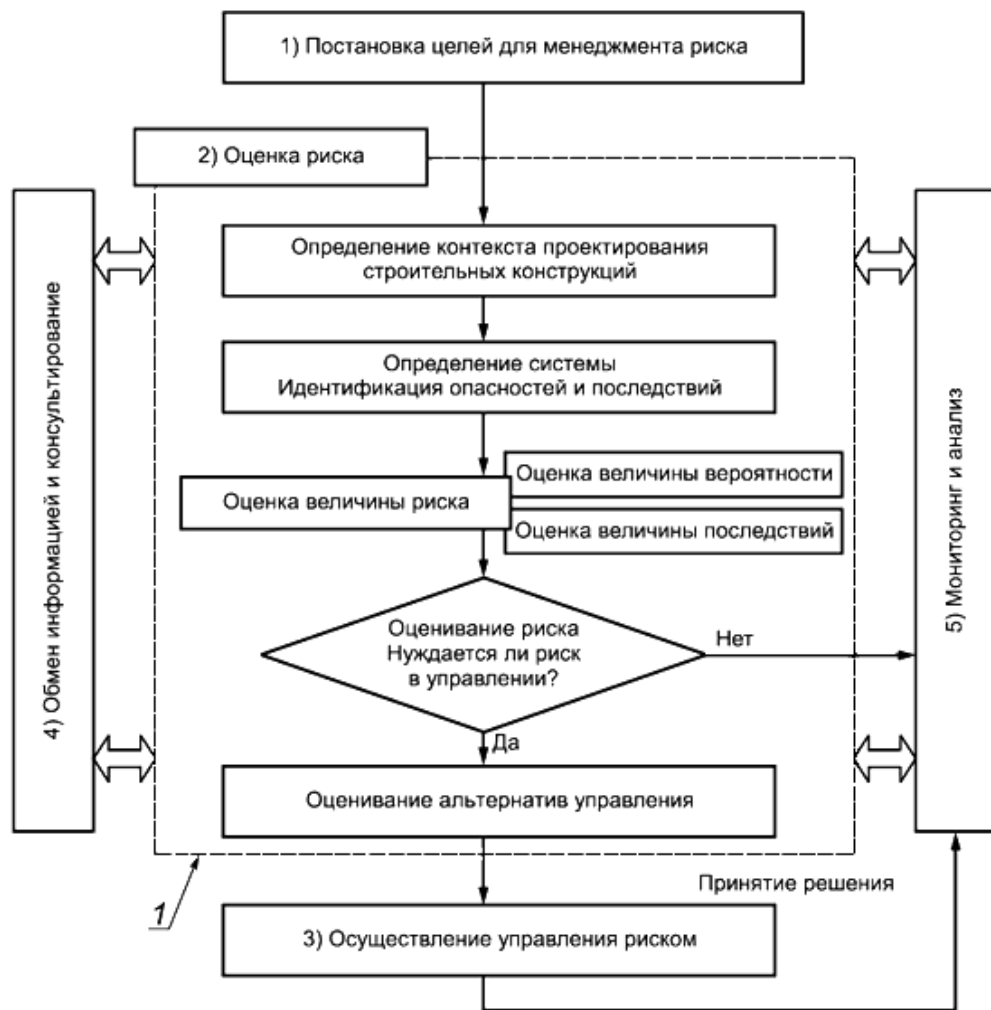


Рис. 1.4 Процесс управления рисками для систем, содержащих строительные конструкции, [82]

Документ [8] с точки зрения детализации стадий анализа опасностей и оценки рисков выглядит более предпочтительным к применению для анализа рисков при строительстве подземных объектов. В данном документе содержатся термины «инцидент» и «авария», выделены задачи анализа риска аварий в зависимости от стадии жизненного цикла опасного производственного объекта, подробно расшифрован состав этапов анализа риска, определены основные и дополнительные показатели опасности аварий, описаны методики расчета риска поражения людей. В документе приводится оценка применимости методов для различных стадий жизненного цикла объекта.

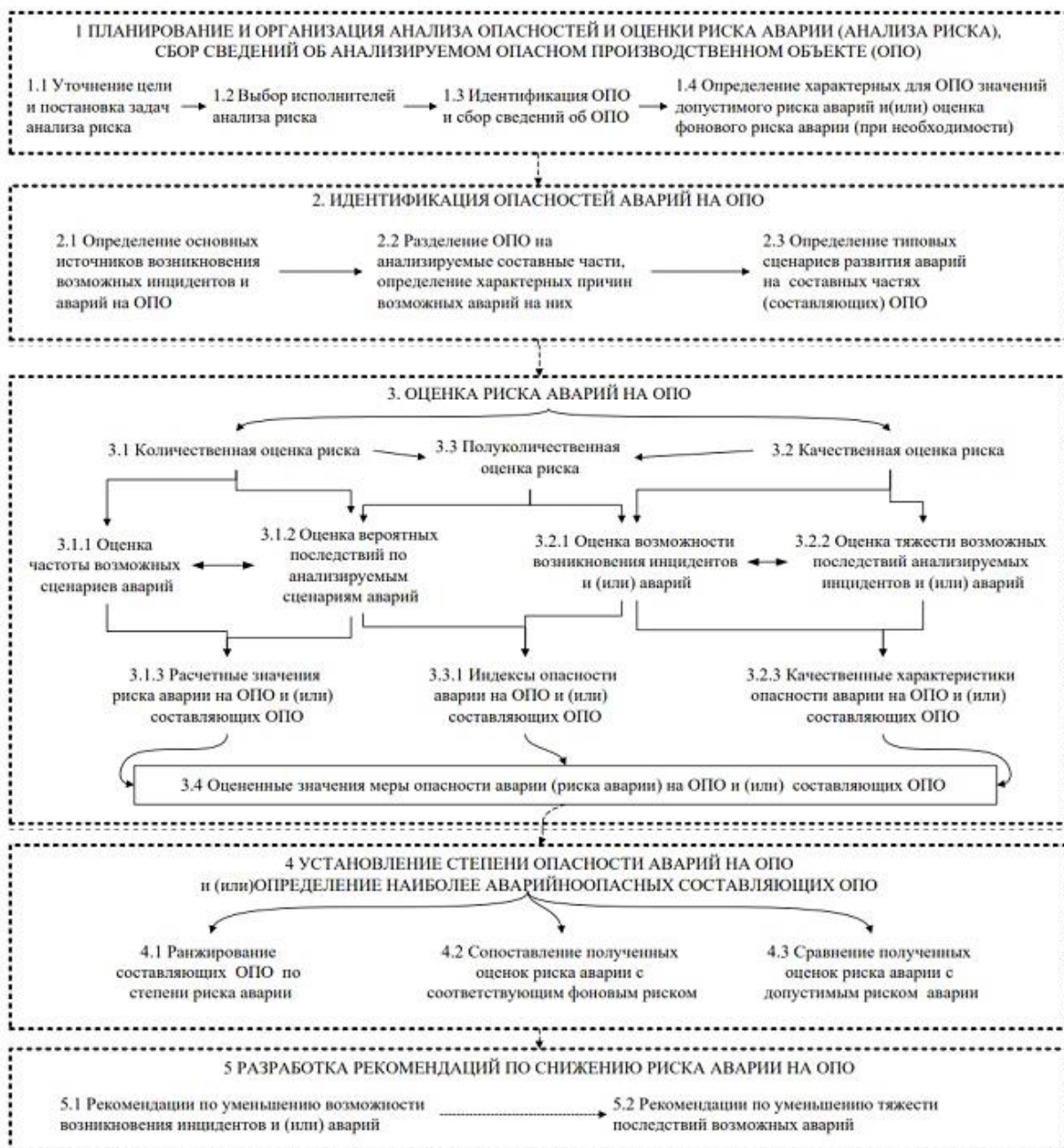


Рис. 1.5. Общая схема анализа опасностей и оценки риска на ОПО, [8]

Вместе с тем при попытке переноса положений настоящей работы на объекты геотехнического строительства также возникают определенные трудности и вопросы:

- в документе рекомендуется (не является обязательным) сравнение полученных оценок риска с фоновым риском аварии, как одно из направлений на этапе установления степени опасности объекта или его составляющих. Однако, во-первых, не определен источник информации о фоновых рисках. Наиболее

достоверными источниками в настоящий момент являются ежегодные годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [79]. Но в данных документах информация о рисках приводится в цифрах, отражающий человеческие потери и травматизм. Статистика о прорывах воды и грунта, пожарах, деформациях и разрушении обделки практически полностью отсутствует. Очевидно, что уровень фонового риска не может отразить все многообразие геотехнических рисков и их причин. Во-вторых, документ не содержит алгоритма и критериев сравнения полученного риска с фоновым. Таким образом, возникают проблемы получения достоверной статистической информации по проявлению различных геотехнических рисков, систематизации и формализации указанной информации для анализа и методики сравнения;

- схема анализа (рисунок 1.5) не заканчивается пунктом об архивации полученных данных, а также данных по проявлению геотехнических рисков (инцидентов/аварий) для использования качественных и статистических данных на этапах 2. «Идентификация опасностей аварий на ОПО», 4.2 «Сопоставление полученных оценок риска аварии с соответствующим фоновым риском»;

- отсутствие критериев поражения горно-строительного оборудования, зданий, сооружений, коммуникаций при проявлении геотехнических рисков.

Таким образом, положения настоящего документа применимы в основном для персонала анализируемого опасного промышленного объекта и жителей прилегающих территорий при техногенных авариях, сопровождающихся последствиями в виде различных выбросов, ударной волны, теплового излучения. Например, величину потенциального риска на территории и в граничащих зонах, рекомендуется определять по формуле (1.1) [8]:

$$R_{\text{пот}} = \sum_{i=1}^I Q_i \min \left(1; 1 - \prod_{j=1}^{\Phi_i(x,y)} (1 - v_{\text{уяз}}^{ij}(x,y) P_{\text{гиб}}^{ij}(x,y)) \right) \quad (1.1)$$

где I - количество сценариев аварий,

Q_i - частота i -го сценария аварии, 1/год,

$v_{\text{уяз}}^{ij}(x,y)$ - показатель уязвимости человека в точке с координатами от j -го поражающего фактора в ходе i -го сценария аварии,

$P_{\text{гиб}}^{ij}(x,y)$ - условная вероятность гибели человека в точке с координатами от j -го поражающего фактора в ходе i -го сценария аварии.

При попытке использования документа для анализа геотехнических рисков возникает вопрос методики оценки вероятностей реализации расчетных сценариев (в том числе с эскалацией и возникновением каскада геотехнических рисков) и установления частоты проявления геотехнических рисков при определенных условиях строительства.

Необходимо отдельно отметить справочно-методическое пособие [159]. В документе содержится систематизированная информация о возможных нештатных ситуациях при возведении подземных объектов в условиях Москвы, а также ряд примеров данных ситуаций с описанием, анализом причин, последствий и мер по их ликвидации. В частности, приведено несколько примеров нештатных ситуаций при строительстве объектов метрополитена (14 шт) и других объектов тоннелестроения (5 шт). Рассмотрены методы оценки и управления рисками в строительстве (балльная оценка, вероятностные методы, метод экспертных оценок). Пособие содержит адаптированную к условиям инженерно-геологических и градостроительных условий Москвы методику оценки и учета рисков при строительстве и эксплуатации подземных сооружений на основе выделения отдельных составляющих общего ущерба.

Значительной проблемой является сбор информации по рискам, её обработка, анализ, передача результатов и архивация. Во времена СССР существовала система, при которой все нештатные и аварийные ситуации обсуждались на расширенных собраниях строительных трестов. Результаты обсуждения передавались в проектные и научно-исследовательские институты для анализа причин, рассмотрения принятых мер по локализации аварии и ликвидации последствий, а также разработки организационно-технологических и технических мероприятий по недопущению проявления риска в будущем. Такой подход был возможен, так как строительством и проектированием метрополитена занималось

ограниченное число территориальных крупных организаций. В настоящее время реализация инвестиционно-строительных проектов происходит с участием множества строительных организаций в рамках свободной конкуренции. На первый план выходят такие понятия, как «коммерческая тайна» и «репутация фирмы». Если во время строительства объекта происходит нештатная ситуация по причине недостаточной оценки рисков, то результаты, полученные при её ликвидации, в большинстве случаев, не подвергаются архивации, анализу и формализации. Следует отметить, что в процессе эксплуатации объектов метрополитена и иных подземных сооружений данные функции призвана выполнять структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений (СМИС) [84], создание которой выполняется на стадии проектирования. Наряду с этим отсутствует обратная связь между проектными, строительными организациями и организациями, осуществляющими геотехническое сопровождение по обмену информацией о хронологии нештатной ситуации, предварительных причинах и принимаемых технических решениях. Нет единой базы данных о статистике аварий в метростроении.

Одновременно с вышеуказанными проблемами задача управления рисками, входящая в состав обязательной системы менеджмента качества (СМК) строительных организаций согласно ГОСТ Р ИСО 31000-2010, носит формальный характер отчётной процедуры, необходимой для сертификации СМК. Выбранные методы оценки риска (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011) редко используются на практике для принятия решений при проектировании и заключении контрактов на строительство.

1.3 Выводы (постановка задач исследования)

1. Оценивая изученность проблемы геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена в целом необходимо отметить имеющиеся

достижения в зарубежных и отечественных исследованиях, научную важность и практическую значимость полученных результатов.

2. Вместе с тем в настоящий момент отсутствует база данных (архив рисков) о фактах проявления геотехнических рисках, доступная широкому кругу пользователей-участников реализации проекта геотехнического строительства объектов метрополитена. Отсутствует методика и алгоритм управления геотехническими рисками с учетом фактора возможной эскалации аварий и инцидентов (анализ каскада геотехнических рисков). Не разработаны методики и критерии сопоставления полученных количественных результатов оценки рисков со статистическими архивными данными. Не определены критерии целесообразности анализа конкретных рисков в зависимости от условий строительства отдельного объекта и функционально-технологической группы (ствол, тоннель, станция/сооружение закрытого способа строительства, станция/сооружение в открытом котловане). В действующей нормативной литературе отсутствуют методики расчета фоновых (статистических) рисков, не определены источники получения информации о данных рисках, отсутствуют методики и критерии сопоставления полученных количественных результатов оценки рисков с фоновыми рисками.

2. Алгоритмы анализа рисков ОПО, к которым также относятся сооружения метрополитена, в действующей нормативной базе не заканчиваются обязательным пунктом об архивации полученных данных, а также данных по проявлению геотехнических рисков (инцидентов/аварий) для использования качественных и статистических данных при оценке. Отсутствует концептуальная модель системы менеджмента качества для строительных предприятий с учетом менеджмента рисков. Не сформирована система сбора, учета, анализа информации по рискам (архив рисков) для получения статистических данных, в том числе весьма ограниченное использование современным информационных технологий для получения информации о фактах проявлении геотехнических рисков. Не разработаны методики обоснования эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена с учетом геотехнических рисков.

3. Задачи исследования:

1. Исследование геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, определение составляющих геотехнического риска, разработка обобщенной модели геотехнического риска.

2. Исследование сценариев развития рисков ситуации при строительстве объекта метрополитена, возможности каскадного сценария развития рисков ситуации, разработка обобщенной модели каскада геотехнических рисков.

3. Обоснование типологии сооружений метрополитена на основании технологических, объемно-планировочных и конструктивных особенностей. Разработка классификаций геотехнических рисков на основании составляющих геотехнического риска при строительстве объектов метрополитена, позволяющие прогнозировать каскадный сценарий развития рисков ситуаций.

4. Обоснование подхода к анализу геотехнических рисков и разработка методики оценки геотехнических рисков.

5. Обоснование эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена с учетом геотехнических рисков и разработка мероприятий по снижению последствий проявления рисков.

2. ТИПОЛОГИЯ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ

2.1 Подходы к определению составляющих геотехнических рисков и целесообразность их адаптации для строительства метрополитена

Информация по авариям и инцидентам (последствиям проявления геотехнических рисков), связанным со строительством тоннелей и метрополитенов в мире, представлена в [28, 47, 75-78, 94-97, 105-107, 144-150]. Анализ данных демонстрирует, что сценарии развития данных процессов характеризуются значительным разнообразием с точки зрения первопричин (рискообразующих факторов), развития дальнейших событий (проявления рисков ситуации) и последствий. Одни сценарии полностью уникальны, другие в некоторой степени схожи. Однако все сценарии обладают индивидуальностью, обусловленной спецификой объектов, на которых они локализуются.

Очевидно, что для дальнейшего анализа необходимо глубокое изучение исследуемого объекта путем определения его состава, свойств, природы возникновения, жизненного цикла, принципов формирования связей. Методом подобного познания с делением объекта исследования на определенные группы посредством определения существенных признаков (оснований) является классификация. Между тем, в практике исследований предложены различные подходы к классификации рисков при строительстве городских подземных сооружений [27, 38] и геотехнических рисков [28,53,60]. Данные классификации являются содержательными и охватывают широкий диапазон признаков различного характера. Например, в [27] впервые предложено классифицировать риски при строительстве городских подземных сооружений с разделением рисков на 8 групп: строительные, экологические, управленческие, исполнительские, коммерческие, экономические, контрактные, социальные и эксплуатационные. Каждая группа подвергается дальнейшей классификации на следующем уровне. Также следует отметить, что в [27] классифицируются рискообразующие факторы.

В [53] при оценке и управлении геотехническими рисками автором предложена классификация, основанная на следующих критериях: масштаб воздействия, степень воздействия, степень зависимости от исходного события, тип информации, место проявления, размер ущерба и т.д. Автором приводится качественная характеристика риска для возможности отнесения его к той или иной группе. В [38] автор предлагает первый уровень классификации по следующим критериям (основаниям): по времени возникновения, по факторам возникновения, по характеру последствий, по методам оценки.

При анализе различных подходов к классификации выделяются общие черты, которые позволяют нам выделить три составляющие геотехнического риска (рисковой ситуации) (рисунок 2.1):

- 1) **причина** (фактор, рискообразующий фактор, фактор возникновения, исходное событие),
- 2) **проявление** (проявление рисковой ситуации, место проявления, воздействие, распространение, длительность, рисковая ситуация),
- 3) **последствие** (характер последствий, размер ущерба, реализация каскадного сценария развития).



Рис. 2.1 Составляющие риска

Рассмотрим обобщенную формулу риска:

$$R=P*Y \quad (2.1)$$

где P – вероятность наступления рисковой ситуации на объекте,

Y – величина ущерба в результате проявления рисковой ситуации.

При этом проявление рискованной ситуации выступает промежуточным звеном и в двойном качестве как:

- следствие совокупности факторов,
- причина ущерба.

Определению вероятности наступления рискованной ситуации предшествует этап идентификации, которая будет основываться на классификации. Вероятность наступления рискованной ситуации может быть определена на основе качественного и количественного анализа. На этапе качественного анализа важно изучить факторы возникновения и возможные последствия с оценкой их размера. Результаты качественного анализа риска являются важной информацией для последующего количественного анализа и оценки.

Следовательно, актуальной является создание адаптированной классификации, отражающей специфику конкретных сооружений метрополитена и предназначенной для решения конкретных задач строительства метрополитена, которая позволит с достаточной степенью достоверности произвести идентификацию рискообразующих факторов, рискованной ситуаций и возможных последствий для целей последующего анализа.

Таким образом, можно сформулировать общие принципы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена:

1. Классификация выполняется по трем направлениям, (составляющим рискованную ситуацию):

- 1 – классификация рискообразующих факторов,
- 2 – классификация проявления рискованной ситуаций,
- 3 – классификация последствий рискованной ситуаций.

2. Структура классификации - многоуровневая.

3. Основанием первого уровня классификации проявления рискованной ситуаций является тип строящегося сооружения метрополитена (типологическая классификация).

4. Учет специфики природно-техническую геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» при назначении критериев второго и последующих уровней и выбора классификационной группы.

2.2 Обоснование выделения основных типов сооружений метрополитена на этапе сооружения

Подземная линия метрополитена является составляющим элементом сложной природно-техническую геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» [27]. Рассматривать данную геосистему возможно в зависимости от этапа жизненного цикла проекта линии метрополитена, с точки зрения специфики ее создания и функционирования, степени влияния на окружающую природную, техногенную и социальную среды, количества и особенностей входящих в нее сооружений и инженерных систем. Учитывая предложенное определение геотехнического риска [53], как риска при строительстве подземных сооружений, первым уровнем классификации должны стать сооружения метрополитена.

Наиболее значимыми для рассмотрения и анализа вопросов, связанных с сооружениями метрополитена, являются этапы строительства и эксплуатации линии. На этапе эксплуатации анализу подвергается законченное подземное сооружение, находящееся во взаимодействии с породным массивом, испытывающее влияние работающих инженерных систем, склонное к рисковому ситуациям и предельным состояниям этапа эксплуатации [86] в связи с преимущественно длительным и постепенным воздействием внутренних и внешних факторов. На этапе строительства подземное сооружение рассматривается в процессе создания. Вместе с отсутствием постоянных инженерных систем с подземным сооружением происходят изменения во времени, в породном массиве, в окружающей среде, а также обусловленные данным процессом рисковые ситуации и предельные состояния с более выраженной

динамикой по сравнению с этапом эксплуатации. Таким образом, элемент ПТГС «технология» рассматривается по-разному в зависимости от этапа жизненного цикла. Как отмечается в работе [27], на этапе строительства «технология» – это технология строительства, а на этапе эксплуатации – технология эксплуатации.

Продолжая анализ подземных сооружений метрополитена, отметим, что характерной особенностью является изменение функций одного и того же сооружения в зависимости от этапа жизненного цикла. Например, при строительстве подземной линии метрополитена вертикальные стволы могут выполнять различные функции (таблица 2.1). При этом одни сооружения выполняют исключительно временные функции на период строительства (например, выработки околоствольных дворов), а другие сооружение после выполнения временных функций при строительстве после переоборудования переходят в постоянную эксплуатацию в составе комплекса сооружений метрополитена. Например (таблица 2.1):

- рабоче-вентиляционный ствол после демонтажа армировки для осуществления грузо-людского клетового подъема на период строительства сооружений линии глубокого заложения при эксплуатации будет выполнять функции вентиляционного в составе вентиляционного узла на перегоне;
- демонтируемая щитовая камера для демонтажа тоннелепроходческого комплекса на период строительства линии глубокого заложения при эксплуатации будет выполнять функции камеры металлоконструкций (гермозатворов) на перегоне.

Таблица 2.1

Вертикальные стволы метрополитена	
Для эксплуатации на период строительства:	Для эксплуатации в качестве постоянного сооружения метрополитена:
- вскрывающая и обслуживающая выработка для сооружения подходов к выработкам и эксплуатируемым сооружениям метрополитена (рабочий ствол, рабоче-вентиляционный ствол); - ствол для монтажа (демонтажа) и пуска (выхода) тоннелепроходческого комплекса (ТПМК).	- вентиляционный ствол; - ствол комплекса водоотливной установки; - эвакуационный выход на перегоне; - ствол для размещения коммуникаций комплекса дополнительных устройств.

Наконец, необходимость строительства комплекса временных подземных сооружений (выработок), обусловленная элементом технологии, является еще одной особенностью подземных сооружений метрополитена при строительстве линий глубокого заложения. Это выработки околоствольных дворов рабочих стволов (обгонные выработки, камеры водоотливных и вентиляционных установок, склады взрывчатых материалов, камеры ремонтных депо и т.д.), подходные и вспомогательные выработки. При этом поперечные сечения, конструкция и сложность их возведения (проходки) сравнимы с конструкциями и технологиями сооружения постоянных сооружений метрополитена.

Таким образом, подземные сооружения метрополитена обладают рядом особенностей, присущих, с одной стороны принадлежностью к природно-технической геосистеме (ПТГС), а с другой – к транспортной системе метрополитена (рисунок 2.2).

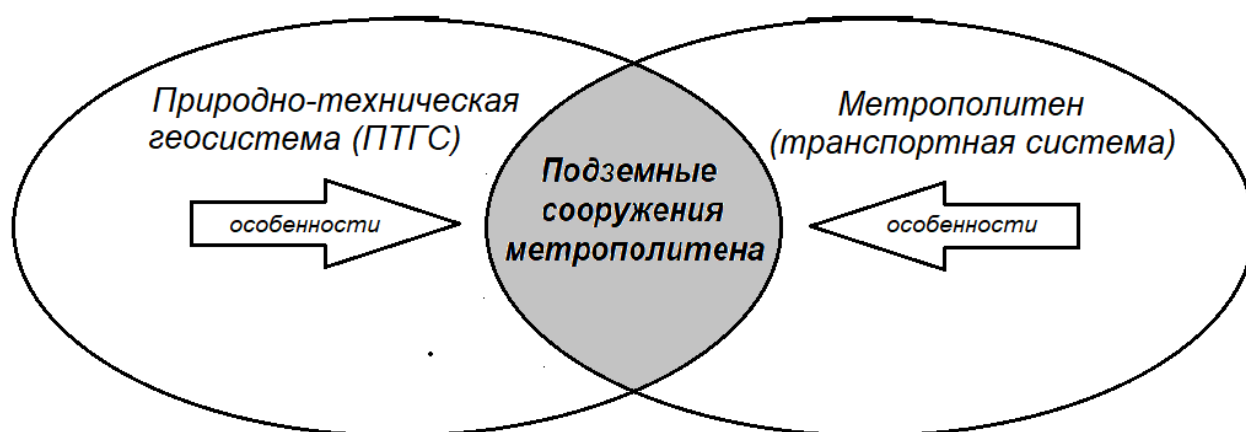


Рис. 2.2 Система сооружений метрополитена

Очевидно, что сооружения метрополитена представляют собой отдельное множество подземных объектов. Для целей исследования необходимо определить возможность дальнейшего разделения данного множества по различным признакам. То есть исследовать классификационный потенциал данного множества с точки зрения особенностей ПТГС на этапе строительства.

Работа [87] является одним из ранних примеров в отечественной литературе по метростроению, где выполняется разделение сооружений метрополитена по различным признакам. В частности, выполняется деление линий метрополитена по глубине заложения: мелкого и глубокого заложения. Также приводится деление

станций метрополитена по способу строительства (открытый и закрытый способы), объемно-планировочным решениям, расположению и количеству платформ. В [88, 89, 142] метрополитен выделен и отнесен в классификации подземных сооружений к группе транспортных подземных сооружений. В [90, 91] метро без разделения на сооружения внесено в классификацию транспортных сооружений в области вопросов архитектуры. При классификации подземных транспортных сооружений в [141] метрополитены учтены в группе признака «Планировочная схема» (назначение) и далее разделены по признакам на протяженные подземные сооружения («Тоннели метрополитена») и подземные сооружения ограниченной длины («Станции метрополитена»). Также стоит отметить, что в документе СП 120.13330.2022 «Метрополитены» [143] указаны перегонные тоннели, станции, наклонные тоннели, вертикальные шахтные стволы, другие подземные и надземные сооружения, депо в части требований к их проектированию, строительству и приемке в эксплуатацию. Однако конкретного перечня данных сооружений, их систематизации и классификации в документе [143] не приведено.

Необходимо отметить работу [29], в которой автор для целей своего исследования при установлении значимых факторов риска выделяет такие основные подземные сооружения, как «тоннель», «станция», «вестибюль». В дальнейшем при выполнении экспертного опроса автором приводится детальное уточнение параметров изначально принятых сооружений: «котлован подземного комплекса в зоне перегонных тоннелей», «перегонный тоннель, сооружаемый тоннелепроходческим комплексом», «станция глубокого заложения». Данное уточнение важно, так как указывает на сочетание конструктивных особенностей и технологии в качестве возможного основания (критерия, признака) для типологической классификации.

Сооружения метрополитена можно классифицировать по функциональному назначению (таблица 2.2).

Таблица 2.2

№ п/п	Наименование комплекса сооружений метрополитена	Состав сооружений	Функциональное назначение
1	Станции (станционные комплексы)	наземные павильоны	Обеспечение доступа пассажиров для посадки в электропоезд и выхода на поверхность, размещение помещений для работы персонала станции и помещений инженерных систем
		лестничные сходы	
		пешеходные переходы	
		вестибюли	
		спуск на платформу	
		платформенная часть	
2	Перегонные сооружения	перегонные тоннели	Пространство для движения, маневрирования и отстоя электропоездов
		камеры съездов	
		тупики	
		раструбы	
3	Эскалаторный комплекс, лифтовой комплекс	натяжная камера	Обеспечение доступа пассажиров на платформу и выхода на поверхность
		эскалаторный	
		наклонный тоннель	
		лифтовая шахта	
		камера машинного помещения	
4	Пересадочные сооружения	пересадочные	Пересадка пассажиров с одной линии на другую
		пешеходные тоннели	
		лестничные сходы	
		эскалаторные спуски	
5	Сооружения электропитания	тягово-понижительные подстанции	Электропитание линии и обеспечение движения электропоездов
		сооружения для размещения кабельных систем (стволы, тоннели)	
6	Вентиляционные сооружения	вентиляционные киоски	Вентиляция линии
		вентиляционные каналы	
		вентиляционный ствол	
		вентиляционная камера	
		вентиляционная сбойка	
		противодутьевая сбойка	
7	Водоотливные сооружения	камеры и каналы водоотливных комплексов	Водоотведение из сооружений линии
		санитарно-технические скважины	
8	Дополнительные сооружения	камеры затворов	Обеспечение отдыха машинистов электропоездов, ремонт и обслуживание электропоездов, обеспечение защиты в чрезвычайных ситуациях
		здания отдыха локомотивных бригад	
		депо	

Данное разделение достаточно информативно, но предназначено больше для анализа вопросов, связанных с сооружениями и рисками в условиях эксплуатации. Оно описывает сооружения с точки зрения технологии эксплуатации и наличия работающих основных систем линии метрополитена. Вместе с тем в процессе строительства перегонных и эскалаторных тоннелей закрытым способом первоначально строятся монтажные камеры в открытых котлованах. Данные монтажные камеры являются самостоятельными подземными сооружениями с определенной конструкцией, технологией возведения и функцией, выполняемой в процессе проходки тоннелей. Камеры затем используются для возведения в них вестибюлей станционных комплексов и машинных залов эскалаторов, однако относить их к тоннелям не представляется корректным. Их также необходимо включать в состав объектов строительства метрополитена. Как отмечалось выше, для этапа строительства подземных сооружений метрополитена наиболее важным является процесс взаимодействия с окружающим массивом через выбранную технологию возведения.

Приведенный здесь анализ позволяет выявить отсутствие общей типологической классификации подземных сооружений метрополитена. В то же время типологические классификации (типологии) существуют для большинства наземных промышленно-гражданских сооружений [92], транспортных сооружений [90, 91]. Жилые здания классифицируются по самым разным признакам (основаниям, критериям): типу несущих конструкций, количеству этажей, объемно-пространственной структуре, технологии возведения и т. д. Например, приняв основанием объемно-пространственную структуру, можно провести следующую классификацию жилых зданий [92]: отдельно стоящий дом; групповая малоэтажная застройка; линейно-сблокированный дом; дом-вставка; дом-пластина; дом-квартал; дом-башня.

Очевидно, что для такой сложной по составу, структуре и функционалу системы, как метрополитен необходима типологическая классификация (типология) сооружений на основании наиболее характерных признаков для каждой типологической группы. Как любая классификация, они призваны

упорядочить исследуемый массив объектов, явлений и процессов путем их деления на устойчивые группы, типы, виды. То есть для дальнейшей разработки классификации геотехнических рисков рассмотрим возможность разделения объектов метрополитена на устойчивые группы [113].

Используя практический опыт строительства, теоретические основы метростроения и утверждение о принадлежности сооружений метрополитена к природно-технической геосистеме (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда», можно выделить две основные группы классификационных признаков [113]:

- 1 – признаки, зависящие от технологии строительства сооружения,
- 2 – признаки, зависящие от объемно-планировочных и конструктивных особенностей сооружения.

К первой группе признаков отнесем технологические масштабы вскрытия земной поверхности и пересечения геологических слоев. Ко второй группе отнесем характеристики продольных и поперечных размеров, объем сооружаемых конструкций, пространственное положение сооружения в породном массиве. Всего выбрано пять классификационных признаков (таблица 2.3).

Таблица 2.3

№ п/п	Группа классификационных признаков	Наименование признака
1	1	Разнообразие инженерно-геологических условий
2	1	Степень нарушения целостности дневной поверхности
3	2	Пропорции сооружения
4	2	Объем сооружения
5	2	Пространственное положение

Далее необходимо преобразовать выбранные признаки для возможности дальнейшей сравнительной оценки и классификации. Признаки могут быть качественными (неизмеримыми) или количественными (измеримыми). Отметим,

что для целей сравнения наиболее подходящими являются количественные признаки.

1. Разнообразие инженерно-геологических условий (X1).

Количественный признак, который характеризуется количеством пересекаемых геологических слоев на 1 м наибольшего габарита сооружения:

$$X1 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\Gamma_{\max}} \quad (2.2)$$

где $\sum_{i=1}^n a_i$ - сумма пересекаемых различных геологических слоев (a_i – отдельный геологический слой), шт (определяется данными геологического разреза участка линии),

$\Gamma_{\max}$ - наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

2. Степень нарушения целостности дневной поверхности (X2).

Количественный признак, который характеризуется площадью вскрытия земной поверхности:

$$X2 = S_{\text{вскр.з.п.}} \quad (2.3)$$

где $S_{\text{вскр.з.п.}}$ – площадь вскрытия земной поверхности в процессе возведения сооружения, м^2 (определяется технологией).

3. Пропорции сооружения (X3).

Количественный признак, который характеризуется соотношением площади поперечного сечения к наибольшему габариту сооружения:

$$X3 = \frac{S_{\text{попер.сеч.}}}{\Gamma_{\max}} \quad (2.4)$$

где $S_{\text{попер.сеч.}}$ – площадь поперечного сечения сооружения, м^2 ,

$\Gamma_{\max}$ - наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

4. Объем сооружения (X4).

Количественный признак, который характеризуется занимаемым объемом сооружения в породном массиве по наружному контуру:

$$X4 = V_{\text{соор.}} \quad (2.5)$$

где $V_{\text{соор.}}$ – объем, который занимает сооружение в породном массиве по наружному контуру, м^3 .

5. Пространственное положение (X5).

Качественный признак, который характеризуется положением центральной оси сооружения в пространстве породного массива и имеет геометрический смысл.

Представим породный массив в качестве трехмерного пространства в декартовой системе координат с ортогональными друг другу координатными осями Ox , Oy и Oz . Пусть вектор $\vec{p}$ принадлежит прямой центральной оси подземного сооружения метрополитена (рисунок 2.3).

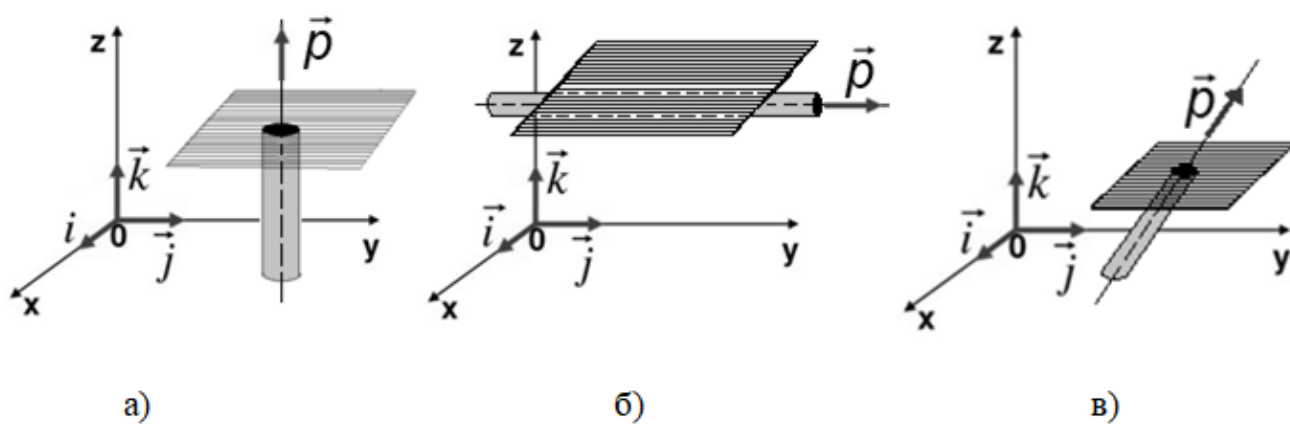


Рис. 2.3 Возможные положение сооружения в пространстве

Рассматривая взаимное расположение вектора $\vec{p}$ по отношению к векторам ортонормированного базиса $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ пространства породного массива с позиции коллинеарности и ортогональности, определим геометрический смысл признака X5:

$$X5 = \begin{cases} \text{вертикальное положение, если } \vec{p} \parallel \vec{k} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$X5 = \begin{cases} \text{горизонтальное положение, если } \vec{p} \parallel \vec{i} \\ \text{если } \vec{p} \parallel \vec{j} \\ \text{если } \vec{p} \nparallel \vec{i}, \vec{p} \nparallel \vec{j}, \vec{p} \perp \vec{k} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$X5 = \begin{cases} \text{наклонное положение, если } \vec{p} \nparallel \vec{i}, \vec{p} \nparallel \vec{j}, \vec{p} \nparallel \vec{k}, \widehat{\vec{p}\vec{k}} \neq 90^\circ \end{cases} \quad (2.8)$$

Соответственно, признак $X5$ будет принимать три значения и характеризовать три возможных положения сооружения в пространстве:

- вертикальное (рисунок 2.3, а),
- горизонтальное (рисунок 2.3, б),
- наклонное (рисунок 2.3, в).

Все определенные признаки и их характеристики сведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4

№ п/п	Наименование признака	Измеримость	Ед. изм.	Обозначение
1	Разнообразие инженерно-геологических условий	количественный	-	X1
2	Степень нарушения целостности дневной поверхности	количественный	м ²	X2
3	Пропорции сооружения	количественный	-	X3
4	Объем сооружения	количественный	м ³	X4
5	Пространственное положение	качественный	-	X5

Таким образом, процесс типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена можно представить в виде **кластерной модели типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена** (рисунок 2.4).

Кластерная модель типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена

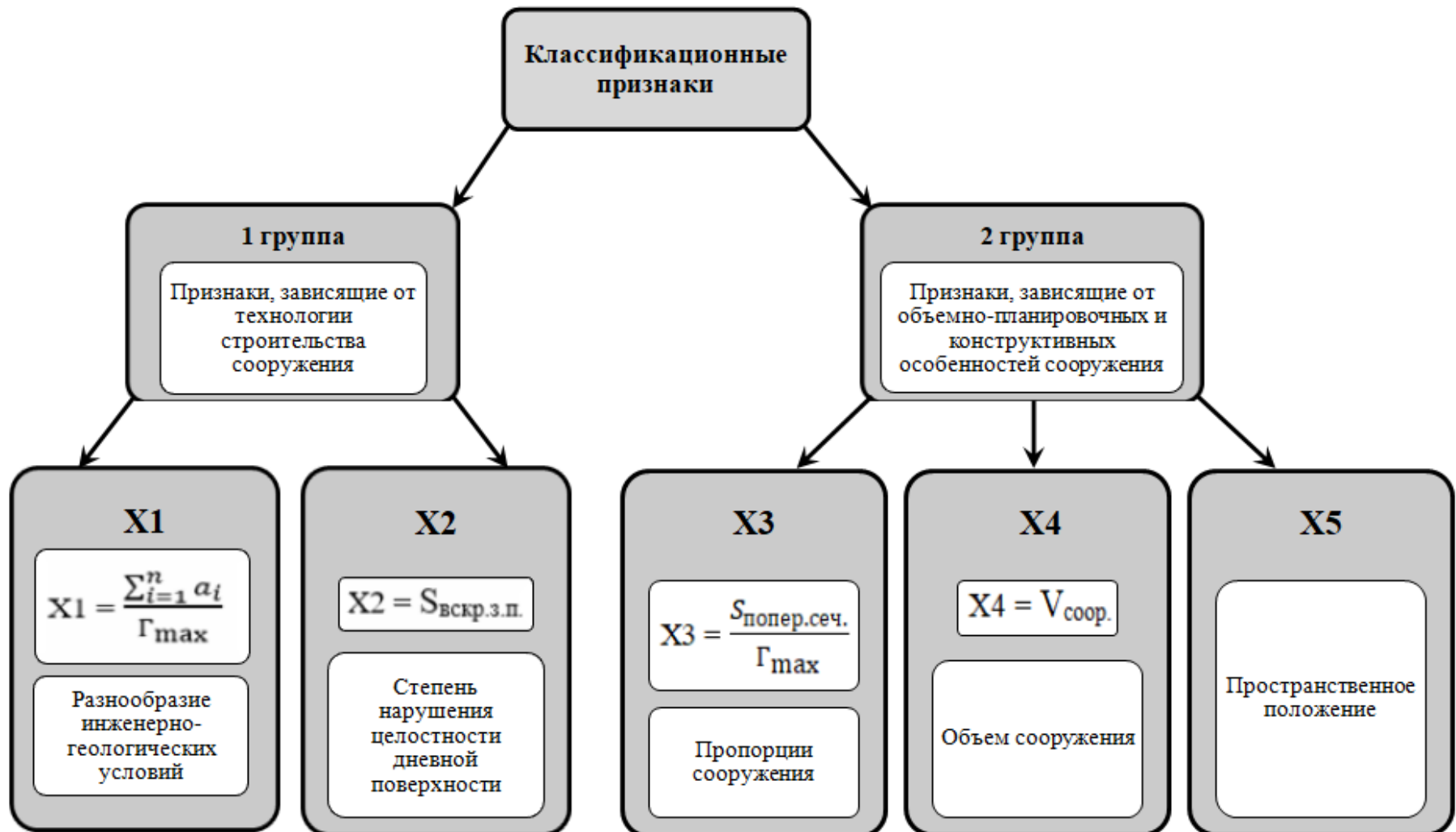


Рис. 2.4

Дальнейшая работа над типологической классификацией будет заключаться в выделении основных групп сооружений на основании определенных признаков. Исследования основаны на результатах анализа строительства объектов метрополитена линий мелкого и глубокого заложения города Москвы (рисунки 2.5 и 2.6).

На рисунке 2.5 изображен продольный профиль и инженерно-геологические условия участка линии мелкого заложения. На рисунке можно увидеть следующие подземные сооружения участка линии:

- станции мелкого заложения (включая вестибюли и платформенную часть), построенные в открытом котловане с вертикальными стенами;
- тягово-понижительные подстанции, построенные в открытом котловане с вертикальными стенами;
- вентиляционные камеры на станциях, построенные в открытом котловане с вертикальными стенами;
- перегонные тоннели, построенные закрытым способом с применением механизированных тоннелепроходческих комплексов, пройденные из котлованов монтажных камер, построенных открытым способом;
- вертикальный вентиляционный ствол на перегоне;
- вентиляционная камера мелкого заложения на перегоне, построенная в открытом котловане с вертикальными стенами.

На рисунке 2.6 изображен продольный профиль и инженерно-геологические условия участка линии глубокого заложения. На рисунке можно увидеть следующие подземные сооружения участка линии:

- вестибюли станции мелкого заложения, построенные в открытом котловане с вертикальными стенами;
- станция глубокого заложения (платформенная часть), построенная закрытым способом;
- тягово-понижительная подстанция, построенная закрытым способом;
- вентиляционная камера на станции, построенная закрытым способом;

- перегонные тоннели, построенные закрытым способом с применением механизированных тоннелепроходческих комплексов и горного способа;
- вертикальный рабоче-вентиляционный ствол на перегоне;
- вертикальный рабоче-вентиляционный ствол на станции;
- наклонные эскалаторные тоннели, пройденные из котлованов монтажных камер, построенных открытым способом.

Из представленных данных можно предварительно сделать вывод о следующей возможной типологической классификации подземных сооружений метрополитена:

- 1 – вертикальный ствол,
- 2 – наклонный тоннель,
- 3 – горизонтальный тоннель,
- 4 – станционные сооружения.

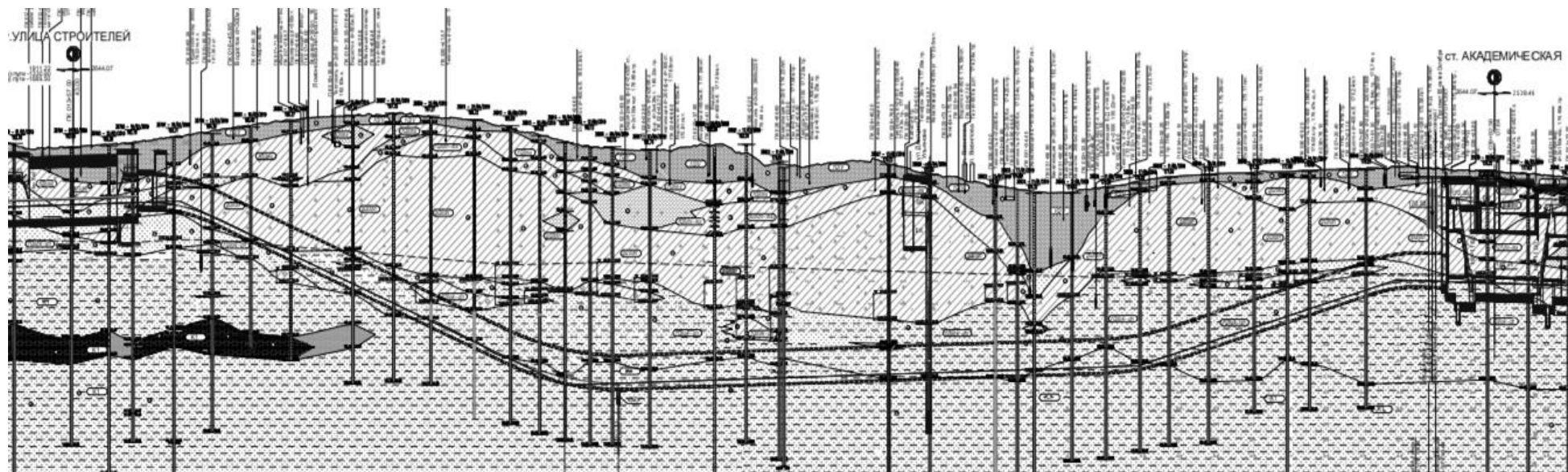


Рис. 2.5 Продольный профиль и инженерно-геологические условия участка линии мелкого заложения

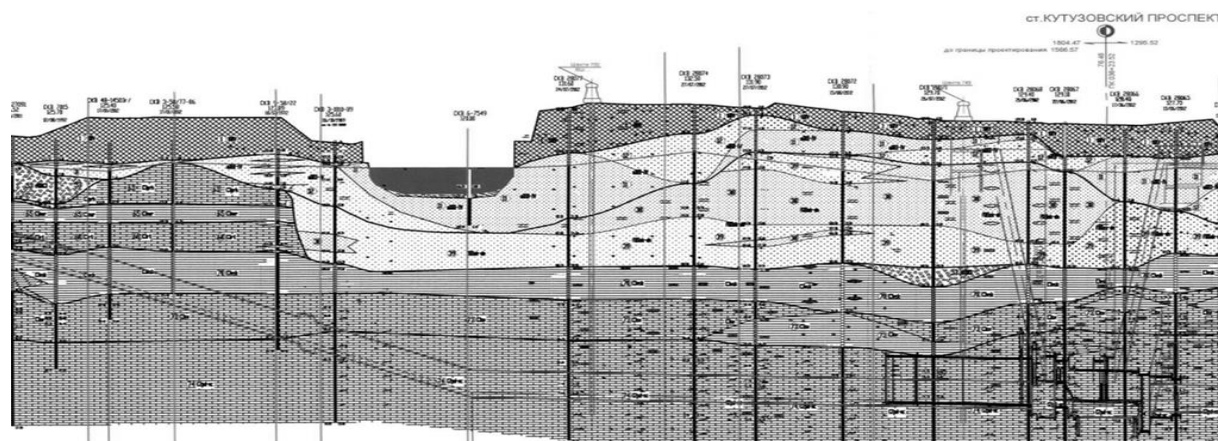
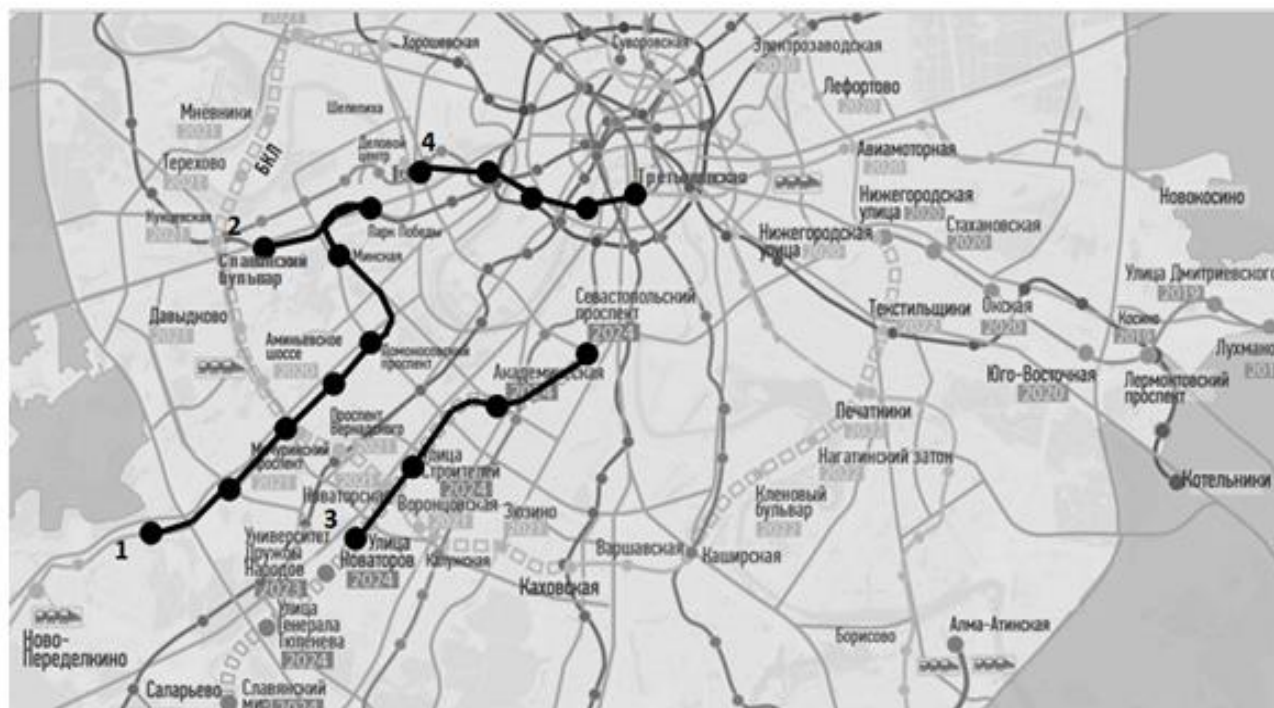


Рис. 2.6 Продольный профиль и инженерно-геологические условия участка линии глубокого заложения

Продолжая анализ реальных условий строительства метрополитена города Москвы, рассмотрим более детально сооружения и их специфику для линий глубокого и мелкого заложения, строящихся и проектируемых для разных районов города (рисунок 2.7): участок Калининско-Солнцевской линии от станции «Парк Победы» до станции «Солнцево» и участок Арбатско-Покровской линии от станции «Парк Победы» до станции «Славянский бульвар» (западный округ), участок Коммунарской линии от станции «Улица Новаторов» до станции «Севастопольский проспект» (юго-западный округ), участок Калининско-Солнцевской линии от станции «Деловой центр» до станции «Третьяковская» (западный и центральный округа).



- 1 – участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Парк Победы» - ст. «Солнцево»)
- 2 - участок Арбатско-Покровской линии (ст. «Парк Победы» - ст. «Славянский бульвар»)
- 3 - участок Коммунарской линии (ст. «Улица Новаторов» - ст. «Севастопольский проспект»)
- 4 - участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Деловой центр» - ст. «Третьяковская»)

Рис. 2.7 План линий Московского метрополитена

Для сооружений, расположенных на данных участках, были определены значения признаков $X_1 \div X_5$ (таблица 2.5) по выражениям (2.2) $\div$ (2.8). Рассмотрим особенности определения признаков на примере вертикальных стволов, горизонтальных (перегонных) тоннелей и станционных сооружений.

1. Вертикальные стволы.

Было рассмотрено несколько вертикальных стволов метрополитена различного назначения, построенных в период с 2007 года, а также запланированных к сооружению (рисунок 2.8). В ходе работы выявлены следующие особенности. Стволы глубиной от 34 до 73,5 м пересекали от 8 до 20 породных слоев. Диаметр стволов «вчерне» - от 6,3 до 8,5 м. В этой связи требуемая площадь вскрытия земной поверхности, с учетом потребности в сооружении дополнительных элементов в зависимости от принятой технологии (форшахты, фундаментов под ростверки, фундаментов под домкратную систему и т.д.) составляет от 123 до 269 м². Соотношение поперечных размеров к длине стволов составляет от 0,433 до 0,961. Объем сооружения составляет от 1775 до 4169 м³.

2. Горизонтальные (перегонные) тоннели.

Для целей исследования рассматривались однопутные перегонные тоннели (рисунок 2.9). Проходка осуществлялась с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов, отдельные участки на линиях глубокого заложения сооружались горным способом с применением буровзрывных работ. Диаметр тоннелей «вчерне» 6 м. Тоннели длиной от 950 м до 2725 м пересекали от 3 до 7 слоев с различными литолого-стратиграфическими и гидрогеологическими характеристиками. Требуемая площадь вскрытия земной поверхности для возможности механизированной проходки одного тоннеля с монтажом оборудования тоннелепроходческого комплекса составляет от 269 до 1013 м², в зависимости от объемно-планировочных характеристик и способа возведения монтажных камер (вертикальный ствол или открытый котлован).

3. Станционные сооружения.

Были рассмотрены станции мелкого (рисунок 2.9, а) и глубокого (рисунок 2.9, б) заложения. Количество пересекаемых геологических слоев - от 2 до 6.

Требуемая площадь вскрытия земной поверхности в зависимости от способа возведения станции (закрытый или открытый) и типа вскрывающей и обслуживающей выработки (вертикальный ствол или открытый котлован) – от 269 до 9450 м². Соотношение поперечных размеров станции к длине станции составляет от 1,01 до 1,47.

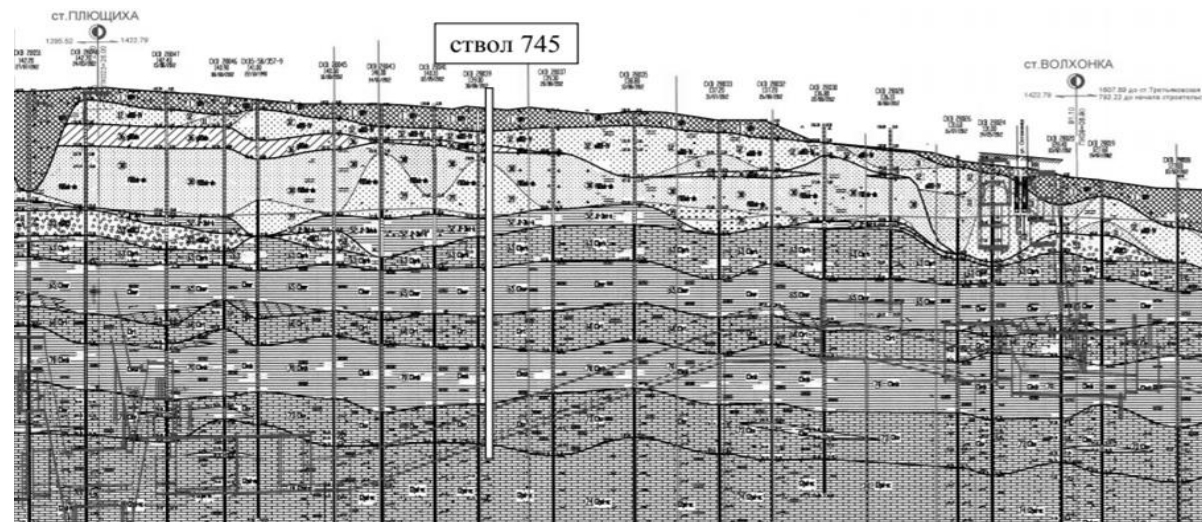
Определенные по выражениям (2.2)÷(2.8) значения признаков X1÷X5 сведены в таблицу 2.5.



Рис. 2.8 Продольные профили вертикальных стволов Московского метрополитена



а) Участок линии мелкого заложения от ст. «Раменки» до ст. «Ломоносовский пр.-т».



б) Участок линии глубокого заложения от ст. «Плющиха» до ст. «Волхонка».

Рис. 2.9

Таблица 2.5

№ п/п	Сооружение	Обозна- чение	X1	X2	X3	X4	X5
1	Ствол ш. 463 (ст. «Парк Победы»- ст. «Славянский бульвар»)	C1	0,2721	268,6663	0,7716	4168,6444	вертикальное
2	Ствол ш. 463а (ст. «Парк Победы»- ст. «Славянский бульвар»)	C2	0,2920	268,6663	0,4548	2134,2244	вертикальное
3	Ствол ш. 752бис (ст. «Минская – ст. «Парк Победы»)	C3	0,2098	208,5667	0,4358	2227,6940	вертикальное
4	Ствол ш. 748 (ст. «Дорогомиловская» - ст. «Деловой центр»)	C4	0,2985	268,6663	0,8465	3799,9888	вертикальное
5	Ствол ш. 749 (ст. «Дорогомиловская» - ст. «Деловой центр»)	C5	0,2353	208,5667	0,9164	1059,3230	вертикальное
6	Ствол ш. 754 (ст. «Минская – ст. «Парк Победы»)	C6	0,3175	122,6563	0,9003	3573,1238	вертикальное
7	Ствол ш. 745 (ст. «Волхонка» - ст. «Плющиха»)	C7	0,3036	208,5667	0,5564	1744,7674	вертикальное
8	Ствол ш. 746 (ст. «Волхонка» - ст. «Плющиха»)	C8	0,2676	268,6663	0,7988	4026,8538	вертикальное
9	Ствол ш. 747 (ст. «Дорогомиловская»-«Плющиха»)	C9	0,2639	208,5667	0,4327	2243,2723	вертикальное
10	Ствол ВШ (ст. «Академическая» - ст. «Севастопольский проспект»)	C10	0,2712	268,6663	0,9613	3346,2588	вертикальное
11	Перегонный тоннель от ст. «Раменки» до ст. «Ломоносовский проспект»	П1	0,0025	1 001	0,0233	34335,9	горизонтальное
12	Перегонный тоннель от ст. «Ломоносовский проспект» до ст. «Минская»	П2	0,0015	1 013	0,0104	77008,5	горизонтальное
13	Перегонный тоннель от ст. «Минская» до ст. «Парк Победы»	П3	0,0027	1 013	0,0127	62935,02	горизонтальное
14	Перегонный тоннель от ст. «Говорово» до ст. «Солнцево»	П4	0,0017	1 013	0,0154	51715,8	горизонтальное
15	Перегонный тоннель от ст. «Раменки» до ст. «Мичуринский проспект»	П5	0,0021	1 013	0,0198	40355,28	горизонтальное
16	Перегонный тоннель от ст. «Мичуринский проспект» до ст. «Очаково»	П6	0,0018	1 013	0,0131	61182,9	горизонтальное

17	Перегонный тоннель от ст. «Улица Строителей» до ст. «Академическая»	П7	0,0016	747	0,0116	68841,36	горизонтальное
18	Перегонный тоннель от ст. «Академическая» до ст. «Севастопольский проспект»	П8	0,0031	1005	0,0127	62821,98	горизонтальное
19	Перегонный тоннель от ст. «Плющиха» до ст. «Волхонка»	П9	0,0042	268,66625	0,0297	26847	горизонтальное
20	Перегонный тоннель от ст. «Дорогомиловская» до ст. «Плющиха»	П10	0,0019	268,66625	0,0268	29757,78	горизонтальное
21	Станция «Улица Строителей»	О1	0,0101	7400	1,6216	113664	горизонтальное
22	Станция «Академическая»	О2	0,0218	6875	1,7455	105600	горизонтальное
23	Станция «Новокосино»	О3	0,0154	8125	1,4769	124800	горизонтальное
24	Станция «Раменки»	О4	0,0132	9450	1,2698	145152	горизонтальное
25	Станция «Мичуринский проспект»	О5	0,0171	8750	1,3714	134400	горизонтальное
26	Станция «Говорово»	О6	0,0212	7075	1,6961	108672	горизонтальное
27	Станция «Ломоносовский проспект»	О7	0,0156	7856	1,658	135600	горизонтальное
28	Станция «Волхонка» *	31	0,0165	268,6663	1,2178	71460,800	горизонтальное
29	Станция «Плющиха»*	32	0,0161	208,5667	1,1895	73160,000	горизонтальное
30	Станция «Дорогомиловская»*	33	0,0150	268,6663	1,4750	59000,000	горизонтальное
31	Камера металлоконструкций (затвора) (ст. «Волхонка»-ст. «Третьяковская»)	34	0,0449	268,6663	1,2745	2523,8731	горизонтальное
32	Вентиляционная камера (ст. «Волхонка»)	35	0,0588	268,6663	1,6681	1928,3525	горизонтальное
33	Вентиляционная камера (ст. «Плющиха»)	36	0,0588	268,6663	1,6681	1928,3525	горизонтальное
34	ТПП-716 (ст. «Волхонка»)	37	0,0288	268,6663	0,5453	5898,4900	горизонтальное
35	ТПП-715 (ст. «Плющиха»)	38	0,0208	268,6663	0,5908	5444,7600	горизонтальное
36	Вентиляционная камера (ст. «Парк Победы» - ст. «Славянский бульвар»)	39	0,0732	122,6563	1,3833	2325,3663	горизонтальное
37	Эскалаторный тоннель ст. «Волхонка»	Э1	0,1400	400	1,5240	3808,1331	наклонное
38	Эскалаторный тоннель ст. «Плющиха»	Э2	0,1333	400	0,8467	6854,6396	наклонное
39	Эскалаторный тоннель ст. «Дорогомиловская»	Э3	0,1111	400	0,8467	6854,6396	наклонное
40	Эскалаторный тоннель ст. «Парк Победы»	Э4	0,1328	400	0,5953	9748,8208	наклонное

Вычисленные значения $X1 \div X4$ образуют дискретные вариационные ряды каждого признака. В целях предварительной проверки предположения о наличии характерных типов сооружений построим столбчатые гистограммы отдельно для количественных признаков $X1 \div X4$ (рисунок 2.10). Качественный признак $X5$ при этом обозначим следующим образом: вертикальное – 1, горизонтальное – 2, наклонное – 3.

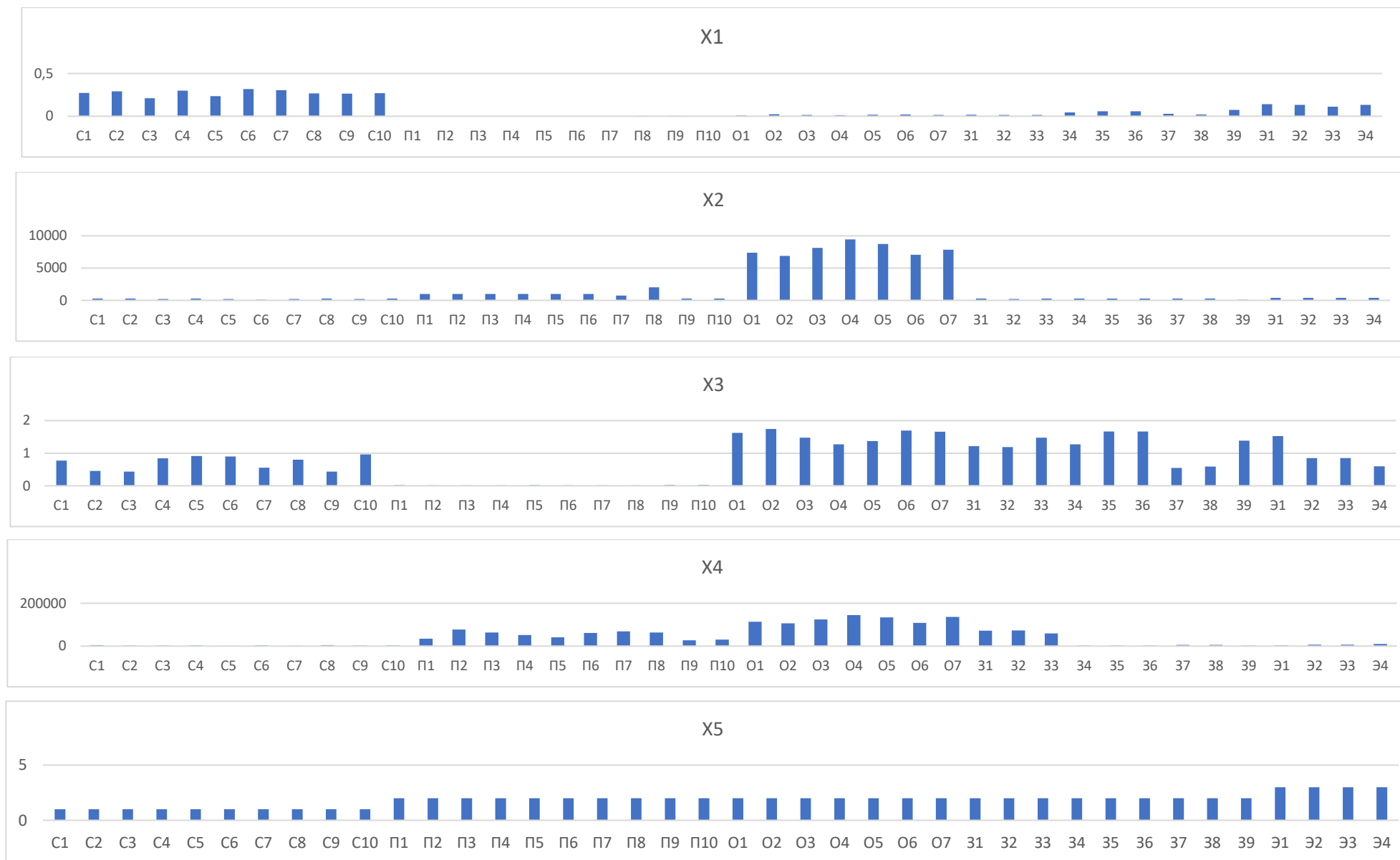
Из рисунка 2.10 очевидно, что в совокупности сооружений выделяются несколько групп в зависимости от признака. Однако для задачи формирования целостной картины классификации требуется разделение на основании всех признаков в целом, а не по каждому в отдельности. Для этого следует применить методы прикладной статистики. В теории классификации выделяется три подобласти: кластеризация (кластер-анализ) и группировка, статистический анализ классификаций, дискриминация (дискриминантный анализ) [98-102]. Для целей нашего исследования применим кластерный анализ.

Основная цель кластерного анализа в настоящем исследовании – выделить в исходных многомерных данных сооружений однородные подмножества сооружений, похожих друг на друга, и объекты из других групп. Под «похожестью» будем понимать близость объектов в многомерном пространстве признаков $X1 \div X5$. Тогда задача будет сводиться к выделению в пространстве признаков скоплений (кластеров) объектов, которые считаются однородными группами.

Кластерные методы, разработанные за последние 20 лет, разделяются на следующие группы [98-102]:

- 1) иерархические агломеративные методы;
- 2) иерархические дивизимные методы;
- 3) итеративные методы группировки;
- 4) методы поиска модальных значений плотности;
- 5) факторные методы;
- 6) методы сгущений;
- 7) методы, использующие теорию графов.

55

**Рис. 2.10 Распределение признаков X1÷X5**

Из группы кластерных методов наиболее часто на практике употребляются иерархические агломеративные методы, которые используют метрики расстояния d_{ij}^L ; d_{ij}^E ; d_{ij}^M для определения меры сходства между объектами. При этом расстояние (метрика) $d(x,y)$ между объектами в пространстве признаков должна удовлетворять аксиомам, определяющим сходство между объектами:

- 1) симметрия: $d(x,y) = d(y,x) \geq 0$
- 2) неравенство треугольника. Даны три объекта x, y, z и расстояния между ними удовлетворяют условию: $d(x,y) \leq d(x,z) + d(z,y)$
- 3) различимость нетождественных объектов: если $d(x,y) \neq 0$, то $x \neq y$.
- 4) неразличимость идентичных объектов: если $d(x,y) = 0$, то x и y идентичны.

Иерархические агломеративные методы в основе различаются по правилам (стратегиям) построения кластеров. Существует много различных стратегий создания кластеров, каждый из которых образует собственный иерархический метод: ближайшего соседа, дальнего соседа, средней невзвешенной связи, гибкий, агломеративное объединение и другие.

В работе применен кластерный анализ по иерархическому агломеративному методу с алгоритмом объединения «ближайший сосед» с евклидовым расстоянием (метрикой) d_{ij} (2.9):

$$d_{ij}^E = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2.9)$$

где d_{ij} - расстояние между объектами i, j , x_{ik} - значение k -го признака для i -го объекта; x_{jk} - значение k -го признака для j -го объекта.

Соответственно, представим данные таблицы 2.5 в качестве выборки из 40 наблюдений, представляющих собой сооружения из таблицы 2.5, описываемые пятью параметрами X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 . Для расчета результатов и визуализации кластеров использовался программный комплекс STATISTICA.

Результаты работы иерархических процедур оформим в виде дендрограммы (рисунок 2.10), по горизонтали которой показаны номера объектов $1 \div 40$, а по

вертикали значения межкластерных расстояний d_{ij} , при которых произошло объединение двух данных кластеров.

Проведенный кластерный анализ, в котором использовался алгоритм объединения «ближайший сосед» с евклидовой метрикой построения расстояний между объектами, показал, что данные структурно неплохо разделены на пять основных кластеров (рисунок 2.11), если процесс кластеризации остановить на уровне «схожести» порядка в $8 \cdot 10^9$ единиц.

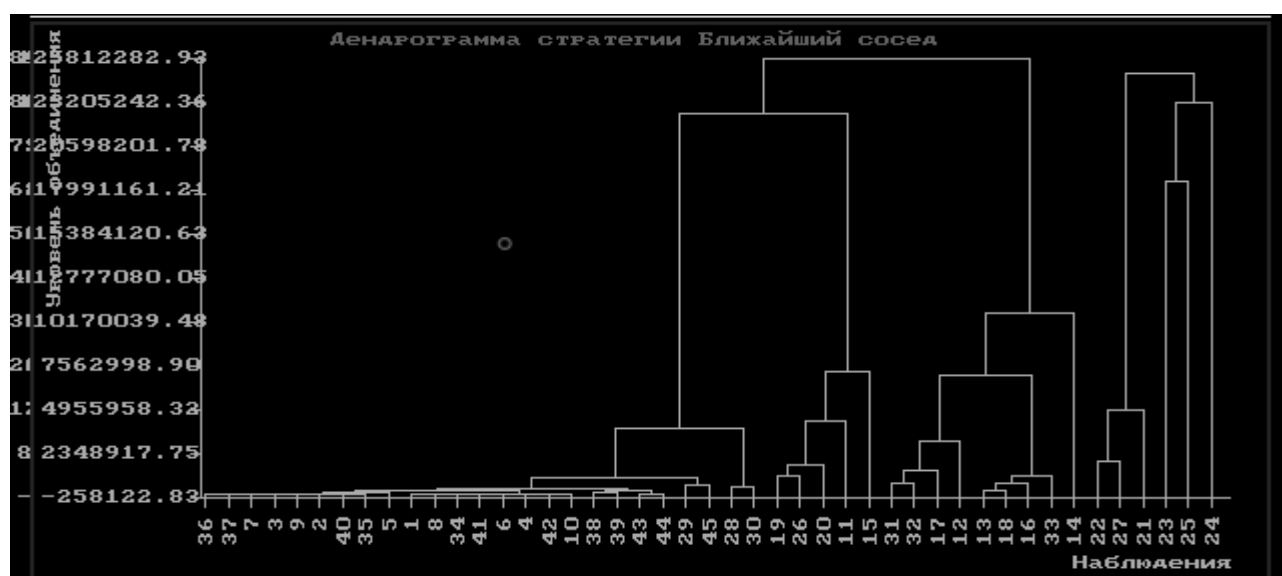


Рис. 2.11. Дендрограмма 1 кластерного анализа

Анализирую дендрограмму 1 объединения, заметно, что существуют устойчивые кластеры, состоящие из групп объектов с номерами: (21, 22, 23, 24, 25, 27); (12, 13, 14, 16, 17, 18, 31, 32, 33); (11, 15, 19, 20, 26) и (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 39, 40).

Проведем нормировку признаков X_2 и X_4 , пользуясь формулой $z = (x - \bar{x}) / \sigma$, где $\bar{x}$ - среднее значение признака, σ - среднее квадратическое отклонение признака. Получим таблицу 2.6, где преобразованные значения расположены в столбцах Z_2 и Z_4 .

Таблица 2.6

№ п/п	Группа	X1	Z2	X3	Z4	X5
1	C1	0,2721	-0,506	0,7716	-0,741	1
2	C2	0,2920	-0,506	0,4548	-0,789	1
3	C3	0,2098	-0,529	0,4358	-0,786	1
4	C4	0,2985	-0,506	0,8465	-0,749	1
5	C5	0,2353	-0,529	0,9164	-0,814	1
6	C6	0,3175	-0,562	0,9003	-0,755	1
7	C7	0,3036	-0,529	0,5564	-0,798	1
8	C8	0,2676	-0,506	0,7988	-0,744	1
9	C9	0,2639	-0,529	0,4327	-0,786	1
10	C10	0,2712	-0,506	0,9613	-0,760	1
11	П1	0,0025	-0,225	0,0233	-0,028	2
12	П2	0,0015	-0,221	0,0104	0,981	2
13	П3	0,0027	-0,221	0,0127	0,648	2
14	П4	0,0017	-0,221	0,0154	0,383	2
15	П5	0,0021	-0,221	0,0198	0,115	2
16	П6	0,0018	-0,221	0,0131	0,607	2
17	П7	0,0016	-0,323	0,0116	0,788	2
18	П8	0,0031	0,161	0,0127	0,646	2
19	П9	0,0042	-0,506	0,0297	-0,205	2
20	П10	0,0019	-0,506	0,0268	-0,136	2
21	O1	0,0101	2,228	1,6216	1,847	2
22	O2	0,0218	2,027	1,7455	1,657	2
23	O3	0,0154	2,506	1,4769	2,111	2
24	O4	0,0132	3,014	1,2698	2,592	2
25	O5	0,0171	0,276	1,3714	2,337	2
26	O6	0,0212	2,103	1,6961	1,729	2
27	O7	0,0156	-0,032	4,5116	-0,508	2
28	31	0,0165	-0,506	1,2178	0,850	2
29	32	0,0161	-0,529	1,1895	0,890	2
30	33	0,0150	-0,506	1,4750	0,555	2
31	34	0,0449	-0,506	1,2745	-0,779	2
32	35	0,0588	-0,506	1,6681	-0,793	2
33	36	0,0588	-0,506	1,6681	-0,793	2
34	37	0,0288	-0,506	0,5453	-0,700	2
35	38	0,0208	-0,506	0,5908	-0,710	2
36	39	0,0732	-0,562	1,3833	-0,784	2
37	Э1	0,1400	-0,456	1,5240	-0,749	3
38	Э2	0,1333	-0,456	0,8467	-0,677	3
39	Э3	0,1111	-0,456	0,8467	-0,677	3
40	Э4	0,1328	-0,456	0,5953	-0,609	3

Применим тот же алгоритм объединения «ближайший сосед» с евклидовой метрикой построения расстояний между объектами, представленными в таблице 2.6. Получим дендрограмму 2 (рисунок 2.12).



Рис. 2.12 Дендрограмма 2 кластерного анализа

Из рисунка 2.12 видно, что при уровне объединения порядка 0,42 хорошо отделены 5 групп объектов: 11-20, 21-27, 28-36, 37-40, 1-10. Данные группы соответствуют обозначениям наблюдений П1-П10, О1-О7, 31-39 и Э1-Э4, С1-С10 и сооружениям в таблице 2.5. При этом группа С1-С10 соответствует вертикальным стволам, П1-П10 – перегонным тоннелям, О1-О7 – станциям мелкого заложения, сооружаемым открытым способом, 31-39 – станциям глубокого заложения, сооружаемым закрытым способом, Э1-Э4 – эскалаторным тоннелям.

Таким образом, выполненный кластерный анализ подтверждает предположение о наличии характерных типов сооружений метрополитена.

На рисунке 2.13 представлена **типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена.**

Типологическая классификация сооружений метрополитена

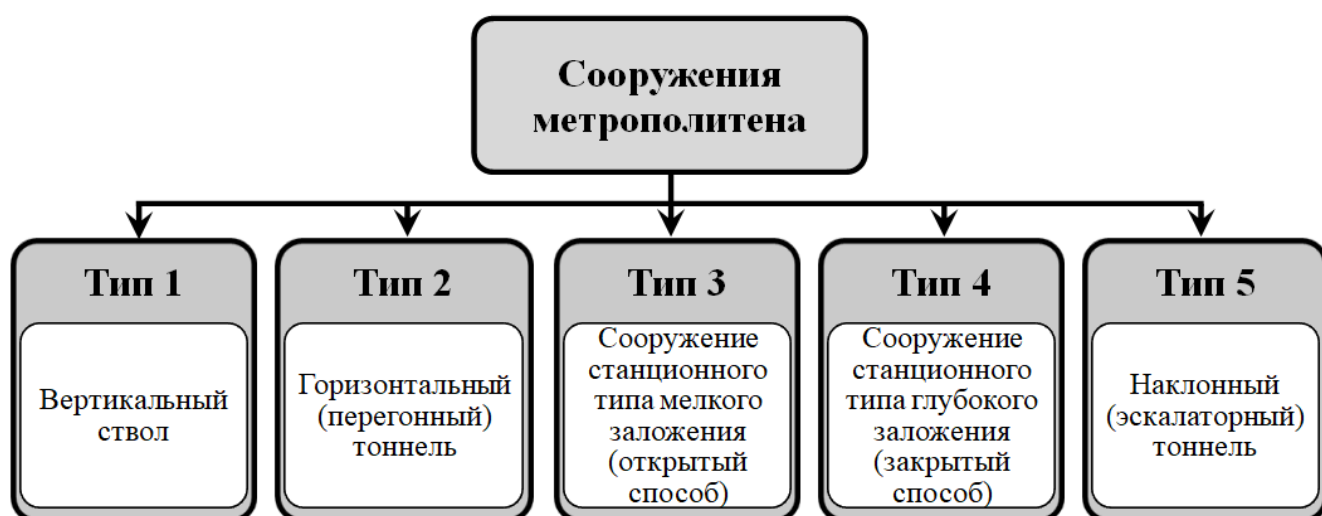


Рис. 2.13

2.3. Выводы по главе 2

1. Сценарии развития рискованных ситуаций характеризуются значительным разнообразием с точки зрения первопричин (рискообразующих факторов), развития дальнейших событий (проявления рискованной ситуации) и последствий и обладают индивидуальностью, обусловленной спецификой объектов метрополитена, на которых они локализуются.

2. Составляющие геотехнического риска (рискованной ситуации) включают причины (рискообразующие факторы), проявления (проявления рискованной ситуации), последствия. Для анализа составляющих геотехнических рисков необходимо глубокое изучение их состава, свойств, природы возникновения, жизненного цикла, принципов формирования связей путем разделения на определенные группы посредством определения существенных признаков (классификация).

3. Создание адаптированной классификации геотехнических рисков, отражающей специфику конкретных сооружений метрополитена и

предназначенной для решения конкретных задач строительства метрополитена, позволит с достаточной степенью достоверности произвести идентификацию рискообразующих факторов, рискованных ситуаций и возможных последствий для целей последующего анализа.

4. Общие принципы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена включают отдельное классифицирование по трем направлениям составляющих геотехнического риска (факторы, проявления, последствия), многоуровневую структуру классификации, учет специфики природно-техническую геосистемы (ПТГС) при назначении критериев второго и последующих уровней и выбора классификационной группы. При этом основанием первого уровня классификации проявления рискованных ситуаций должен быть тип строящегося сооружения метрополитена согласно типологии.

5. Сооружения метрополитена представляют собой отдельное множество подземных объектов, обладающих рядом особенностей, присущих, с одной стороны принадлежностью к природно-технической геосистеме (ПТГС), а с другой – к транспортной системе метрополитена.

6. Для сложной системы метрополитена необходима типологическая классификация (типология) сооружений на основании наиболее характерных признаков. При этом установлены две группы классификационных признаков с учетом особенностей природно-технической геосистемы: 1 – признаки, зависящие от технологии строительства сооружения, 2 – признаки, зависящие от объемно-планировочных и конструктивных особенностей сооружения. К первой группе признаков отнесены технологические масштабы вскрытия земной поверхности и пересечения геологических слоев, ко второй группе отнесены характеристики продольных и поперечных размеров, объем сооружаемых конструкций, пространственное положение в породном массиве. Процесс типологической классификации представляется в виде **кластерной модели типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена.**

7. Типология сооружений метрополитена заключается в выделении в исходных многомерных данных сооружений однородных подмножеств основных

групп (типов) методом кластерного анализа на основании признаков, установленных в кластерной модели типологической классификации.

8. Установленная кластерным анализом типология подтверждают предположение о наличии характерных типов сооружений метрополитена и позволяет определить основание первого уровня классификации геотехнических рисков для дальнейшей идентификации при анализе и оценке.

По результатам исследования сформулировано **первое научное положение диссертации**, выносимое на защиту:

«Типологическая кластерная модель, устанавливающая основные признаки многомерных данных однородных подмножеств и выделяющая их в основные группы (типы) объектов метрополитена, позволяет определить основание первого уровня классификации геотехнических рисков для их дальнейшей идентификации».

3. КЛАССИФИКАЦИИ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОБЪЕКТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

3.1 Классификация рискообразующих факторов

Учитывая сформулированные в Главе 2 принципы классификации, форма классификации рискообразующих факторов Φ (RF - *risk factor*) будет иметь следующий вид (рисунок 3.1). Рискообразующий фактор в данной классификации может являться отдельной причиной проявления рискованной ситуации (простой фактор) (выражения 3.1, 3.2). Например, «1. Наличие зон тектонических разломов», «16. Землетрясение», «18. Взрыв». Либо представлять собой обобщенную формулировку для комплекса причин (сложный фактор) (выражение 3.3). Например, фактор «19. Климатические явления» объединяет в себе такие возможные явления как ливни, ураганы, цунами, таяние снегов и и.д. Фактор «44. Нарушение технологии разработки грунта котлована» включает возможность возникновения отдельного нарушения или целого комплекса: увеличение глубины разработки грунта без установки яруса крепления по сравнению с проектом, уменьшение ширины берм, переборы грунта ниже проектной отметки и т.д.

$$\Phi-1 \text{ (отдельная единственная причина): } \Phi_1 = \text{const} \quad (3.1)$$

$$\Phi-19 \in [\Phi^1_{19}; \Phi^2_{19}; \Phi^3_{19}; \dots; \Phi^i_{19}] \quad (3.2)$$

- 1 вариант (строгая дизъюнкция):

$\Phi-19$ (отдельная причина из возможного комплекса):

$$\Phi^1 \vee \Phi^2_{19} \vee \Phi \vee \Phi^i_{19} \quad (3.3)$$

- 2 вариант (конъюнкция):

$\Phi-19$ (совокупность причин из возможного комплекса):

$$\Phi-19: \Phi^1_{19} \wedge \Phi^3_{19} \wedge \Phi^5_{19} \wedge \dots \wedge \Phi^i_{19} \quad (3.4)$$

1. Классификация рискообразующих факторов Ф				
Критерий			Характеристика	Соответствующие рискообразующие факторы (номер фактора)
№	Наименование	Группа		
1	По среде источника возникновения	внешние	Источник находится за пределами строящего сооружения	1-11, 14-22, 54,55,59-63, 69
		внутренние	Источник находится в пределах строящего сооружения	12,13, 23-53, 56-58,62-65-68, 69
2	По источнику возникновения	породный массив	Источником возникновения является породный массив	1-11, 14, 15, 36
		окружающая среда	Источником возникновения является окружающая среда	16, 18-20, 59-61
		оборудование	Источником возникновения является оборудование	54, 55
		сооружение	Источником возникновения является сооружение	62, 63
		человек	Источником возникновения является человеческая деятельность	12, 13, 21-35, 37-53, 56-58, 64-69
3	По природе фактора	природные	Вызванные природными явлениями и объектами	1-11, 14-20
		техногенные	Вызванные наличием и влиянием сооружений, транспорта, коммуникаций, технологий и т.д.	17, 18, 21, 22, 36, 54, 55, 59-61, 62, 63
		человеческие	Вызванные деятельностью человека	12, 13, 9, 17, 18, 23-35, 37-53, 56-58, 64- 69
4	По структуре фактора	простые	Содержит отдельную единственную причину	1-6, 8, 9, 14, 16-18, 27, 28, 34, 38, 40-42, 44, 48, 49, 57, 58, 60-63, 67
		сложные	Может содержать совокупность причин из возможного комплекса или отдельную причину из возможного комплекса	7, 10-13, 15, 19-26, 29-33, 35-37, 39, 43, 47, 50-56, 59, 64-66, 68, 69
5	По возможности влиять на возникновение других факторов (реализация каскада геотехнических рисков)	влияют		1-69
		не влияют		-
6	По возможности становиться проявлением рисков ситуации	да		14, 15, 17, 18, 36, 38, 41, 42, 52-54, 56-58
		нет		1-13, 16, 19-35, 37, 39-40, 43-51, 55, 59-69
Рискообразующие факторы (Ф)				
№	Наименование			

- 1 Наличие зон тектонических разломов
- 2 Наличие зон разуплотненных пород
- 3 Наличие зон обводненных пород
- 4 Наличие зон слабых пород
- 5 Наличие зон пучащих пород
- 6 Наличие зон валунных включений
- 7 Наличие зон структурных особенностей и ослаблений породного массива (трещиноватость, неоднородность, рассланцевание и т.д.)
- 8 Наличие зон карстово-суффозионных процессов
- 9 Наличие зон газовыделения из породного массива в сооружение
- 10 Наличие напорных водоносных пластов, значительных водопритоков в сооружение и проницаемых грунтов
- 11 Взаимное расположение продольной оси сооружения по отношению к направлению падения пластов пород массива (в т.ч. мощность, ориентация пластов)
- 12 Недостаточный учет/недостаточность данных при проектировании параметров напряженно-деформированного состояния массива
- 13 Недостаточный учет/недостаточность данных для учета при проектировании реологических и фильтрационных свойства массива
- 14 Вывалы и обрушения пород
- 15 Прорывы воды, затопления
- 16 Землетрясения
- 17 Пожары
- 18 Взрывы
- 19 Климатические явления (ливни, ураганы, цунами, таяние снегов и и.д.)
- 20 Особенности рельефа (зоны эрозионных процессов, курумы, оползни и т.д.)
- 21 Наличие непредвиденных ранее построенных заглубленных и подземных сооружений (подвалы, колодцы, топлиохранилища автозаправочных станций, коммуникации, скважины, элементы опор и т.д.)
- 22 Наличие непредвиденных техногенных включений (боеприпасы, строительный мусор, зоны захоронений отходов, зоны цементации грунта и т.д.)
- 23 Ошибки при выборе модели грунта и ее параметров при геотехнических расчетах работы сооружений
- 24 Ошибки при проектировании конструкции временной крепи, ограждающих конструкций котлованов, распорных и анкерных систем котлованов, свайных ростверков
- 25 Ошибки при проектировании конструкции постоянной обделки и постоянных конструкций сооружения
- 26 Ошибки при проектировании технологии и конструкции сооружения в зоне ранее построенных и эксплуатируемых сооружений метрополитена и подземных сооружений (неучет зоны влияния буровзрывных работ, вибрационного воздействия, наличия пустот и разуплотненных грунтов и т.д.)
- 27 Ошибки при проектировании формы сечения сооружения
- 28 Ошибки при проектировании технологии строительства сооружения
- 29 Ошибки при проектировании специальных способов подготовки массива (замораживание, тампонирующее пород, водопонижение, кондиционирование грунта и т.д.)
- 30 Ошибки при проектировании трассы сооружения, определения места заложения сооружения
- 31 Ошибки при проектировании параметров пригруза ТПК* и СПМК** (грунтового, пеногрунтового, бентонитового, гидропригруза, пневмопригруза)

- 32 Ошибки маркшейдерского сопровождения проходки, навигации ТПМК, СПМК
- 33 Ошибки при проектировании устройства защиты и усиления зданий и сооружений в зоне строительства объектов метрополитена
- 34 Недостаточный учет при проектировании технологической осадки при прогнозировании деформаций оснований окружающей застройки
- 35 Недостаточные объемы при проектировании геотехнического мониторинга и опережающего исследования массива при строительстве
- 36 Процессы морозного пучения и оседания при искусственном замораживании грунтов
- 37 Несоблюдение параметров пригруза (грунтового, пеногрунтового, бентонитового, гидропригруза, пневмопригруза)
- 38 Смещение проектной трассы или продольной оси сооружения
- 39 Нарушения при выполнении геотехнического мониторинга и опережающего исследования массива при строительстве
- 40 Недостаточный объем и качество инженерно-геологических изысканий
- 41 Переборы при выполнении операции разработки грунта при технологии ТПМК, СПМК
- 42 Переборы при выполнении операции разработки грунта горным способом
- 43 Несоблюдение конструктивных решений сооружения (конструкции обделки, временной крепи, ограждающих конструкций, грунтоцементного массива монтажного и демонтажного котлованов ТПМК, применение стальной арматуры вместо стеклопластиковой/попадание стальных стержней в сечение ротора в торцевой стенке монтажной/демонтажной камере ТПМК и т.д.)
- 44 Нарушение технологии разработки грунта котлована
- 45 Нарушение технологии возведения временной крепи (нарушения последовательности и технологического процесса возведения, некачественное крепление/распор в породе элементов, недостаточное усилие при натяжении анкеров, опоздание возведения затяжки и т.д.)
- 46 Нарушение технологии возведения постоянной обделки, конструкций сооружения (нарушения последовательности и технологического процесса возведения, режимов работы домкратов ТПМК, СПМК, опускной крепи стволов, нарушение при бетонировании и устройстве стыков ограждающих стен котлована и т.д.)
- 47 Нарушение технологии возведения ограждающих конструкций котлованов (нарушение бетонирования секций «стены в грунте», буронабивных свай, опоздание или отсутствие возведения межсвайной затяжки, некачественное выполнение элементов и соединений распорного крепления, несоблюдение параметров анкерного крепления и т.д.)
- 48 Нарушение технологии устройства гидроизоляции
- 49 Нарушение технологии заполнения заобделочного пространства
- 50 Нарушение технологии проходки и строительно-монтажных работ
- 51 Нарушение технологии при применении специальных способов подготовки массива (замораживание и оттаивание, тампонирующее пород, водопонижение, кондиционирование грунта и т.д.)
- 52 Нарушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)
- 53 Выход из строя и неисправности в работе проходческого и строительного оборудования и инженерных систем по причине несвоевременного выполнения ремонтных и сервисных работ, а также нарушения промышленной безопасности
- 54 Выход из строя и неисправности в работе проходческого и строительного оборудования и инженерных систем по внешним причинам
- 55 Отключение систем внешнего обеспечения строительства (электропитание, водоснабжение, водоотведение)
- 56 Разрушение/повреждение водонесущих подземных коммуникаций и сооружений (водопровод, канализация, дренаж, теплотрасса и т.д.) при строительстве
- 57 Разрушение/повреждение газонесущих подземных коммуникаций и сооружений при строительстве

58	Разрушение/ повреждение топливнонесущих подземных коммуникаций и сооружений при строительстве
59	Разрушение/повреждение водонесущих подземных коммуникаций и сооружений (водопровод, канализация, дренаж, теплотрасса и т.д.) по внешним причинам
60	Разрушение/повреждение газонесущих подземных коммуникаций и сооружений по внешним причинам
61	Разрушение/ повреждение топливнонесущих подземных коммуникаций и сооружений по внешним причинам
62	Коррозия металлических элементов конструкций
63	Коррозия бетона/железобетона конструкций
64	Нарушения при устройстве защиты и усиления зданий и сооружений в зоне строительства объектов метрополитена
65	Нарушения и ошибки при реализации функций управления строительно-монтажными работами
66	Недостаточный учет влияния действующих сооружений (в т.ч. вибрационное воздействие поездов железнодорожной ветки, действующей ветки метро, автодорожного тоннеля и т.д.)
67	Недостаточный входной контроль применяемых строительных материалов, конструкций, вспомогательных технологических материалов
68	Недостаточный контроль при производстве и допущение низкого качества строительных материалов, конструкций, вспомогательных технологических материалов
69	Человеческий фактор (физиологические, психологические, личностные свойства человека)
* - ТПМК – тоннелепроходческий механизированный комплекс.	
** - СПМК – стволпроходческий механизированный комплекс.	

Рис. 3.1 Классификация рискообразующих факторов Ф

Важно отметить, что, например, факторы «1. Наличие зон тектонических разломов», «2. Наличие зон разуплотненных пород» являются внешними факторами, которые могут быть известны на этапе проектно-изыскательских работ, однако именно их наличие обуславливает ряд аварийных ситуаций. В то же время внутренний фактор «40. Недостаточный объем и качество инженерно-геологических изысканий» может означать отсутствие информации о вышеуказанных факторах из-за некачественных и недостаточных объемов работ на этапе инженерно-геологических изысканий. При таком взаимовлиянии факторы 1 и 2 могут приводить к большему количеству проявлений и последствий рискованных ситуаций, а также большей величине ущерба при реализации последствий. По критерию классификации «5. По возможности влиять на возникновение других факторов (реализация каскада геотехнических рисков)» все рискообразующие факторы не являются изолированными явлениями и могут быть отнесены группе влияющих.

В настоящей работе введем понятие **каскада геотехнических рисков (КГТР)**, как совокупности рискованных ситуаций, последовательное или параллельное проявление которых при проведении работ по возведению подземного сооружения приводит к неблагоприятному сценарию протекания аварийной ситуации/инцидента с включением в следующий этап развития аварии/инцидента новых элементов строительства подземного сооружения и расширением зоны (площади) аварии/инцидента [117]. Таким образом, можно говорить о начале КГТР еще на этапе формирования рискообразующих факторов (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 (на примере схемы возможного КГТР при строительстве сооружений Типа 2) представлены переходы от одного уровня стадии рискообразующих факторов к другому (уровни 1÷3). Видно, что рискообразующий фактор 2-го уровня с одной стороны может провоцировать самостоятельное проявление рискованной ситуации на 1-ом уровне, а с другой – являться причиной формирования рискообразующего фактора 3-го уровня, который в свою очередь провоцирует собственные проявления.

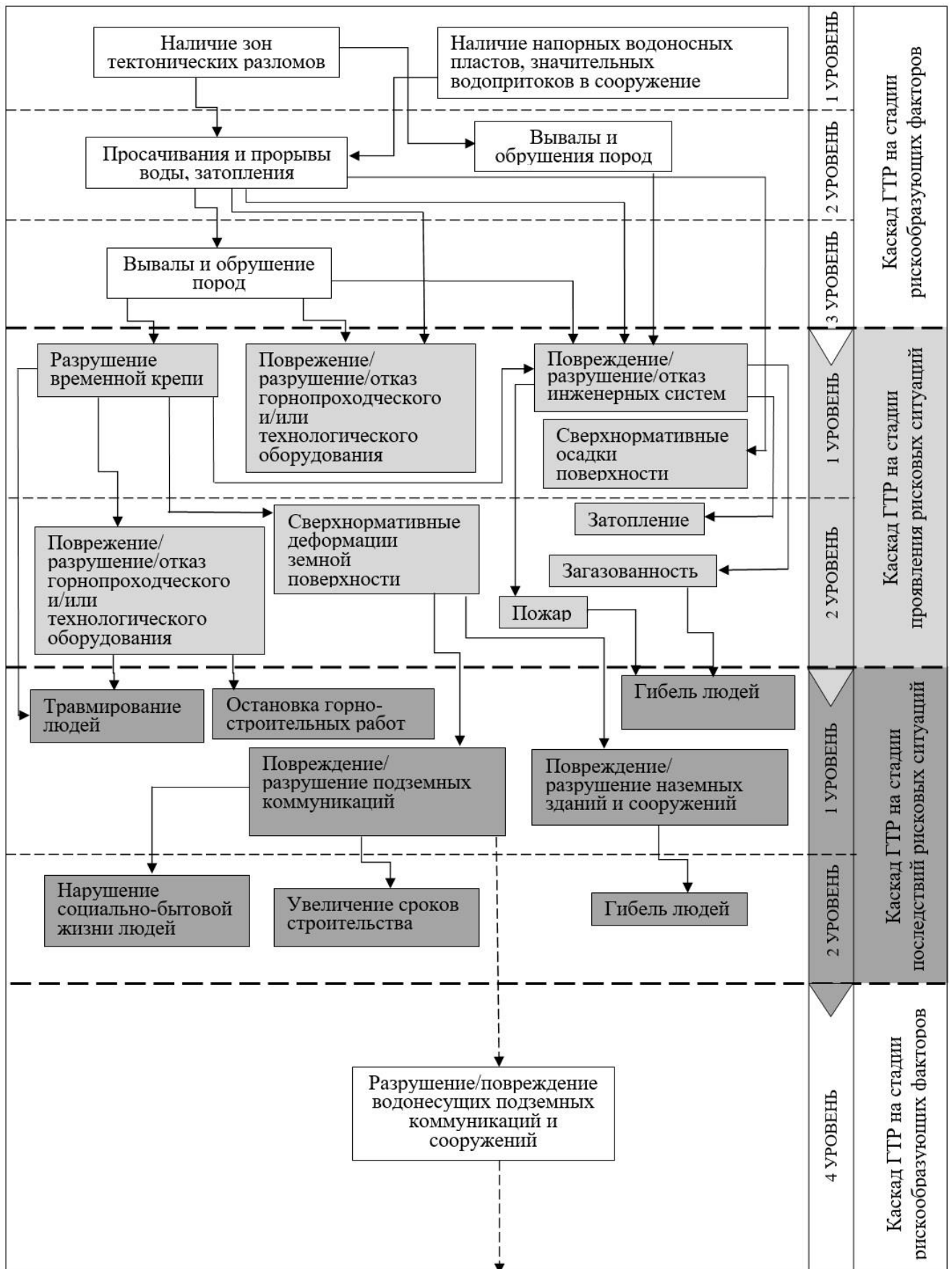


Рис. 3.2. Пример схемы возможного КГТР

На стадии КГТР проявления рискованных ситуаций наблюдается схожая картина перехода с одного уровня на другой при развитии рискованной ситуации. При этом хронология может характеризоваться как последовательным, так и параллельным течением событий. На стадии КГТР наступления последствий может возникать явление преобразования последствия рискованной ситуации в рискообразующий фактор и начало формирования нового КГТР. Возможные сочетания составляющих на разных уровнях образуют сценарии с траекториями движения от составляющей к составляющей по уровням каскада. Представленная каскадная схема имеет отличия от древовидной структуры событий, исходящих от единственного инициирующего события с дальнейшим разветвлением на взаимоисключающие последовательности событий. Каскадная схема имеет более сложную структуру, чем дерево событий. Можно заметить, что она представляет собой совокупность деревьев событий, которые являются **сценарными траекториями КГТР** с различными вероятностями реализации. Дополняя схему на рисунке 3.2 шифрами составляющих согласно классификационным таблицам из настоящей диссертации, получаем адаптированную классификационную схему КГТР (рисунок 3.3). На рисунках 3.4÷3.6 изображены примеры сценарных траекторий для КГТР рисунка 3.3.

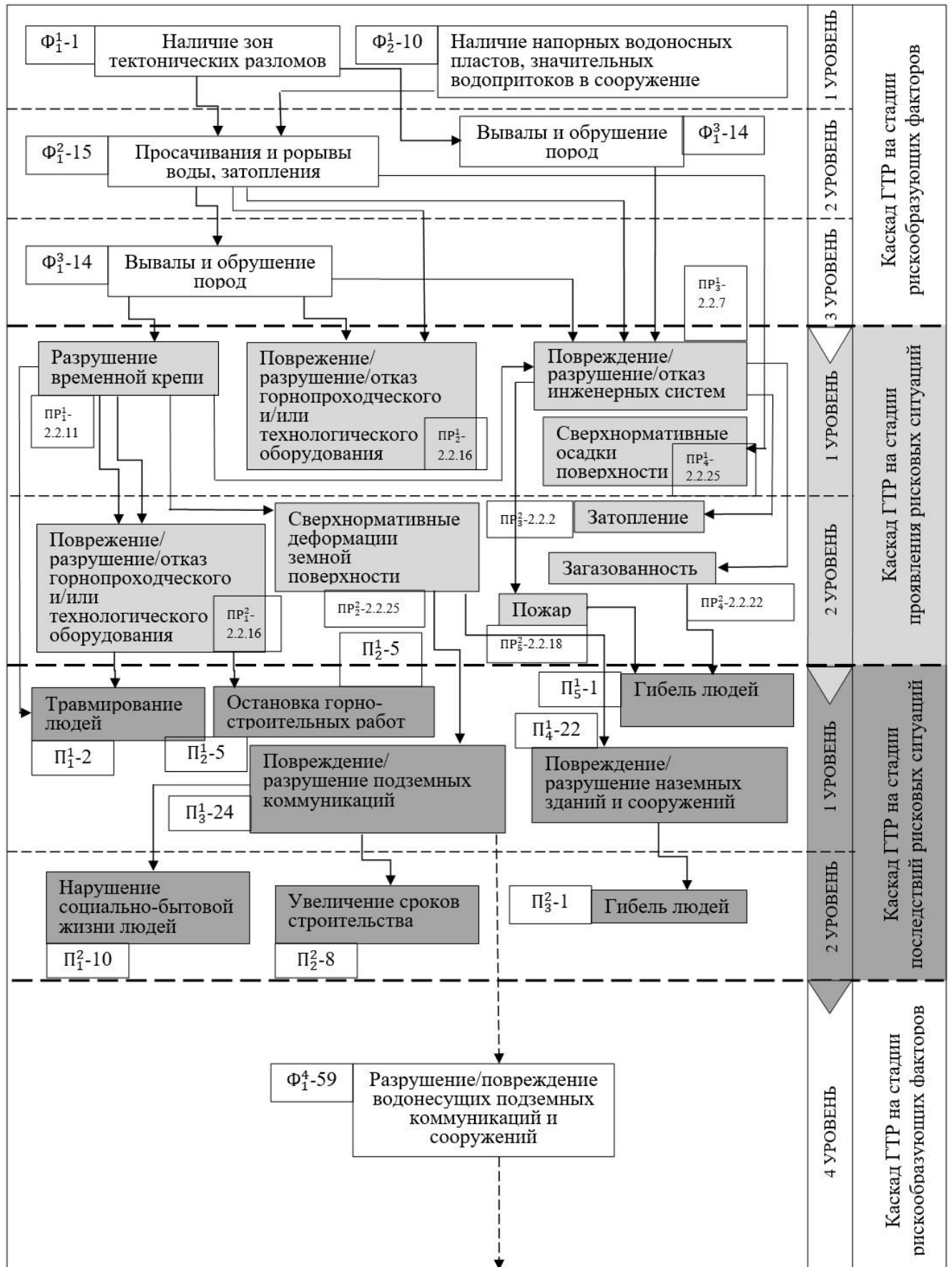


Рис. 3.3. Пример адаптированной для классификаций схемы КГТР

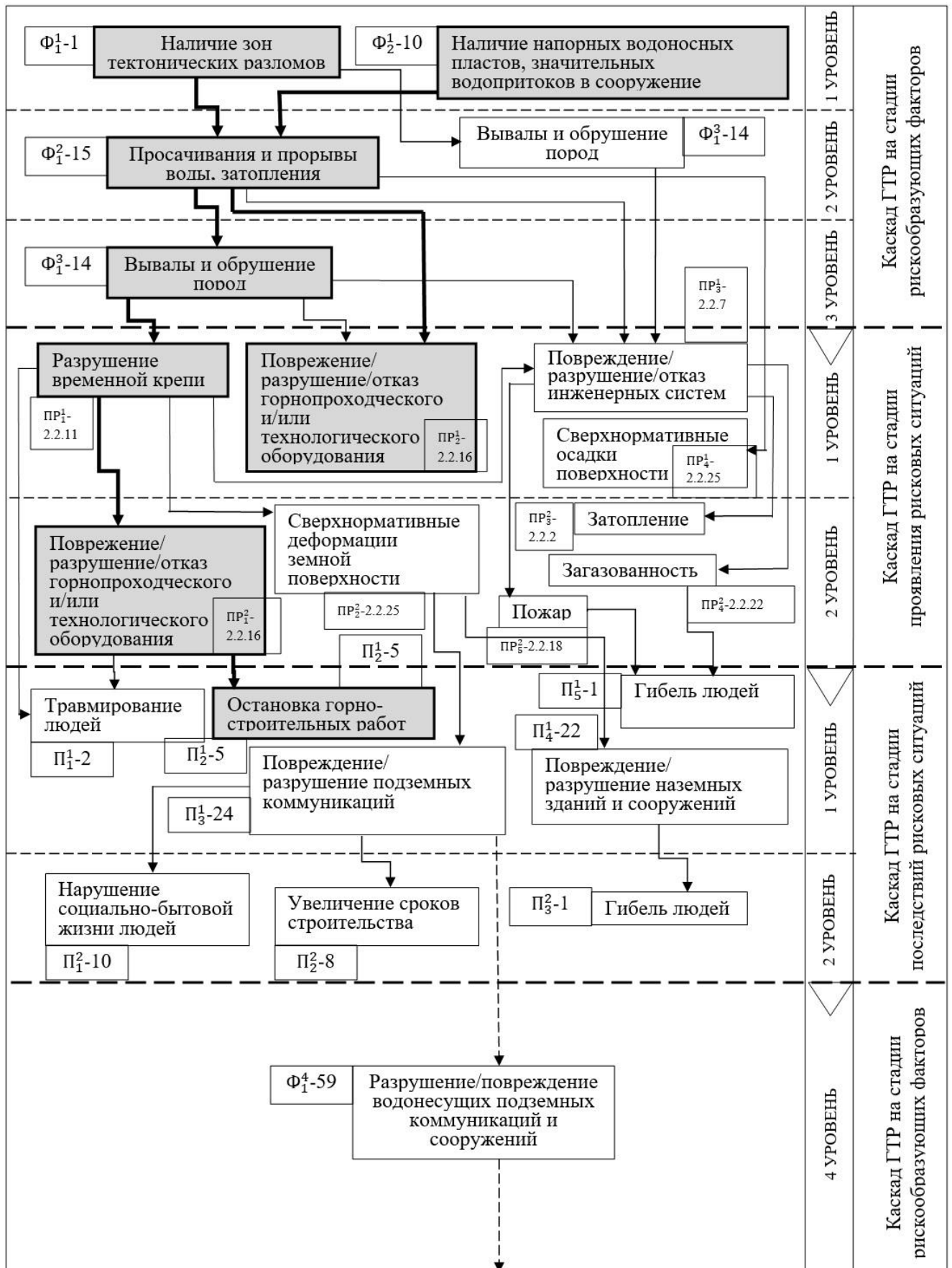


Рис. 3.4 Схема сценарной траектории (СТ-1) КГТР на рисунке 3.3

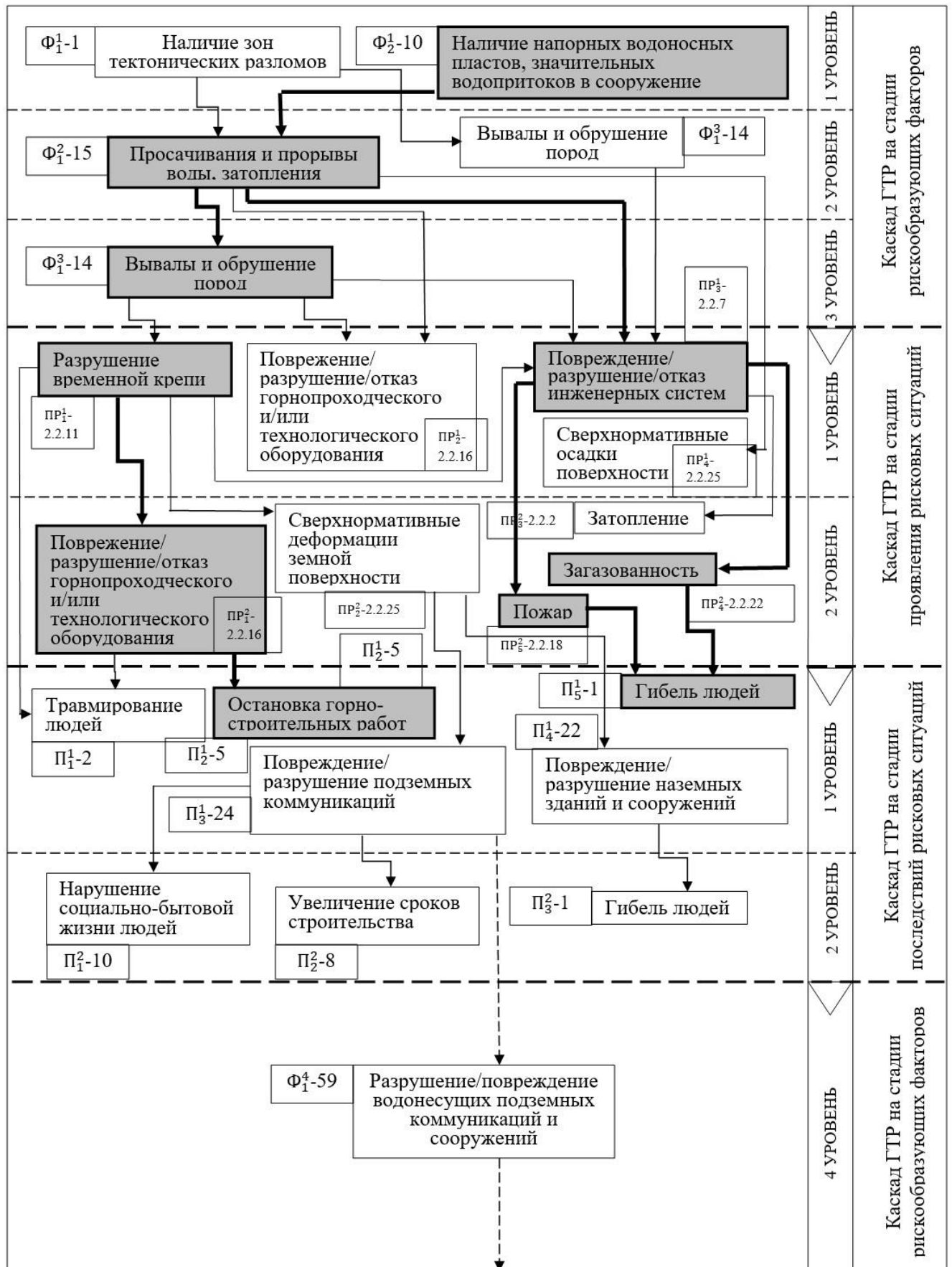


Рис. 3.5 Схема сценарной траектории (СТ-2) КГТР на рисунке 3.3

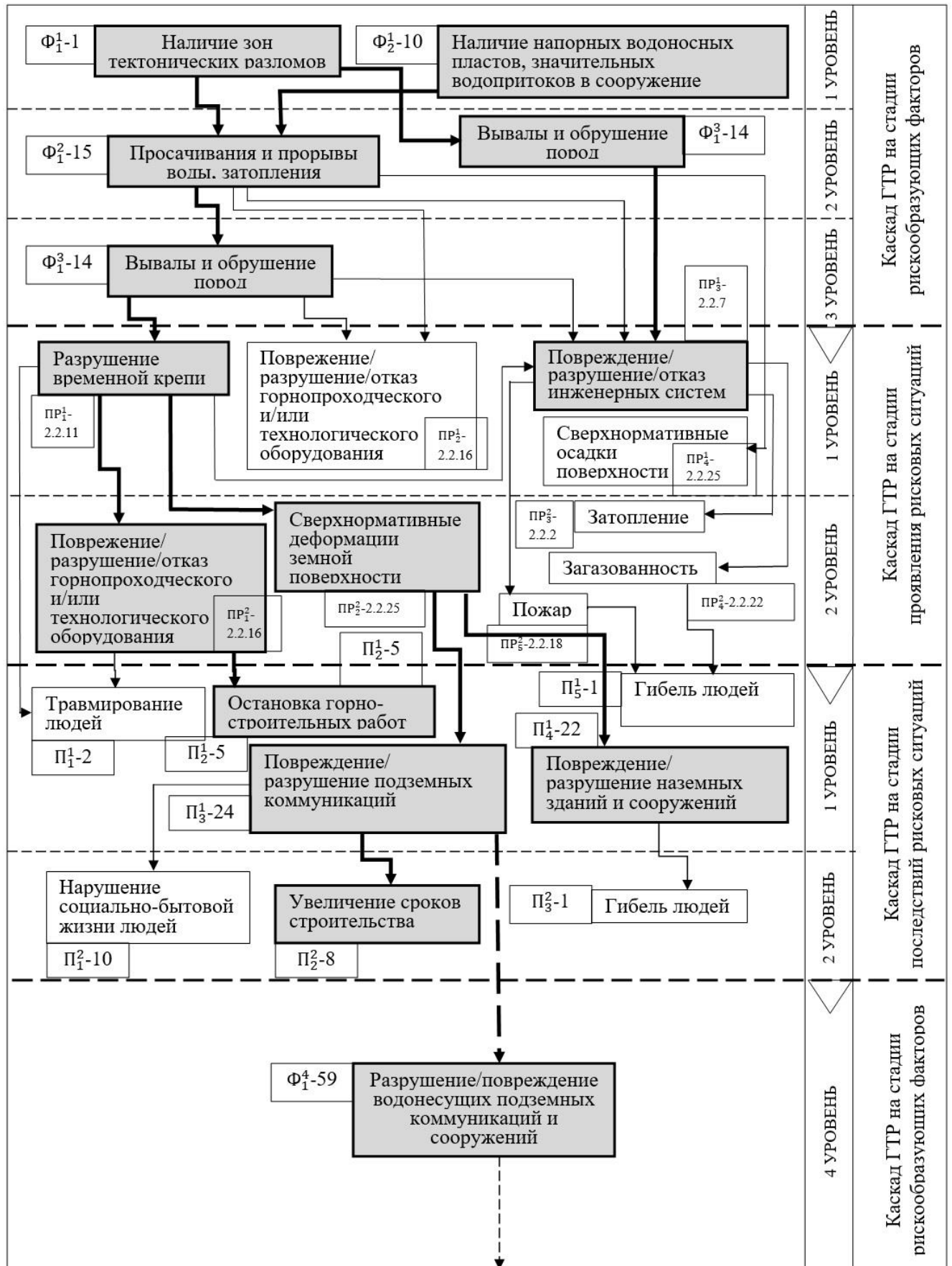


Рис. 3.6 Схема сценарной траектории (СТ-3) КГТР на рисунке 3.3

Следует отметить, что явление преобразования одной составляющей геотехнического риска в другую отличает ПТГС от других техногенных систем (объекты химической, перерабатывающей, нефте- и газодобывающей промышленности, объекты транспортной инфраструктуры, электрораспределительные предприятия и т.д.) с точки зрения основного передающего элемента окружающей среды, а также возможности своевременной локализации аварии (барьеры, оповещение, отключения и т.д.). В случае аварии, например, на заводе, основной передающий элемент – это атмосфера (взрывное и тепловое воздействия, осколки, выбросы аварийно-химически опасных веществ). В случае ПТГС основным элементом окружающей среды, испытывающим изменения и влияние риска от функционирования системы «массив – технология - подземное сооружение - окружающая среда», является породный массив (рисунок 3.7). Литосфера (породный массив) передает влияние риска далее на следующие элементы ПТГС [129]. Похожая ситуация может складываться, например, при авариях на гидроэлектростанциях, где передающей средой является гидросфера водохранилищ.

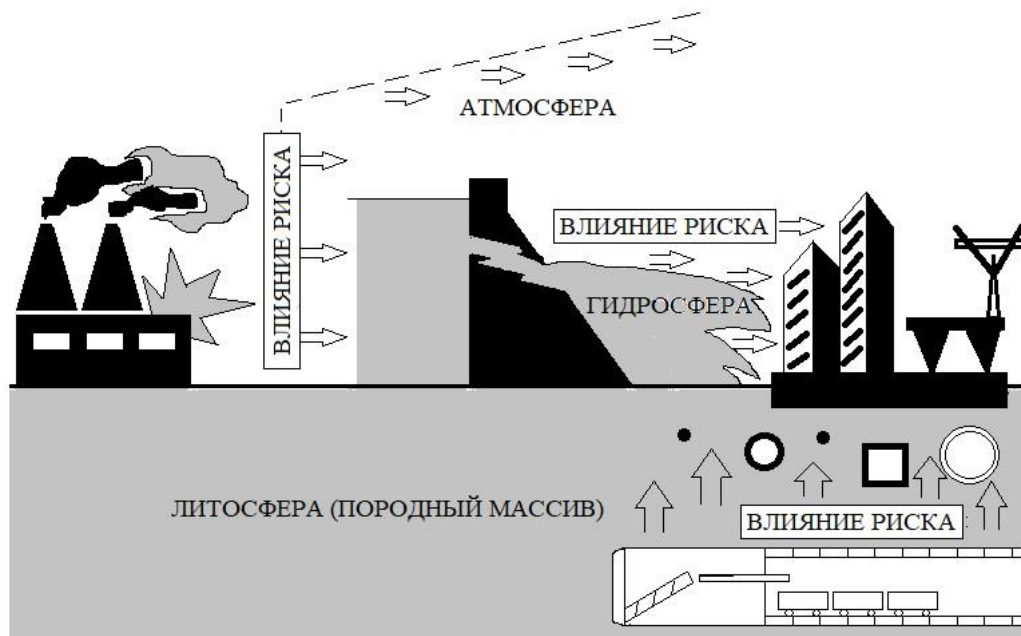


Рис. 3.7 Передающие риск элементы природной среды

Таким образом, можно сказать, что массив является основным звеном, распространяющим и преобразовывающим составляющие геотехнического риска. В породном массиве располагаются коммуникации, фундаменты здания и сооружений, эксплуатируемые подземные сооружения, испытывающие влияние риска и становящиеся следующим элементом каскада.

Анализ схемы КГТР на рисунке 3.2 указывает на возможность прогнозировать каскадный сценарий развития рискованной ситуации, для чего важно уметь составлять подобные причинно-следственные схемы на этапе качественного анализа при оценке риска.

3.2 Классификация проявлений рискованной ситуации

Форма классификаций проявлений рискованной ситуации ПР (MRS – manifestation of risk situation) для выделенных типов сооружений будет иметь следующий вид (рисунок 3.8). На рисунке представлена форма классификации для сооружения Тип 1. Для остальных типов сооружений формы классификаций представлены в Приложении № 1 к настоящей работе. Характер происшествия (авария, инцидент) в ходе проявления рискованной ситуации указан в соответствии со определением, приведенным в Федеральном законе от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»:

В таблицах классификаций в каждой классификационной группе проявлению рискованной ситуации присвоен собственный цифровой шифр. Например, по характеру происшествия – 1.1.1 (инцидент), по виду проявления – 1.2.5 (обрушение грунта вертикального ствола), по месту проявления – 1.3.5 (в забое ствола). Таким образом, каждому проявлению рискованной ситуации при строительстве метрополитена будет соответствовать минимум четыре различных переменных критерия. В-первых, это тип строящегося сооружения. Во-вторых, это характер происшествия в ходе проявления рискованной ситуации. В-третьих, это конкретный вид проявления с возможным дальнейшим разделением. В-четвертых, это место

локализации проявления рискованной ситуации. На основании данных критериев экспертом создается вербальная формулировка, которая характеризует проявление в целом (таблица 3.1, а, б).

Таблица 3.1

а)

Критерии	1	1.1	1.2	1.3
Наименование	<i>По типу сооружения</i>	<i>По характеру происшествия</i>	<i>По виду проявления</i>	<i>По месту локализации</i>
Значение (по группе классификации)	1	1.1.1	1.2.5	1.3.5
Расшифровка	<i>вертикальный ствол</i>	<i>инцидент</i>	<i>обрушение грунта</i>	<i>в забое</i>
Вербальная формулировка проявления	<i>Проявление рискованной ситуации - инцидент в ходе обрушения грунта в забое ствола</i>			
Формальная запись проявления	$PR_i(1; 1.1; 1.2; 1.3) \rightarrow PR_i(1; 1.1.1; 1.2.5; 1.3.5)$			

б)

Критерии	2	2.1	2.2	2.2.3	2.3	2.3.3
Наименование	<i>По типу сооружения</i>	<i>По характеру происшествия</i>	<i>По виду проявления</i>	<i>По виду разрушения /повреждения</i>	<i>По месту локализации</i>	<i>По точке/ зоне локализации</i>
Значение (по группе классификации)	2	2.1.2	2.2.10	2.2.10.3	2.3.3	2.3.3.1, 2.3.3.3
Расшифровка	<i>горизонтальный (перегонный) тоннель</i>	<i>авария</i>	<i>повреждение/ разрушение постоянной обделки</i>	<i>вывалы, отделение от породы частей монолитной конструкции</i>	<i>Протяженная часть</i>	<i>свод, косые диаметры</i>
Вербальная формулировка проявления	<i>Проявление рискованной ситуации – авария в ходе разрушения монолитной железобетонной постоянной обделки протяженной части строящегося перегонного тоннеля в виде вывалов и отделение от породы монолитной конструкции в зоне свода и косых диаметров</i>					
Формальная запись проявления	$PR_i(2; 2.1; 2.2; 2.2.3; 2.3; 2.3.3) \rightarrow PR_i(2; 2.1.2; 2.2.10; 2.2.10.3; 2.3.3; 2.3.3.1; 2.3.3.3)$					

2.1 Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 1)														
№ уровня классификации														
I			II			III			IV					
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий					
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа			
1	По типу сооружения	1-Вертикальный ствол												
												1.1	По характеру происшествия*	1.1.1 - инцидент
												1.2	По виду проявления	1.1.2 - авария
														1.2.1 - прорыв воды/породы
														1.2.2 – затопление
														1.2.3 - просачивание /течи воды
														1.2.4 – разуплотнение грунта
														1.2.5 - обрушение грунта
														1.2.6 - вывалы пород
														1.2.7 - горные удары
														1.2.8
												1.2.8.2 - взаимное смещение колец/блоков/тюбингов плоскости поперечного сечения (образование уступов)		
												1.2.8.3 - отклонение от горизонтальной плоскости колец (расхождение смежных колец)		
												1.2.8.4 - усадочные деформации бетона		
												1.2.9	По виду деформации	
1.2.9.2 - взаимное смещения колец крепи														
			1.2.9	По виду деформации	1.2.9.1 - смещения (эллиптичность) поперечного сечения									
					1.2.9.2 - взаимное смещения колец крепи									

					1.2.9.3 - потеря устойчивости элементов крепи
					1.2.9.4 - изгиб колец крепи/элементов затяжки
					1.2.10.1 - сколы
					1.2.10.2 - трещины
					1.2.10.3 - выпадение сборных элементов, вывалы, отделение от породы частей монолитной конструкции
					1.2.10.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
					1.2.11.1 - трещины набрызг-бетона
					1.2.11.2 - отрыв набрызг-бетонного слоя
					1.2.11.3 - отрыв сетки, анкеров
					1.2.11.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
	1.2.10- повреждение/разрушение постоянной обделки		1.2.10	По виду повреждения/разрушения	1.2.11.5 – коррозионное разрушение прокатных профилей
					1.2.11.6 - потеря несущей способности прокатных профилей кольцевых крепей
					1.2.11.7 - разрушение и выпадение элементов затяжки
	1.2.11 - разрушение временной крепи		1.2.11	По виду повреждения/разрушения	

1.2.12 - сверхнормативные отклонения продольной/ горизонтальной осей ствола (перекос)	1.2.13 - всплытие обделки	1.2.14 - резкое понижение уровня гидропригруза	1.2.15 - потеря тиксотропной рубашки (прорыв бентонита в забой, выход в породные полости, трещины)	1.2.16 - связанные с применением специальных способов и ограждающих конструкций	1.2.16	По виду проявления	1.2.16.1 – разрушение замораживающих колонок
							1.2.16.2 - разрушение трубопроводов хладогента/хладоно сителя
							1.2.16.3 - разрушение ледопородного ограждения
							1.2.16.4 - преждевременное оттаивание ледопородного ограждения
							1.2.16.5 – повреждения и деформации обделки при оттаивании ледопородного ограждения
							1.2.16.6 – повреждения и деформации обделки, вызванные морозным пучением
							1.2.16.7 – повреждения и деформации зданий

и сооружений, вызванные морозным пучением/выпором/ оседанием
1.2.16.8 - нарушение сплошности противофильтрацио нных завес
1.2.16.9 - отклонение от проектных параметров упрочнения массива
1.2.16.10 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере
1.2.16.11 - заиливание иглофильтровых установок и фильтров водопонижающих скважин
1.2.16.12 - повреждение/разру шение насосного оборудования и водоотводящих трубопроводов системы водопонижения
1.2.16.13 – нарушение параметров процесса водопонижения
1.2.16.14 - расхождение свай/захваток ограждающих конструкций
1.2.16.15 - засорение гидромонитора при струйной цементации

					1.2.16.16 - отсутствие сплошности грунтоцементных свай/массива
				1.2.17 - повреждение подземных коммуникаций стволопроходческим оборудованием	
				1.2.18 – повреждение/разрушение/отказ горнопроходческого и технологического оборудования	
				1.2.19 - повреждение/разрушение/отказ обеспечивающих инженерных систем	
				1.2.20 - пожар	
				1.2.21 - взрыв	
				1.2.22 - поступление нефтепродуктов, химических веществ в сооружение	
				1.2.23 - поступление газов в сооружение	
				1.2.24 - загазованность	
				1.2.25 - выброс породы при БВР	
				1.2.26 - обрыв канатов подвески оборудования в стволе	
				1.2.27 – сверхнормативные деформации земной поверхности	
				1.2.28– потеря устойчивости ростверками стволопроходческого комплекса	
				1.2.29 – попадание людей в движущиеся части механизмов и оборудования	
				1.2.30 – гидроразрыв породного массива при нагнетании растворов за обделку	

		1.2.31 – необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования	
		1.2.32 - нарушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)	
		1.2.33 – сверхнормативные деформации и разрушения действующих сооружений	
		1.2.34 – разрушение армировки	
		1.2.35 – заклинивание обделкипускного колодца	
	1.3	По возможности влиять на возникновение других проявлений (реализация каскада геотехнических рисков)	
		1.3.1 - влияет	
		1.3.2 – не влияет	
	1.4	По месту проявления	1.4.1 - за пределами сооружения
			1.4.2 – устьевая часть
			1.4.3 - протяженная часть
			1.4.4 - сопряжения
			1.4.5 – забой ствола

* - в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"

Рис. 3.8 Классификация проявлений рисков ситуаций ПР (сооружение - Тип 1)

3.3 Классификация последствий проявления рискованных ситуаций

Форма классификации последствий рискованных ситуаций П (CRS – *consequence of risk situation*) будет иметь следующий вид (рисунок 3.9).

3. Классификация последствий рискованных ситуаций II				
Критерий			Характеристика	Соответствующие последствия рискованных ситуаций (номер последствия)
№	Наименование	Группа		
1	По локализации	внутренние	Не выходят за пределы строящегося сооружения	5, 13, 14, 16, 31, 39
		внешние	Выходят за пределы строящегося сооружения	1-4, 6-12, 15, 17-30, 32-38, 40-42
2	По структуре	простые	Содержат единственно возможный результат	1, 6-8, 12, 13, 35-37, 42
		сложные	Содержат комплекс одновременных или избирательных результатов	2-4, 9-11, 14-34, 38-41
3	По длительности развития	краткосрочные	Последствия наступают практически одновременно с проявлением рискованной ситуации, развивается в максимально короткие сроки	
		среднесрочные	Последствия наступают в срок до 3-х суток после проявления искомой ситуации	
		долгосрочные	Последствия развиваются в течение длительного времени, вплоть до всего срока эксплуатации сооружения	
4	По длительности ликвидации	1 группа	Ликвидация последствий завершается в период строительства сооружения	
		2 группа	Ликвидация последствий продолжается после ввода сооружения в эксплуатацию и завершается в период эксплуатации	
		3 группа	Ликвидация последствий выполняется периодически в течение всего срока эксплуатации сооружения	
5	По размеру ущерба	1 группа	Ущерб оценивается как малый	
		2 группа	Ущерб оценивается как средний	
		3 группа	Ущерб оценивается как значительный	
6	По характеру ущерба	наносит материальный ущерб	Ущерб связан с уничтожением или повреждением имущества, иных материальных ценностей, лишением или уменьшением доходов, возможной прибыли	5-9, 11-40
		наносит физический ущерб	Ущерб наносится здоровью людей (травмы, заболевания, смерть), выражается в утрате трудоспособности, росте смертности, появлении тревоги за свое здоровье и жизнь	1-4, 32

		наносят социально-бытовой ущерб	Ущерб наносится благополучию людей, проявляется в снижении уровня жизнеобеспечения и комфортности условий жизни	10
		наносят репутационный ущерб	Наносят ущерб вследствие неблагоприятного восприятия имиджа и деловой репутации организации	42
		наносят экологический ущерб	Наносят ущерб вследствие вредного воздействия на окружающую среду	41
7	По возможности влиять на возникновение других последствий (реализация каскада геотехнических рисков)	влияющие		5, 11, 13, 16-29, 32-37, 39, 40
		не влияющие		1-4, 6-10, 12, 14,15, 30, 31, 38, 41, 42
8	По возможности становиться проявлением рискообразующим фактором	да		5, 11, 13, 16-29, 32-37, 39, 40
		нет		1-4, 6-10, 12, 14,15, 30, 31, 38, 41, 42
Последствия рисковых ситуаций (II)				
№	Наименование			
1	Гибель людей			
2	Травмы людей			
3	Приобретение людьми острых и хронических заболеваний			
4	Необходимость проведения мероприятий по спасению людей			
5	Остановка горнопроходческих и строительно-монтажных работ			
6	Увеличение сроков строительства			
7	Увеличение объемов работ			
8	Увеличение стоимости строительства			
9	Необходимость в разработке и применении дополнительных мероприятий по снижению негативного влияния и ликвидации последствий			
10	Нарушение и снижение качества социально-бытовых условий жизни людей			
11	Необходимость сооружения дополнительного объема горных выработок, не предусмотренных проектом			
12	Необходимость корректировки проектной документации и повторного прохождения экспертизы			
13	Снижения качества строительно-монтажной продукции			
14	Необходимость ремонта и восстановления временной крепи, обделки, конструкций			
15	Необходимость ремонта и восстановления техники и оборудования			

- | | |
|----|--|
| 16 | Уменьшение несущей способности отделки и конструкции сооружений |
| 17 | Нарушение работоспособности и эксплуатационной надежности расположенных вблизи действующих сооружений метрополитена, тоннелей, других подземных сооружений |
| 18 | Нарушение работоспособности и эксплуатационной надежности построенных сооружений метрополитена |
| 19 | Нарушение работоспособности и эксплуатационной надежности наземных зданий и сооружений (в т.ч. эстакад, путепроводов, железнодорожных дорог) |
| 20 | Нарушение работоспособности и эксплуатационной надежности подземных инженерных коммуникаций |
| 21 | Сверхнормативные деформации зданий и сооружений окружающей застройки и дорожной сети |
| 22 | Разрушение и повреждение зданий и сооружений окружающей застройки и дорожной сети |
| 23 | Сверхнормативные деформации подземных коммуникаций |
| 24 | Разрушение и повреждение подземных коммуникаций |
| 25 | Сверхнормативные деформации расположенных вблизи действующих сооружений метрополитена, тоннелей, других подземных сооружений |
| 26 | Разрушение и повреждение расположенных вблизи действующих сооружений метрополитена, тоннелей, других подземных сооружений |
| 27 | Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом технологии |
| 28 | Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом техники и оборудования |
| 29 | Простои, связанные с выходом из строя, повреждением, разрушением техники и оборудования |
| 30 | Замена проектировщика, подрядчика и необходимость проведения конкурсных процедур для заключения новых контрактов |
| 31 | Уменьшение габаритов приближения строений |
| 32 | Аварии с подвижным составом в расположенных вблизи действующих сооружениях метрополитена и тоннелях |
| 33 | Нарушение работы и отключение систем метрополитена |
| 34 | Нарушение требований безопасности движения и перевозок |
| 35 | Образование воронок мусора оседания на поверхности |
| 36 | Образование подъемов поверхности |
| 37 | Образование полостей в грунтовом массиве |
| 38 | Закрытие действующих станций метрополитена для выполнения ремонтно-восстановительных работ |
| 39 | Нарушение гидроизоляции и водонепроницаемости отделки и конструкций |
| 40 | Затопление действующих сооружений метрополитена, подземных сооружений, подвалов зданий |
| 41 | Негативное влияние на экологию и окружающую среду |
| 42 | Репутационные потери |

Рис. 3.9 Классификация последствий рискованных ситуаций II

3.4 Обобщенные модели развития каскада геотехнических рисков и геотехнического риска

Идентификация i -го геотехнического риска ΓTP_i включает идентификацию его составляющих Φ_i , PP_i и Π_i . При этом составляющим Φ_i и Π_i может соответствовать несколько вариаций, а составляющая PP_i определяется несколькими переменными (тип сооружения $T_{i=const}$, характер происшествия X_i , конкретный вид проявления с возможным дальнейшим разделением B_i , место локализации ML_i) в соответствии с классификациями проявлений рискованных ситуаций для сооружений Тип 1÷5 (выражения 3.5, 3.6). В свою очередь данные переменные также могут разделяться на большее количество качественных переменных (вид разрушения P_i , или деформации D_i , точка локализации T_i и т.д.) (выражение 3.7). При этом тип сооружения T при идентификации геотехнического риска для конкретного сооружения изменяться не может ($T_{i=const}$).

$$\Gamma TP_i (\Phi_i; PP_i; \Pi_i) \rightarrow \begin{cases} \Phi_i \in [\Phi_i^1; \Phi_i^2; \Phi_i^3; \dots; \Phi_i^n] \\ PP_i \in [PP_i^1; PP_i^2; PP_i^3; \dots; PP_i^n] \\ \Pi_i \in [\Pi_i^1; \Pi_i^2; \Pi_i^3; \dots; \Pi_i^n] \end{cases} \quad (3.5)$$

где

$$PP_i^n (T_{i=const}; X_i; B_i; ML_i) \rightarrow \begin{cases} X_i \in [X_1; X_2] \\ B_i \in [B_i^1; B_i^2; B_i^3; \dots; B_i^n] \\ ML_i \in [ML_i^1; ML_i^2; \dots; ML_i^n] \end{cases} \quad (3.6)$$

где (например, для вида проявления «Разрушение » $B_i^n = P_i$)

$$B_i^n = P_i \in [P_i^1; P_i^2; \dots; P_i^n] \quad (3.7)$$

Из предложенных классификаций рискообразующих факторов (Ф), проявлений рискованных ситуаций (ПР) в соответствии с типологией сооружений (Тип 1÷5), последствий рискованных ситуаций (П) видно, что проявление рискованной ситуации может становиться фактором, а проявление может расцениваться как последствие. Данные явления обуславливают существование каскада геотехнических рисков и его развитие. В этой связи при оценке геотехнических рисков данные классификаций должны применяться для учета всех возможных вариаций по составляющим геотехнического риска, а также для учета возможности и вероятности перехода одной составляющей в другую при строительстве конкретного сооружения (развитие каскада геотехнических рисков). **Обобщенная модель развития каскада геотехнических рисков с учетом составляющих геотехнического риска** представлена на рисунке 3.10.

Вместе с тем все предложенные классификации составляющих геотехнического риска образуют совокупность классификаций геотехнических рисков, позволяющую прогнозировать каскадный сценарий развития рискованных ситуаций на основе соответствующего графоаналитического моделирования и определения вероятностей сценарных траекторий КГТР.

Итоговое обобщение составляющих, классификаций геотехнических рисков и модели развития каскада геотехнических рисков позволяют нам получить **обобщенную модель геотехнического риска** для анализа и оценки геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена (рисунок 3.11).

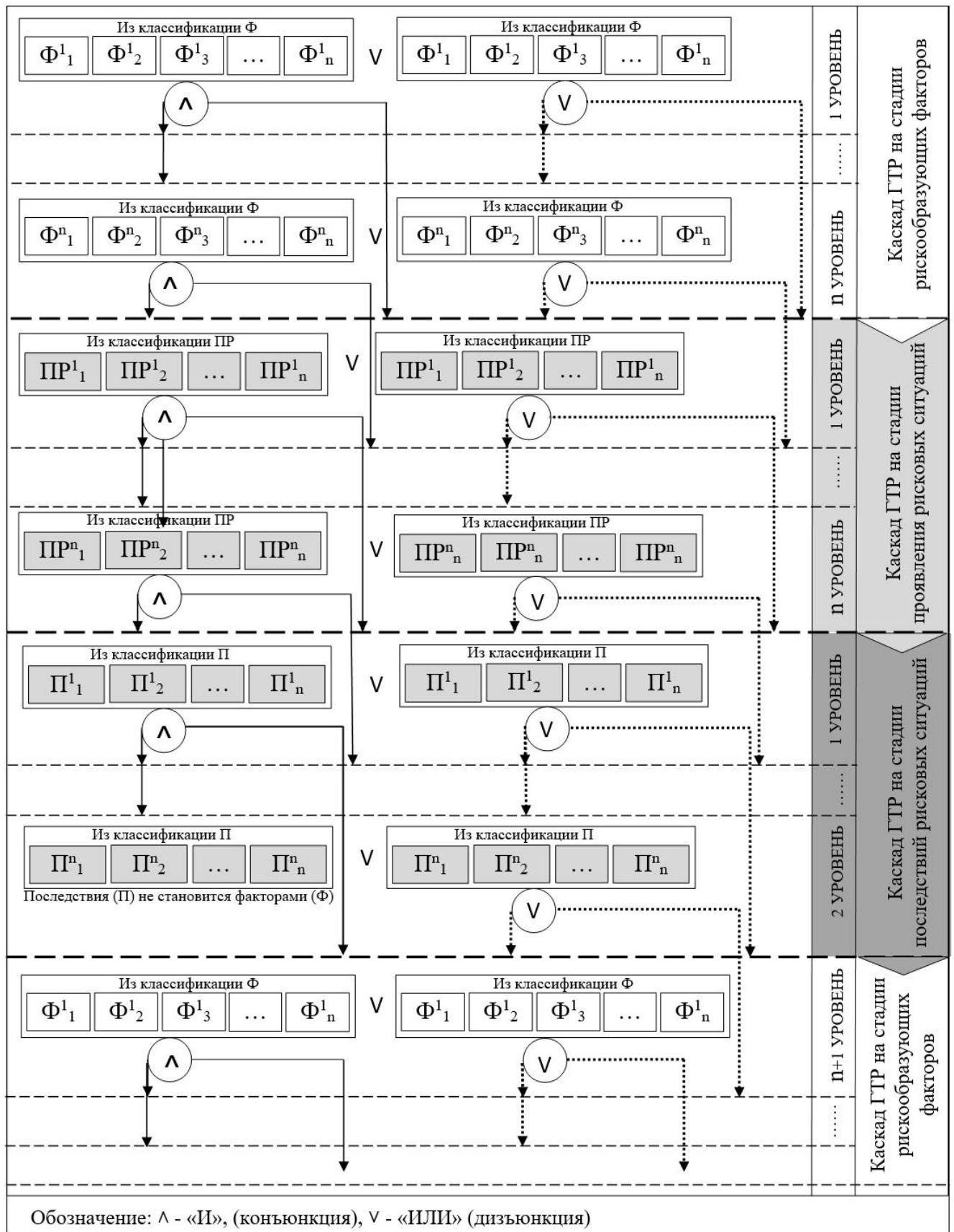


Рис. 3.10 Обобщенная модель развития каскада геотехнических рисков

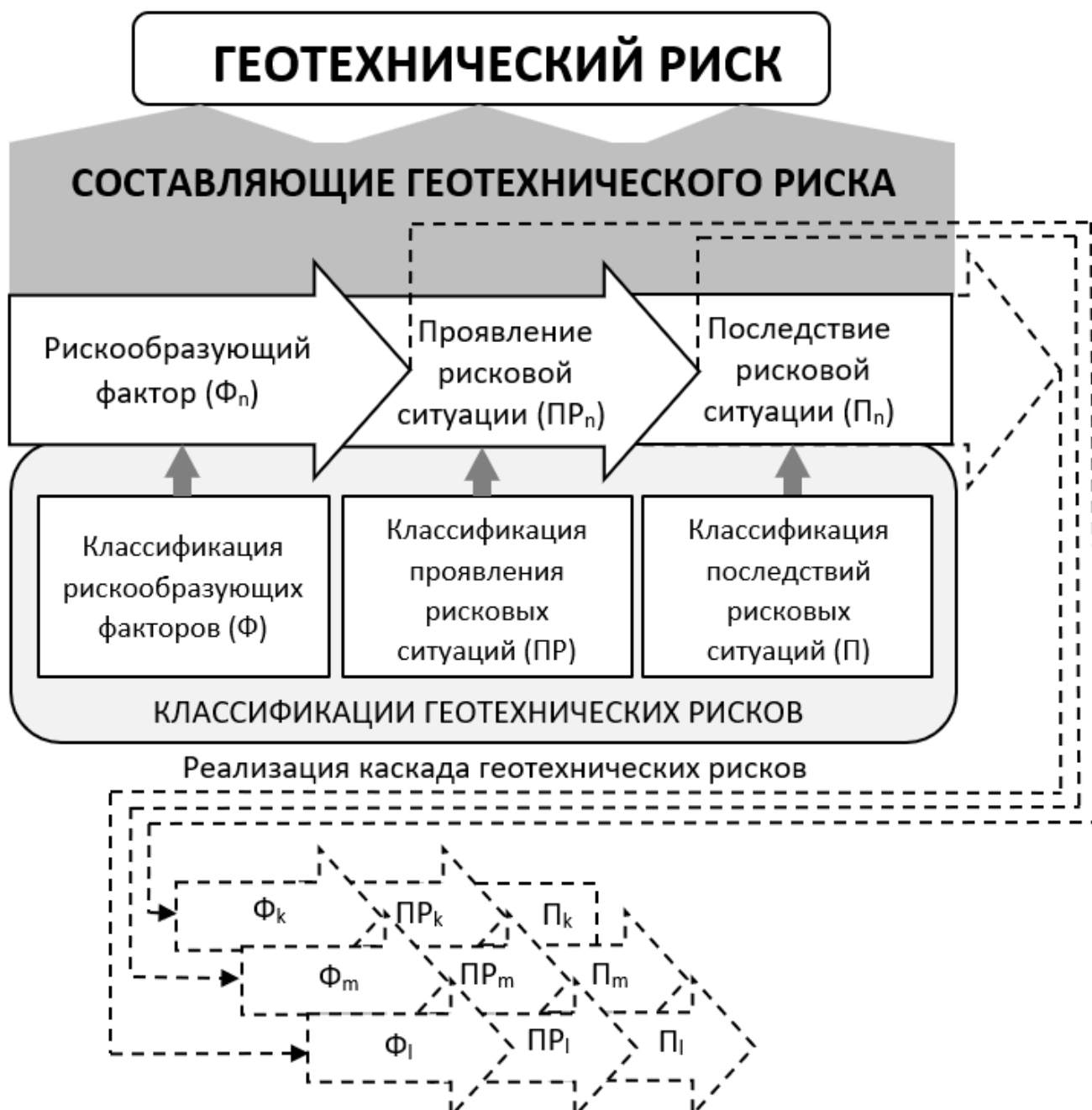


Рис. 3.11 Обобщенная модель геотехнического риска

3.5 Выводы по главе 3

1. Для идентификации геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена необходимы классификации на основе составляющих геотехнических рисков (рискообразующий фактор, проявление рискованной ситуации, последствие рискованной ситуации). При оценке геотехнических рисков данные

классификации должны применяться для учета всех возможных вариаций по составляющим геотехнического риска, а также для учета возможности и вероятности перехода одной составляющей в другую при строительстве конкретного сооружения (развитие каскада геотехнических рисков).

2. Каскад геотехнических рисков (КГТР) есть совокупность рискованных ситуаций, последовательное или параллельное проявление которых при проведении работ по возведению подземного сооружения приводит к неблагоприятному сценарию протекания аварийной ситуации/инцидента с включением в следующий этап развития аварии/инцидента новых элементов строительства подземного сооружения и расширением зоны (площади) аварии/инцидента.

3. При сооружении объектов метрополитена породный массив является основным звеном, распространяющим и преобразовывающим составляющие геотехнического риска. Располагающиеся в породном массиве коммуникации, фундаменты здания и сооружений, эксплуатируемые подземные сооружения испытывают влияние риска и становятся следующими элементами уровней КГТР.

4. На различных стадиях КГТР хронология может характеризоваться как последовательным, так и параллельным переходом с одного уровня составляющих геотехнического риска на другой при развитии рискованной ситуации. При этом на стадии наступления последствий может возникать явление преобразования последствия рискованной ситуации в рискообразующий фактор и начало формирования нового каскада.

5. Оценку геотехнических рисков следует осуществлять на основе данных классификаций составляющих для учета всех возможных вариаций по составляющим, а также для учета возможности и вероятности перехода одной составляющей в другую при строительстве конкретного сооружения. Совокупность классификаций составляющих геотехнического риска позволяет прогнозировать каскадный сценарий развития рискованных ситуаций на основе составления причинно-следственных схем на этапе качественного анализа и

графоаналитического моделирования в соответствии с **обобщенной моделью развития каскада геотехнических рисков.**

6. На основе составляющих геотехнического риска, классификаций геотехнических рисков и модели развития каскада геотехнических рисков получена **обобщенная модель геотехнического риска** для анализа и оценки геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена.

По результатам исследования сформулировано **второе научное положение** диссертации, выносимое на защиту:

«Оценка последствий рискованных ситуаций применительно к конкретному подземному объекту или его участку должна производиться на основе прогноза каскадного сценария развития аварий, где породный массив является основным звеном, распространяющим и преобразовывающим составляющие геотехнического риска. Через породный массив фундаменты зданий и сооружений, эксплуатируемые подземные объекты и инженерные коммуникации испытывают влияние риска и становятся следующим элементом каскада. Применение данной модели позволяет оценить последствия рискованных ситуаций применительно к конкретному подземному объекту или его участку».

4. АНАЛИЗ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ОСНОВАНИИ ЭКСПЕРТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

4.1 Принципы развития рискованных ситуаций

Принцип классификации «фактор-проявление-последствие», определенный в Главе 2, а также данные различных источников по известным аварийным ситуациям и инцидентам [28, 75-78, 94-97, 103-107, 127], позволяют говорить о многообразии причин, причинно-следственных связей развития, различных вариантов их последствий. То есть происходит реализация различных сценариев рискованных ситуаций, которые необходимо идентифицировать на этапе качественного анализа и прогнозировать их реализацию в процессе количественной оценки. Как следует из системы классификации в Главе 3, проявление рискованных ситуаций при строительстве объектов метрополитена характеризуется сложностью с точки зрения типов сооружений, характера происшествий, видов проявления, месту локализации, уровней развития, возможности развития каскада геотехнических рисков. Таким образом, на следующем этапе исследования рассматриваются вопросы:

- 1) возможное количество сценариев рискованных ситуаций;
- 2) возможность учета всех сценариев развития рискованных ситуаций при анализе.

Исходя из утверждения, что каждую рискованную ситуацию определяют три составляющие, отдельную рискованную ситуацию PC_i можно математически представить как точку некоего пространства с координатами Φ_i , PP_i , $П_i$:

$$PC_i (\Phi_i ; PP_i ; П_i) \tag{4.1}$$

где Φ_i – рискообразующий фактор рискованной ситуации PC_i ,

PP_i – проявление i -ой рискованной ситуации PC_i ,

Π_i - последствие i -ой рисковей ситуации PC_i .

Очевидно, что данное представление рисковей ситуаций основывается на идеализированной модели, при которой единственный фактор приводит к единственному проявлению рисковей ситуации с единственным последствием. Следует отметить, что подобная идеализация не учитывает даже значимые рискообразующие факторы, то есть находится на самом высоком уровне абстрагирования.

Используя данную модель, вся совокупность возможных рисковей ситуаций будет ограничиваться в объеме V_{PC} некоего n -мерного пространства рисковей ситуаций. Учитывая, что в идеализированной модели $n=3$, в качестве такого пространства может быть предложено трехмерное евклидово пространство R^n , в котором располагаются ортогональная система Φ_i , PP_i , Π_i и все точки с координатами согласно выражению (4.1). Тогда объем такого пространства целесообразно представить в виде:

$$V_{PC} = \iiint_{V_{PC}} f(\Phi_i, PP_i, \Pi_i) \Delta V_{PC} \quad (4.2)$$

где Φ_i – координата – рискообразующий фактор рисковей ситуации PC_i ,

PP_i – координата – проявление рисковей ситуации PC_i ,

Π_i – координата – последствие рисковей ситуации PC_i .

Тогда, исходя из предложенной в Главе 3 системы классификации, можно предварительно определить общее количество рисковей ситуаций $V_{PC_{max}}$ в результате реализации возможных сценариев для каждого типа сооружений метрополитена (выражение 4.3):

$$V_{PC_{max}} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^m PC_j \quad (4.3)$$

где $\sum_{j=1}^m PC_j$ – сумма всех рисков ситуаций для типов сооружений 1÷5.

В таблице 4.1 представлено в общем виде возможное количество различных составляющих рисков ситуаций в соответствии с разработанной системой классификации. Как видно из таблицы, наибольшее разнообразие наблюдается в части проявлений. Это связано с тем, что каждое отдельное проявление может быть отнесено к четырем различным критериям $K_{\text{ПР}}$ согласно классификации.

Таблица 4.1

Составляющая РС	Источник информации	Количество	
Ф	Классификация рискообразующих факторов Ф (Рисунок 3.1, глава 3)	$\Phi_{\max} = \sum_{i=1}^n \Phi_i = 69$	(4.4)
ПР ₁	Классификация проявлений рисков ситуаций ПР (сооружение - Тип 1) (Рисунок 3.4, глава 3)	$\begin{aligned} \text{ПР}_{1, \max} &= \sum_{i=1}^n \text{ПР}_i = \prod_{i=1}^4 K_{\text{ПР}}^i = \\ &= K_{\text{ПР}}^{1.1} K_{\text{ПР}}^{1.2} K_{\text{ПР}}^{1.3} K_{\text{ПР}}^{1.4} = \\ &= 2 * [30 + (4 + 4 + 4 + 7 + 16)] * 2 * 5 = 1300 \end{aligned}$	(4.5)
		$K_{\text{ПР}}^{1.1} = 2$ – значение критерия 1.1 $K_{\text{ПР}}^{1.2} = 30 + (4 + 4 + 4 + 7 + 16) = 65$ – значение критерия 1.2 $K_{\text{ПР}}^{1.3} = 2$ – значение критерия 1.3 $K_{\text{ПР}}^{1.4} = 5$ – значение критерия 1.4	
ПР ₂	Классификация проявлений рисков ситуаций ПР (сооружение - Тип 2) (Таблица П1.1, Приложение № 1)	$\begin{aligned} \text{ПР}_{2, \max} &= \sum_{i=1}^n \text{ПР}_i = \prod_{i=1}^4 K_{\text{ПР}}^i = \\ &= K_{\text{ПР}}^1 K_{\text{ПР}}^2 K_{\text{ПР}}^3 K_{\text{ПР}}^4 = \\ &= 2 * [36 + (5 + 4 + 6 + 6 + 13 + 11)] * 2 * [2 + (4 + 3)] = 2916 \end{aligned}$	(4.6)
		$K_{\text{ПР}}^{2.1} = 2$ – значение критерия 2.1 $K_{\text{ПР}}^{2.2} = 36 + (5 + 4 + 6 + 6 + 13 + 11) = 81$ – значение критерия 2.2 $K_{\text{ПР}}^{2.3} = 2$ – значение критерия 2.3 $K_{\text{ПР}}^{2.4} = 2 + (4 + 3) = 9$ – значение критерия 2.4	
ПР ₃	Классификация проявлений рисков ситуаций ПР (сооружение - Тип 3)	$\begin{aligned} \text{ПР}_{3, \max} &= \sum_{i=1}^n \text{ПР}_i = \prod_{i=1}^4 K_{\text{ПР}}^i = \\ &= K_{\text{ПР}}^{3.1} K_{\text{ПР}}^{3.2} K_{\text{ПР}}^{3.3} K_{\text{ПР}}^{3.4} = \\ &= 2 * [26 + (6 + 10 + 3 + 5 + 8 + 14 + 8)] * 2 * [2 + 4] = 1920 \end{aligned}$	(4.7)
		$K_{\text{ПР}}^{3.1} = 2$ – значение критерия 3.1	

	(Таблица П1.2, Приложение № 1)	$K^{3.2}_{\text{ПР}} = 26 + (6 + 10 + 3 + 5 + 8 + 14 + 8) = 80$ – значение критерия 3.2 $K^{3.3}_{\text{ПР}} = 2$ – значение критерия 3.3 $K^{3.4}_{\text{ПР}} = 2 + 4 = 6$ – значение критерия 3.4	
	Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 4) (Таблица П1.3, Приложение № 1)	$\begin{aligned} \text{ПР}_{4, \max} &= \sum_{i=1}^n \text{ПР}_i = \prod_{i=1}^4 K_{\text{ПР}}^i = \\ &= K^{4.1}_{\text{ПР}} K^{4.2}_{\text{ПР}} K^{4.3}_{\text{ПР}} = \\ &= K^{4.4}_{\text{ПР}} = 2 * [26 + (4 + 4 + 6 + 8 + 13)] * 2 * [2 \\ &\quad + (3 + 3)] = 1952 \end{aligned}$	(4.8)
		$K^{4.1}_{\text{ПР}} = 2$ – значение критерия 4.1 $K^{4.2}_{\text{ПР}} = 26 + (4 + 4 + 6 + 8 + 13) = 61$ – значение критерия 4.2 $K^{4.3}_{\text{ПР}} = 2$ – значение критерия 4.3 $K^{4.4}_{\text{ПР}} = 2 + (3 + 3) = 8$ – значение критерия 4.4	
ПР ₅	Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 5) (Таблица П1.4, Приложение № 1)	$\begin{aligned} \text{ПР}_{5, \max} &= \sum_{i=1}^n \text{ПР}_i = \prod_{i=1}^4 K_{\text{ПР}}^i = \\ &= K^{5.1}_{\text{ПР}} K^{5.2}_{\text{ПР}} K^{5.3}_{\text{ПР}} K^{5.4}_{\text{ПР}} = \\ &= 2 * [32 + (5 + 4 + 6 + 6 + 15 + 10)] * 2 * [2 + \\ &\quad + (4 + 3)] = 2808 \end{aligned}$	(4.9)
		$K^{5.1}_{\text{ПР}} = 2$ – значение критерия 5.1 $K^{5.2}_{\text{ПР}} = 32 + (5 + 4 + 6 + 6 + 15 + 10) = 78$ – значение критерия 5.2 $K^{5.3}_{\text{ПР}} = 2$ – значение критерия 5.3 $K^{5.4}_{\text{ПР}} = 2 + (4 + 3) = 9$ – значение критерия 5.4	
П	Классификация проявлении рисковых ситуаций П (Рисунок 3.5, глава 3)	$\text{П}_{\max} = \sum_{i=1}^n \text{П}_i = 42$	(4.10)

Принимая, что объемы совокупности рискованных ситуаций по каждому типу сооружений образуют общий объем всех возможных рискованных ситуаций $V_{\text{РС}}$, можем представить $V_{\text{РС}}$ в виде рисунка 4.1.

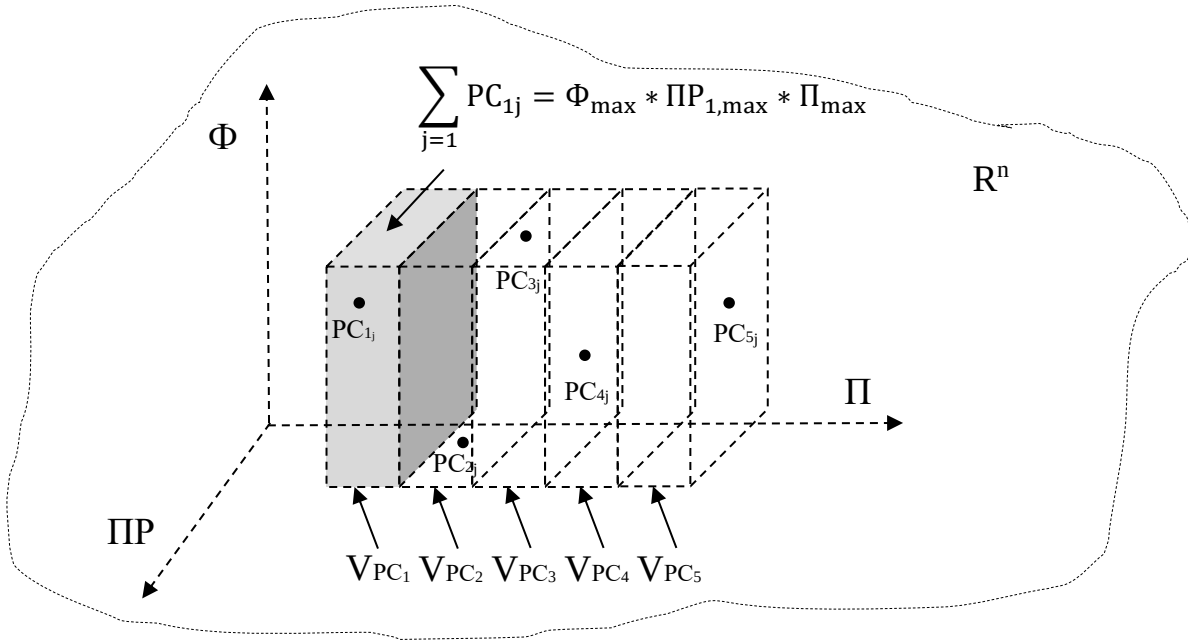


Рис. 4.1 Объем всех возможных рисков ситуаций V_{PC} в пространстве

Тогда выражение (4.3) принимает следующий вид (4.11):

$$\begin{aligned}
 V_{PC_{\max}} &= \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^k PC_{ij} = \\
 &= \sum_{j=1}^k PC_{1j} + \sum_{j=1}^k PC_{2j} + \sum_{j=1}^k PC_{3j} + \sum_{j=1}^k PC_{4j} + \sum_{j=1}^k PC_{5j}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

где $\sum_{j=1}^k PC_{1j} = \Phi_{\max} * PP_{1,\max} * \Pi_{\max}$

$$\sum_{j=1}^k PC_{2j} = \Phi_{\max} * PP_{2,\max} * \Pi_{\max}$$

$$\sum_{j=1}^k PC_{3j} = \Phi_{\max} * PP_{3,\max} * \Pi_{\max}$$

$$\sum_{j=1}^k PC_{4j} = \Phi_{\max} * PP_{4,\max} * \Pi_{\max}$$

$$\sum_{j=1} PC_{5j} = \Phi_{\max} * PR_{5,\max} * P_{\max}$$

Подставив в выражение (4.11) значения из таблицы 4.1, можем определить общий объем многообразия всех возможных рискованных ситуаций:

$$V_{PC_{\max}} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^k PC_{ij} = 31\,576\,608 \approx 32 \cdot 10^6 \quad (4.12)$$

Данная идеализированная модель риска полезна при описании наличия составляющих риска и отображения факта многообразия рискованных ситуаций в объеме V_{PC} пространства рискованных ситуаций. Одновременно очевидно, что каждый рискообразующий фактор не способен обязательно приводить ко всем вариантам проявлений рискованных ситуаций, а каждое последствие не может обязательно наступить от всех вариантов проявлений рискованных ситуаций. Идеализированная модель не учитывает особенности ПТГС и транспортной системы метрополитена. Она отличается от обобщенной модели, предложенной в Главе 3, и не подходит для моделирования реальных сценариев рискованных ситуаций в геотехническом строительстве, когда к проявлению рискованной ситуации приводит более одного рискообразующего фактора, имеет место более одного проявления рискованной ситуации и более одного последствия.

В работах С.Н. Власова, Л.В. Маковского, В.Е. Меркина, Д.С. Конюхова, Л.Л. Кауфмана, Риты Л. Соузы и других исследователей [28, 38, 75-78, 94-97, 103-107, 127, 128, 157] при описании различных инцидентов и аварий при строительстве объектов метрополитена и транспортных тоннелей присутствуют различные сочетания составляющих рискованных ситуациях. Данные в работах исследователей, а также информация автора об имевших место в разное время рискованных ситуациях, проанализированы и сведены в «Реестр рискованных ситуаций, имевших место при строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей»

(Приложение № 3 к настоящей работе). Например, в реестре описаны следующие рисковые ситуации:

- аварийные ситуации при обрушениях породы свода на нескольких участках при строительстве Кодарского тоннеля БАМ (СССР) в 1984 году, вызванные осыпанием оттаявшего грунта своде в закрепном пространстве и разрушением временной крепи вследствие ошибок при проектировании технологии проходки и крепления тоннеля в условиях криолитозоны, несоблюдения технологии оттаивания грунта и возведения монолитной бетонной обделки, а также несоблюдения режима вентиляции и температурного режима ([75], пункт 19 Приложения № 3);

- авария в 1983 году при строительстве Минского метрополитена (СССР) при вывале породы (12 м^3) в кровле соединительного ходка между вертикальным стволом и перегонным тоннелем метрополитена при сооружении котлована над ходком, вызванном потерей устойчивости временной крепи ходка вследствие обрушения купола разуплотненного грунта под промерзшим грунтом лотка котлована над пустотой, образовавшейся в закрепном пространстве ходка вследствие суффозионных процессов от ливневой канализации, нарушения геологической структуры и выпусков грунта при сооружении котлована, и повлекшая образование воронки мульды оседания ($14,9 \text{ м}^3$) в лотке котлована и тяжелой травме проходчика ([75], пункт 21 Приложения № 3);

- авария в 2005 году при проходке перегонного тоннеля метрополитена линии М2 в Лозанне (Швейцария) с прорывом воды и грунта (1400 м^3) в забой с образованием воронки мульды оседания на поверхности, увеличением сроков строительства (на 9 месяцев), нарушением социально-бытовых условий жизни людей, вызванная появлением по трассе тоннеля карстовой полости, заполненной водонасыщенным песком вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий и невыполнения опережающего исследования массива ([94], пункт 52 Приложения № 3).

В таблице 4.2 сведены *вербальное* (вербальная формулировка) и *формальное* (формальная запись) представления рискованной ситуации при постановке задачи анализа риска и выбора наиболее предпочтительного алгоритма получения оптимального решения задачи. Числовые обозначения для составляющих рискованной ситуации приняты согласно системе классификации в Главе 3.

Таблица 4.2

Рискованная ситуация (пункт 19 Приложения №3)	
Вербальная формулировка рискованной ситуации	<i>Рискованная ситуация (РС) при строительстве Кодарского тоннеля (Тун 2)* БАМ (СССР) в 1984 году, вследствие ошибок при проектировании технологии проходки ($\Phi_1=\Phi-28$) и временного крепления тоннеля ($\Phi_2=\Phi-24$) в условиях криолитозоны, несоблюдения технологии оттаивания грунта ($\Phi_3=\Phi-51$) и возведения монолитной бетонной обделки ($\Phi_4=\Phi-46$), а также несоблюдения режима вентиляции и температурного режима ($\Phi_5=\Phi-52$), проявившиеся в авариях ($ПР_1=ПР-2.1.2$) с осыпанием оттаявшего грунта ($ПР_2=ПР-2.2.5$) свода ($ПР_3=2.4.3.1$) в закреплённом пространстве, разрушением временной крепи ($ПР_4=ПР-2.2.14.5$) и обрушением породы свода тоннеля ($ПР_5=ПР-2.2.5; 2.4.3.1$) на нескольких участках, и повлекшая необходимость в разработке и применении дополнительных мероприятий по снижению негативного влияния и ликвидации последствий ($П_1=П-9$)</i>
Формальная запись рискованной ситуации	$PC (\Phi_i; ПР_i; П_i) \rightarrow$ $PC \left(\begin{array}{l} \Phi_i = \{ \Phi_1 = \Phi-28; \Phi_2 = \Phi-24; \Phi_3 = \Phi-51; \Phi_4 = \Phi-46; \Phi_5 = \Phi-52 \} \\ ПР_i = \{ ПР_1 = ПР-2.1.2; ПР_2 = ПР-2.2.5; ПР_3 = ПР-2.4.3.1; \\ ПР_4 = ПР-2.2.14.5; ПР_5 = 2.2.5; 2.4.3.1 \} \\ П_i = \{ П_1 = П-9 \} \end{array} \right)$
Рискованная ситуация (пункт 21 Приложения №3)	
Вербальная формулировка рискованной ситуации	<i>Рискованная ситуация (РС) в 1983 году при строительстве Минского метрополитена при строительстве соединительного хода между вертикальным стволом и перегонным тоннелем (Тун 2), вызванная потерей устойчивости временной крепи хода ($\Phi_1=\Phi-2.2.11.4$) вследствие обрушения купола ($\Phi_2=\Phi-2.2.5$) разуплотнённого грунта ($\Phi_3=\Phi-2.2.4$) под промерзшим грунтом лотка котлована над пустотой, образовавшейся в закреплённом пространстве хода вследствие суффозионных процессов от ливневой канализации ($\Phi_4=\Phi-59$), нарушения геологической структуры и выпусков грунта ($\Phi_5=\Phi-44$) при сооружении котлована, проявившаяся аварией ($ПР_1=ПР-2.1.2$) с вывалом породы (12 м^3) ($ПР_2=ПР-2.2.6$) в кровле ($ПР_3=ПР-2.4.3.1$) соединительного хода при сооружении котлована над ходом и повлекшая образование воронки мульды оседания ($14,9 \text{ м}^3$) ($П_1=П-35$) в лотке котлована и тяжелой травме проходчика ($П_2=П-2$)</i>

Формальная запись рисковой ситуации	$PC (\Phi_i; PP_i; \Pi_i) \rightarrow$ $PC \left(\begin{array}{l} \Phi_i = \{\Phi_1 = \Phi-2.2.11.4; \Phi_2 = \Phi-2.2.5; \Phi_3 = \Phi-2.2.4; \Phi_4 = \Phi-59; \Phi_5 = \Phi-44\} \\ PP_i = \{PP_1 = PP-2.1.2; PP_2 = PP-2.2.6\}; PP_3 = PP-2.4.3.1\} \\ \Pi_i = \{\Pi_1 = \Pi-35; \Pi_2 = \Pi-2\} \end{array} \right)$
Рисковая ситуация (пункт 52 Приложения №3)	
Вербальная формулировка рисковой ситуации (пункт 52 Приложения №3)	<i>Рисковая ситуация (РС) в 2005 году при проходке перегонного тоннеля (Тун 2) метрополитена линии М2 в Лозанне (Швейцария), вызванная появлением по трассе тоннеля карстовой полости ($\Phi_1 = \Phi-8$), заполненной водонасыщенным песком ($\Phi_2 = \Phi-3$) вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий ($\Phi_3 = \Phi-40$) и невыполнения опережающего исследования массива ($\Phi_4 = \Phi-35$), проявившаяся в аварии ($PP_1 = PP-2.1.2$) с прорывом воды и грунта ($PP_2 = PP-2.2.1$) (1400 м^3) в забой ($PP_3 = PP-2.4.4$) с образованием воронки мульды оседания ($\Pi_1 = \Pi-35$) на поверхности, увеличением сроков строительства ($\Pi_2 = \Pi-6$) (на 9 месяцев), нарушением социально-бытовых условий жизни людей ($\Pi_3 = \Pi-10$)</i>
Формальная запись рисковой ситуации	$PC (\Phi_i; PP_i; \Pi_i) \rightarrow$ $PC \left(\begin{array}{l} \Phi_i = \{\Phi_1 = \Phi-8; \Phi_2 = \Phi-3; \Phi_3 = \Phi-40; \Phi_4 = \Phi-35\} \\ PP_i = \{PP_1 = PP-2.1.2; PP_2 = PP-2.2.1; PP_3 = PP-2.4.4\} \\ \Pi_i = \{\Pi_1 = \Pi-35; \Pi_2 = \Pi-6; \Pi_3 = \Pi-10\} \end{array} \right)$
Рисковая ситуация (пример)	
Вербальная формулировка рисковой ситуации	<i>Рисковая ситуация (РС) при сооружении перегонного тоннеля метрополитена (Тун 2), вызванная наличием зон тектонических разломов ($\Phi_1 = \Phi-1$), недостаточным объемом и качеством инженерно-геологических изысканий ($\Phi_2 = \Phi-40$) и ошибками при проектировании конструкции постоянной обделки сооружения ($\Phi_3 = \Phi-25$), проявившаяся в аварии ($PP_1 = PP-2.1.2$) с прорывом воды и породы ($PP_2 = PP-2.2.1$), разрушением монолитной железобетонной постоянной обделки протяженной части строящегося перегонного тоннеля в виде вывалов и отделение от породы частей монолитной конструкции ($PP_3 = PP-2.2.10.3$) в зоне свода и косых диаметров ($PP_4 = PP-2.4.3.1; 2.4.3.3$) и повлекшая за собой последствия в виде и травм людей ($\Pi_1 = \Pi-2$), образование воронок мульды оседания на поверхности ($\Pi_2 = \Pi-35$) и разрушением и повреждением зданий и сооружений окружающей застройки и дорожной сети ($\Pi_3 = \Pi-22$)</i>
Формальная запись	$PC (\Phi_i; PP_i; \Pi_i) \rightarrow$

рисковой ситуации	$PC \left(\begin{array}{l} \Phi_i = \{\Phi_1 = \Phi - 1; \Phi_2 = \Phi - 40; \Phi_3 = \Phi - 25\} \\ PP_i = \{PP_1 = PP - 2.1.2; PP_2 = PP - 2.2.1\}; PP_3 = PP - 2.2.10.3; \\ PP_4 = PP - 2.4.3.1; 2.4.3.3\} \\ \Pi_i = \{\Pi_1 = \Pi - 2; \Pi_2 = \Pi - 35; \Pi_3 = \Pi - 22\} \end{array} \right)$
* - в примере железнодорожный тоннель отнесен к типу сооружения Тип 2	

Таким образом, при реальных условиях рискованных ситуаций, как правило, всегда имеется комбинация различного количества вариантов из составляющих риска. Учитывая данные таблицы 4.1, в соответствии с известной формулой комбинаторики можно получить общие выражения для сочетаний составляющих рискованных ситуаций:

$$C_{PC_i}(\Phi)_{\Phi_{PC_i}}^n = \frac{\Phi_{PC_i}!}{(\Phi_{PC_i} - n)!n!} \quad (4.13)$$

$$C_{PC_i}(PP_1)_{PP_{1,PC_i}}^k = \frac{PP_{1,PC_i}!}{(PP_{1,PC_i} - k)!k!} \quad (4.14)$$

$$C_{PC_i}(PP_2)_{PP_{2,PC_i}}^k = \frac{PP_{2,PC_i}!}{(PP_{2,PC_i} - k)!k!} \quad (4.15)$$

$$C_{PC_i}(PP_3)_{PP_{3,PC_i}}^k = \frac{PP_{3,PC_i}!}{(PP_{3,PC_i} - k)!k!} \quad (4.16)$$

$$C_{PC_i}(PP_4)_{PP_{4,PC_i}}^n = \frac{PP_{4,PC_i}!}{(PP_{4,PC_i} - n)!n!} \quad (4.17)$$

$$C_{PC_i}(PP_5)_{PP_{5,PC_i}}^k = \frac{PP_{5,PC_i}!}{(PP_{5,PC_i} - k)!k!} \quad (4.18)$$

$$C_{PC_i}(P)_{PP_{PC_i}}^m = \frac{P_{PC_i}!}{(P_{PC_i}-m)!m!} \quad (4.19)$$

где $C_{PC_i}(\Phi)_{\Phi_{PC_i}}^n$ - сочетание из n рискообразующих факторов Φ из множества Φ_{PC_i} рискообразующих факторов, которые могут привести к проявлению рискованной ситуации PC_i ,

n – набор рискообразующих факторов Φ , которые могут привести к рискованной ситуации PC_i ,

$\Phi_{PC_i} = \Phi_{\max} - \Phi_{(P(0))}$ - все множество рискообразующих факторов, которые могут привести к проявлению рискованной ситуации PC_i ($\Phi_{(P(0))}$ – рискообразующие факторы, вероятность которых привести к рискованной ситуации PC_i равна 0),

$C_{PC_i}(PP_1)_{PP_{1,PC_i}}^k \div C_{PC_i}(PP_5)_{PP_{5,PC_i}}^k$ – сочетание из k проявлений рискованной ситуации PP из множества PP_{PC_i} проявлений, которые могут привести к проявиться при рискованной ситуации PC_i ,

k – набор проявлений $PP_1 \div PP_5$ рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип1÷5,

$PP_{1,PC_i} = PP_{1,\max} - PP_{1,(P(0))}$ - все множество проявлений рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип 1 ($PP_{1,(P(0))}$ – проявления рискованной ситуации PC_i , вероятность которых равна 0),

$PP_{2,PC_i} = PP_{2,\max} - PP_{2,(P(0))}$ - все множество проявлений рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип 2 ($PP_{2,(P(0))}$ – проявления рискованной ситуации PC_i , вероятность которых равна 0),

$PP_{3,PC_i} = PP_{3,\max} - PP_{3,(P(0))}$ - все множество проявлений рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип 3 ($PP_{3,(P(0))}$ – проявления рискованной ситуации PC_i , вероятность которых равна 0),

$ПР_{4,PC_i} = ПР_{4,max} - ПР_{4,(P(0))}$ - все множество проявлений рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип 4 ($ПР_{4,(P(0))}$ – проявления рискованной ситуации PC_i , вероятность которых равна 0),

$ПР_{5,PC_i} = ПР_{5,max} - ПР_{5,(P(0))}$ - все множество проявлений рискованной ситуации PC_i для сооружений Тип 5 ($ПР_{5,(P(0))}$ – проявления рискованной ситуации PC_i , вероятность которых равна 0),

$C_{PC_i}(П)_{П_{PC_i}}^m$ - сочетание из m последствий $П$ из множества $П_{PC_i}$, которые могут наступить при проявлении рискованной ситуации PC_i ,

m – набор последствий $П$, к которым могут привести проявления рискованной ситуации PC_i ,

$П_{PC_i} = П_{max} - П_{(P(0))}$ - все множество последствий, к которым могут привести проявления рискованной ситуации PC_i ($П_{(P(0))}$ – последствия, вероятность которых при проявлении рискованной ситуации PC_i равна 0).

Таким образом, можно говорить о том, что каждой составляющей рискованной ситуации соответствует уже не одна координата. Следовательно, трехмерное пространство рискованной ситуации преобразуется в n -мерное пространство. Рассматриваемая идеализированная модель продолжает усложняться и приближаться к обобщенной модели, представленной в Главе 3, так как проявления рискованной ситуации (например, разрушение и деформация обделки ствола), а также их последствия редко ограничиваются единственным последствием. Сочетание факторов, проявлений и последствий, а также присоединение внешних техногенных факторов (неудовлетворительное состояние фундаментов зданий и подземных сетей) зачастую запускает каскад геотехнических рисков (КГТР), приводящий к серьезной аварии. При проявлении КГТР необходимо уметь определить вероятности сочетаний и уровней развития КГТР.

Следовательно, **сценарии рискованной ситуации развиваются по принципу совокупности различных сочетаний составляющих риска.**

4.2 Информационный ресурс в управлении геотехническими рисками

Актуальным вопросом управления рисками является определение информационной составляющей процесса оценки рисков с позиции принятия источников, методик сбора, архивации и анализа информации. Процесс управления рисками должен быть обеспечен необходимым информационным материалом. Предполагается, что больший объем информации делает оценку рисков более точной.

Знаковая модель в работе [108] демонстрирует переход посредством информации И к возможности вычисления риска и процесса управления им:

$$C \rightarrow P \rightarrow O_1 \rightarrow P_{\text{и}} \rightarrow P_3 \rightarrow И \rightarrow P_{\text{и}} \rightarrow У,$$

где С – субъект, П – предприниматель, O_1 – ожидание результата, $P_{\text{и}}$ – неисчисляемый риск, P_3 – риск предпринимателя, И – информация, $P_{\text{и}}$ – исчисляемый риск, У – управление риском.

Нехватка или полное отсутствие информации, доступа к информации, отсутствие корректно обработанной информации ведут к росту неопределенности и снижению достоверности оценки рисков [115]. Дж. Акерлоф [109] полагал, что нехватка информации и ее несовершенство могут стать причиной кризиса целых сегментов рынка. Общей проблемой с точки зрения влияния на оценку рисков, в том числе в строительной геотехнологии, является проблема отбора информации. При этом идентификация геотехнических рисков на стадии качественного анализа и процесс ранжирования выполняются на основании результатов отбора.

Г. Марковиц в своей работе [110], посвященной формированию портфеля ценных бумаг, выделяет два этапа. При этом первый основан на информации наблюдений за объектом и опыте ретроспективы. А.И. Кривцов в работе [111] определяет информацию главным ресурсом анализа рисков и приводит требования

к качеству информационного ресурса: своевременность, достоверность, достаточность, объективность, сопоставимость и эффективность.

Очевидно, что информация для процесса управления рисками является важнейшей составляющей. От ее качества будет зависеть эффективность анализа рисков и результат управления.

4.3 Обоснование методики оценки геотехнических рисков на основании экспертно-статистического подхода

Как видно из предыдущей подглавы, экспертам необходимо понимать специфику процесса и обладать соответствующим опытом строительства, знанием факторов риска и характера их проявлений, умением прогнозировать ожидаемое проявление риска и моделировать негативные последствия. Проведение достоверного экспертного анализа вероятности возникновения риска – чрезвычайно сложная задача, требующая учета изменчивости значимости факторов в различных условиях строительства. Решением данной задачи является комплексный подход к оценке с использованием экспертных заключений и статистических данных о рисковых ситуациях, которые имели место на практике, или **экспертно-статистический подход** к анализу и оценке [112]. Данный подход позволит производить оценку геотехнических рисков с большей степенью достоверности, чем при использовании только метода экспертной оценки. Таким образом, возникает предположение о необходимости сравнения мнения экспертов с реальными данными о проявлении рисков ситуации

На рисунке 4.2 представлена концептуальная схема анализа геотехнических рисков на основании данного подхода.

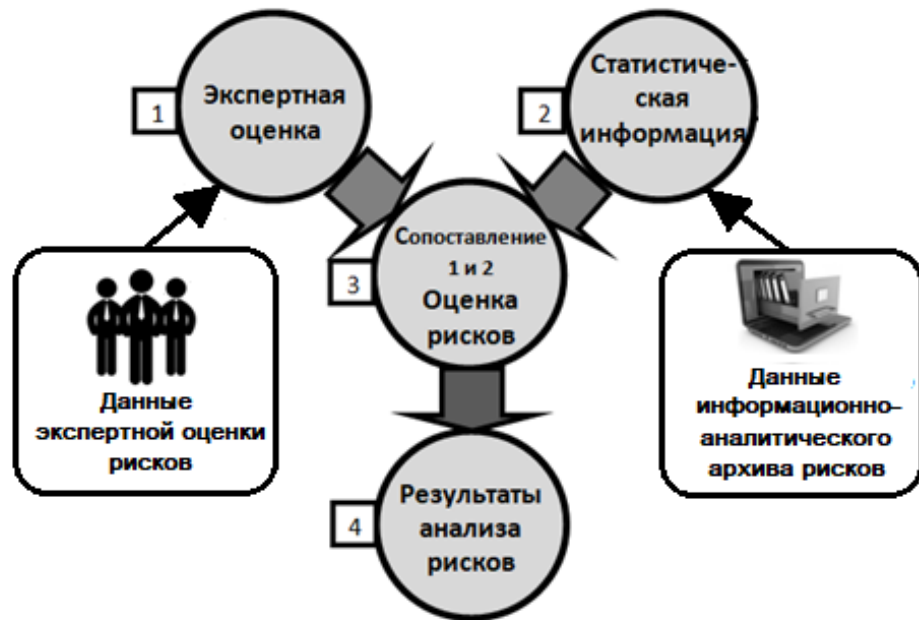


Рис. 4.2 Концептуальная схема анализа геотехнических рисков

На схеме видно, что этап оценки рисков (*блок 3*) предполагает сопоставление результатов экспертной оценки (*блок 1*) и статистических данных (*блок 2*). Стоит отметить, что характер использования информационного ресурса – статистической информации, возможен в широком спектре возможностей. В настоящей работе в качестве статистической информации рассматривается только внутренняя информация – информационно-аналитический архив рисков. Однако, наряду с внутренним архивом в качестве статистической информации может использоваться соответствующим образом обработанная внешняя информация, являющаяся продуктом инновационных решений и цифровизации («большие данные» (Big Data), «интернет вещей» («Internet of Things», IOT) [114]. В дальнейшей перспективе необходим анализ возможностей использования технологий Big Data в управлении рисками при строительстве объектов метрополитена. На рисунке 4.3 показан фрагмент перспективной концептуальной схемы *блока 2* с возможным использованием в качестве источника статистической информации внешнюю информацию «больших данных» [115].

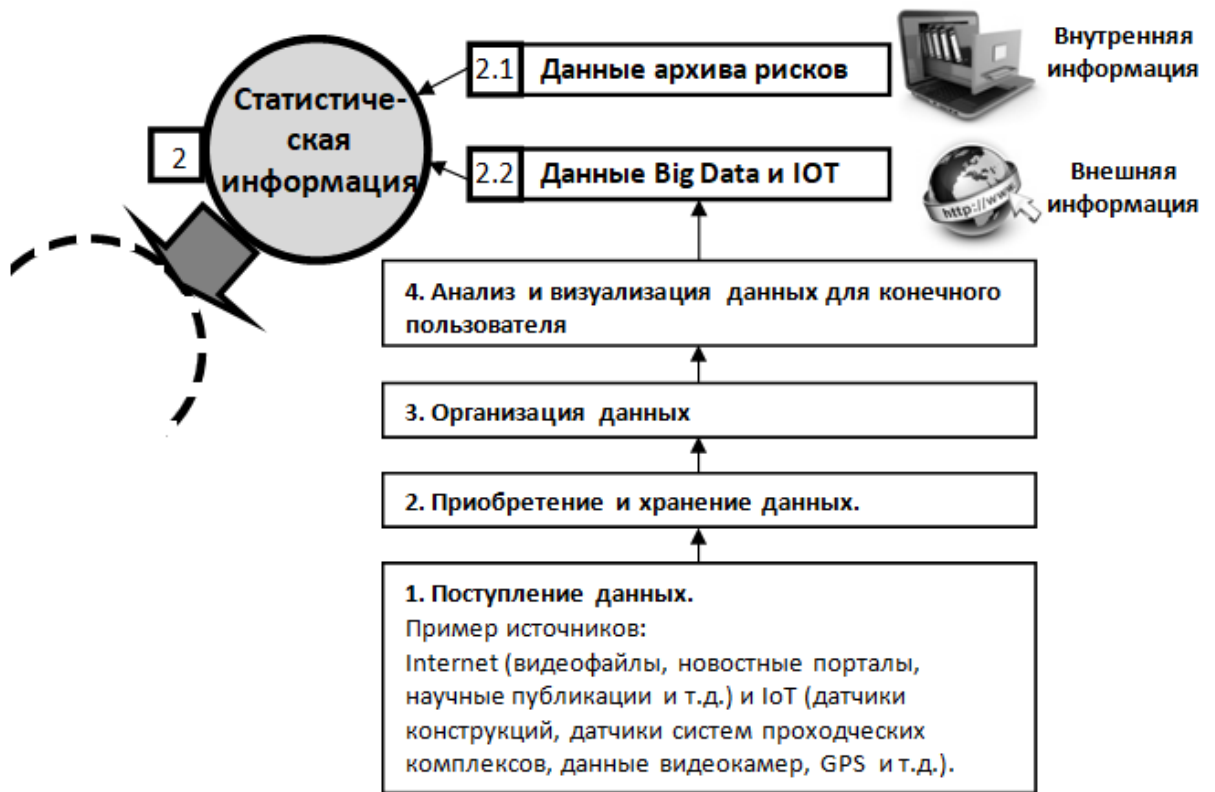


Рис. 4.3 Источники внешней информации для архива

Из схемы на рисунке 4.2 определяем основные составляющие подхода:

- 1) экспертная оценка (блок 1),
- 2) статистический анализ (блок 2),
- 3) сопоставление результатов экспертной оценки и статистического анализа (блок 3),
- 4) результаты анализа рисков (блок 4).

Метод экспертных оценок широко используется при анализе рисков опасных производственных объектов и сложных технических систем. Сущность метода заключается в наиболее целесообразной организации анализа экспертами проблемы, определении мнений экспертов, формировании на их основе необходимой информации с последующей количественной ее обработкой для получения результатов оценки. Важнейшим достоинством метода является использование знаний, практического опыта и аналитического потенциала экспертов в области метростроения и транспортного тоннелестроения для,

выявления рискообразующих факторов, прогнозирования вероятности проявления и описания возможных последствий конкретной рискованной ситуации для вновь возводимых объектов в сочетании с уникальной комбинацией сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условий, когда информация о возможных рисковых ситуациях отсутствует.

Экспертные методы могут классифицироваться по различным критериям [125]. В таблице 4.3 представлен вариант на основании признаков, соответствующим различным операциям процесса экспертной оценки.

Таблица 4.3

Классификация методов экспертных оценок

Критерий	Значение	Название метода
По характеру взаимодействия с экспертами	Очное	Очная беседа/Опрос
	Заочное	Анонимное анкетирование
По порядку учета мнений экспертов	Индивидуальные	Анкетный опрос
		Интервьюирование (свободная беседа, метод «вопрос-ответ», метод «перекрестный допрос»)
		Тестирование
		Метод Дельфи
		Морфологический анализ
		Метод сценариев
	Коллективные	Мозговой штурм
		Деловая игра
		Метод суда
		Метод ПАТТЕРН
		Метод сценариев
		Метод комиссий (совещаний)
По характеру измеряемости выполняемой оценки	Количественные оценки	Непосредственная количественная оценка
		Метод весовых коэффициентов
		Метод средней точки
		Метод Черчмена-Акоффа
		Метод лотерей
	Качественные оценки	Экспертная классификация
		Метод парных сравнений
		Ранжирование альтернативных вариантов
		Метод векторов предпочтений
		Дискретные экспертные кривые
		Метод ассоциаций
		Метод фокальных объектов

По стадийности процедуры согласования оценок	Однотуровый	
	Многотуровый	

Некоторые авторы придерживаются мнения, что при наличии аналитических или экспериментальных методов, с помощью которых поставленную задачу можно решить более точно и менее затратно, от применения экспертных методов необходимо отказаться [124]. Даже тщательно обработанные и согласованные результаты оценки опытных экспертов будут заключать в себе фактор субъективности, зависящий от образования, опыта, интуиции и навыков предиктивного анализа конкретного эксперта. То есть вопрос выбора экспертов с требуемыми качествами и решение о количестве экспертов становится критически важным. При этом увеличение численности экспертной группы фактор субъективности не снизит, так как каждый новый эксперт будет обладать собственным компетентностным набором и суждениями по конкретному риску. Так, Э.П. Райхман и Г.Г. Азгальдов в работе [125] значительное внимание уделяют вопросам формирования экспертной группы с точки зрения формализации процесса определения качества и количества экспертов. В частности, авторы отмечают, что в практике при формировании экспертной группы зачастую не учитывается качество экспертов, а их количество выбирается необоснованно [125]. В свою очередь необоснованное увеличение экспертной группы существенно повышает трудоемкость и стоимость процесса экспертной оценки и негативно влияет на его эффективность. Проблеме формализации процесса выбора оптимального количества экспертов в группе посвящены также работы [130, 132, 134, 151-155]. В [130, 154] для расчета предварительного количества экспертов применяется аппарат теории вероятности и математическую статистику и предлагает рассматривать два варианта количественных групп – до 30 человек и более 30 человек. В [151] количество экспертов должно быть не меньше числа элементов для ранжирования в процессе оценки. Согласно [153] рекомендованный диапазон количества экспертов - от 10 до 30, а в [132] – от 7 до 20 экспертов. В

[134] определяется минимальное количество экспертов на основе допустимой ошибки результата экспертной оценки, а в [155] – на основе коэффициента вариации. В [152] определяется максимальное количество экспертов на основе оценки компетентности экспертов. Таким образом, не наблюдается общей позиции относительно подхода к определению оптимальной или рекомендуемой средней численности экспертной группы, а также определяющих (ведущих) показателей численности группы (минимальное количество, максимальное количество или диапазон).

В общем случае состав и последовательность операций процесса экспертной оценки выглядит следующим образом (таблица 4.4):

Таблица 4.4

Процесс экспертной оценки

№ операции	Содержание операции
1	Определение проблемы, формулирование целей и задач исследования
2	Принятие решения об использовании метода экспертной оценки, определение бюджета
3	Разработка организационно-методических документов, подготовка рабочей группы, подготовка материалов для оценки, выбор метода сбора экспертной информации, составление графика, и т.д.
4	Определение количества и состава экспертов
5	Проведение сбора экспертной информации
6	Обработка и анализ экспертной информации (обработка экспертных оценок)
7	Подготовка отчета с результатами экспертной оценки

После проведения сбора экспертной информации производится ее обработка для преобразования (формализации) в форму, удобную для последующего анализа и достижения цели исследования. В зависимости от целей исследований экспертная информация может быть количественной (экспертиза непосредственно числовых показателей в рамках исследования) или качественной. Во втором случае для представления мнения экспертов будет использована количественная интерпретация (присвоение рангов, баллов, весовых коэффициентов и т.д.).

Основными задачами при обработке результатов могут быть:

- 1) построение обобщенной оценки на основании отдельных мнений экспертов;
- 2) определение относительных весов объектов оценки;
- 3) определение согласованности мнений экспертов;
- 4) оценка надежности и достоверности результатов.

Операцию по обработке результатов иногда относят к отдельной классификационной группе методов экспертных оценок – математико-статистическим методам, тогда как получение мнений экспертов – к методам опроса экспертов [116]. В таблице 4.5 представлены методы обработки экспертной информации.

Таблица 4.5

Методы обработки экспертной информации

Метод	Описание
Простой арифметический подсчет ранжировки без усреднения	Подсчет распределения баллов по количеству экспертов
Обобщенная оценка методом средних арифметических рангов	Число баллов экспертов объектам экспертизы усредняются с использованием оценки среднего арифметического (точечной оценки)
Обобщенная оценка методом медианных рангов	Число баллов экспертов объектам экспертизы усредняются с использованием медиан, вычисленных как среднее арифметическое центральных членов вариационного ряда
Определение согласованности мнений экспертов	Анализ разброса и согласованности оценок выполняется на основе статистических характеристик – мер разброса (вариационный размах, дисперсия, среднеквадратическое отклонение), определения коэффициентов ранговой корреляции Кендалла [118] и Спирмена [119], дисперсионного и энтропийного коэффициентов конкордации, альтернативного коэффициента конкордации [120, 121], и т.д.
Определение компетентности экспертов	Определение весового коэффициента компетентности
Оценка надежности и достоверности результатов экспертизы.	Установление критериев надежности и достоверности оценки

При этом важно понимать, что, например, ранжирование, метод сравнений, метод предпочтений следует относить прежде всего к операции сбора экспертной информации, так как результатом является мнение эксперта (группы экспертов), выраженное в количественных показателях для дальнейшей обработки и получения обобщенного результата. Операция обработки экспертной информации может включать 1-2 метода, либо целый комплекс методов в зависимости от сложности проблемы, требуемой точности результата, метода сбора экспертной информации, поставленных задач (формирование обобщенной оценки, определение относительных весов объектов, определение степени согласованности мнений и т.д.). Цель обработки результатов оценки группы экспертов – определение результата обобщенного мнения, либо выявление резко отличающихся мнений (в том числе сформированные в группы). Обработка результатов в количественной форме (как правило, в форме баллов, рангов) основывается на теории статистических выборок определенного закона распределения вероятностей (методы математической статистики). Количество экспертов при оценке рисков представляет собой малую статистическую выборку (редко может превысить 30 экспертов), и не сравнимо, например, с количеством респондентов социальных исследований. В таком случае может применяться t -распределение Стьюдента. Дальнейшая обработка результатов математической выборки объемом n (численность группы) случайной величины X сводится к определению функций выборки: выборочного среднего $\widehat{m}_x$, выборочной дисперсии $\widehat{d}_x$, исправленной (несмещенной) выборочной дисперсии S_x^2 и исправленному среднеквадратическому отклонению s по известным формулам:

$$\widehat{m}_x \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.20)$$

$$\widehat{d}_x \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \widehat{m}_x)^2 \quad (4.21)$$

$$S_x^2 = \frac{n}{n-1} \widehat{d}_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \widehat{m}_x)^2 \quad (4.22)$$

$$s = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{n}{n-1} \widehat{d}_x} \quad (4.23)$$

На основании определенных функций выборки вычисляются доверительные границы X_A и X_B по формулам (4.24) и (4.25) для определения доверительного интервала b (4.26) с наибольшим количеством идентичных мнений экспертов ($t_{\frac{1}{\alpha}}$ – квантиль распределения Стьюдента).

$$X_A = \widehat{m}_x - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.24)$$

$$X_B = \widehat{m}_x + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.25)$$

$$\widehat{m}_x - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \leq b \leq \widehat{m}_x + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.26)$$

Необходимо отметить, что проверка надежности и достоверности зачастую не выделяется в отдельный этап обработки результатов экспертизы с применением соответствующего метода. Соответственно, решение о достоверности полученных результатов сводится к формализации степени согласованности мнений экспертов и степени их компетентности.

При определении согласованности мнений экспертов требуется, чтобы степень согласованности была достаточной для признания результатов проведенной экспертной оценки. Согласованность мнений экспертов в случае наличия связанных рангов может устанавливаться на основе определения

коэффициента конкордации Кендалла, либо по формуле (4.20) дисперсионного коэффициента конкордации для случая отсутствия связанных рангов:

$$W = \frac{12S}{m^2 n(n^2 - 1)} \quad (4.20)$$

где S – это сумма квадратов отклонения оценок рангов каждого объекта в процессе экспертной оценки от среднего значения. Определяется по формуле (4.21):

$$S = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{m(n+1)}{2} \right\}^2 \quad (4.21)$$

где m – число экспертов,

n – число объектов для экспертной оценки (рисковых ситуаций, факторов риска, последствий и т.д.),

i – номер объекта экспертной оценки,

j – номер эксперта.

Коэффициент W теоретически находится в интервале $[0; 1]$ и представляет собой сумму отклонений мнений экспертов от варианта, если мнения представлены совершенно случайно. Необходимо отметить, что таких случайных вариантов может быть достаточно много. Следовательно, неочевидно, с каким вариантом происходит сравнение [120]. Таким образом, использование коэффициента W в качестве критерия согласованности мнений экспертов не является гарантией подтверждения согласованности мнений [120, 121, 153]. В частности, для устранения недостатков применения коэффициента в работах [120, 121] предлагается применение альтернативных коэффициентов конкордации.

Возвращаясь к фактору субъективности результатов оценки отдельных экспертов, очевидно, что при анализе и оценке геотехнических рисков полагаться только на согласованность мнений экспертов не представляется возможным. Предполагается, что повышение достоверности результатов экспертных оценок

может быть достигнуто путем привлечения в группу наиболее компетентных экспертов. Таким образом, актуальными задачами являются: подбор экспертов, определение их компетентности, сравнение и выделение экспертной группы. В процессе экспертной оценки (таблица 4.4) для этого может быть выделена операция «Определение количества и состава экспертов (экспертной группы)», а в перечне методов (таблица 4.5) имеется «Определение компетентности экспертов».

В таблице 4.6 представлены определения понятия «компетентность», которые приведены в ряде нормативно-технических и отраслевых документах [170-185] в области менеджмента качества, риска, проектирования, безопасности. Анализируя и обобщая содержание данных определений, можно сделать вывод, что основные критерии компетентности – это знания и навыки по определенной теме. Однако в ряде документов уточняется, что факта наличия знаний и навыков недостаточно. Необходима способность, в том числе подтвержденная, применять эти знания и навыки. В ряде определений обязательным критерием является опыт, связанный с определенной темой или областью знаний. Ничего не сказано относительно влияния на компетентность опыта научной деятельности и наличия научной квалификации. Наконец, некоторые определения включают необходимым критерием наличие личностных характеристик и выраженных личных качеств.

Таблица 4.6

№ п/п	Определение понятия "компетентность"	Источник
1	Продемонстрированная способность, применять знания и навыки [170]	[170]
2	Накопление знаний, навыков и опыта, относящиеся к конкретной теме или области [171]	[171]
3	Способность применять знания и профессиональные навыки для достижения запланированных результатов [172]	[172]
4	Способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов Примечания: 1. Продемонстрированная компетентность иногда рассматривается как квалификация - уровень знаний, умений, профессиональных навыков и опыта работника, характеризующий подготовленность к выполнению определенного вида профессиональной деятельности. 2. Компетентность подразумевает наличие мотивационного, этического, социального, эмоционального и поведенческого компонентов, определяющих личностное отношение работника к своей деятельности [173-175]	[173-175]
5	Проявленные личные качества и выраженная способность применять свои знания и навыки [176]	[176]
6	Комплекс профессиональных знаний, мастерства и опыта, а также соответствующего состояния здоровья, которые дают возможность персоналу надлежащим образом выполнять неразрушающий или разрушающий контроль [177]	[177]
7	Совокупность знаний, навыков и опыта, связанная с определенной темой или областью знаний [178]	[178]
8	Наличие знаний, умений и навыков и способность их применять для достижения результатов [179]	[179]
9	Подтвержденная способность применять знания и навыки для достижения желаемых результатов [180]	[180]
10	Способность применять знания и навыки на практике для достижения намеченных результатов [181]	[181]

11	Компетентность персонала - это совокупность навыков, опыта, специальных знаний и личностных характеристик, позволяющих работнику успешно выполнять свою функцию (роль) [182]	[182]
12	Выраженные личные качества и способность применять свои знания и навыки [183]	[183]
13	Охватывает знания, навыки и производственный опыт, применяемые и совершенствуемые в конкретных условиях [184]	[184]
14	Выраженная способность работника организации применять на практике свою квалификацию [185]	[185]

Наличие знаний, навыков и опыта в определенной сфере можно документально подтвердить дипломами, сертификатами, стажем работы. В свою очередь, назначение и измерение практического опыта необходимого уровня (занимался ли эксперт решением конкретных задач по исследуемой тематике), способности применять знания и навыки на практике, личностных характеристик и качеств отдельного эксперта не представляется возможным выполнить в должной мере, либо невозможно. Например, в работах [130-135] авторами предлагаются следующие личные качества экспертов, наличие которых должны определить сами эксперты путем самооценки по заданной шкале:

- организованность;
- дисциплинированность,
- оперативная оценка ситуации, принятие эффективных решений и способность к своевременной реализации данных решений,
- стремление к профессиональному росту и постоянному повышению квалификации,
- умение создать в рабочем коллективе нормальный психологический климат.

Необходимо отметить, что в области экспертизы пожарных рисков, промышленной безопасности опасных промышленных объектов, проектной документации, судебной экспертизы вопрос о компетентности экспертов решается наличием обязательной государственной аттестации с соответствующей нормативно-правовой базой (Постановление Правительства РФ от 02.06.2022 № 1009 «Об аттестации экспертов в области промышленной безопасности», Постановление Правительства РФ от 29 ноября 2021 г. № 2081 «Об аттестации должностных лиц, осуществляющих деятельность в области оценки пожарного риска», Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2460 «Правила аттестации, переаттестации на право подготовки заключений экспертизы проектной документации и (или) экспертизы результатов инженерных изысканий, в том числе продления срока действия квалификационного аттестата на право подготовки заключений экспертизы проектной документации и (или) экспертизы

результатов инженерных изысканий»). В области оценки геотехнических рисков в настоящий момент специальная аттестация экспертов отсутствует.

Данные обстоятельства представляет значительную сложность для организаторов экспертной оценки и вносит неопределенность в процедуру выбора экспертов. Назначение критериев, необходимого диапазона каждого критерия, мнение о соответствии экспертов данным критериям остается в зоне принятия решения организаторов проведения экспертной оценки, делая организаторов своего рода «экспертами для экспертов». В связи с этим очевидно возникает следующая проблема фактора субъективности: на субъективность мнения отдельного эксперта накладывается субъективность мнения организатора проведения оценки при назначении критериев компетентности экспертов и определении соответствия отдельного эксперта данным критериям.

В общем случае можно предположить, что фактор субъективности при назначении критериев компетентности и выборе экспертной группы можно интерпретировать как проявление неопределенности для выполнения расчетов, описываемых ошибками 1-го и 2-го рода для проверки гипотез (таблица 4.7).

Таблица 4.7

Критерий K1 - Стаж работы от 5 до 10 лет в строительстве объектов метрополитена Критерий K2 - Наличие научной квалификации и научных трудов в области строительства объектов метрополитена за последние 5 лет свыше 20 работ		
Результат принятия решения	Верная гипотеза	
	H_1	H_0
	K1 - весовой коэффициент - 0,3 K2 – весовой коэффициент – 0,5	K1 - весовой коэффициент - 0,5 K2 – весовой коэффициент – 0,5
Принять H_1 и отклонить H_0	H_1 верно принята. H_0 верно отклонена.	H_1 неверно принята. H_0 неверно отклонена. (ошибка 1-го рода)
Принять H_0 и отклонить H_1	H_1 неверно отклонена. H_0 неверно принята. (ошибка 2-го рода)	H_1 верно отклонена. H_0 верно принята.

В таблице 4.7 показан пример условия проверки гипотезы о назначении весовых коэффициентов критериев компетентности. Нулевая гипотеза H_0 состоит

в том, что вес (приоритетность) критерия K1 по стажу работы эксперта от 5 до 10 лет в строительстве объектов метрополитена и вес критерия K2 по наличию научной квалификации и научных трудов в области строительства объектов метрополитена за последние 5 лет свыше 20 работ не имеют различия. То есть связь между повышением уровня компетентности эксперта, а также вероятности достоверности его суждений при наличии опыта научной деятельности отсутствует. Альтернатива H_1 предполагает, что научный опыт и научная квалификация в области строительства объектов метрополитена является более весомым критерием, чем стаж работы. Однако для проверки правильности принятия гипотезы о назначении весового коэффициента необходимо наличие статистической выборки. То есть необходимо провести ряд экспертных оценок рисков, выявить достоверные и недостоверные оценки, получить статистику оценок экспертов, выбранных по критериям K1 и K2, и только затем получить ответ о правильности назначения весовости критерия для выбора эксперта.

Для выявления взаимосвязи между значимостью различных критериев компетенции и возможностью экспертов наиболее полно провести идентификацию рискованных ситуаций на этапе качественного анализа, в рамках диссертации автором была проведена следующая работа. Специалистам различных организаций-участников строительства метрополитенов было предложено идентифицировать возможные рискованные ситуации при строительстве 5-ти типов сооружений метрополитена согласно типологии. В процессе работы специалисты заполняли документ (анкету) для сбора информации о рискованных ситуациях при строительстве метрополитенов по форме Приложения № 2 к настоящей диссертации. При этом список возможных рискованных ситуаций специалисты составляли самостоятельно. Необходимо отметить, что рискованные ситуации должны были быть идентифицированы специалистами не применительно к конкретному объекту строительства, а в целом к типу сооружения.

Специалисты были выбраны из организаций 3-х групп:

- группа «Строительные организации» (13 специалистов),

- группа «Проектные организации» (11 специалистов),
- группа «Научные организации» (9 специалистов).

В группу «Строительные организации» вошли фирмы, непосредственно выполняющие горно-строительные работы при сооружении объектов метрополитена (АО «Мосметрострой», АО «Трансинжстрой», ООО «СИАРСИСИ РУС»). В группу «Проектные организации» вошли специалисты проектных институтов по проектированию метрополитенов (АО «Метрогипротранс», ОАО «Ленметрогипротранс», БКП АО «Трансинжстрой»). В группу «Научные организации» вошли специалисты с ученой степенью, деятельность и область научных интересов которых связана со строительством метрополитенов и транспортных тоннелей, а также вопросами управления рисков (ООО «Тоннельная ассоциация России», НИТУ «МИСиС», АО «Мосинжпроект», ФБГОУ ВО СПГУ). На момент заполнения анкет специалисты являлись действующими сотрудниками организаций. Должности специалистов: главные инженеры проекта, начальники отделов проектирования, руководители и заместители руководителей строительно-монтажных управлений, начальники, руководители дирекций и департаментов по научно-техническому сопровождению строительства, доценты и профессора профильных кафедр ВУЗов. Опыт работы в области строительства метрополитенов и транспортных тоннелей – от 10 до 50 лет. Распределение по опыту работы представлено на рисунке 4.4. Также в анкете учитывалось наличие ученой степени.

Результаты по количеству выделенных каждым специалистом рискованных ситуаций (РС) по типам сооружений 1-5 проанализированы автором и представлены в форме гистограмм на рисунке 4.5, а. В целом существенного расхождения мнений по количеству идентифицированных возможных РС для типов сооружений 1-5 между группами не наблюдается. Вместе тем, на диаграмме группы «Научные организации» (специалист 1, область научных интересов

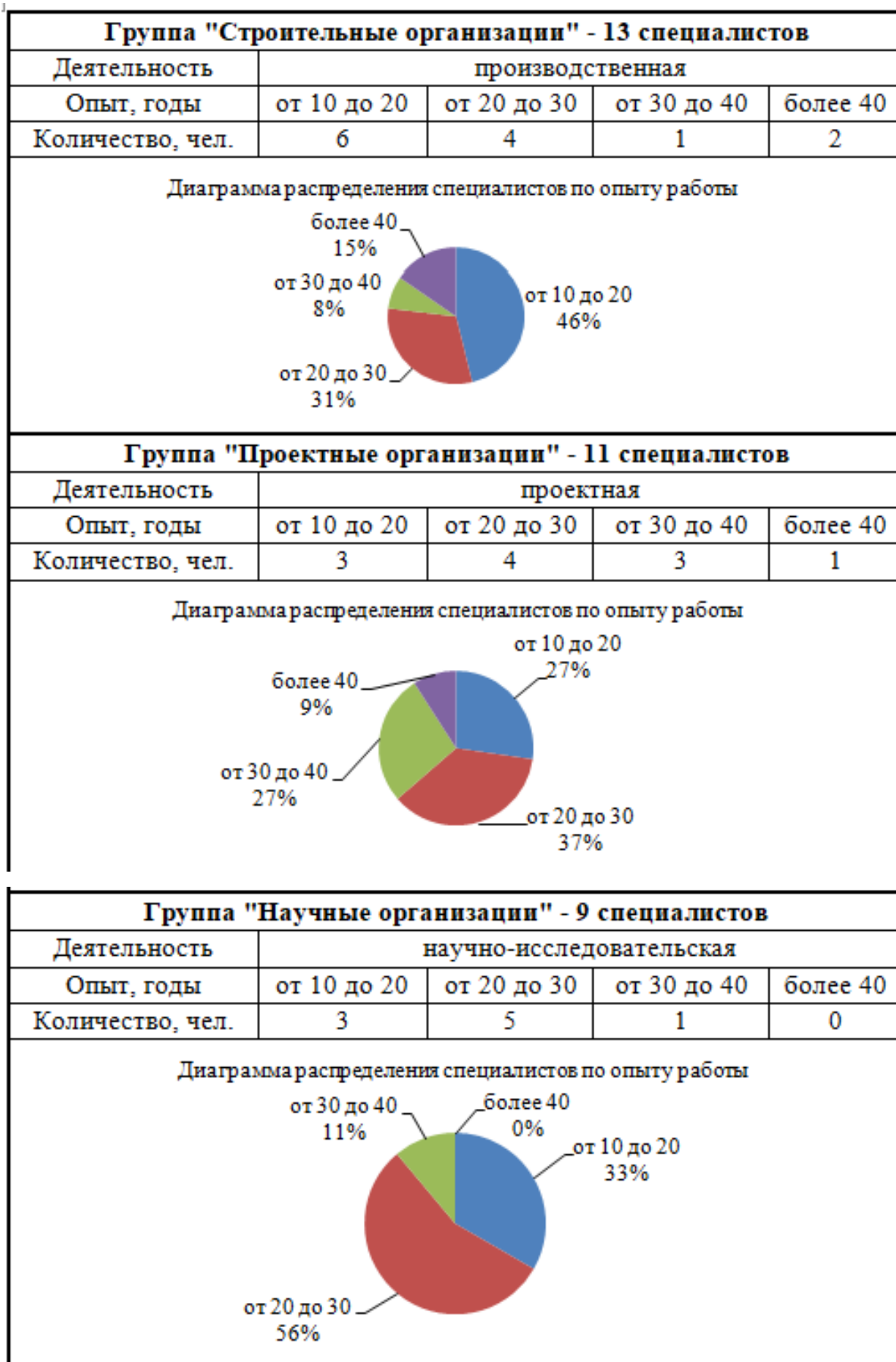
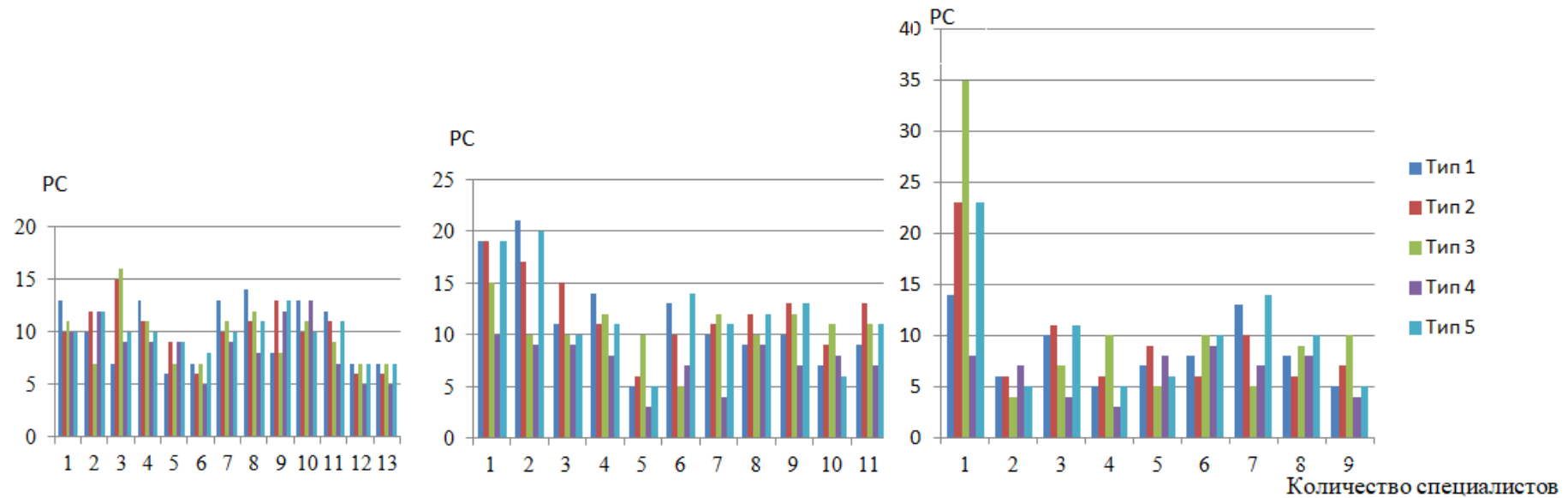


Рис. 4.4. Распределение специалистов по опыту работы

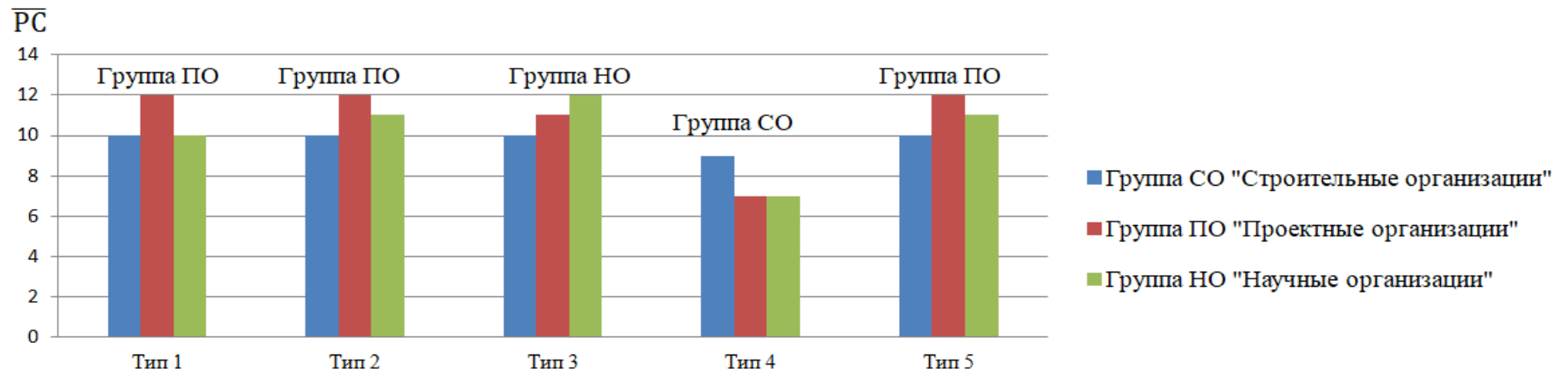
Группа «Строительные организации»

Группа «Проектные организации»

Группа «Научные организации»



а)



б) Рис. 4.5. Результаты идентификации рисков ситуаций (РС) специалистами 3-х групп

связана с управлением геотехническими рисками) регистрируется важный момент: значительный выброс по количеству идентифицированных РС по типу 3 по сравнению с общим результатом 3-х групп, а по типам 2 и 5 – в целом по группе «Научные организации».

По критерию опыта работы фиксируется небольшое увеличение в группе «Строительные организации» у специалистов с опытом работы в исследуемой области более 40 лет, а также увеличение до 30% по типам 1, 2 и 5 в группе «Проектные организации» у специалистов с опытом работы в исследуемой области от 30 до 40 лет. Средние арифметические значения $\overline{PC}$ результатов групп по типам сооружений представлены в виде результирующей гистограммы на рисунке 4.5, б (результаты по выбросу из выборки исключены по причине возможного искажения результатов даже в случае использовании медианы вместо среднего арифметического). Из результирующей гистограммы существенной разницы результатов идентификации по группам специалистов производственной, проектной, научно-исследовательской деятельности не выявлено. Вместе с тем имеются различия в группах-лидерах по типам сооружений. Наибольшее количество рискованных ситуаций при строительстве вертикальных стволов, перегоны и эскалаторных тоннелей (типы сооружений 1, 2 и 5) выделено специалистами группы «Проектные организации». По станционным сооружениям открытого способа строительства (тип 3) наибольшее количество рискованных ситуаций выделено специалистами группы «Научные организации». По станционным сооружениям глубокого заложения закрытого способа строительства (тип 4) лидерами являются специалисты группы «Строительные организации».

Также в ходе работы выявлена следующая особенность неравномерности приоритетов при идентификации рискованных ситуаций специалистами разных групп (таблица 4.8).

Таблица 4.8

Группа специалистов	Выделенные рисковые ситуации
Группа «Строительные организации»	Связанные с выходом из строя и неисправностью горнопроходческого оборудования, систем, рельсового транспорта, остановкой и сдавливанием (засасыванием) тоннелепроходческого комплекса и обделки, проявлением горного давления и воздействием подземных вод
Группа «Проектные организации»	Связанные со сверхнормативными деформациями, повреждением и разрушением постоянной обделки, переборами грунта, нарушением технологии проходки, сверхнормативными отклонениями осей сооружения, сверхпроектным приближением строящегося сооружения к действующим сооружениям метрополитена
Группа «Научные организации»	Связанные с несоответствием данных ИГИ фактической ситуации, наличием карстовых полостей, зон разуплотнения, пучения пород, сейсмическими воздействиями, недостаточным объемом геомониторинга, подтоплением в результате баражного эффекта, несоблюдением диаграмм пригрузки, ошибками в расчетах обделки

По результатам проведенной работы можно сформулировать рекомендации о компетентном составе экспертной группы для повышения полноты и достоверности оценки. По критерию опыта работы - **желательный опыт в исследуемой области от 20 лет**. Оптимально в экспертную группу должны входить представители **строительных, проектных и научных организаций**. Вместе с тем выброс в выборке по специалисту в группе «Научные организации» указывает на необходимость наличия в группе «Научные организации» именно **специалиста в области управления геотехническими рисками в строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей**. Таким образом, достоверность экспертной оценки в определенной степени будет зависеть от возможности найти и включить в группу оценки такого специалиста.

После назначения критериев компетентности и назначения веса (приоритетности) каждого критерия организаторам необходимо выбрать группу наиболее компетентных экспертов (определить *качественный и количественно-компетентностный состав группы*). Базовым подходом к формализации процесса определения качественного состава экспертной группы является расчет по

различным методикам *коэффициентов (показателей) компетентности экспертов* [130-140] (таблица 4.9). Например, для оценки уровня компетентности K_i (качественный состав) каждого i -ого эксперта по каждому критерию $j=p$ в работе [130] предложено выражение (4.24). В работе [136] автор выделяет коэффициент относительной самооценки, взаимной оценки, объективный коэффициент компетентности экспертов. Весовой коэффициент экспертов предлагается определять по выражению (4.25) для каждого фактора (критерия), где p – количество назначенных критериев, m – количество экспертов, a_i – баллы i -го эксперта по j -му критерию. В работе [137] предложен расчет обобщающего коэффициента компетентности (выражение (4.26), где K_d , K_n , K_k , K_m – коэффициенты состояния локальных документов, устранения нарушений, контроля и планирования и реализации мероприятий, k_{Π} – поправочный коэффициент функциональной возможности реализации профессиональных компетенций. В работах [138, 139] решается задача формирования высококвалифицированных экспертных групп для принятия итоговых решений при оценке предложений по проведению фундаментальных поисковых и прогнозных исследований. Квалификация оценивается в соответствии с занимаемой должностью и наличием ученой степени (выражение (4.27). В [140] предложено численно определять качество эксперта интегральным показателем качества по выражению (4.28) на основании свойств эксперта в виде многокритериальной иерархической структуры, включающей компетентность, заинтересованность, деловитость, объективность. В выражении (4.28) R_k – это весомости критериев, V_{ik}^r – эталонные весомости объекта экспертизы по каждому из критериев сравнения.

Таблица 4.9

Определение качественного состава экспертной группы

Наименование показателя	Расчет
Коэффициент уровня компетентности, [130]	$K_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (4.24)$
Весовой коэффициент экспертов, [136]	$W_i = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad \sum_{i=1}^m W_i = 1 \quad (4.25)$
Обобщающий коэффициент компетентности, [137]	$K_0 = 0,25(K_D + K_H + K_K + K_M)k_{\Pi} \quad (4.26)$
Коэффициент квалификации и опыта эксперта, [138]	$e_n = \sqrt{\frac{r_{nij}}{r_{\max}}} \in \left[\frac{1}{\sqrt{12}}; 1 \right] \quad (4.27)$
Интегральный показатель качества эксперта, [140]	$y_{ir} = \sum_{k=1}^K R_k V_{ik}^r \quad (4.28)$

После определения коэффициента (показателя) компетентности каждого эксперта необходимо оставить в группе наиболее компетентных экспертов и определить оптимальную численность (определить *количественно-компетентностный состав группы*). То есть решается, какие именно эксперты должны войти в экспертную группу. Существуют различные подходы к формализации данного процесса (таблица 4.10).

Таблица 4.10

Определение количественно-компетентностного состава экспертной группы

Наименование показателя	Расчет
Количество экспертов рабочей группы и оценка уровня компетентности группы М, [130]	$m = \frac{\sigma^2}{\mu^2}, \text{ при } m > 30 \quad m = \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1, \text{ при } m < 30$ $M = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K_i \quad (4.29)$
Необходимая выборочная совокупность экспертов, [136]	$n = \frac{t^2 \sigma^2 N}{\Delta^2 N + t^2 \sigma^2} \quad (4.30)$

Необходимое минимальное количество экспертов, [155]	$m = \left(\frac{VU_P}{M} \right)^2 \quad (4.32)$
---	--

Например, согласно [130], окончательная рабочая группа m выбирается из ранжированного ряда, начиная с наибольшего уровня компетентности (по выражению (4.24)). Далее выполняется общая оценка компетентности M экспертной группы по выражению (4.29). В работе [136] численность n экспертов (необходимая выборочная совокупность) рассчитывается по выражению (4.30), где t – коэффициент доверия, σ – выборочная дисперсия для весовых коэффициентов, определенных по выражению (4.25); N – генеральная совокупность экспертов. При этом в выборочную совокупность должны попасть эксперты с наибольшим глобальным приоритетом среди остальных экспертов с учетом приоритетности критериев. В [155] необходимое минимальное количество экспертов (выражение (4.32) с учетом коэффициента вариации).

Представленный анализ процессов определения количественного, качественного и количественно-компетентностного состава экспертных групп указывает на то, что несмотря на развитие формально-теоретического базиса для численных расчетов, в основе процессов назначения критериев компетентности, определения их веса и значимости, определения соответствие эксперта тому или иному критерию заложено мнение организаторов экспертной оценки, а также мнение по самооценке и взаимной оценке самих экспертов. Обращает на себя внимание присутствие фактора субъективности при назначении компонентов выражений для расчета.

Обобщая результаты проведенного анализа, можно выделить очевидные недостатки метода экспертных оценок:

- 1) недостатки методик расчета и ограничения применения коэффициента конкордации для подтверждения согласованности мнений экспертов;
- 2) субъективность организаторов оценки при:

- назначении необходимых и приоритетных критериев компетентности экспертов;

- принятии решения о соответствии экспертов данным критериям;

3) недостатки методик расчета показателей компетентности экспертов;

4) субъективность экспертов в процессе экспертной оценки.

Результатом оценки должны стать управленческие решения для исключения и минимизации геотехнических рисков. Тогда достоверность оценки может рассматриваться как один из решающих критериев при принятии решений. Обобщая достоинства и выявленные недостатки метода экспертных оценок и статистического метода, данные о многообразии сценариев рискованных ситуаций, фактор сложности системы метрополитена, многокритериальность задач создания подземных объектов в условиях неопределенности и риска, наличие несистематизированного опыта рискованных ситуаций при строительстве метрополитена и транспортных тоннелей, полагаем, что достоверная оценка геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена должна основываться на основе сопоставления результатов экспертной оценки и статистических данных – **экспертно-статистическом подходе** (рисунок 4.6).

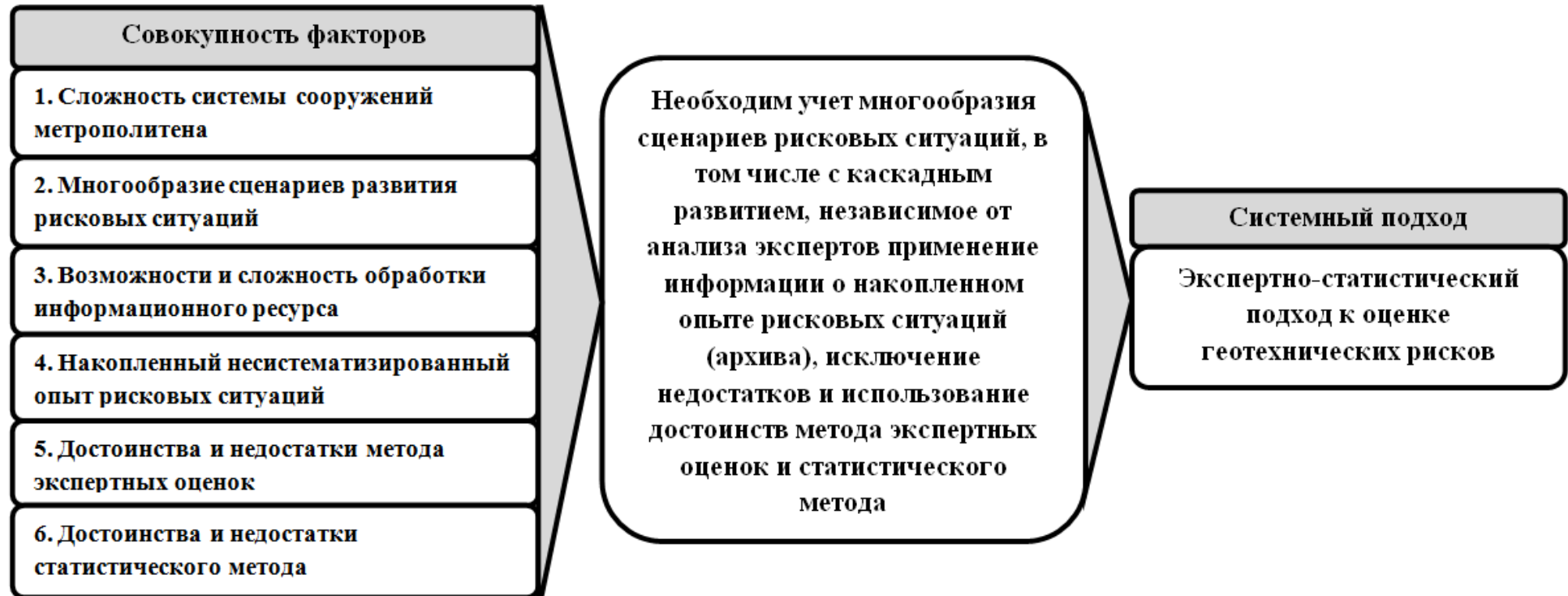


Рис. 4.6. Схема обоснования необходимости системности анализа геотехнических рисков на основании экспертно-статистического подхода

4.4 Методика анализа геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена

На основании полученных принципов, моделей, сформулированных понятий, подходов и требований сформирована общая методика анализа риска с применением экспертно-статистического подхода к оценке при сооружении объектов метрополитена. Структура и алгоритм методики представлены в виде блок-схемы (рисунок 4.7).

Основные компоненты методики: экспертная оценка, статистический анализ, сопоставление результатов и анализ возможности реализации каскада геотехнических рисков (КГТР) (этап 1), анализ КГТР и оценка вероятности реализации сценарных траекторий (этап 1.1), оценка допустимости (приемлемости) результатов и разработка комплекса мер по минимизации риска и снижению возможного ущерба (этап 2). На начальном этапе организаторами анализа должна быть подготовлена вся необходимая информация об объекте строительства и определен тип объекта согласно типологии, предложенной в главе 2. Данная информация, во-первых, заносится организаторами в информационно-аналитический архив рисков для статистической составляющей и, во-вторых, передается экспертной группе для выполнения экспертной оценки. Также организаторами должны быть определены численность и количественно-компетентностный состав экспертной группы согласно рекомендациям, сформулированным выше.

На этапе 1 при выполнении экспертной составляющей выполняется идентификация рискованных ситуаций (качественный анализ). Идентификация должна быть основана на разработанных в Главе 3 классификациях рисков по составляющим. При этом каждой составляющей присваивается идентификационный номер согласно разработанным в Главе 3 классификационным таблицам (рисунки 3.1, 3.4, 3.5, Приложение № 2).

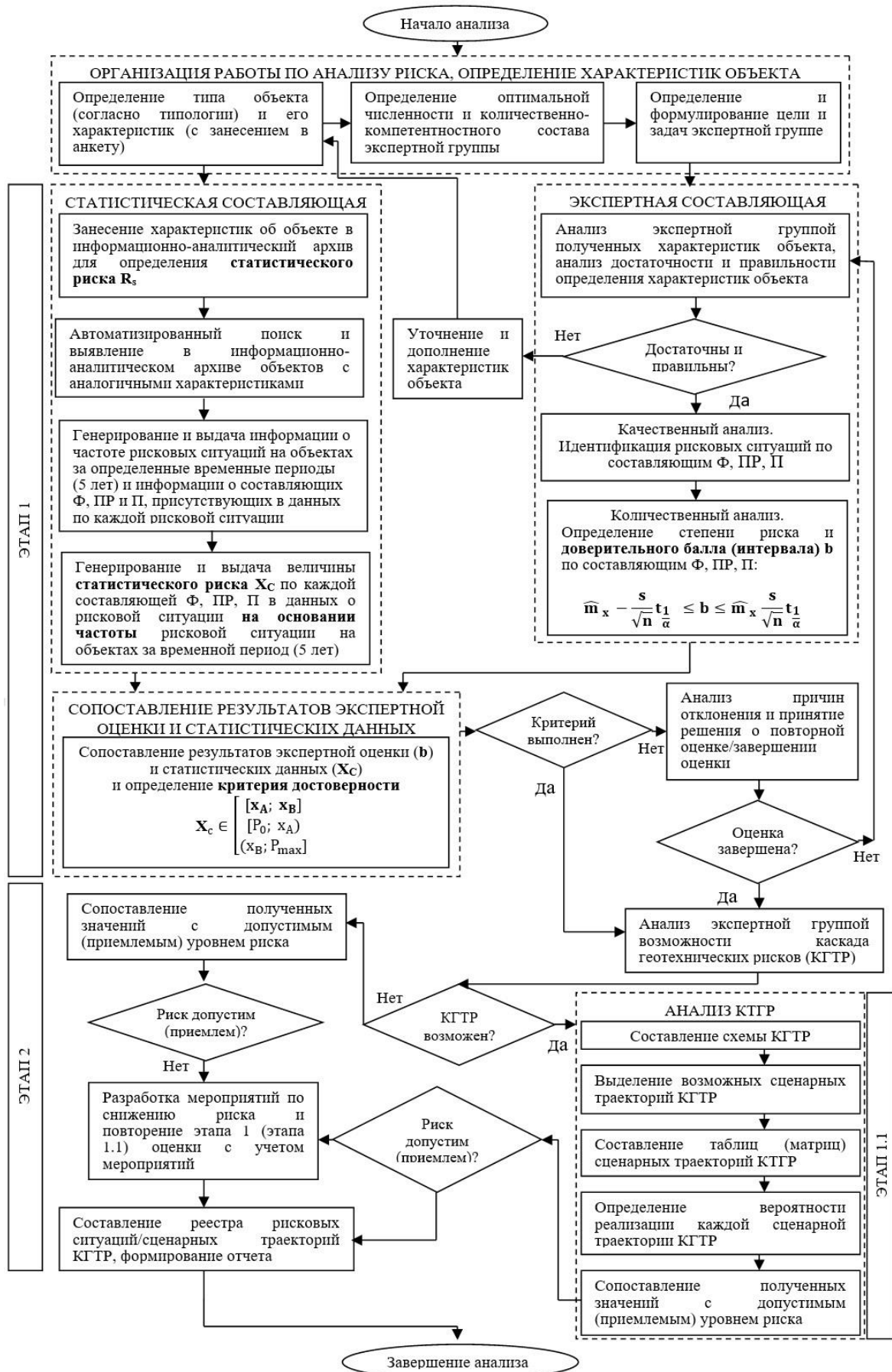


Рис. 4.7. Структура и алгоритм методики анализа геотехнических рисков

После идентификации рискованных ситуаций экспертами определяется вероятность их возникновения (количественный анализ) для выделения наиболее вероятных по возникновению рискованных ситуаций при строительстве объекта с точки зрения причин, проявлений и последствий. На начальном этапе экспертами производится ранжирование составляющих рискованных ситуаций по степени проявления. Оптимальным является начать процесс с проявлений, далее переходя к факторам и последствиям. Ранжирование выполняется в соответствии со степенью вероятности возникновения составляющей рискованной ситуации $P_i \in [P_0; P_{\max}]$ с присвоением ранга от 0 до 4 (таблица 4.11).

Таблица 4.11

**Ранжирование составляющих рискованных ситуаций по вероятности
возникновения**

Обозначение степени	Наименование степени вероятности	Описание	Степень возникновения, ранг
P_0	вероятность практически отсутствует	сомнительно, что есть вероятность возникновения на рассматриваемом объекте	0
P_1	низкая вероятность	маловероятно, но может возникнуть на рассматриваемом объекте	1
P_2	средняя вероятность	может возникнуть на рассматриваемом объекте	2
P_3	высокая вероятность	вероятнее всего, возникнет на рассматриваемом объекте	3
$P_{\max}$	экстремальная вероятность	несомненно, возникнет на рассматриваемом объекте	4

Для обработки полученных результатов выборки экспертной оценки могут быть использованы известные методы математической статистики для нахождения функций выборки согласно формулам (4.20÷4.23). Обработка сводится к определению доверительного интервала b в границах X_A и X_B по известным формулам (4.24÷4.26) математической статистики. Наибольшее количество

идентичных мнений экспертов о степени вероятности возникновения составляющих будет находиться в границах X_A и X_B . В связи с данными о рекомендуемом количестве экспертов, изложенными выше, применяется t -распределение Стьюдента.

На этапе 1 методики параллельно с экспертной составляющей реализуется статистическая составляющая. Как установлено выше (рисунок 4.6), недостатки и достоинства экспертного и статистического методов, особенности и многообразие проявлений рискованных ситуаций, наличие информации о происходивших ранее инцидентах и авариях обуславливают необходимость применения экспертно-статистического подхода и сопоставление результатов экспертной оценки и статистических данных. Для целей сбора, накопления, анализа и представления окончательных статистических данных необходим **информационно-аналитический архив рисков (ИААР)**. Посредством данного ИААР возможно накапливать, систематизировать и анализировать информацию об имевших место рискованных ситуациях при строительстве объектов метрополитена (база данных (БД), а также применять для получения статистического риска для оценки (программный комплекс для автоматизации процесса обработки информации БД). Для получения статистической информации о рискованных ситуациях, которые происходили в разное время в разных регионах мира при строительстве метрополитенов, необходимо ее внесение в базу данных (БД ИААР). Для этого необходимо определить, во-первых, какая информация требуется. В таблице 4.12 предложены обобщенные параметры такой информации.

Таблица 4.12

**Список параметров для каждой записи в
базу данных информационно-аналитического архива (БД ИААР)**

№ п/п	Параметр
1	Название проекта
2	Местоположение
3	Тип сооружения
4	Габариты/форма поперечного сечения
5	Количество зарегистрированных аварий/инцидентов

6	Инженерно-геологические и гидрогеологические условия
7	Способ строительства
8	Тип рискованной ситуации (авария/инцидент)
9	Год/место/время проявления
10	Описание проявления рискованной ситуации
11	Рискообразующие факторы (причины)
12	Последствия
13	Меры по устранению последствий
14	Источник информации
15	Фотографии, схемы

Во-вторых, необходимо определить источники этой информации. Источниками подобной информации, как было указано выше, могут быть привлеченные эксперты, организации-участники строительства, средства массовой информации, специализированные издания. В настоящей работе разработан документ в форме анкеты (Анкеты А.1, рисунок 4.8) для привлеченных экспертов. Анкета состоит из 5-ти разделов: Информация об эксперте, Информация об объекте строительства, Информация о рискованной ситуации, Информация о мероприятиях по минимизации/ликвидации последствий, Информация о возможности по предотвращению/минимизации вероятности рискованной ситуации.

Регистрационный № _____ - А.1

Анкета А.1 для сбора информации о рискованной ситуации

1. Информация об эксперте

1. ФИО эксперта: _____
2. Место работы: _____
3. Должность: _____
4. Научная степень (при наличии): _____
5. Опыт производственной/проектной/научно-исследовательской (нужное подчеркнуть) деятельности в области строительства метрополитенов и транспортных тоннелей ____ (лет)

2. Информация об объекте строительства

2.1 Основная информация

Наименование проекта	
Местоположение (<i>город, страна</i>)	
Адрес	
Заказчик	
Проектировщик	
Подрядчик	
Дата начала строительства	
Дата окончания строительства	

Фото ¹ , схемы (положение на карте района, трасса и т.д.)	
2.2 Информация о сооружении	
Тип (выберите номер из списка): 1 - вертикальный ствол 2 – горизонтальный (перегонный) тоннель 3 – сооружение станционного типа (открытый способ) 4 - сооружение станционного типа (закрытый способ) 5 – наклонный перегонный тоннель	☐
Длина, м	
Форма поперечного сечения	☐ круглая ☐ прямоугольная ☐ трапецевидная ☐ полигональная ☐ подковообразная ☐ подковообразная с обратным сводом ☐ сводчатая ☐ сводчатая с обратным сводом ☐ подковообразная двухциркульная ☐ 1-сводчатая (для сооружений типов 3,4) ☐ 2-сводчатая (для сооружений типов 3,4) ☐ 3-сводчатая (для сооружений типов 3,4) ☐ другое: _____
Размеры поперечного сечения	
в свету	высота, м: _____ ширина, м: _____ площадь, м ² : _____
в черне:	высота, м: _____ ширина, м: _____ площадь, м ² : _____
Объемно-планировочные решения сооружения и конструктивные решения обделки	
Глубина заложения, м	
Фото ¹ , схемы	
2.3 Инженерно-геологические и гидрогеологические условия	
Грунт	☐ скальный ☐ дисперсный ☐ многолетнемерзлый
Характеристика грунтов (тип, вид, состав, состояние)	

Массив по степени сплошности, описание структурны <i>(для скальных грунтов)</i>	
Описание структурных особенностей <i>(для скальных грунтов)</i>	
Гидрогеологические условия	
Наличие и характеристика инженерно-геологических процессов	
Наличие зон разломов	☐ да ☐ нет
Сейсмичность района строительства	☐ баллов
Фото ¹ , схемы <i>(геологический разрез, геологическая колонка)</i>	

2.4 Информация по технологии строительства

Способ строительства	☐ горный <i>(для сооружений типов 1,2,4,5)</i> ☐ механизированный <i>(для сооружений типов 1,2,4,5)</i> ☐ котлованный <i>(для сооружений типа 3)</i>
Способ раскрытия сечения <i>(для горного способа)</i>	☐ сплошным забоем ☐ по частям
Тип ТПМК <i>(для механизированного способа)</i>	☐ с открытым забоем ☐ с закрытым забоем
Вид пригруза в ТПМК <i>(для механизированного способа)</i>	☐ суспензионный ☐ грунтовый ☐ воздушный ☐ комбинированный
Стволопроходческий комплекс <i>(механизированный способ для сооружений типа 1)</i>	
Описание технологии	
Дополнительные мероприятия и применение специальных способов.	☐ замораживание, _____ <i>(способ)</i> ☐ тампонирующее, _____ <i>(способ)</i> ☐ химизация, _____ <i>(способ)</i> ☐ смолизация, _____ <i>(способ)</i> ☐ водопонижение, _____ <i>(способ)</i> ☐ опускная крепь с _____ <i>(способ)</i> ☐ «стена в грунте» ☐

2.5 Дополнительная информация ¹

--

3. Информация о рискованной ситуации

3.1 Основная информация

Дата фиксации проявления рисковей ситуации	
Время фиксации проявления рисковей ситуации	
Инженерно-геологические условия и геотехническая информация в зоне проявления	
Глубина в зоне проявления, м	
Конструкция обделки	
Конструкция временной крепи (если предусмотрена технологией)	
Этап строительства ² и процент готовности сооружения	
Особенности технологии строительства в месте проявления	

3.2 Описание рисковей ситуации³

Тип проявления рисковей ситуации ⁴	
Проявление рисковей ситуации (ПР) ⁴	
Место проявления рисковей ситуации ⁴	
Рискообразующие факторы (Ф) ⁴	
Последствия рисковей ситуации (П) ⁴	
Хронология событий и подробное описание	
Реализация каскада геотехнических рисков	☐ да ☐ нет
Фото ¹ , схемы (схема рисковей ситуации)	

4. Информация о мероприятиях по минимизации/ликвидации последствий⁵

№ мероприятия:	Описание

5. Информация о возможности предотвращения/минимизации вероятности рисковей ситуации

--

1 – Приложить при наличии.

2 – На каком участке сооружения и при выполнении какого технологического этапа (операции проходческого цикла) зафиксировано проявление рисковей ситуации? Во время выполнения каких работ?

3 – В случае множества рисковей ситуаций, проявившихся практически одновременно, необходимо описать все.

4 – Указать шифр в соответствии с таблицей системы классификации

5 – Описать, какие мероприятия были реализованы, чтобы обеспечить завершение строительства? Какие мероприятия были реализованы для минимизации/ликвидации последствий? Насколько данные мероприятия были обоснованными и эффективными?

Рис. 4.8 Форма анкеты А.1 для сбора информации о рисковей ситуации

При наличии информации о рискованных ситуациях, поступившей не от экспертов, анкета на рисунке 4.7 трансформируется в форму Анкеты А.2 (рисунок 4.9) Основные части и параметры анкеты остаются неизменными. Изменению подвергается раздел 1. Вместо информации об эксперте указываются информация о специалисте, заполнявшем анкету, и источники информации.

Регистрационный № _____ - А.2	
Анкета А.2 для сбора информации о рискованной ситуации	
1. Информация о специалисте, заполнявшем анкету, и источниках информации	
1. ФИО специалиста: _____	
2. Должность: _____	
3. Источники информации:	
№ источника	Наименование
2. Информация о проекте строительства	
.....	
3. Информация о рискованной ситуации	
.....	
4. Информация о мероприятиях по минимизации/ликвидации последствий	
.....	
5. Информация о возможности предотвращения/минимизации вероятности рискованной ситуации	
.....	

Рис. 4.9 Форма анкеты А.2 для сбора информации о рискованной ситуации

В настоящей диссертации выполнена работа по составлению Реестра рискованных ситуаций, имевших место при строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей (Приложение № 3), который может быть основой для базы данных ИААР. В Реестре из различных источников собрана информация о 231-ой рискованной ситуации в отечественном и зарубежном метростроении и транспортном тоннелестроении. Вербальная формулировка описания большинства рискованных ситуаций приближена к логике «последствие-проявление-фактор». В Приложении № 4 приведены диаграммы распределения рискованных ситуаций согласно

Приложению № 3 по типам сооружений 1÷5 (рисунок П. 4.1) и распределения рисков ситуаций по типу проявления согласно Приложению № 3. Статистические данные позволят определить вероятность возникновения рисков ситуации, исходя из частоты возникновения на объектах с аналогичными характеристиками в базе данных. В связи с тем, что в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации метрополитен относится к линейным объектам, а также к опасным производственным объектам, временной период для статистического риска можно принимать 5 лет как для фоновых рисков (согласно Приложению № 6 в [8] (рисунок 4.10)).

Пример ранжирования участков линейного ОПО по сравнению со среднеотраслевым фоновым риском аварий за последние 5 лет ($R_{5\text{лет}}$)	
Сравнительная степень опасности аварий на участке линейного ОПО	Значение рассчитанного показателя риска R
Малая	Менее $0,5 \cdot R_{5\text{лет}}$
Средняя	$(0,5 - 5,0) \cdot R_{5\text{лет}}$
Высокая	$(5 - 50) \cdot R_{5\text{лет}}$
Чрезвычайно высокая	Более $50 \cdot R_{5\text{лет}}$

Рис. 4.10. Пример ранжирования по степени опасности аварии на ОПО по сравнению с фоновым риском (для линейных объектов), [8]

Таким образом, период, за который предлагается учитывать статистический риск по количеству рисков ситуаций, принимается 5 лет. Выбор данного периода в том числе может быть обоснован средним периодом обновления промышленных технологий и внедрения инновационных разработок [78, 158÷160]. Ранжирование рисков ситуаций по степени возникновения статистического риска X_c (**статистический риск X_c**) для статистической составляющей методики приведено в таблице 4.13.

Таблица 4.13

**Ранжирование рискованных ситуаций по вероятности
статистического риска**

Частота возникновения (период – 5 лет)	Вероятность возникновения рисковой ситуации	Степень возникновения риска X_c (статистический риск), ранг
менее 1	вероятность отсутствует	0
1 - 4	низкая вероятность	1
5 - 10	средняя вероятность	2
11 - 30	высокая вероятность	3
более 30	экстремальная вероятность	4

Результатом выполнения экспертной и статистической составляющих этапа 1 методики являются две величины: интервальная оценка b в границах X_A и X_B и статистический риск X_c по каждой из идентифицированных составляющих рискованных ситуаций. Следующим компонентом методики является необходимость сравнения полученных результатов и проверка достоверности оценки. В диссертации для данного сравнения и проверки достоверности оценки предложен **критерий достоверности оценки рисков**, заключающийся в выполнении условия (4.33):

$$X_c \in \begin{cases} [X_A; X_B] \\ [P_0; X_A] \\ (X_B; P_{\max}] \end{cases} \quad (4.33)$$

Таким образом, оценка риска считается достоверной, если результаты экспертной оценки совпадают со статистическим риском. То есть значение статистического риска X_c принадлежит доверительному интервалу: $X_c \in [X_A; X_B]$. При этом существуют следующие варианты результатов сравнения по критерию достоверности оценки рисков, влияющие на дальнейший алгоритм методики (таблица 4.14).

Таблица 4.14

Варианты результатов оценки с использованием экспертно-статистического подхода по критерию достоверности оценки риска

Вариант 1	$X_c \in [X_A; X_B]$	оценка риска достоверна
Вариант 2	$X_c \in [P_0; X_A]$	недооценка степени возникновения риска экспертами по сравнению со статистикой
Вариант 3	$X_c \in (X_B; P_{\max}]$	переоценка степени возникновения риска экспертами по сравнению со статистикой

Мы видим, что в случае варианта 1 мнения экспертов совпадают с результатами статистики. Оценка риска на данном этапе может считаться достоверной и завершённой. При вариантах 2 и 3 мнения экспертов не согласуются со статистическими данными. В этом случае нельзя переходить к следующему этапу анализа. Необходимо более тщательно проанализировать, почему эксперты посчитали вероятность риска ниже (недооценка риска) или выше (переоценка риска) статистической. Это важно, так как назначение более высокой степени вероятности возникновения станет предпосылкой для изменения мероприятий по воздействию на риск в направлении их усложнения и удорожания. Назначение более низкой степени вероятности возникновения может привести к ошибке в прогнозе проявления рискованной ситуации и не принятии вовремя необходимых мер минимизации риска, а также по снижению и ликвидации последствий. Результаты оценки риска должны быть максимально достоверны. Графически результаты экспертной оценки могут быть представлены гистограммой частот по распределению выборки оценок экспертной группы, а результат анализа статистики – прямой линией, параллельной оси Оу (прямая статистического риска), которая пересекает ось Ох в точке X_c . Таким образом, графическая интерпретация сопоставления экспертной и статистической составляющих представляется в виде наложения прямой линии статистического риска, которая пересекает ось Ох в точке X_c , на гистограмму частот ответов экспертов (рисунок 4.10).

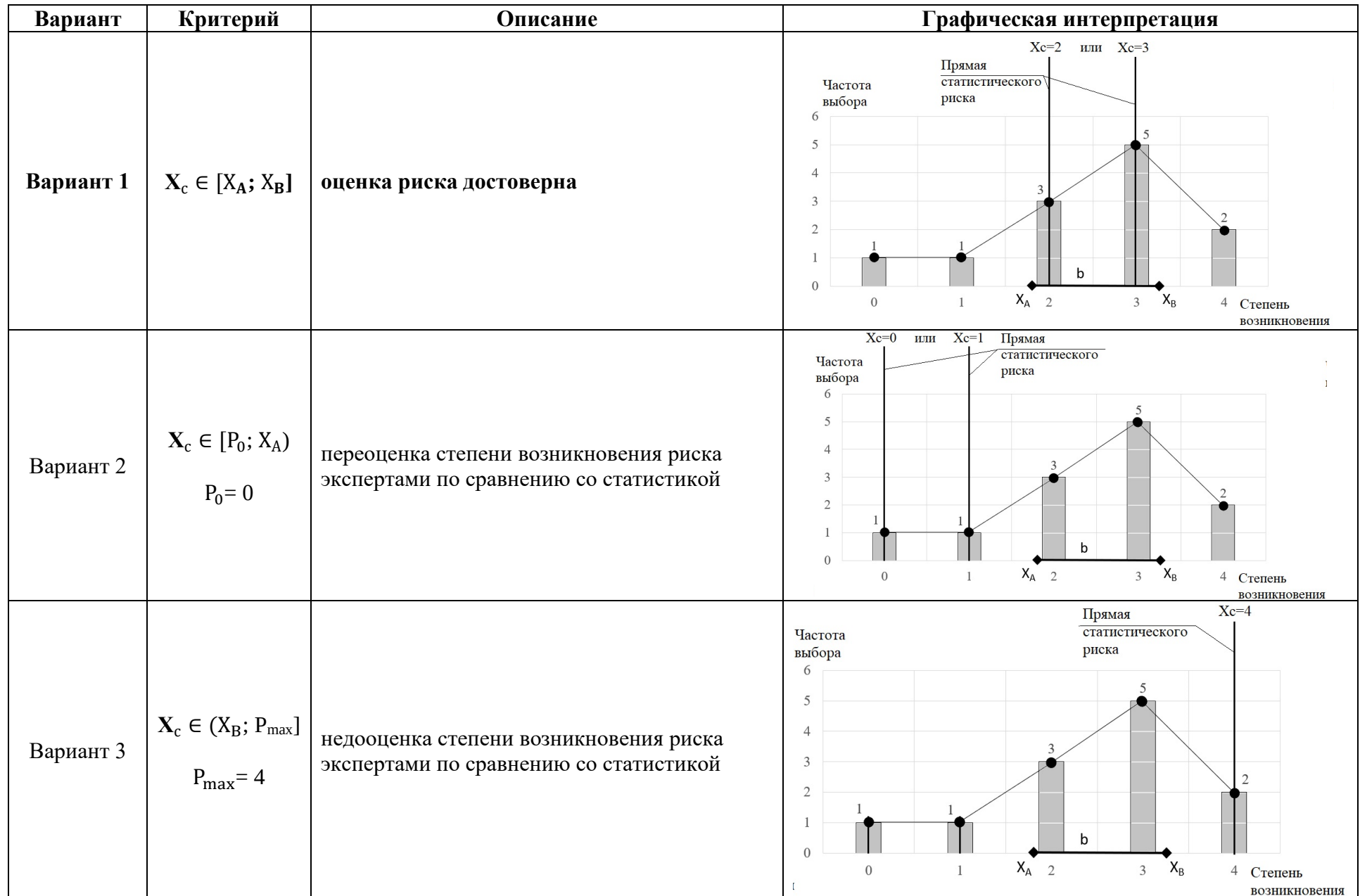


Рис. 4.11. Варианты результатов оценки по критерию достоверности оценки риска

По результатам оценки могут возникнуть следующие частные случаи, требующие внимания (рисунок 4.11):

- 1) случаи, когда идентифицированные экспертами рисковые ситуации для исследуемого объекта не отражены в ИААР («Слепая зона статистики»);
- 2) случаи, если эксперты не идентифицировали рисковые ситуации, определенные в ИААР для подобного объекта («Слепая зона экспертов»).

В первом случае в связи с отсутствием статистических данных следует принимать при должном обосновании доводы экспертной оценки. Необходимо выяснить, на чем эксперт (эксперты) основывают свои выводы. Если эксперт обладает информацией об имевшей место рисковомой ситуации, не занесенной в ИААР, организаторами оценки эксперту должно быть предложено заполнить Анкету А.1 для внесения информации в ИААР. Во втором случае экспертам необходимо проанализировать и оценить рисковые ситуации, найденные ИААР.

Определение статистического риска X_c на основании данных ИААР является трудоемкой задачей, поскольку предполагает анализ значительного количества информации выборки по составляющим и формирование статистических значений. Процесс обработки результатов экспертных оценок также может быть упрощен при помощи использования специализированных математических программ. Поэтому актуальной является задача создания автоматизированного программного комплекса, объединяющего в себе архив рисков, возможность обработки статистических данных, результатов экспертных оценок и получения результата сопоставления.

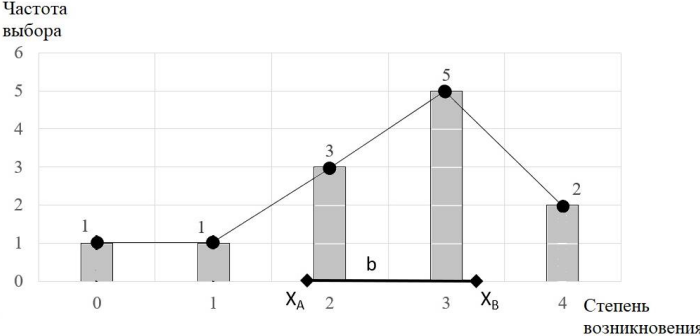
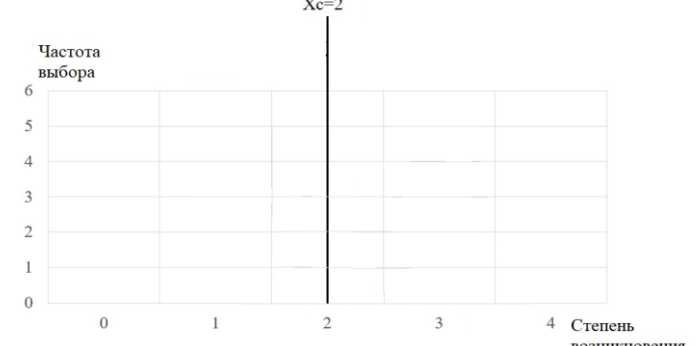
Частный случай	Описание	Графическая интерпретация	Действия при анализе
«Слепая зона статистики»	Идентифицированные экспертами рисковые ситуации для исследуемого объекта не отражены в ИААР	 Частота выбора Степень возникновения X_A X_B b	1) Принимать при должном обосновании доводы экспертной оценки. 2) Предложить эксперту заполнить Анкету А.1 для внесения информации об имевшей место рисковой ситуации в ИААР.
«Слепая зона экспертов»	Эксперты не идентифицировали рисковые ситуации, определенные в ИААР для подобного объекта	 Частота выбора Степень возникновения $X_c=2$	Экспертам необходимо проанализировать и оценить рисковые ситуации, найденные ИААР

Рис. 4.12. Частные случаи при анализе («Слепая зона статистики», «Слепая зона экспертов»).

После реализации этапа 1 экспертами дается обоснованное заключение о возможности формирования составляющих рисков ситуаций в каскад геотехнических рисков (КГТР). То есть имеется одна или несколько независимых рисков ситуаций, составляющие которых не смогут сформировать различные сценарные траектории КГТР. В таком случае этап 1.1 исключается из алгоритма анализа и осуществляется переход к этапу 2 по оценке допустимости (приемлемости) рисков, разработке мероприятий и составлению реестра рисков для данного объекта. В случае возможности КГТР анализ переходит на этап 1.1 графоаналитического анализа, в ходе которого составляется многоуровневая схема КГТР на основании обобщенной схемы, предложенной в главе 3. Из составленной схемы выделяются сценарные траектории КГТР и составляются сценарно-траекторные таблицы с указанием номера участка траектории от составляющей к составляющей, шифры составляющих и вероятности участка траектории. При этом вероятность отдельной сценарной траектории определяется с учетом того, что сценарная траектория рассматривается в качестве сложного события, состоящего из совместном возникновении нескольких событий (составляющих рисков ситуации). Пример сценарно-траекторных таблиц КГТР для сценарных траекторий СТ-1 и СТ-2 на рисунках 3.4÷3.5 приведен в таблице 4.15.

Таблица 4.15

Пример сценарно-траекторных таблиц КГТР

№ участка траектории	Шифры составляющих участка траектории	Вероятность участка траектории, P_{Ti}
Таблица сценарной траектории СТ-1 КГТР		
T-1-1	$\Phi_1^1-1; \Phi_1^2-15$	$P_{T-1-1}=P(\Phi_1^1)P(\Phi_1^2)$
T-1-2	$\Phi_2^1-10; \Phi_1^2-15$	$P_{T-1-2}=P(\Phi_2^1)P(\Phi_1^2)$
T-1-3	$\Phi_1^2-15; \Phi_1^3-14$	$P_{T-1-3}=P(\Phi_1^2)P(\Phi_1^3)$
T-1-4	$\Phi_1^2-15; PR_2^1-2.2.16$	$P_{T-1-4}=P(\Phi_1^2)P(PR_2^1)$
T-1-5	$\Phi_1^3-14; PR_1^1-2.2.11$	$P_{T-1-5}=P(\Phi_1^3)P(PR_1^1)$
T-1-6	$PR_1^1-2.2.11; PR_1^2-2.2.16$	$P_{T-1-6}=P(PR_1^1)P(PR_1^2)$
T-1-7	$PR_1^2-2.2.16; P_2^1-5$	$P_{T-1-7}=P(PR_1^2)P(P_2^1)$
Вероятность реализации сценарной траектории СТ-1		$P_{СТ-1} = \prod_{i=1}^n P_{Ti}$
Таблица сценарной траектории СТ-2 КГТР		
T-2-1	$\Phi_2^1-10; \Phi_1^2-15$	$P_{T-2-1}=P(\Phi_2^1)P(\Phi_1^2)$
T-2-2	$\Phi_1^2-15; \Phi_1^3-14$	$P_{T-2-2}=P(\Phi_1^2)P(\Phi_1^3)$

T-2-3	$\Phi_1^2-15; \text{ПР}_3^1-2.2.7$	$P_{T-2-3}=P(\Phi_1^2)P(\text{ПР}_3^1)$
T-2-4	$\Phi_1^3-14; \text{ПР}_1^1-2.2.11$	$P_{T-2-4}=P(\Phi_1^3)P(\text{ПР}_1^1)$
T-2-5	$\text{ПР}_1^1-2.2.11; \text{ПР}_1^2-2.2.16$	$P_{T-2-5}=P(\text{ПР}_1^1)P(\text{ПР}_1^2)$
T-2-6	$\text{ПР}_3^1-2.2.7; \text{ПР}_4^2-2.2.22$	$P_{T-2-6}=P(\text{ПР}_3^1)P(\text{ПР}_4^2)$
T-2-7	$\text{ПР}_1^2-2.2.16; \text{П}_2^1-5$	$P_{T-2-7}=P(\text{ПР}_1^2)P(\text{П}_2^1)$
T-2-8	$\text{ПР}_3^1-2.2.7; \text{ПР}_5^2-2.2.18$	$P_{T-2-8}=P(\text{ПР}_3^1)P(\text{ПР}_5^2)$
T-2-9	$\text{ПР}_5^2-2.2.18; \text{П}_5^1-1$	$P_{T-2-9}=P(\text{ПР}_5^2)P(\text{П}_5^1)$
Вероятность реализации сценарной траектории СТ-2		$P_{\text{СТ-2}} = \prod_{i=1}^n P_{T_i}$

При назначении вероятностей составляющих, соответствующим степени вероятности возникновения для этапа 1, в настоящей методике будем учитывать рекомендации для значений степеней опасности для линейных объектов в [8] на рисунке 4.9 (таблица 4.16)

Таблица 4.16

Обозначение степени	Наименование степени вероятности	Степень возникновения, ранг	Вероятность возникновения
P_0	вероятность практически отсутствует	0	0,01
P_1	низкая вероятность	1	0,1
P_2	средняя вероятность	2	0,22
P_3	высокая вероятность	3	0,65
$P_{\max}$	экстремальная вероятность	4	0,95

На этапе 2 анализа выполняется оценка последствий с расчетом затрат на их ликвидацию (расчет ущерба), сравнение с допустимой степени риска (приемлемой степени риска, сравнение с установленными критериями и т. д.), разработка мероприятий по снижению риска, повторная оценка с учетом реализации мероприятий. Анализ заканчивается отчетом и составлением реестра рисков.

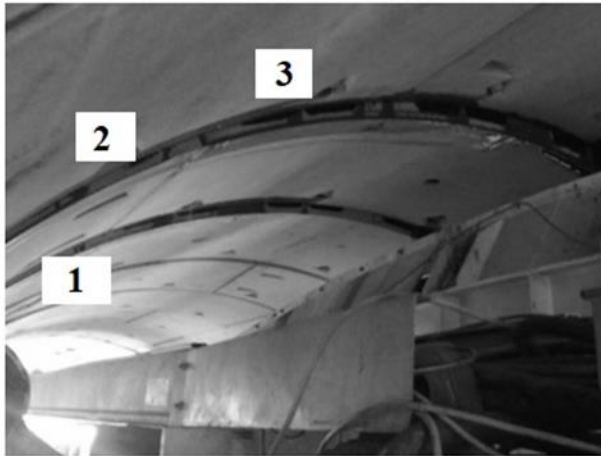
Предложенная в настоящей работе методика анализа геотехнических рисков позволяет выполнить комплексный анализ на основе экспертно-статистического подхода геотехнических рисков при строительстве объектом метрополитена с учетом возможности пошагового графоаналитического анализа структуры КГТР, разработать рекомендации и организационно-технологические мероприятия для управления рисками.

4.5 Реализация компонентов методики анализа геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена

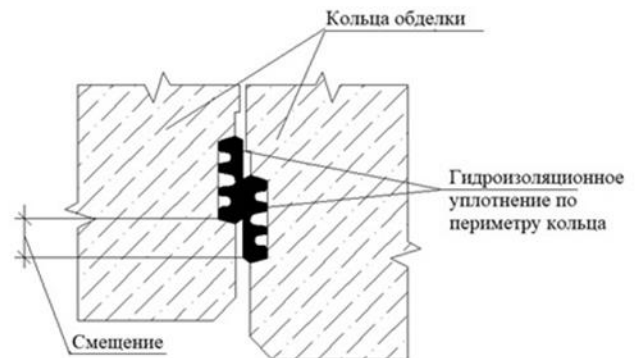
4.5.1 Анализ рисковой ситуации взаимного смещения блоков обделки (образование уступов) при проходке перегонного тоннеля метрополитена тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК)

В рамках диссертации рассмотрена достаточно распространенная рисковая ситуация со смещением колец в вертикальном направлении и образованием уступов блочной высокоточной кольцевой обделки с гидроизоляционным уплотнителем по периметру блока при проходке перегонного тоннеля метрополитена и транспортного тоннеля (сооружение – Тип 2) с применением механизированного тоннелепроходческого комплекса (ТПМК). Данная технология проходки тоннелей метрополитена и транспортных тоннелей является наиболее прогрессивной и эффективной. Применение вышеуказанной обделки обосновывается расчетом на проектные эксплуатационные нагрузки, а также на монтажные нагрузки в процессе проходки. В отечественной практике проблема появления уступов была отмечена впервые при реализации в начале 2000-х годов первых проектов применения ТПМК в неустойчивых грунтах для проходки автодорожных тоннелей и тоннелей метрополитена (Лефортовские тоннели, Серебряноборские тоннели, перегонные тоннели Митинско-Строгинской линии Московского метрополитена) [107, 161÷167]. Проблема до настоящего времени находится в поле зрения исследователей и проектировщиков, что делает управление данной рисковой ситуацией актуальной задачей. На рисунке 4.12 представлено фото тоннеля с проявлением рисковой ситуации с образованием уступов и различные варианты по степени влияния на геометрию обделки.

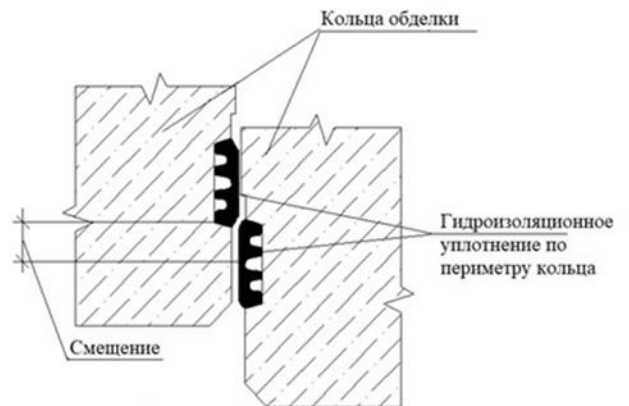
Взаимное смещение блоков в плоскости поперечного сечения тоннеля (образование уступов)



1. Смещение колец со снижением площади примыкания гидроизоляционных уплотнителей



2. Смещение колец с полной потерей площади примыкания гидроизоляционных уплотнителей



3. Смещение колец с полной потерей площади примыкания гидроизоляционных уплотнителей и нарушением геометрии кольца

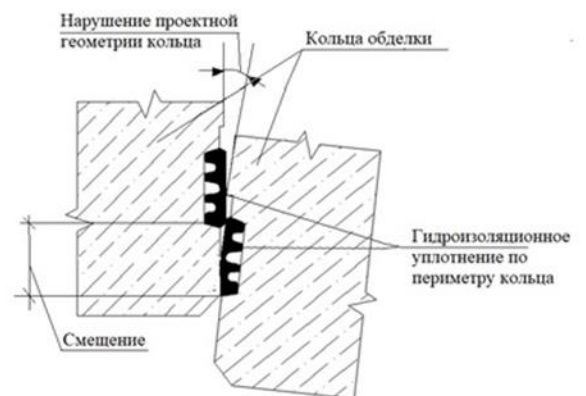


Рис. 4.13. Взаимное смещение блоков обделки (образование уступов)

Последствия проявления рискованной ситуации негативно сказываются на процессе проходки (течи в тоннеле над силовым оборудованием; риск вываливания блоков обделки при значительных величинах уступов; снижение точности результатов навигации проходки из-за смещения от проектного навигационного хода щита и осей колец; необходимость ремонта в процессе проходки) и эксплуатации перегонного тоннеля в дальнейшем (нарушение работы системы «обделка-породный массив» из-за истончения (вплоть до исчезновения) слоя тампонажного раствора; водопроявления в тоннеле из-за смещения положения гидроизоляционных уплотнений блоков и уменьшению площади примыкания; сколы обделки при нарушении геометрии кольца; нарушение габаритов приближения строений; снижение надежности тоннельной обделки).

В таблице 4.17 приведены характеристики рискованной ситуации в соответствии с классификацией, предложенной в настоящей диссертации. При определении точки локализации учитывается эффект «всплытия» колец - смещении горизонтальной оси кольца к шельге свода после выхода собранного кольца из юбки ТПМК с тампонажем раствора за обделку, и неравномерного опускания после застывания раствора.

Таблица 4.17

Идентификация рискованной ситуации согласно классификации

Наименование	Описание	Шифр классификации
Тип сооружения	Горизонтальный (перегонный) тоннель	2
Проявление рискованной ситуации	По виду проявления: Сверхнормативные деформации обделки (2.2.8) По виду деформации: Взаимное смещение колец/блоков/тюбингов в плоскости поперечного сечения (образование уступов) (2.2.8.3)	ПР-2.2.8.3
Место проявления	По месту проявления: Протяженная часть (2.4.3) По точке/зоне локализации: Свод/перекрытие (2.4.3.1), Лоток (2.4.3.4)	ПР-2.4.3.1 ПР-2.4.3.4

Экспертной группе в количестве 10 человек из строительных, проектных и научных организаций было предложено оценить степень возникновения рискованной

ситуации при проходке однопутного перегонного тоннеля метрополитена глубиной заложения от 12 до 35 м с применением ТПМК с активным грунтопригрузом забоя для условий Юго-Западного административного округа города Москвы. Результаты приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18

Степени возникновения рисков ситуации, присвоенные экспертами

№ эксперта	Степень возникновения (присвоенный экспертом ранг)	Примечание
1	2	Проектная организация
2	3	Проектная организация
3	3	Строительная организация
4	4	Строительная организация
5	3	Строительная организация
6	2	Проектная организация
7	3	Строительная организация
8	3	Проектная организация
9	4	Строительная организация
10	4	Научная организация

Необходимо отметить, что мнения экспертов относительно степени возникновения рисков ситуации распределились следующим образом (рисунок 4.13): эксперты из строительных и научных организаций присвоили степень высокую и экстремальную степень, тогда как эксперты из проектных организаций присвоили среднюю и высокую.

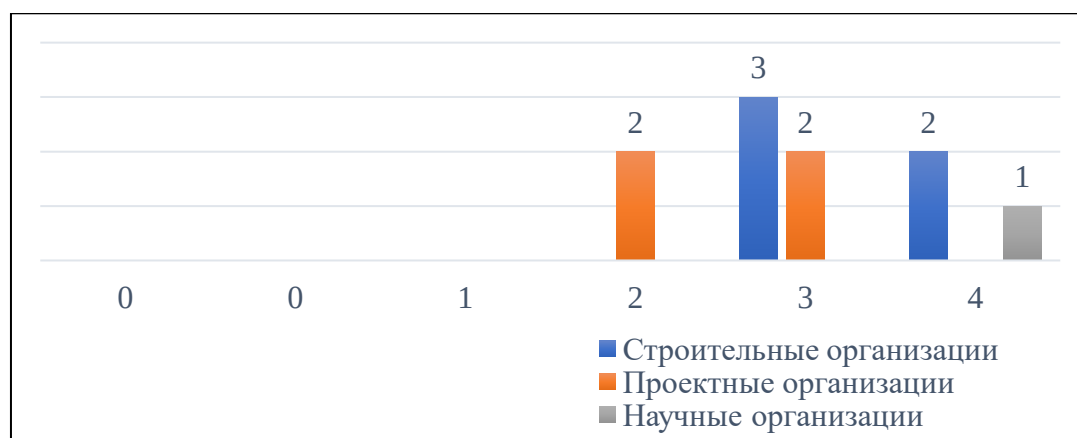


Рис. 4.14. Распределение мнений экспертов

Полученные результаты оценки обработаны с использованием формул (4.20÷4.26). Выборочное среднее $\widehat{m}_x$ согласно формулы (4.20):

$$\widehat{m}_x \triangleq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{1}{10} 31 = 3,1 \quad (4.34)$$

где X_i – степень, присвоенная i -тым экспертом,

n – численной экспертной группы.

Несмещенные выборочная дисперсия S_x^2 и среднеквадратическое отклонение s согласно формулам (4.22÷4.23):

$$S_x^2 = \frac{n}{n-1} \widehat{d}_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \widehat{m}_x)^2 = 0,53 \quad (4.35)$$

$$s = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{n}{n-1} \widehat{d}_x} = 0,73 \quad (4.36)$$

На основании определенных функций выборки вычислим доверительные границы X_A и X_B по формулам (4.24) и (4.25) для определения доверительного интервала b (4.26) с наибольшим количеством идентичных мнений экспертов ($t_{\frac{1}{\alpha}} = 2,26$ квантиль распределения Стьюдента, принят для числа степеней свободы $n-1=9$ и доверительной вероятности 0,95).

$$X_A = \widehat{m}_x - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} = 2,93 \quad (4.37)$$

$$X_B = \widehat{m}_x + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} = 3,26 \quad (4.38)$$

Таким образом, получаем доверительный интервал b экспертной оценки:

$$\widehat{m}_x - \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \leq b \leq \widehat{m}_x + \frac{s}{\sqrt{n}} t_{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.39)$$

$$2,93 \leq b \leq 3,26$$

В соответствии с данными Приложения № 3 за три года (2013-15 гг.) количество рискованных ситуаций с деформацией тоннельно обделки и появлением устатов зафиксировано на отметке 8 рискованных ситуаций (тоннелей). Учитывая данные таблицы 4.16, получаем высокую вероятность возникновения и $X_c=3$ (заметим, что Приложение № 3 не содержит полной картины по частоте реализации рискованных ситуаций, так как не является ИААР, а может использоваться в качестве основы для создания базы данных).

Сравнение результатов экспертных оценок и данных статистики выполняем с применением критерия достоверности по выражению (4.33).

$$X_c=3 \in [2,93; 3,26] - \text{оценка риска достоверна}$$

Графическая интерпретация результатов представлена на рисунке 4.14.

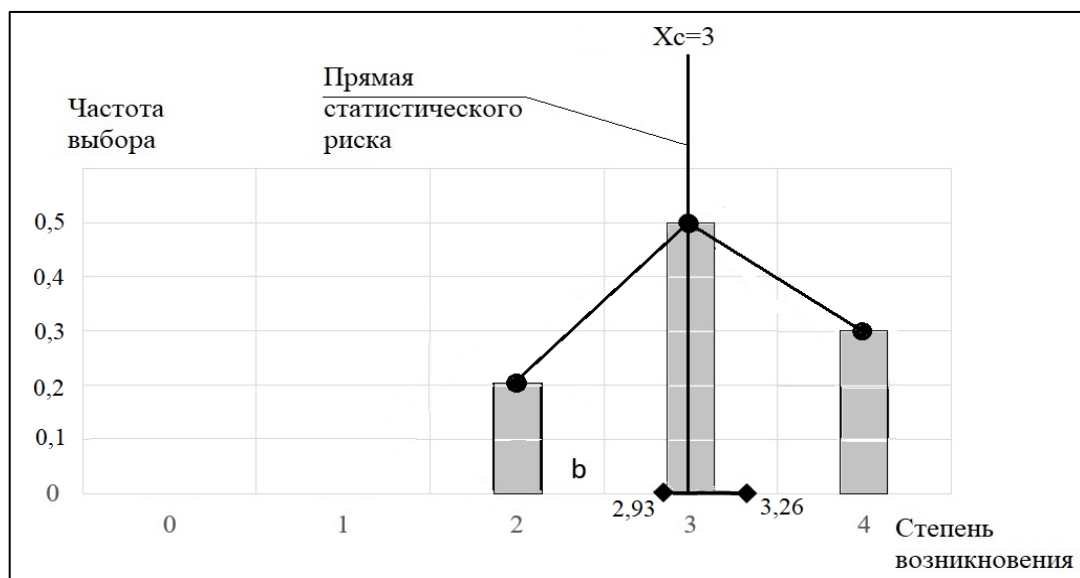


Рис. 4.15. Результат оценки рискованной ситуации

Таким образом, вероятность наступления рискованной ситуации предполагается высокой ($P_{PC}=0,65$). Полученный полигон частот показывает, что эксперты считают

наиболее вероятной 3-ю степень проявления риска, что соответствует высокой вероятности смещения обделки и появления уступов, и совпадает с заданой статистикой. Учитывая такой высокий уровень риска, необходимо обязательная разработка комплекса мероприятий для минимизации риска, которые должны использоваться на стадии проектирования параметров технологии проходки и разработки технологического регламента проходки.

4.5.2 Анализ рисковой ситуации и каскада геотехнических рисков с потерей гидропригруза при проходке вертикального ствола метрополитена стволопроходческим механизированным комплексом (СПМК)

При строительстве линий метрополитена проходка вертикальных стволов представляет собой одну из ведущих и наиболее сложных задач. От скорости и качества проходки стволов зависят сроки строительства других сооружений и всей линии в целом. Проходка ствола в неустойчивых водоносных грунтах может сопровождаться проявлениями геотехнических рисков, таких как, прорывы воды и грунта, затопления, обрушения пород призабойного пространства, потере гидропригруза, сверхнормативные деформации обделки, приводящих к повреждению и выходу из строя проходческого оборудования и систем, деформациям земной поверхности, разрушениям зданий и сооружений, травмам и гибели людей. Самыми эффективными технологиями на сегодняшний день является применение механизированных стволопроходческих комплексов [77, 78, 107, 168, 169].

Для целей демонстрирования реализации методики в работе рассмотрен инцидент (пункт № 197 Приложения № 3), вызванный резкой потерей гидропригруза при пересечении зоны трещиноватых известняков вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий, приведший к заклиниванию обделки ствола, образованию воронки мульды оседания на поверхности,

невозможности продолжения проходческих работ при проходке механизированным способом рабочего вертикального ствола № 748 от ст. «Деловой Центр» до ст. «Кутузовский проспект» Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена [186]. План участка перегона от ст. «Кутузовский проспект» в сторону ст. «Плющиха» со стволом №748 и продольный профиль представлены на рисунках 4.15 и 4.16.

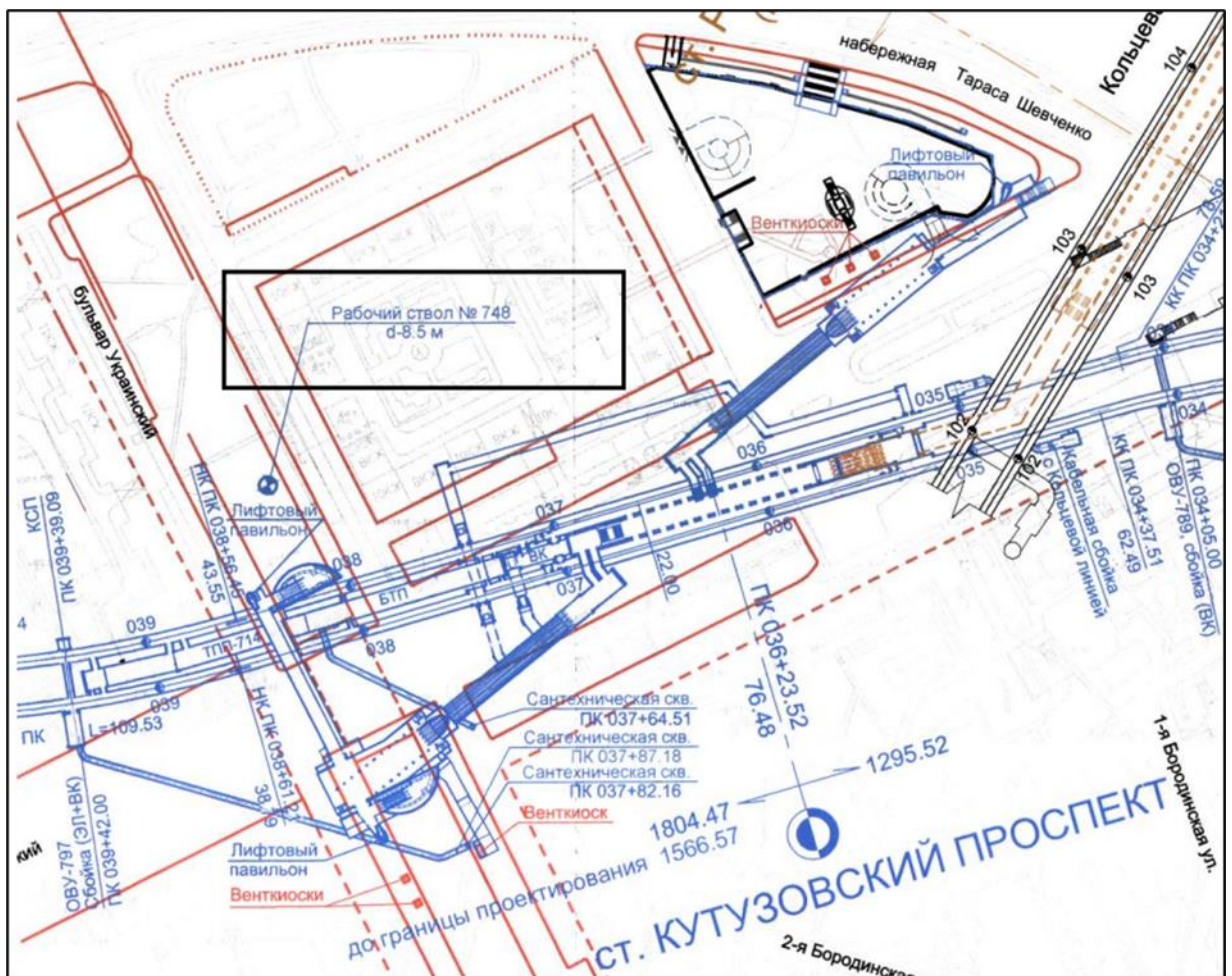


Рис. 4.16. План участка перегона от ст. «Кутузовский проспект» в сторону ст. «Плющиха» со стволом №748

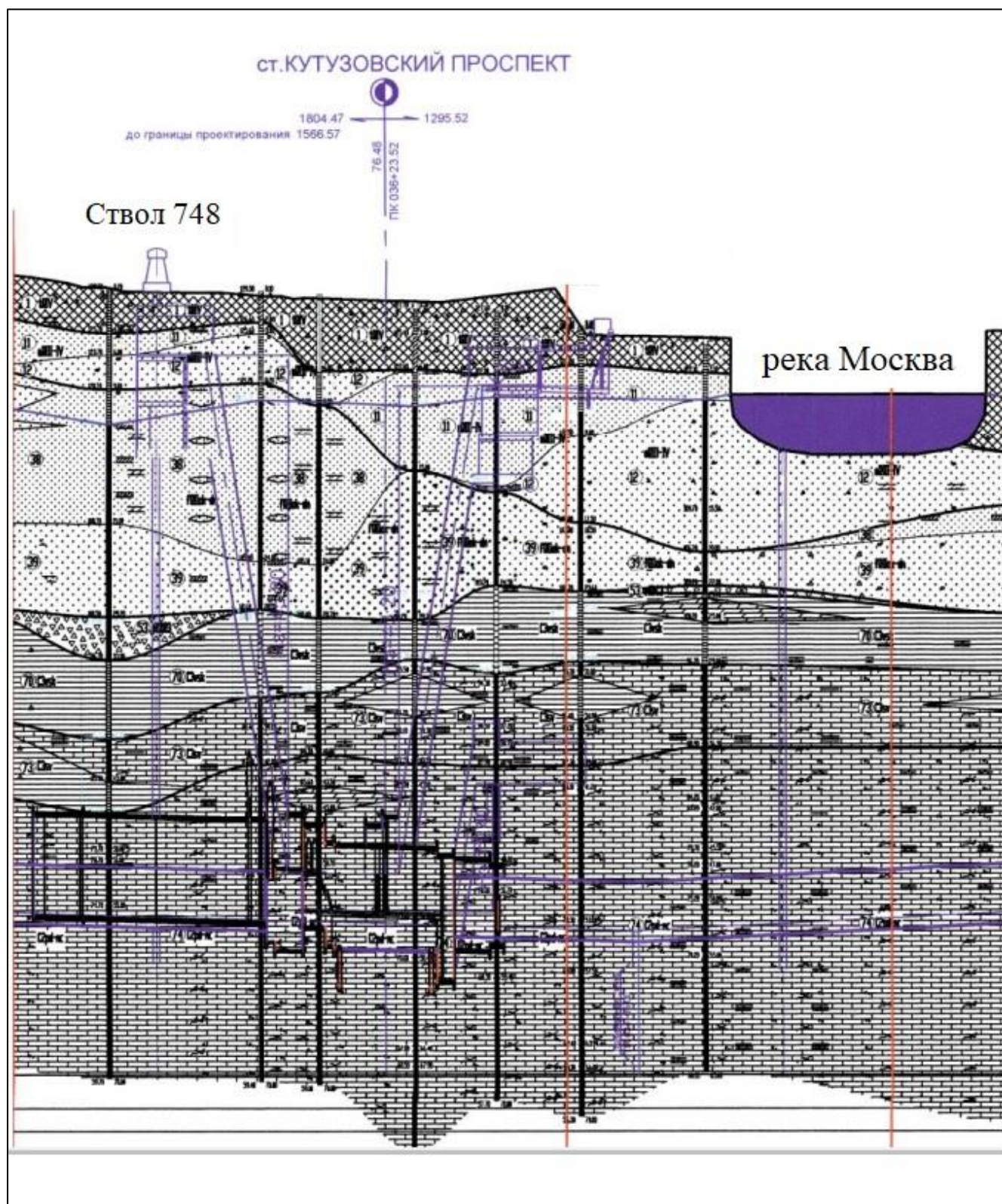


Рис. 4.17. Профиль перегона от ст. «Плющиха» до ст. «Кутузовский проспект» со стволом 748

В таблице 4.19 приведены все выявленные составляющие инцидента в соответствии с классификацией, предлагаемой в настоящей диссертации.

Таблица 4.19

Идентификация рисков ситуации согласно классификации

Наименование	Описание	Шифр
Тип сооружения	Вертикальный ствол	1
Характер происшествия	Инцидент	ПР-1.1.1
Рискообразующие факторы	Наличие зон обводненных пород (3) Наличие зон структурных особенностей и ослаблений породного массива (трещиноватость) (7) Наличие зон карстово-суффозионных процессов (8) Недостаточный учет при проектировании реологических и фильтрационных свойств массива (13)	Φ_1^1 -3 Φ_2^1 -7 Φ_3^1 -8 Φ_4^1 -13
Проявление рисков ситуации	Разуплотнение грунта (1.2.4) Сверхнормативные деформации постоянной обделки (1.2.8) - Отклонение от горизонтальной плоскости колец (расхождение смежных колец) (1.2.8.4) Резкое понижение уровня гидропригруза (1.2.14) Потеря тиксотропной рубашки (1.2.15) Отказ горнопроходческого оборудования (1.2.18) Потеря устойчивости ростверками СМПК (1.2.28) Необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования (1.2.31) Заклинивание обделки опускного колодца (1.2.35)	$ПР_2^2$ -1.2.4 $ПР_1^5$ -1.2.8.4 $ПР_1^1$ -1.2.14 $ПР_1^2$ -1.2.15 $ПР_2^4$ -1.2.18 $ПР_1^3$ -1.2.28 $ПР_2^5$ -1.2.31 $ПР_1^4$ -1.2.35
Последствия	Остановка горнопроходческих работ (5) Увеличение сроков строительства (6) Увеличение объемов строительства (7) Увеличение стоимости строительства (8) Необходимость корректировки проектной документации и повторного прохождения экспертизы (12) Снижение качества строительно-монтажной продукции (13) Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом технологии (27) Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом техники и оборудования (28) Образование воронок мульд оседания на поверхности (35) Образование подъемов поверхности (36)	$П_2^1$ -5 $П_2^3$ -6 $П_3^3$ -7 $П_4^3$ -8 $П_1^3$ -12 $П_1^1$ -13 $П_1^2$ -27 $П_2^2$ -28 $П_3^2$ -35 $П_4^2$ -36

На рисунке 4.17 представлена схема КГТР инцидента с разделением составляющих на уровни и траекториями от составляющей к составляющей.

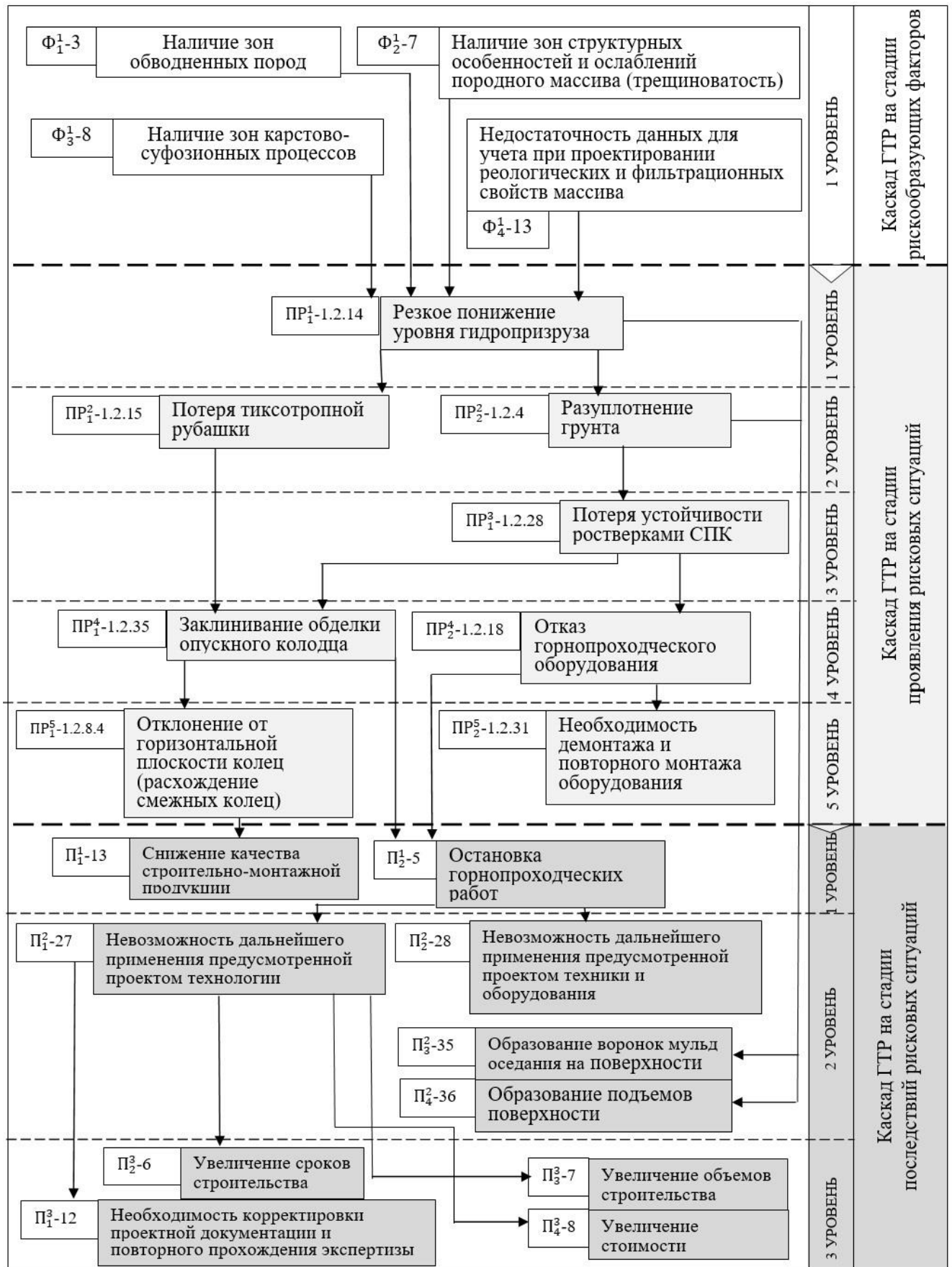


Рис. 4.18. Схема КГТР инцидента на при проходке ствола № 748 СПМК

Как видно из анализа представленной схемы, подобного рода инцидент при механизированной проходке ствола состоит из 22-х составляющих рисков ситуаций и характеризуется сложной многоуровневой структурой (9 уровней) и является весьма сложным объектом для точного прогноза рисков без графоаналитического моделирования и анализа сценарных траекторий.

В ходе инцидента были приняты технологические решения для минимизации и ликвидации последствий рисков ситуации с целью продолжить проходку ствола по проектной технологии, а затем для продолжения работ по проходке горным способом. Перечень работ и ориентировочных затрат, которые могут быть отнесены к стоимости составляющей рисков ситуации и к финансовым потерям, представлен в таблице 4.20. В данный перечень не включены работы по корректировке проектной документации и повторного прохождения экспертизы.

Таблица 4.20

Технологические решения и мероприятия для минимизации и ликвидации последствий инцидента

Составляющая (шифр классификации)	Тех. решение/Мероприятие по ликвидации/минимизации	Стоимость составляющей рисков ситуации, млн руб.
Потеря устойчивости ростверками СМПК (ПР ₁ ³ -1.2.28)	Разработка проекта и сооружение дополнительных свайных ростверков с заглублением свай в устойчивый грунт (свай-стойки)	35
Резкое понижение уровня гидропригруза (ПР ₁ ¹ -1.2.14)	Организация дополнительного водоснабжения для поддержания уровня гидропригруза	0,7
Потеря тиксотропной рубашки (ПР ₁ ² -1.2.15)	Нагнетание бентонита для сохранения тиксотропной рубашки	3,5
Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом технологии (П ₁ ² -27) Невозможность дальнейшего применения	Переоснащение поверхности и ствола для перехода на горный способ проходки	132

предусмотренной проектом техники и оборудования (П ₂ ² -28)		
Остановка горнопроходческих работ (П ₂ ¹ -5)	Простои	45
Отказ горнопроходческого оборудования (ПР ₂ ⁴ -1.2.18) Необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования (ПР ₂ ⁵ -1.2.31)	Демонтаж, ремонт и монтаж поврежденных элементов СПМК	27
Отклонение от горизонтальной плоскости колец (расхождение смежных колец) (ПР ₁ ⁵ -1.2.8.4) Снижение качества строительно-монтажной продукции (П ₁ ¹ -13)	Ремонт высокоточной железобетонной блочной обделки с металлоизоляцией	6
Заклинивание обделки опускного колодца (ПР ₁ ⁴ -1.2.35)	Установка дополнительной системы гидродомкратов для сдвижения и задавливания обделки	4
Образование воронок мульды оседания на поверхности (П ₃ ² -35) Образование подъемов поверхности (П ₄ ² -36)	Проведение геотехнического мониторинга и компенсационных мероприятий	17
ИТОГО		270,2

Таблица 4.20 может применяться для определения стоимости составляющей рискованной ситуации и, с учетом данных по вероятности таблицы 4.16, может служить для проверки допустимости (приемлемости) риска $R_{PC_i}^C$ для каждой составляющей по цене ущерба на этапе 2 методики по формуле (4.40):

$$R_{PC_i}^C = Y_{PC_i}^C P_{PC_i}^C \quad (4.40)$$

где $Y_{PC_i}^C$ - величина ущерба от возникновения составляющей рискованной ситуации (затраты, финансовые потери),

$P_{PC_i}^C$ – вероятность возникновения составляющей рискованной ситуации.

Из таблицы 4.20 очевидно, что самым значительным является ущерб от последствий «Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом технологии (27)», «Невозможность дальнейшего применения предусмотренной проектом техники и оборудования (28)». Иными словами, проходка с применением СПМК не может быть продолжена, и требуется переход на горный способ. Необходимо выполнить полное оснащение поверхности и ствола для проходки горным способом с применением буровзрывных работ и открытым водоотливом из забоя, что потребует значительных затрат.

Технологические решения для снижения вероятностей составляющих уровня 1-го и 2-го уровней КГТР проявлений, а также 2-го КГТР последствий рискованной ситуации и минимизации последствий для проходки ствола представлены в таблице 4.21 с ориентировочными стоимостями. Часть мероприятий применялась для проходки ствола, находящегося вблизи ствола № 748 на той же линии.

Таблица 4.21

**Технологические решения и мероприятия для снижения вероятности
рисковой ситуации**

Составляющая (шифр классификации)	Мероприятие по снижению вероятности	Стоимость составляющей рискованной ситуации, млн руб.
Потеря устойчивости ростверками СМПК (ПР ₁ ³ -1.2.28)	Проектирование свай ростверков в виде свай-стоек вместо висячих свай. Хранение аварийного запаса материалов для заполнения пустот вблизи свай.	11
Резкое понижение уровня гидропригруза (ПР ₁ ¹ -1.2.14)	Организация дополнительного водоснабжения для поддержания уровня гидропригруза	0,7
Потеря тиксотропной рубашки (ПР ₁ ² -1.2.15)	Изменение конструкции уплотнителя стартового стакана ножевой части. Повышение вязкости бентонита путем внесения специальных добавок	0,6

Образование воронок мульд оседания на поверхности (P_3^2 -35) Образование подъемов поверхности (P_4^2 -36)	Организация и проведение геотехнического мониторинга и компенсационных мероприятий. Хранение аварийного запаса материалов для компенсационный мероприятий.	17
ИТОГО		29,3

Таким образом, эффективность мероприятий составит составляет ориентировочно 240,9 млн руб.

На рассмотренном примере очевидно, что запланированный анализ рисков по предложенной методике с составлением схемы КГТР для понимания сценарной структуры может значительно повысить точность и достоверность оценки, обоснованность параметров технологии строительства объектов метрополитена и эффективность разрабатываемых мероприятий. Представленная на рисунке 4.17 схема КГТР инцидента при проходке ствола может использоваться в качестве образца при оценке геотехнических рисков для графоаналитического анализа с построением сценарных траекторий и формированием сценарно-траекторных таблиц при реализации этапа 1.1 методики для конкретных условий проходки стволов с применением СПМК.

4.6 Выводы по главе 4

1. Реализация различных сценариев рискованных ситуаций при строительстве объектов метрополитена связана со значительным многообразием рискообразующих факторов, проявлений и последствий, а также причинно-следственных связей, которые необходимо идентифицировать на этапе качественного анализа и прогнозировать их реализацию в процессе количественной оценки.

2. Проявление рискованных ситуаций при строительстве объектов метрополитена характеризуется сложностью с точки зрения типов сооружений, характера происшествий, видов проявления, месту локализации, уровней развития, возможности развития каскада геотехнических рисков.

3. Представление рискованных ситуаций на основе идеализированной модели «единственный фактор - единственное проявление - единственное последствие» не учитывает особенности ПТГС и транспортной системы метрополитена, отличается от обобщенной модели, предложенной в Главе 3, и не подходит для моделирования реальных сценариев рискованных ситуаций в геотехническом строительстве, когда к проявлению рискованной ситуации приводит более одного рискообразующего фактора, имеет место более одного проявления рискованной ситуации и более одного последствия.

4. В реальных условиях рискованных ситуациях, как правило, всегда имеется комбинация различного количества вариантов из составляющих риска. Сценарии рискованной ситуации развиваются по принципу совокупности различных сочетаний составляющих риска. Сочетание факторов, проявлений и последствий зачастую запускает каскад геотехнических рисков (КГТР). При проявлении КГТР необходимо уметь определить вероятности сочетаний и уровней развития КГТР.

5. Информация для процесса управления рисками является важнейшей составляющей. От ее качества будет зависеть эффективность анализа рисков и результат управления.

6. Для повышения полноты и достоверности оценки состав экспертной группы оптимально должен включать представителей строительных, проектных и научных организаций с опытом работы в исследуемой области не менее 20 лет. В составе экспертов от научных организаций необходимо включать специалистов в области управления геотехническими рисками при строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей.

7. Метод экспертных оценок не следует применять как единственный метод оценки рисков ввиду наличия фактора субъективности организаторов

оценки при назначении необходимых и приоритетных критериев компетентности экспертов и принятии решения о соответствии экспертов данным критериям, недостатков методик расчета показателей компетентности экспертов и коэффициентов согласованности мнений, субъективности экспертов в процессе экспертной оценки. Статистический метод не следует применять как единственный метод оценки рисков ввиду необходимости использовать компетентность эксперта для прогнозирования вероятности рисков ситуации для вновь возводимых объектов в сочетании с уникальной комбинацией сложных инженерно-геологических и гидрогеологических условий, когда информация об имевших место рискованных ситуациях отсутствует.

8. Основными компонентами методики анализа рисков являются экспертная оценка, статистический анализ, сопоставление результатов и анализ возможности реализации каскада геотехнических рисков (КГТР) (этап 1), анализ КГТР и оценка вероятности реализации сценарных траекторий (этап 1.1), оценка допустимости (приемлемости) результатов и разработка комплекса мер по минимизации риска и снижению возможного ущерба (этап 2).

9. Предложенная методика анализа геотехнических рисков позволяет выполнить комплексный анализ на основе экспертно-статистического подхода геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена с учетом возможности пошагового графоаналитического анализа структуры КГТР, разработать рекомендации и организационно-технологические мероприятия для управления рисками.

11. Для целей сбора, накопления, анализа и представления окончательных статистических данных необходим информационно-аналитический архив рисков (ИААР). Источниками информации для базы данных архива (БД ИААР) могут быть привлеченные эксперты (Анкета А.1), организации-участники строительства (Анкета А.2), средства массовой информации, специализированные издания.

12. Статистический риск определяет вероятность возникновения рисков ситуации, исходя из частоты возникновения на объектах с аналогичными характеристиками в базе данных за временной период 5 лет.

13. Анализ рисков при строительстве объектов метрополитена необходимо выполнять с использованием экспертно-статистического подхода на основании сопоставления результатов экспертных оценок и статистической информации на основании критерия достоверности оценки риска. По результатам применения экспертно-статистического подхода могут возникать три основных варианта с учетом критерия достоверности оценки риска (достоверная оценка, переоценка и недооценка риска), а также частные случаи («Слепая зона статистики», «Слепая зона экспертов»). В первом частном случае следует принимать при должном обосновании доводы экспертной оценки. Во втором частном случае экспертам необходимо проанализировать и оценить рисков ситуации, найденные ИААР.

14. Анализ КГТР в настоящей работе предлагается выполнять с на основе графоаналитического анализа, в ходе которого составляется многоуровневая схема КГТР на основании обобщенной схемы, выделяются сценарные траектории КГТР и составляются сценарно-траекторные таблицы. При этом вероятность отдельной сценарной траектории определяется с учетом того, что сценарная траектория рассматривается в качестве сложного события, состоящего из совместном возникновения нескольких событий.

По результатам выполненных исследований сформулировано **третье научное положение диссертации:**

«Повышение точности оценки геотехнических рисков достигается при использовании предложенного критерия достоверности, базирующегося на реализации алгоритма анализа рисков с сопоставлением результатов групповой экспертной оценки и статистических данных о рисков ситуациях».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных исследований автором решена актуальная задача прогноза и моделирования геотехнических рисков для обоснования эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена на основе разработанной обобщенной модели геотехнических рисков, позволяющей прогнозировать каскадный сценарий развития аварийных ситуаций на сооружениях метрополитена, которая имеет важное значение для, которая имеет важное значение для повышения безопасности и технико-экономической эффективности строительства объектов метрополитена и развития строительной геотехнологии.

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Анализ отечественных и зарубежных исследований и нормативного поля показал отсутствие алгоритма управления геотехническими рисками на основе системного подхода с учетом каскадного сценария развития рисков ситуации, а также методики сопоставления полученных количественных результатов оценки рисков со статистическими архивными данными; системы сбора, учета, анализа информации по рискам (архив рисков) для получения статистических данных.

2. Выполнено исследование геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, определены составляющие геотехнического риска, разработана обобщенная модель геотехнического риска.

3. Исследованы сценарии развития рисков ситуаций при строительстве объекта метрополитена и возможности каскадного сценария развития рисков ситуации, разработана обобщенная модель каскада геотехнических рисков.

4. На основании технологических, объемно-планировочных и конструктивных особенностей разработана и обоснована типология сооружений метрополитена.

5. Разработаны классификации геотехнических рисков на основании составляющих геотехнического риска при строительстве подземных объектов метрополитена, позволяющие прогнозировать каскадный сценарий развития рискованных ситуаций.

6. Разработан алгоритм и методика анализа геотехнических рисков, позволяющие реализовать системный подход к управлению геотехническими рисками применительно к сооружениям метрополитена на основании экспертно-статистического подхода с пошаговым графоаналитическим анализом структуры каскада геотехнических рисков и различной сценарной траектории и выполнять эффективную оценку и прогноз геотехнических рисков для обоснования параметров технологий строительства объектов метрополитена.

7. По результатам работы определено направление дальнейших исследований в области экспертно-статистического подхода в части использования наряду с внутренним архивом в качестве статистической информации соответствующим образом обработанной внешней и внутренней цифровой информации («большие данные» (Big Data), «интернет вещей» («Internet of Things», IOT). В области информационно-аналитического архива актуальной является задача создания автоматизированного программного комплекса, объединяющего в себе архив рисков, возможность обработки статистических данных, результатов экспертных оценок и получения результата сопоставления.

8. Практическое применение результатов работы выполняется в качестве внедрения методики в виде стандарта предприятия для оценки геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хамаза А.А. Риск-ориентированный подход в регулирующей деятельности в области ядерной и радиационной безопасности // Радиация и риск.- 2015.- том 24. - №4.- с.87-97.
2. Приказ Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 июля 2019 года № 291 «Об утверждении методических рекомендаций по внедрению риск-ориентированного подхода при проведении плановых проверок деятельности юридического лица и (или) индивидуального предпринимателя субъекта электроэнергетики, эксплуатирующего объекты электросетевого хозяйства» [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 22.01.2020).
3. Постановление Правительства РФ от 17 августа 2016 г. N 806 (ред. от 21.03.2019) "О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации" [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 22.01.2020).
4. Риск-ориентированная модель контрольно-надзорной деятельности в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия. Классификация видов деятельности и хозяйствующих субъектов по потенциальному риску причинения вреда здоровью человека для организации плановых контрольно-надзорных мероприятий: метод. рекомендации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2014.
5. Риск-ориентированное государственное регулирование: международный опыт и российская практика (Серия «Аналитические обзоры Института государственной службы и управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации». № 4/2015) – М., 2015 г. – 78 с.

6. Аналитическая записка Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации. Обмен лучшими практиками применения риск-ориентированного подхода и оценки эффективности в контрольно-надзорной деятельности. [Электронный ресурс] /<http://ac.gov.ru/> (дата обращения 24.01.2020).

7. Концепция совершенствования государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020года (утверждена Решением Коллегии Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26 сентября 2011 года) [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 24.01.2020).

8. Руководство по безопасности "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" (утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.11.2022 г. N 387).

9. ПАО «Газпром нефть». Отчет Компании о деятельности в области устойчивого развития за 2018 год. URL: <https://ar2018.gazprom-neft.ru/control-system/control/risk-management>.

10. Бородин В.И., Шепелев Р.Е.,Ляпичев Д.М., Лопатин А.С., Никулина Д.П. Применение риск-ориентированного подхода к оценке необходимости и целесообразности установки систем мониторинга технического состояния газопроводов // Газовая промышленность.- 2018. - № 1 – с.60-63.

11. Руководство ФАТФ по применению риск-ориентированного подхода для банковского сектора. 2014 URL: https://eurasiangroup.org/files/FATF_docs/Rukovodstvo_FATF_ROP_v_bankovskom_sektore.pdf.

12. Crockford G.N. The bibliography and history of risk management: some preliminary observations // The Geneva Papers on Risk and insurance, 1982, Vol.7, No.23, pp.169-179. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1057%2Fgpp.1982.10.pdf>.

13. Markowitz H. Portfolio selection // The journal of finance, 1952, Vol. 7, No.1, pp. 77-91. URL: <http://links.jstor.org/sici?sici=00221082%28195203%297%3a1%3c77%3aps%3e2.0.co%3b2-1>.
14. Dionne G. Risk Management: istory, Definition and Critique // Interuniversity Research Centre on Enterprise, 2013, 22 p. URL: <https://www.cirrelt.ca/documentstravail/cirrelt-2013-17.pdf>
15. Mehr R. I. Risk Management and the Business Enterprise // R.I. Mehr, B.A. Hedges - R. D. Irwin, 1963.- 648 p.
16. Фидря Е.С. Институционализация, понятия и регулирование риска в советском нормативном поле // Журнал социологии и социальной антропологии. – 2017. - №20(2). – С. 40–61.
17. Whitman R.V. Evaluating Calculated Risk in Geotchnical Engineering // Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(2).
18. Telford T. Managing Geotechnical Risk: Improving Productivity in UK Building and Construction // 1988. Prediction, design and performance in geotechnical engineering. In: Fifth Australia–New Zealand Conference on Geomechanics, Sydney. Institution of Engineers Australia, Canberra, p.1–12.
19. Mkmahon B.K. Geotechnical design in the face of uncertainty // Journal of the Australian Geomechanics Society, 1985, Vol. 10, pp. 7–19.
20. Baecher, G.B. Geotechnical Risk Analysis User's Guide. Federal Highway Administration Report // US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, 1987, 50 p.
21. Hoek E., Palmeiri A. Geotechnical risks on large civil engineering projects // International Association of Engineering Geologists Congress, Vancouver, Canada, 1998, 12 p. URL: <https://www.rocscience.com/assets /resources/ learning/hoek/1998-Geotechnical-Risks-on-Large-Civil-Engineering-Projects.pdf>
22. Петренко Е.В., Петренко И.Е. Методология проектирования подземных сооружений // ГИАБ.- 1996.- С. 119-128.

23. Петренко Е.В., Петренко И.Е. Менеджмент в подземном строительстве // ГИАБ.- 1996.- С. 24-34.
24. Картозия Б.А., Малюжинец Д.Г. Решение проблемы риска в подземном строительстве // Горный вестник. – 1997. - №4 –С. 48-50.
25. Картозия Б.А., Малюжинец Д.Г. Решение проблемы риска в подземном строительстве на основе внедрения оперативного контроля качества скрытых работ // Материалы Недели горняка. - 1998.
26. Картозия Б.А. «Строительная геотехнология» как составная часть комплекса горных наук и ее роль в решении проблемы основания подземного пространств // ГИАБ. – 1993. – С. 8-15.
27. Куликова Е. Ю. Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве./Е. Ю. Куликова, А. В. Корчак, А.Н. Левченко// Моск. гос. гор. ун-т. - М. : Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2005. – 206с.
28. Кауфман Л. Л. Геотехнические риски в подземном строительстве (обзор зарубежного опыта) / Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысиков // Под общ. ред. Л. Л. Кауфмана. — Донецк: Норд-Пресс, 2009. — 362 с.
29. Запрудин А. Г. Техничко-экологические модели оценки рисков в системе защиты городской среды при строительстве метрополитена : диссертация канд. техн. наук : 25.00.22 / А. Г. Запрудин; [Место защиты: Ур. гос. гор. ун-т]. - Екатеринбург, 2008. - 213 с. : ил. Геотехнология (подземная, открытая и строительная) ОД 61 09-5/718.
30. Левченко А.Н. О новом направлении научных исследований в строительной геотехнологии // ГИАБ. – 2007. – С. 15-21.
31. Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А., Заполова К.И., Сирачев И.Ж. Опыт оценки рисков подземного строительства // Наука и прогресс транспорта. Вестник днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. — 2010. —с.55-60.
32. Паланкочев И. М. Оценка степени риска возникновения аварийных ситуаций при строительстве вертикальных шахтных стволов способом

искусственного замораживания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 6. – с. 44-51.

33. Серова, Е. А. Анализ и прогнозирование риска аварийных ситуаций при строительстве в условиях городской застройки с учетом технологических решений : диссертация ... кандидата технических наук : 05.26.02 / Серова Елена Анатольевна; [Место защиты: Моск. гос. строит. ун-т].- Москва, 2012.- 220 с.: ил. РГБ ОД.

34. Куликова Е. Ю. Выработка управленческих решений в сфере безопасности подземного строительства // ГИАБ. – 2014.- с.79-82.

35. Куликова Е. Ю. Понятие «риск» при химическом укреплении грунтов и факторы риска // ГИАБ. – 2009.- с.90-95.

36. Куликова Е. Ю. Финансовый риск при строительстве подземных сооружений с применением химукрепления грунтов // ГИАБ. – 2009.- с.128-130.

37. Gordon A.Fenton. Risk Assessment in Geotechnical Engineering / Gordon A.Fenton, D.V. Griffiths // Wiley, 2008, 480 p.

38. Кофан. О.С. Повышение качества и безопасности строительства тоннелей метрополитена на основе анализа риска : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.11. - Санкт-Петербург, 2002. - 146 с. : ил. OD 61 03-5/2062-8.

39. Пингасов Д.В. Совершенствование методов оценки рисков при управлении качеством реализации проектов автомобильных дорог : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.11 / Пингасов Дмитрий Владимирович; [Место защиты: Сиб. гос. ун-т путей сообщ.]. - Новосибирск, 2012. - 202 с. : ил.

40. Mishra R. K., M. Janiszewski, L.K.T. Uotinen, M. Szydlowska, T. Siren, M. Rinne. Geotechnical risk management concept for intelligent deep mines // Procedia Engineering, 2017, Vol. 191, pp. 361-368.

41. Mishra R. K. , Rinne M. Guidelines to design the scope of a geotechnical risk assessment for underground mines // Journal of Mining Science, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 745–756.

42. Vervorn R. R. E., Dekker H.R.E. Using GeoRM to communicate geotechnical risks between engineers and managers // 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. Rotterdam, Netherlands, 13-16 October 2015.
43. McLain K., Gransberg D., Loulakis M. Managing geotechnical risk on US design-build transport projects // Australasian Journal of Construction Economics and Building, 2014, 14 (1), pp 1-19.
44. Чунюк Д. Ю. Оценка и управление рисками при строительстве подземных сооружений открытым способом // Вестник МГСУ. – 2009, - №3 – с. 120-123.
45. Чунюк Д. Ю., Магомедов М.М., Алирзаев Э.И. Качественная оценка геотехнического риска на этапе производства работ методом построения матрицы рисков // Научное обозрение. - 2017. - № 8. - С. 16-19.
46. Чунюк Д. Ю. Магомедов М.М., Алирзаев Э.И. Расчет суммарного геотехнического риска на этапе производства работ // Научное обозрение.- 2017. - № 9.- С. 31-34.
47. Чунюк Д. Ю., М.М. Магомедов. Снижение геотехнического риска и реализация мер по повышению безопасности проектирования и строительства подземных сооружений // Естественные и технические науки. - 2014. - № 9-10 (77).- с. 381-383.
48. Серова Е. А. Причины роста количества аварий в геотехническом строительстве // Вестник МГСУ. - 2009. - № 1. - с. 513-516.
49. Дейнеко А.В., Серова Е.А.,Чунюк Д.Ю. Особенности качественного и количественного анализа геотехнического риска // В сборнике: Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции. - 2010. - с. 337-341.
50. Дейнеко А.В., Серова Е.А.,Чунюк Д.Ю. Учет технологической составляющей геотехнического риска при устройстве ограждения котлована с помощью траншейной "стены в грунте" в стесненных городских условиях // В

сборнике: Численные методы расчетов в практической геотехнике. - 2012.- с. 210-213.

51. Чунюк Д.Ю. Магомедов М.М., Алирзаев Э.И. Оценка геотехнического риска методом экспертного опроса на этапе производства работ // Научное обозрение. -2016. -№ 20.- с. 222-225.

52. Чунюк Д.Ю., Пашетова А.А. Экспертная оценка геотехнических рисков в строительстве // В сборнике: интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании научное издание. МГСУ - 2012. - с. 532-535.

53. Чунюк Д. Ю., Шуршалина М.С. Классификация геотехнического риска в строительстве//В сборнике: Теоретические и практические аспекты развития современной науки материалы XII международной научно-практической конференции. - 2014. - с. 40-46.

54. Чунюк Д.Ю. Магомедов М.М. Возможные пути снижения рисков на различных стадиях существования объекта геотехнического строительства // Естественные и технические науки. 2015. - № 3 (81). - с. 204-206.

55. Чунюк Д.Ю., Краснова А.В. Учет геологической составляющей геотехнического риска при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий, имеющих развитую подземную часть// Естественные и технические науки. - 2015. - № 3 (81).- с. 207-209.

56. Чунюк Д. Ю., Краснова А.В. Возможные риски при устройстве глубоких котлованов и методы их оценки // Естественные и технические науки. - 2014. № 9-10 (77). -с. 384-386.

57. Чунюк Д. Ю., Косарева В.А. Оценка риска на основе метода анализа дерева событий, примененного к конструкции щита тоннельной буровой машины // Научное обозрение. - 2016. - № 22. - с. 63-67.

58. Чунюк Д. Ю., Косарева В.А. Общие методы анализа риска при строительстве и эксплуатации тоннеля // Научное обозрение. - 2016. - № 14. - с. 33-36.

59. Чунюк Д. Ю., Косарева В.А. Методика расчета риска в рамках проектов строительства тоннелей на основе применения динамических байесовских сетей // Научное обозрение. - 2016. - № 14. - с. 43-47.
60. Чунюк Д. Ю. Особенности классификации и составляющие геотехнического риска в строительстве // Промышленное и гражданское строительство.- 2013. - № 9. - с. 42-44.
61. Чунюк Д.Ю., Серова Е.А. Качественный анализ составляющих геотехнического риска при строительстве подземных и заглубленных сооружений // Вестник МГСУ.- 2010. - № 4-4.- с. 136-143.
62. Чунюк Д. Ю. Управление рисками при решении геотехнических проблем строительства сооружений повышенной ответственности // Вестник МГСУ. - 2009.- № 1. - с. 522-525.
63. Чунюк Д. Ю., Ярных В.Ф. Снижение геотехнических рисков в строительстве на примере расчета и проектирования глубоких котлованов в стесненных условиях мегаполисов // В мире научных открытий. - 2010.- № 1-4 (7). - с. 193-199.
64. Чунюк Д. Ю. Серова Е.А. Качественный и количественный подходы при анализе геотехнического риска // Вестник МГСУ.- 2010. - № 2.- с. 164-168.
65. Чунюк Д. Ю. Экспертная оценка геотехнических рисков на основе методов нечисловой статистики // Вестник МГСУ.-2011. - № 5. - с. 144-150.
66. Чунюк Д. Ю. Стратегия управления геотехническим риском // Вестник МГСУ - 2011. - № 5.- с. 151-154.
67. Чунюк Д. Ю., Ярных В.Ф. Разработка методологии управления геотехническим риском при устройстве глубоких котлованов в условиях сложившейся городской застройки // В сборнике: вопросы образования и науки: теоретический и методический аспекты сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции: в 7 частях. - 2012. - с. 159-163.

68. Чунюк Д. Ю., Ярных В.Ф. Использование объемной конечно-элементной модели системы "проектируемое здание – котлован – окружающая застройка" как фактора снижения геотехнических рисков в строительстве // В сборнике: теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. аналитические и численные методы материалы 2-ой международной научно-практической конференции. коллектив авторов. - 2009. - с. 346-352.

69. Чунюк Д. Ю., Ярных В.Ф., Силаньев А.И. Снижение геотехнического риска устройства глубоких котлованов и технико-экономическое обоснование применения шпунта arcelor mittal взамен традиционного ограждения из труб// Научное обозрение. - 2014. - № 7-2. - с. 639-642.

70. Волков А.А., Серова Е.А. Методика количественного анализа уровня технологического риска возникновения аварийных ситуаций при строительстве в условиях городской застройки //International journal for computational civil and structural engineering. - 2012. - т. 8. № 4. - с. 85-88.

71. Чунюк Д. Ю., Шуршалина М.С. Составляющие геотехнического риска и их взаимосвязь с типичными нарушениями на объектах геотехнического строительства г.Москвы // В сборнике: актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий III международная научно-практическая конференция. коллектив авторов. - 2013.- с. 154-157.

72. Волков А.А., Чунюк Д.Ю. Анализ нарушений на объектах геотехнического строительства г. москвы и связь их с геотехническим риском // Научное обозрение. -2013. -№ 9. -с. 182-184.

73. Чунюк Д.Ю. Обеспечение безопасности и снижение рисков в геотехническом строительстве // Вестник МГСУ - 2008. - №2.- с.107-111.

74. Куликова Е.Ю. Механизм управления рисками в городском подземном строительстве // ГИАБ. – 2006.- с.32-35.

75. Власов С.Н. Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов / С.Н. Власов, Л.В. Маковский, В.Е. Меркин – М.:ТИМР, 2000. - 197 с.
76. Гарбер В.А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях // Подземные горизонты.- 2018.-№16.-с.20-25.
77. Мазаник Т. А., Потапов М. А., Потапова Е. В. Рекомендации по минимизации деформаций земной поверхности (на примере применения стволопроходческого комплекса для строительства метро // Метро и тоннели. – 2016. – №3. – С. 12-16.
78. Потапов М. А., Потапова Е. В. Стволопроходческие комплексы: практика применения для проходки вертикальных стволов московского метрополитена за последние 10 лет // Метро и тоннели. – 2016. – №2. – С. 12-16.
79. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2018 году. URL:http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Годовой%20отчет%20за%202018%20год.pdf/.
80. Guidelines for Managing Geotechnical Risks in Design–Build Projects (2018). URL: <https://www.nap.edu/catalog/25262/guidelines-for-managing-geotechnical-risks-in-design-build-projects>.
81. Managing Geotechnical Risk. Design Manual for Roads and Bridges (UK). Vol.4, S.1. URL: <https://ru.scribd.com/document/284658917/managing-geotechnical-risk>.
82. ГОСТ Р ИСО 13824-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Общие принципы оценки риска систем, включающих строительные конструкции [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 22.01.2020).
83. ASCE GSP 285-2017. Geotechnical risk assessment and management. American Society of Civil Engineers. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10162673/ASCE%20GSP%20285>.

84. ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования (с Изменением N 1) [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 22.01.2020).
85. ГОСТ Р 51344-99 Безопасность машин. Принципы оценки и определения риска. [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 22.01.2020).
86. СП 248.1325800.2016 Сооружения подземные. Правила проектирования. [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 11.01.2021).
87. Волков В.П. Тоннели и метрополитены. / В.П. Волков, С.Н. Наумов, А.Н. Пирожкова, В.Г. Храпов // М.:Транспорт, 1975. – 551 с.
88. СП 473.1325800.2019 Здания, сооружения и комплексы подземные. Правила градостроительного проектирования. [Электронный ресурс] /<http://www.consultant.ru/> (дата обращения 11.01.2021).
89. СМП НОСТРОЙ 3.27.3-2014 Освоение подземного пространства. Комплексное использование подземного пространства в мегаполисах. Общие требования. -М.: ОАО «Институт по изысканиям и проектированию инженерных сооружений «Мосинжпроект»., 2004.
90. Рачкова, О. Г. Архитектура транспортных сооружений: учеб. пособие для вузов / О. Г. Рачкова. — 2-е изд. — М.: Издательство Юрайт, 2018. — 197 с.
91. Мубаракшина Ф.Д., Рачкова О.Г. К вопросу о современной типологии и некоторых проблемах архитектуры транспортных сооружений // Известия КГАСУ. – 2012. - №1(19). – с. 17-23.
92. Калабин А. В. Типология жилых зданий малой и средней этажности: современное состояние // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. – 2014. - №1. – с. 63-69.
93. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Российской Федерации от 8 декабря 2020 года N 505 «Об

утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

94. Rita L. Sousa. Risk Analysis for Tunneling Projects: Thesis (Ph. D.) Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282>.

95. G.Lance, J.Anderson. Health Safety of New Austrian (2006). «The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground» / by the Health & Safety Executive, Sudbury, Suffolk, HSE Books, 2006. URL: <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr453.pdf>.

96. Health & Safety Executive (2000). «The collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport : a report on the investigation by the Health and Safety Executive into the collapse of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels at the Central Terminal Area of Heathrow Airport on 20/21 October 1994» / by the Health & Safety Executive, Sudbury, Suffolk, HSE Books, 2000. URL: <http://worldcat.org/isbn/0717617920>.

97. Seidenfuss, T. Collapses in Tunnelling: Thesis (M. D.) University of Stuttgart, EPFL and ITA, 2006. URL: <https://ru.scribd.com/document/369445627/Collapses-in-tunnellingpdf>.

98. Орлов А. И. Математические методы теории классификации // Научный журнал КубГАУ. 2014. №95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskie-metody-teorii-klassifikatsii> (дата обращения: 21.01.2021).

99. Мандель М.Д. Кластерный анализ / М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.

100. Факторный дискриминантный и кластерный анализ : [Сборник] / Пер. с англ. А. М. Хотинского, С. Б. Королева; Под ред. И. С. Енюкова. - М. : Финансы и статистика, 1989. - 215 с.

101. Дюран Б. Кластерный анализ / Б. Дюран и П. Оделл ; перевод с английского Е. З. Демиденко ; научное редактирование и предисловие А. Я. Боярского. - Москва : Статистика, 1977. - 127, [1] с. : ил., 1977.
102. Энслейн К. Статистические методы для ЭВМ / К. Энслейн, Г. О. Хартли, Р. Р. Хокинг и др.]; Под ред. К. Энслейна и др.; Перевод с англ. Г. В. Мартынова, А. Т. Терехина; Под ред. М. Б. Малютова. - М. : Наука, 1986. - 459,[1] с. : ил.
103. Kikkawa N.,(1), Itoh K., Hori T., Toyosawa Y., Rolando P. Orense R.P. Analysis of labour accidents in tunnel construction and introduction of prevention measures // Industrial Health, 53(6), 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/277603075_Analysis_of_labour_accidents_in_tunnel_construction_and_introduction_of_prevention_measures.
104. Li. R.Y.M., Ho D. C.W., Tang B. Factors, which affect construction safety in different types of construction work // Conference: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/318156739_Factors_Which_Affect_Construction_Safety_in_Different_Types_of_Construction_Work.
105. Швецов В. А., Меркин В. Е., Пискунов А. А., Петропавловских О.К., Лашков М. В. Нештатные ситуации при строительстве объектов метрополитена. Причины и ликвидация последствий // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – Вып. 5(24). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neshtatnye-situatsii-pri-stroitelstve-obektov-metropolitena-prichiny-i-likvidatsiya-posledstviy/viewer>.
106. Гарбер В. А. Нештатные ситуации при строительстве и эксплуатации московского метрополитена за последние 40 лет // Метро и тоннели. – 2014. – №3. – с. 34-35.
107. Мазеин С. В., Потапова Е. В. Исследование смещений блочной обделки при щитовой проходке автодорожного тоннеля // Наука и техника дорожнойотрасли. – 2019. - № 4(90). – с. 33-36.

108. Нехамкин А. Н., Кокунова Д. В. Эволюция теории риска // Вестник Брянского государственного университета. – 2010. - №3. - с. 36-43.
109. George A. Akerlof . The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism // The Quarterly Journal of Economics, Vol. 84, No. 3 (Aug., 1970), pp. 488-500.
110. Markowitz H. Portfolio selection // The Journal of Finance, 1952, Vol. 7, No.1, pp. 77-91.
111. Кривцов А. И. Информационное обеспечение анализа рисков // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2014. №6. – Режим доступа - URL: <https://science-education.ru /pdf/2014/6/453.pdf> (дата обращения: 10.06.2020).
112. Potapova E.V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities/ - OP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 962, International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020) 6-12 September 2020, Sochi, RussiaCitation E V Potapova 2020 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 962 042052.
113. Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. – Горные науки и технологии №6, 2021. – с. 52–60.
114. Потапова Е.В. Перспективы использования информационного ресурса Big Data в управлении геотехническими рисками при строительстве объектов метрополитена // ГИАБ.- 2021.- № 2-1. - С. 155-163.
115. Потапова Е.В. Методика оценки геотехнических рисков для объектов метрополитена с использованием ресурса Big Data // ГИАБ.- 2021.- № 2-1. - С. 164-173.
116. Дивина Т.В., Петракова Е.А., Вишневский М.С. Основные методы анализа экспертных оценок // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2019. - №7. – с. 42-44.

117. Потапова Е. В. Общие проблемы управления геотехническими рисками на примере строительства вертикальных стволов метрополитена в городе Москве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 44–54. DOI: 10.25018/0236- 1493-2019-10-0-44-54.

118. Кендэл М. Ранговые корреляции. Перевод с английского, научное редактирование и предисловие Е.М. Четыркина и Р.М. Энтова / М.: Статистика, 1975. – 216 с.

119. Пудова Н.В. Никитин В.В. Анализ значений коэффициента ранговой корреляции Спирмена // Экономический анализ: теория и практика. – 2004. - №3. – с.52-56.

120. Лубенец Ю.В. Альтернативный коэффициент конкордации при наличии связанных рангов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2021. – Т.17. - №1. – с. 40-45.

121. Попов Г.А., Попова Е.А. Альтернативный вариант коэффициента конкордации // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2012. - №2. – с. 158-167.

122. Жиликова Е.В., Ларин С.Н. Методы и приемы проведения независимой экспертизы // Вестник ВГУ. Серия: экономика и управление. – 2009. - № 2. – с.108-116.

123. Коробов В. Б. Некоторые проблемы применения экспертных методов на практике / В. Б. Коробов // Научный диалог. – 2013. – № 3(15) : Естествознание. Экология. Науки о земле. – С. 94–108.

124. Интерактивные методы в преподавании теории менеджмента [Текст] : учебно-методическое пособие / [Е. В. Азими́на и др.] ; под ред. Е. Ю. Плешаковой. - Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского гос. экономического ун-та, 2015. - 163 с.

125. Райхман, Э.П. Экспертные методы в оценке качества товаров / Э. П. Райхман, Г. Г. Азгальдов. - Москва : Экономика, 1974. - 149 с.

126. Куликова Е. Ю., Потапова Е. В. Синтез управленческих решений для обеспечения безопасности подземного строительства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 2. – С. 62–69. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_62.
127. Зерцалов, М. Г. Использование подземного пространства: учебник / М. Г. Зерцалов, Д. С. Конюхов, В. Е. Меркин - Москва : Издательство АСВ, 2015. - 416 с.
128. Меркин, В. Е. Управление геотехническими рисками в подземном строительстве / В. Е. Меркин, М. Г. Зерцалов, Д. С. Конюхов // Метро и тоннели. – 2013. – № 6. – С. 36-39.
129. Куликова, Е. Ю. Обоснование критериев и методология выбора экологически безопасных технологий строительства коммунальных подземных сооружений : диссертация доктора технических наук : 25.00.36, 25.00.22 / [Место защиты: Моск. гос. гор. ун-т. - Москва, 2003.
130. Постников В. М. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. - № 5. – С. 333-346 DOI: [10.7463/0512.0360720](https://doi.org/10.7463/0512.0360720)
131. Афоничкин А.И. Управленческие решения в экономических системах/ А.И Афоничкин, Д.Г. Михаленко. – СПб.: Питер. 2009. – 480 с.
132. Зерный Ю.В. Управление качеством в приборостроении./ Ю.В. Зерный, А.Г.Полываный, А.А.Якушин.- М.: Новый центр, 2011.- 479 с.
133. Кошелев О.С. Управление проектами./ О.С. Кошелев, И.О. Леушин, О.В.Федоров – М.: КНОРУС, 2011.- 254 с.
134. Лукичева Л.И., Егорычев Д.Н. Управленческие решения – М.: Омега-Л. 2009 – 383 с. 10. Марголин Е. Методика обработки данных экспертного опроса. // Полиграфия . – 2006. - №5 - С. 14 – 16.
135. Михненко П. Секреты эффективных бизнес-решений. – М. NT Press. - 2007. – 288 с.

136. Петриченко Г. С., Петриченко В. Г. Методика оценки компетентности экспертов // Научный журнал КубГАУ АУ. – 2015. - № 109 (05).
137. Бакико Е. В. Оценка профессиональной компетентности специалистов в области охраны труда методом экспресс-диагностики // Вестник». – 2022. - № 4. – с. 38-46.
138. Лясковский В.Л., Саркисян Д.А. Метод формирования экспертных групп для оценки предложений по проведению ФППИ // Компетентность / Competency (Russia). — 2020. — № 3. DOI: 10.24411/1993-8780-2020-10301.
139. Лясковский В.Л., Смирнов С.С., Пронин А.Ю. Методика оценки компетентности экспертов в процессе формирования предложений в проекты программных документов // Вооружение и экономика. — 2013. — № 3(24).
140. Путивцева Н.П., Игрунова С.В., Бекетова Е.Ю., Капитан С.А. Разработка иерархической многокритериальной процедуры оценки качества экспертов // Сетевой журнал «Научный результат. Информационные технологии». – 2016. – № 1. – с. 39-47.
141. Маковский Л.В. Городские подземные транспортные сооружения. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
142. Конюхов Д.С. Использование подземного пространства. – М.: Архитектура-С. 2004. – 296 с.
143. СП 120.13330.2022. Метрополитены. [Электронный ресурс] <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/8b5/SP-120.pdf> (дата обращения 12.03.2023).
144. S. Dalgic. Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey // Tunnelling and Underground Space Technology. Nov.2003.18(5):453-465.
145. V.Kontogianni, A.Tzortzis, S.Stiros. Deformation and Failure of the Tymfristos Tunnel, Greece // Oct. 2004. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(10).
146. Меркин В. Е., Петрова Е. Н. Характерные тренды развития и цена аварий в современном тоннелестроении // Метро и тоннели. – 2022. - № 4.- с. 38-41.

147. Рюмин А.Н. Авария на питерском метрополитене – еще одна версия // Безопасность труда в промышленности. – 2002. - № 9. – с.10-14.
148. E. E. Alonso, I. R. Berdugo, A. Ramon. Extreme expansive phenomena in anhydritic-gypsiferous claystone: the case of Lilla tunnel. //Geotechnique 63, No. 7, 584–612.
149. Государственный доклад «О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 1997 году» / [Монисов А. А., Беляев Е. Н.] ; М-во здравоохранения РФ, Гос. сан.- эпидемиологическая служба РФ. - Москва, 1998.
150. Пинчук К.И. Исследование распределения и мониторинг радона в Северомуйском железнодорожном тоннеле на трассе Байкало-Амурской магистрали: дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.36: Иркутск., 2012. — 132 с.
151. Марголин Е. Методика обработки данных экспертного опроса. // Полиграфия . – 2006. - №5 - с. 14 – 16.
152. Петров А.Ю. Оценка параметров жизненного цикла инновационного продукта : диссертация ... кандидата экономических наук : 08.00.05 / Петров Александр Юрьевич; [Место защиты: Рос. науч.-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия]. - Москва, 2011. - 174 с. : ил.
153. Жуков Б.М. Исследование систем управления./ Б.М. Жуков, Е.Н.Ткачева.- М.: Дашков и К, 2011.- 208 с.
154. Постников В. М., Спиридонов С.Б. Подход к увеличению уровня согласованности мнений экспертов при выборе варианта развития системы обработки информации // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. - № 6. – С. 333-350.
155. Рупосов В.Л. Методы определения количества экспертов // Вестник ИрГТУ. – 2015. - №3 (98). – с. 286-292.
156. Голицынский Д.М., Фролов Ю.С., Коньков А.Н., Иванес Т.В., Голубых А.Б. Исследование деформированного состояния обделки перегонных тоннелей Петербургского метрополитена в зоне «размыва» на участке между станциями

«Лесная»-«Площадь Мужества» // Подземное пространство мира. - 2002. - №1. - с. 29-35.

157. Справочно-методическое пособие по оценке и учету рисков при освоении подземного пространства в городе Москве / Правительство Москвы. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 260 с.

158. Теличенко В.И., Слесарев М.Ю. «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 5 (116). С. 558–567. DOI: www.dx.doi.org/10.22227/1997-0935.2018.5.558-567.

159. Тюкавкин Н.М. Подходы к формированию пятилетних планов основных направлений развития России // Основы экономики, управления и права. - 2014. - № 1 (13). – с. 10-14.

160. Кононов В.Н., Замбрицкая, Е.С., Дема Р.Р., Харченко М.В. Управление жизненными циклами промышленных технологий // Вестник Омского Университета. – 2018. - № 1(61). – с. 76-85.

161. Федунец Б.И., Бойко Ф.А. Строительство перегонных тоннелей современными ТПМК при проходке в сложных гидрогеологических условиях участков Митинско-Строгинской линии Московского метрополитена // ГИАБ. – 2008. – с. 21-30.

162. Мазеин С.В., Вознесенский А.С., Панкратенко А.Н. Инженерные изыскания и геотехнические проблемы для строительства тоннелей с помощью тоннельных буровых машин (ТБМ) под городской застройкой // Геотехника. – 2017. – № 4. – С. 42–50.

163. Панкратенко А.Н., Саммаль А.С., Анциферов С.В., Деев П.В. Учет технологических особенностей щитового способа проходки при расчете обделок тоннелей // ГИАБ. – 2017. – S1. – с. 212-224.

164. Грошиков С.Н., Панкратенко А.Н., Хуснуллин М.Ш., Сандуковский А.Э., Рубинчик Э.Б. Сравнительный анализ эффективности строительства

однопутных и двухпутных перегонных тоннелей метрополитена в увязке со станционными комплексами // ГИАБ. – 2018. – S55. – с. 3-14.

165. Мазеин С.В., Стафеев Г.М., Маслов М.И. Непрерывный контроль деформаций кольца обделки при щитовой проходке тоннелей // Метро и тоннели. – 2007. - № 3. – с. 20-22.

166. Закоршменный И.М., Закоршменный А.И. Водопроявления в тоннелях с высокоточной железобетонной обделкой и способы их устранения // ГИАБ. – 2022. - № 4. – с. 17-32.

167. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЦНИИС, 2010. — 182 с

168. Исаев А.С. Технология строительства вертикальных горных выработок: учебное пособие для обучающихся по направлению специалитета "Горное дело" / А. С. Исаев, В. Ю. Бугаев, М. С. Плешко, А. Н. Панкратенко ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" (НИТУ "МИСиС"). - Новочеркасск : Лик, 2018. - 330 с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-906993-57-1 : 300 экз.

169. Мазаник Т. А., Потапов М. А., Потапова Е. В. Анализ распределения осадки земной поверхности при использовании стволопроходческого комплекса в неоднородных гидрогеологических условиях строительства метро // Метро и тоннели. – 2016. – №5. – С. 8-11.

170. ГОСТ Р 56482-2015. Воздушный транспорт. Система управления безопасностью вертолетной деятельности. Менеджмент риска. [Электронный ресурс]. <https://base.garant.ru/71396836/> (дата обращения: 20.01.2023).

171. ГОСТ Р 56645.5-2015. Системы дизайн-менеджмента. Термины и определения. [Электронный ресурс]. <https://base.garant.ru/71402652/> (дата обращения: 20.01.2023).

172. ГОСТ Р 56548-2015/ISO/DIS/37101. Устойчивое развитие административно-территориальных образований. Системы менеджмента качества. Общие принципы и требования. [Электронный ресурс]. <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6105095> (дата обращения: 20.01.2023).

173. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17021-1-2017. Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента. Часть 1. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200146130>. (дата обращения: 20.01.2023).

174. ГОСТ Р ИСО 14016-2021. Экологический менеджмент. Руководящие указания по обеспечению достоверности экологической отчетности. [Электронный ресурс]. <https://base.garant.ru/71544070/>. (дата обращения: 20.01.2023).

175. ГОСТ Р 57523-2017. Бережливое производство. Руководство по системе подготовки персонала. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200146134>. (дата обращения: 20.01.2023).

176. ГОСТ Р 57324-2016/ISO/TS 14072:2014. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководящие указания по организационной оценке жизненного цикла. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200142904>. (дата обращения: 20.01.2023).

177. ГОСТ Р 50.05.11-2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Персонал, выполняющий неразрушающий и разрушающий контроль металла. Требования и порядок подтверждения компетентности. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200158658>. (дата обращения: 20.01.2023).

178. ГОСТ Р 55348-2012. Системы управления проектированием. Словарь терминов, используемых при управлении проектированием. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200103594>. (дата обращения: 20.01.2023).

179. ГОСТ Р 55234.4-2014. Практические аспекты менеджмента риска. Требования к персоналу для снижения биориска. [Электронный ресурс]. <https://base.garant.ru/71248262/>. (дата обращения: 20.01.2023).

180. ГОСТ Р 22.0.12-2015/ИСО 22300:2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Международные термины и определения. [Электронный ресурс]. <https://base.garant.ru/71306232/>. (дата обращения: 20.01.2023).

181. ГОСТ Р ИСО 22000-2019. Системы менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к организациям, участвующим в цепи создания пищевой продукции. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200166674>. (дата обращения: 20.01.2023).

182. ГОСТ Р 58543-2019. Интегрированные системы менеджмента. Руководство для малых и средних предприятий по оценке компетентности экспертов по интегрированным системам менеджмента. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200167887>. (дата обращения: 20.01.2023).

183. ГОСТ ISO 9000-2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200093424>. (дата обращения: 20.01.2023).

184. Рекомендация Международной организации труда от 17.06.2004 г. N 195 «О развитии людских ресурсов: образование, подготовка кадров и непрерывное обучение». [Электронный ресурс]. <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=INT&n=40864#Y0yA5ZTABUINO2kr>. (дата обращения: 20.01.2023).

185. ОСТ от 06.01.2004 г. № 95 10587-2004. «ОСТ 95 10587-2004 Профессиональное обучение персонала. Требования к программам подготовки и поддержания квалификации инструктора профессионального обучения. [Электронный ресурс]. <https://docs.cntd.ru/document/1200068004>. (дата обращения: 20.01.2023).

186. Мазеин С.В., Потапова Е.В. Особенности технологии современного проходческого комплекса при строительстве вертикальных стволов метрополитена в сложных условиях // Геотехника. – 2022. – №2. – с. 60-74.

Приложение № 1

Классификации проявлений рискованных ситуаций для сооружений Тип 2-4

Таблица П1.1

2.2. Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 2)											
№ уровня классификации											
I			II			III			IV		
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий		
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа
2	По типу сооружения	Горизонтальны й (перегонный) тоннель									
			2.1	По характеру происшествия *	2.1.1 - инцидент						
					2.1.2 - авария						
			2.2	По виду проявления	2.2.1 - прорыв воды/породы						
					2.2.2 - затопление						
					2.2.3 - просачивание /течи воды						
					2.2.4 – разуплотнение грунта						
					2.2.5 - обрушение грунта						
					2.2.6 - вывалы пород						
					2.2.7 - горные удары						
					2.2.8 - сверхнормативные деформация обделки						
			2.2.8	По виду деформации	2.2.8.1 - изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения						
					2.2.8.2 – выпучивание лотка						
					2.2.8.3 - взаимное смещение колец/блоков/тюбинго в в плоскости поперечного сечения (образование уступов)						
2.2.8.4 - расхождение смежных колец)											
2.2.8.5 - усадочные деформации бетона											

			2.2.9 - сверхнормативные деформации временной крепи	2.2.9	По виду деформации	2.2.9.1 – изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения
						2.2.9.2 – потеря устойчивости элементов временного крепления при разработке сечения по частям
						2.2.9.3 - взаимное смещения арок/рам крепи
						2.2.9.4 - изгиб арок/рам/труб экрана /элементов затяжки
			2.2.10 - повреждение/ разрушение постоянной обделки	2.2.10	По виду повреждения/ разрушения	2.2.10.1 - сколы
						2.2.10.2 - трещины
						2.2.10.3 - выпадение сборных элементов, вывалы, отделение от породы частей монолитной конструкции
						2.2.10.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
						2.2.10.5 - коррозия бетонного камня, арматуры, прокатных элементов
						2.2.10.6 – потеря несущей способности элементов анкерной крепи
			2.2.11 - разрушение временной крепи	2.2.11	По виду повреждения/ разрушения	2.2.11.1 - трещины набрызг-бетона
						2.2.11.2 - отрыв набрызг-бетонного слоя
						2.2.11.3 - отрыв сетки, анкеров
						2.2.11.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов крепи
						2.2.11.5 - потеря несущей способности

								прокатных профилей и труб экрана (в т.ч. при разработке сечения по частям)		
								2.2.11.6 - разрушение и выпадение элементов затяжки		
								2.2.14	По виду проявления	2.2.14.1 – разрушение замораживающих колонок
										2.2.14.2 - разрушение трубопроводов хладагента/хладоносителя
										2.2.14.3 - разрушение ледопородного ограждения
										2.2.14.4 - преждевременное оттаивание ледопородного ограждения
										2.2.14.5 – повреждения и деформации временной крепи/обделки при оттаивании ледопородного ограждения
										2.2.14.6 – повреждения и деформации обделки, вызванные морозным пучением
								2.2.12 - сверхнормативные отклонения продольной/оси сооружения по горизонтали и вертикали/радиусов кривизны		
								2.2.13 - сверхнормативные отклонения радиусов кривизны		
2.2.14 - связанное с применением специальных способов										

						2.2.14.7 – повреждения и деформации зданий и сооружений, вызванные морозным пучением/выпором/оседанием	
						2.2.14.8 - нарушение сплошности противofильтрационных завес	
						2.2.14.9 - отклонение от проектных параметров упрочнения массива	
						2.2.14.10 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере	
						2.2.14.11- заиливание иглофилтровых установок и фильтров водопонижающих скважи	
						3.2.14.12 - повреждение/разрушение насосного оборудования и водоотводящих трубопроводов системы водопонижения	
						2.2.14.13 – нарушение параметров процесса водопонижения	
			2.2.16 – повреждение/разрушение/отказ тоннелепроходческо-	2.2.16	По виду повреждения/отказа	2.2.16.1 – повреждение ротора/рабочего органа	

		го и технологического оборудования		2.2.16.2 – деформации элементов корпуса тоннелепроходческой машины
				2.2.16.3 – заклинивание шнекового конвейера
				2.2.16.4 – выход из строя бустерных станций ленточного конвейера
				2.2.16.5 – повреждение/выход из строя блокоукладчика/тюбингоукладчика
				2.2.16.6 – выход из строя домкратной системы передвижки тоннелепроходческой машины
				2.2.16.7 – повреждение/отказ системы подачи бентонита
				2.2.16.8 – выход из строя системы нагнетания за обделку
				2.2.16.9 – выход из строя системы гидротранспорта грунта
				2.2.16.10 – выход из строя элементов башни натяжки конвейера
				2.2.16.11 – выход из строя отвального конвейера/конвейера-перегрузателя
2.2.18 - пожар				
2.2.19 - взрыв				
2.2.20 - поступление нефтепродуктов,				

химических веществ в сооружение
2.2.21 - поступление газов в сооружение
2.2.22 - загазованность
2.2.23 - выброс породы при БВР
2.2.24 – переборы грунта
2.2.25 – сверхнормативные деформации земной поверхности
2.2.26 - сход с рельс мотовоза/электровоза/ состава вагонеток
2.2.27 – провисание троллея
2.2.28 – попадание людей в движущиеся части механизмов и оборудования
2.2.29 – остановка и сдавливание (засасывание) тоннелепроходческого комплекса и обделки
2.2.30 – заклинивание ротора
2.2.31 – потеря бентонитового пригруза забоя
2.2.32 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере
2.2.33 – разрушение щеточного уплотнения юбки тоннелепроходческого комплекса
2.2.34 – обрушение лесов/опалубочных систем/передвижных подмостей

		2.2.35 – гидроразрыв породного массива при нагнетании растворов за обделку					
		2.2.36 – необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования					
		2.2.37 - нарушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)					
		2.2.38 – смещение ТМПК с трассы					
		2.2.39 – сверхпроектное уменьшение расстояния между ТПМК					
		2.2.40 – сверхпроектное сближение двух тоннелей					
		2.2.41 – сверхпроектное приближение строящего тоннеля к действующим сооружениям					
		2.2.42 – сверхнормативные деформации и разрушения действующих сооружений					
	2.3	По возможности влиять на возникновение других проявлений (реализация каскада геотехнических рисков)		2.3.1 – влияет			
				2.3.2 – не влияет			
				2.4	По месту проявления	2.4.1 - за пределами сооружения	

			2.4.2 – порталная часть				
			2.4.3 – протяженная часть	2.4.3	По точке/зоне локализации	2.4.3.1 – свод/перекрытие	
						2.4.3.2 – диаметр/средняя часть/стены	
						2.4.3.3 – косые диаметры	
						2.4.3.4 – лоток	
			2.4.4 – забой тоннеля	2.4.4	По точке/зоне локализации	2.4.4.1 – верхняя часть	
						2.4.4.2 – средняя часть	
						2.4.4.3 – нижняя часть	

* - в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"

Таблица П1.2

2.3 Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 3)														
№ уровня классификации														
I			II			III			IV					
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий					
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа			
3	По типу сооружения	Сооружение станционного типа (открытый способ)												
												3.1	По характеру происшествия*	3.1.1 - инцидент
														3.1.2 - авария
												3.2	По виду проявления	3.2.1 - прорыв воды/породы
														3.2.2 – затопление подземными/талыми/ливневыми/коммуникационными водами
														3.2.3 – просачивание воды/выносы грунта через ограждающие конструкции котлована
														3.2.4 – разуплотнение грунта за ограждением котлована

[illegible]

							3.2.13.4 - сколы
							3.2.13.5 - разломы
							3.2.13.6 – разлом плиты лотка
							3.2.13.7 - потеря несущей узлов крепления сборных элементов
							3.2.13.8 – смещение/разрыв гидроизоляционных шпонок
							3.2.14.1 - разрушение замораживающих колонок
							3.2.14.2 - разрушение трубопроводов хладагента/хладоносителя
							3.2.14.3 - разрушение ледопородного ограждения
							3.2.14.4 – преждевременное оттаивание ледопородного ограждения
							3.2.14.5 – повреждения и деформации временной крепи/обделки при оттаивании ледопородного ограждения
							3.2.14.6 – повреждения и деформации обделки, вызванные морозным пучением
							3.2.14.7 – повреждения и деформации зданий и сооружений, вызванные морозным пучением/выпором/оседанием
							3.2.14.8 - нарушение сплошности противофильтрационных завес
							3.2.14 - связанное с применением специальных способов и струйной цементации

					3.2.14.9 - отклонение от проектных параметров упрочнения массива
					3.2.14.10 - засорение гидромонитора при струйной цементации
					3.2.14.11 - отсутствие сплошности грунтоцементных свай/массива
					3.2.14.12 - заиливание иглофильтровых установок и фильтров водопонижающих скважин
					3.2.14.13 - повреждение/разрушение насосного оборудования и водоотводящих трубопроводов системы водопонижения
					3.2.14.14 – нарушение параметров процесса водопонижения
					3.2.15 - повреждение подземных коммуникаций
				3.2.16 – повреждение/разрушение/выход из строя технологического оборудования	3.2.16 – повреждение/разрушение/выход из строя
		3.2.16	По виду повреждение/разрушение/выхода из строя		3.2.16.1 – повреждение/разрушение/выхода из строя грейферного/фрезерного оборудования для сооружения «стены в грунте»
					3.2.16.2 – повреждение/разрушение/выхода из строя оборудования для сооружения буронабивных свай
					3.2.16.3 – повреждение/разрушение/выхода из строя оборудования для

				погружения стальных свай/шпунта
				3.2.16.4 – выход из строя домкратной/ходовой системы передвижной механизированной опалубки
				3.2.16.5 – выход из строя оборудования электропрогрева бетона
				3.2.16.6 – выход из строя оборудования поддержания температурно-влажностного режима твердения бетона
				3.2.16.7 – повреждение/отказ системы бентонита
				3.2.16.8 – выход из строя кранового оборудования
				3.2.17 - повреждение/разрушение/отказ обеспечивающих инженерных систем
				3.2.18 - пожар
				3.2.19 - взрыв
				3.2.20 - поступление нефтепродуктов, химических веществ в сооружение
				3.2.21 - поступление газов в сооружение
				3.2.22 - загазованность
				3.2.23 – переборы грунта
				3.2.24 – сверхнормативные деформации земной поверхности
				3.2.25 – падение людей в котлован/траншею

		3.2.26 – падение техники в котлован/траншею			
		3.2.27 – попадание людей в движущиеся части механизмов и оборудования			
		3.2.28 – обрушение лесов/опалубочных систем			
		3.2.29 –падение монтируемых элементов в котлован/траншею			
		3.2.30 – гидроразрыв породного массива при нагнетании растворов за обделку			
		3.2.31 – необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования			
		3.2.32 - нарушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)			
		3.2.33 – сверхнормативные деформации и разрушения действующих сооружений			
		3.3		По возможности влиять на возникновение других проявлений (реализация каскада геотехнических рисков)	3.3.1 - влияет
					3.3.2 – не влияет
	3.4	По месту проявления	3.4.1 - за пределами призмы обрушения		
			3.4.2 - за сооружения, в пределах призмы обрушения		

		3.4.3 – в пределах сооружения	3.4.3	По точке/зоне локализации	3.4.3.1 – кромка котлована (обвязочная балка)
					3.4.3.2 – сопряжение стены с дном котлована
					3.4.3.3 – стена котлована
					3.4.3.4 – дно котлована

* - в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"

Таблица П1.3

2.4 Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 4)												
№ уровня классификации												
I			II			III			IV			
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий			
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	
4	По типу сооружения	Сооружение станционного типа глубокого заложения (закрытый способ)										
			4.1	По характеру происшествия*	4.1.1 - инцидент							
					4.1.2 - авария							
			4.2	По виду проявления	4.2.1 - прорыв воды/породы							
					4.2.2 - затопление							
					4.2.3 - просачивание /течи воды							
					4.2.4 - обрушение грунта							
					4.2.5 - вывалы пород							
					4.2.6 - горные удары							
					4.2.7 - сверхнормативные деформация обделки							
			4.2.7	По виду деформации	4.2.7.1 - изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения							
					4.2.7.2 – выпучивание лотка							

						4.2.7.3 - взаимное смещение колец/блоков/тубингов в плоскости поперечного сечения (образование уступов)
						4.2.7.4 - расхождение смежных колец
		4.2.8 - сверхнормативные деформации временной крепи		4.2.8	По виду деформации	4.2.8.1 – изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения
						4.2.8.2 – потеря устойчивости элементов временного крепления при разработке сечения по частям
						4.2.8.3 - взаимное смещения арок/рам/труб крепи
						4.2.8.4 - изгиб арок/рам/труб экрана /элементов затяжки
		4.2.9 - повреждение/разрушение постоянной обделки		4.2.9	По виду разрушения	4.2.9.1 - сколы
						4.2.9.2 - трещины
						4.2.9.3 - выпадение сборных элементов, вывалы, отделение от породы частей монолитной конструкции
						4.2.9.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
						4.2.9.5 – коррозионное разрушение бетонного камня, арматуры, прокатных элементов
						4.2.9.6 – потеря несущей способности элементов анкерной крепи
		4.2.10 - разрушение временной крепи		4.2.10	По виду разрушения	4.2.10.1 - трещины набрызг-бетона
						1.2.10.2 - отрыв набрызг-бетонного слоя

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

			ледопородного ограждения
			4.2.12.6 – повреждения и деформации обделки, вызванные морозным пучением
			4.2.12.7 – повреждения и деформации зданий и сооружений, вызванные морозным пучением/выпором/оседанием
			4.2.12.8 - нарушение сплошности противофильтрационных завес
			4.2.12.9 - отклонение от проектных параметров упрочнения массива
			4.2.12.10 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере
			4.2.12.11 - заиливание иглофильтровых установок и фильтров водопонижающих скважи
			4.2.12.12 - повреждение/разрушение насосного оборудования и водоотводящих трубопроводов системы водопонижения
			4.2.12.13 – нарушение параметров процесса водопонижения
	4.2.13 - повреждение подземных коммуникаций горнопроходческим оборудованием		

4.2.14 – повреждение/ разрушение/отказ горнопроходческого и технологического оборудования
4.2.15 - повреждение/ разрушение/отказ обеспечивающих инженерных систем
4.2.16 - пожар
4.2.17 - взрыв
4.2.18 - поступление нефтепродуктов, химических веществ в сооружение
4.2.19 - поступление газов в сооружение
4.2.20 - загазованность
4.2.21 - выброс породы при БВР
4.2.22 – сверхнормативные деформации земной поверхности
4.2.23 – сход с рельс электровоза/состава вагонеток
4.2.24 – провисание тролleys
4.2.25 – обрушение элементов возведенных ранее выпележащих сооружений метрополитена/иных сооружений
4.2.26 – обрушение элементов возведенных ранее нижележащих сооружений метрополитена/иных сооружений
4.2.27 – обрушение лесов/опалубочных систем/передвижных подмостей

		4.2.28 – гидроразрыв породного массива при нагнетании растворов за обделку				
		4.2.29 – необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования				
		4.2.30 - арушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)				
		4.2.31 – сверхнормативные деформации и разрушения действующих сооружений				
	4.3	По возможности влиять на возникновение других проявлений (реализация каскада геотехнических рисков)				
		4.3.1 - влияет				
		4.3.2 – не влияет				
	4.4	По месту проявления	4.4.1 - за пределами сооружения		По точке/зоне локализации	4.4.3.1 – свод/перекрытие
			4.4.2 – начало сооружения/ околоствольный двор			4.4.3.2 – диаметр/средняя часть
			4.4.3 - протяженная часть			4.4.3.3 - лоток
			4.4.4 – забой	4.4.4	По точке/зоне локализации	4.4.4.1 – верхняя часть
						4.4.4.2 – средняя часть
						4.4.4.3 – нижняя часть

* - в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"

Таблица П1.4

2.5 Классификация проявлений рисковых ситуаций ПР (сооружение - Тип 5)												
№ уровня классификации												
I			II			III			IV			
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий			
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	
5	По типу сооружения	Эскалаторный (наклонный) тоннель										
			5.1	По характеру происшествия*	5.1.1 - инцидент							
			5.2	По виду проявления	5.1.2 - авария							
					5.2.1 - прорыв воды/породы							
					5.2.2 - затопление							
					5.2.3 - просачивание /течи воды							
					5.2.4 – разуплотнение грунта							
					5.2.5 - обрушение грунта							
					5.2.6 - вывалы пород							
					5.2.7 - горные удары							
					5.2.8 - сверхнормативные деформация обделки							
					5.2.9 - сверхнормативные деформации временной крепи							
									5.2.8	По виду деформации	5.2.8.1 - изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения	
											5.2.8.2 – выпучивание лотка	
											5.2.8.3 - взаимное смещение колец/блоков/тюбингов в плоскости поперечного сечения (образование уступов)	
											5.2.8.4 - расхождение смежных колец	
												5.2.8.5 - усадочные деформации бетона
									5.2.9	По виду деформации	5.2.9.1 – изменение проектной геометрии и формы поперечного сечения	
											5.2.9.2 – потеря устойчивости	

					элементов временного крепления при разработке сечения по частям
					5.2.9.3 - взаимное смещения арок/рам крепи
					5.2.9.4 - изгиб арок/рам крепи/труб экрана /элементов затяжки
					5.2.10.1 - сколы
	5.2.10 - повреждение/разрушение постоянной обделки		5.2.10	По виду повреждения/разрушения	5.2.10.2 - трещины
					5.2.10.3 - выпадение сборных элементов, вывалы, отделение от породы частей монолитной конструкции
					5.2.10.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
					5.2.10.5 – коррозионное разрушение бетонного камня, арматуры, прокатных элементов
	5.2.11 - разрушение временной крепи		5.2.11	По виду повреждения/разрушения	5.2.10.6 – потеря несущей способности элементов анкерной крепи
					5.2.11.1 - трещины набрызг-бетона
					5.2.11.2 - отрыв набрызг-бетонного слоя
					5.2.11.3 - отрыв сетки, анкеров
					5.2.11.4 - потеря несущей способности узлов крепления элементов обделки
					5.2.11.5 - потеря несущей способности прокатных профилей и труб экрана (в т.ч. при

						разработке сечения по частям)
						5.2.11.6 - разрушение и выпадение элементов затяжки
						5.2.12 - сверхнормативные отклонения продольной оси сооружения по горизонтали и вертикали
						5.2.13 - связанное с применением специальных способов
						5.2.13.1 – разрушение замораживающих колонок
						5.2.13.2 - разрушение трубопроводов хладагента/хладоносителя
						5.2.13.3 - разрушение ледопородного ограждения
						5.2.13.4 - преждевременное оттаивание ледопородного ограждения
						5.2.13.5 – повреждения и деформации временной крепи/обделки при оттаивании ледопородного ограждения
						5.2.13.6 – повреждения и деформации обделки, вызванные морозным пучением
						5.2.13.7 – повреждения и деформации зданий и сооружений, вызванные морозным пучением/выпором/оседанием
						5.2.13.8 - нарушение сплошности

						противофильтрационных завес			
						5.2.13.9 - отклонение от проектных параметров упрочнения массива			
						5.2.13.10 - засорение гидромонитора при струйной цементации			
						5.2.13.11 - отсутствие сплошности грунтоцементных свай/массива			
						5.2.13.12 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере			
						5.2.13.13 - заиливание иглофильтровых установок и фильтров водопонижающих скважи			
						3.2.13.14 - повреждение/разрушение насосного оборудования и водоотводящих трубопроводов системы водопонижения			
						5.2.13.15 – нарушение параметров процесса водопонижения			
						5.2.14 - повреждение подземных коммуникаций горнопроходческим оборудованием			
						5.2.15 – повреждение/разрушение/отказ тоннелепроходческого и технологического оборудования	5.2.15	По виду повреждения/отказа	5.2.15.1 – повреждение ротора/рабочего органа
									5.2.15.2 – деформации элементов корпуса тоннелепроходческой машины

				5.2.15.3 – заклинивание шнекового конвейера
				5.2.15.5 – повреждение/выход из строя блокоукладчика/тюбин гоукладчика
				5.2.15.6 – выход из строя домкратной системы передвижки тоннелепроходческой машины
				5.2.15.7 – повреждение/отказ системы подачи бентонита
				5.2.15.8 – выход из строя системы нагнетания за обделку
				5.2.15.9 – выход из строя системы гидротранспорта грунта
				2.2.15.10 – выход из строя отвального конвейера/конвейера- перегружателя
				5.2.16 - повреждение/ разрушение/отказ обеспечивающих инженерных систем
				5.2.17 - пожар
				5.2.18 - взрыв
				5.2.19 - поступление нефтепродуктов, химических веществ в сооружение
				5.2.20 - поступление газов в сооружение
				5.2.21 - загазованность
				5.2.22 - выброс породы при БВР

5.2.23 – переборы грунта
5.2.24 – сверхнормативные деформации земной поверхности
5.2.25 – обрыв тросов и падение комплекса горнопроходческого оборудования в забой
5.2.26 – выход из строя удерживающих лебедок и падение комплекса горнопроходческого оборудования в забой
5.2.27 – попадание людей в движущиеся части механизмов и оборудования
5.2.28 – остановка и сдавливание тоннелепроходческо- го комплекса и обделки
5.2.29 – заклинивание ротора
5.2.30 – потеря бентонитового пригруза забоя
5.2.31 – сход с рельс скипа/грузовой тележки
5.2.32 – непредвиденное изменение давления/потеря герметичности в кессонной камере
5.2.33 – разрушение щеточного уплотнения юбки тоннелепроходческо- го комплекса

		5.2.34 – обрушение лесов/опалубочных систем/передвижных подмостей				
		5.2.35 – гидроразрыв породного массива при нагнетании растворов за обделку				
		5.2.36 – необходимость демонтажа и повторного монтажа оборудования				
		5.2.37 - нарушение режима вентиляции (в т.ч. температурного режима)				
		5.2.38 – сверхнормативные деформации и разрушения действующих сооружений				
5.3	По возможности влиять на возникновение других проявлений (реализация каскада геотехнических рисков)	5.3.1 - влияет				
		5.3.2 – не влияет				
	5.4	По месту проявления	5.4.1 - за пределами сооружения			
			5.4.2 – порталная часть			
			5.4.3 - протяженная часть	5.4.3	По точке/зоне локализации	5.4.3.1 – свод/перекрытие
						5.4.3.2 – диаметр/средняя часть/стены
						5.4.3.3 – косые диаметры
						5.4.3.4 - лоток
5.4.4 – забой тоннеля	5.4.4		5.4.4.1 – верхняя часть			

					По точке/зоне локализации	5.4.4.2 – средняя часть
						5.4.4.3 – нижняя часть

* - в соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов"

**Анкета для сбора информации о рискованных ситуациях
при строительстве метрополитенов**

№ анкеты _____

**Анкета для сбора информации о рискованных ситуациях при строительстве
метрополитенов**

1. Дата заполнения: _____
2. ФИО эксперта: _____
3. Место работы: _____
4. Должность: _____
5. Научная степень (если имеется): _____
6. Опыт производственной/проектной/научно-исследовательской (нужное подчеркнуть) деятельности в области строительства метрополитенов и транспортных тоннелей _____

Тип сооружения метрополитена	Возможные рискованные ситуации при строительстве ¹
1.Вертикальный ствол	
2.Горизонтальный (перегонный) тоннель	
3.Сооружение станционного типа (открытый способ)	
4.Сооружение станционного типа (закрытый способ)	
5.Наклонный (эскалаторный) тоннель	

1 – Перечислите все возможные, по Вашему мнению, рискованные ситуации, которые могут проявиться при строительстве сооружений метрополитена. Перечисленные Вами рискованные ситуации не обязательно ранее проявлялись при реализации проектов строительства, но могут проявиться в будущем. При необходимости можно добавить комментарии и детальное описание рискованной ситуации.
Анкета может быть заполнена от руки разборчивым почерком.

Приложение № 3

**Реестр рискованных ситуаций, имевших место при строительстве
метрополитенов и транспортных тоннелей**

№ п/п	Описание	Страна, город (район)/ Год	Источник информации
1	Затопление тоннеля, сверхнормативные деформации и обрушение участка обделки, прорыв воды и вывал грунта (до 150 м ³) при проходке перегонного тоннеля от ст. «Лермонтовский пр.-т» Московского метрополитена до ст. «Жулебино» вследствие нарушения герметичности укрепленного массива грунта и нарушения технологии разработки и крепления котлована камеры съездов вблизи тоннеля	РФ, Москва/ 2013	[105, 157]
2	Пожар при проходке перегонного тоннеля щитовым способом, вызванный загоранием нефтепродуктов, поступивших из забоя на участке, где ранее находилась автозаправочная станция	СССР, Москва/ 1982	[106]
3	Разрушение обделки действующего тоннеля при сооружении способом БВР натяжной камеры ст. «Полянка» эскалаторного тоннеля, строящейся над действующими тоннелями	СССР, Москва/ 1983	[106]
4	Вывал породы в кровле при проходке фурнели при сооружении пересадочного узла между ст. «Менделеевская» и ст. «Новослободская», вызванная нарушением технологии возведения крепи и недостаточной прочностью временной крепи	СССР, Москва/ 1986	[106]
5	Загазованность тоннеля, вызванная утечкой жидкого азота и нарушением режима проветривания при выполнении работ по искусственному замораживанию грунтов	СССР, Москва/ 1989	[106]
6	Вывал грунта стены котлована, примыкающей к Носовихинскому шоссе, при строительстве выхода станционного комплекса «Новокосино», вызванный нарушением технологии разработки грунта и возведения межсвайной затяжки	РФ, Москва/ 2012	Информация автора
7	Сверхнормативные деформации блочной железобетонной обделки с виде вертикальных смещений (уступов) при проходке с применением ТПМК с грунтопригрузом левого и правого перегонных тоннелей от ст. «Раменки» до ст. «Ломоносовский проспект»	РФ, Москва/ 2013-14	Информация автора
8	Сверхнормативные деформации железобетонной обделки с виде вертикальных смещений (уступов)	РФ, Москва/ 2015	Информация автора

	при проходке с применением ТПМК с грунтопригрузом левого и правого перегонных тоннелей от ст. «Говорово» до ст. «Солнцево»		
9	Сверхнормативные деформации блочной железобетонной обделки с виде вертикальных смещений (уступов) при проходке с применением ТПМК автодорожного тоннеля в Серебряном бору, вызванные комплексом факторов	РФ, Москва/ 2006	[107]
10	Обрушение породы при проходке тоннеля под р. Камдер вследствие проникновения воды в массив и ослабления сил сцепления между слоями массива (погибли 25 человек)	Швейцария, Лечберг/ 1908	[75]
11	Разрушение обделки и обрушение породы подходного тоннеля вследствие взрыва метана (погибли 16 человек)	Великобритания/ до 2000-го	[75]
12	Прорыв воды и грунта и затопление Северомуйского тоннеля (погибли 5 человек)	СССР/ 1979	[75]
13	Обрушение пород кровли при строительстве Рикотского тоннеля (погибли 3 человека)	СССР/ 1979	[75]
14	Обрушение породы лба забоя Дилижанского тоннеля, вызванное внезапной потерей устойчивости породного массива вследствие ослабления из-за просачивания воды в трещины и плоскости соприкосновения локальных напластований глинистых сланцев	СССР, Дилижан / 1983	[75]
15	Вывал породы кровли и повреждение анкерной крепи при проходке Мысового тоннеля № 1 вследствие нарушения технологии проходки и установки анкерной крепи	СССР/ 1979-89	[75]
16	Вывал пород кровли протяженностью 20 м и высотой купола до 20 м при проходке Мысового тоннеля № 2, вызванный наличием зоны интенсивного расланцевания и дробления и недостаточной жесткостью арочной крепи	СССР/ 1979-89	[75]
17	Обрушение породы в забое при проходке Мысового тоннеля № 4, вызванное наличием зоны ослабленных пород и недостаточной длиной опережающей крепи из труб	СССР/ 1979-89	[75]
18	Вывал породы со лба и кровли забоя при проходке Мысового тоннеля № 4, вызванный нарушением технологии проходки	СССР/ 1979-89	[75]
19	Обрушения породы свода на нескольких участках при строительстве Кодарского тоннеля, вызванные осыпание оттаявшего грунта в закрепном пространстве и разрушением временной крепи вследствие ошибок при проектировании технологии проходки и крепления тоннеля в условиях криолитозоны, несоблюдения технологии оттаивания грунта и возведения монолитной бетонной обделки, а	СССР/ 1984	[75]

	также несоблюдения режима вентиляции и температурного режима		
20	Обрушение лобового откоса предпортальной выемки при строительстве обходной трассы Северо-Муйского тоннеля, вызванное сползанием курумов вследствие недостаточности технического надзора (погибли 2 человека)	СССР/ 1986	[75]
21	Вывал породы (12 м ³) в кровле соединительного ходка между вертикальным стволом и перегонным тоннелем метрополитена и образование воронки мульды оседания (14,9 м ³) при сооружении котлована над ходком, вызванный потерей устойчивости временной крепи ходка вследствие обрушения купола разуплотненного грунта под промерзшим грунтом лотка котлована над пустотой, образовавшейся в закрепном пространстве ходка вследствие суффозионных процессов от ливневой канализации, нарушения геологической структуры и выпусками грунта при сооружении котлована (тяжело травмирован проходчик)	СССР, Минск/ 1983	[75]
22	Обвал породы в забое, разрушение временной крепи и образование воронки земной поверхности при проходке перегонного тоннеля между ст. «Вокзальная» и «Дворец Ильича», вызванный водопритоком по границе тектонического разлома, заполненного каолиновыми глинами	СССР, Днепропетровск/ 1986	[75]
23	Вывал породы груди и лба забоя при проходке переходного коридора пересадочного узла ст. «Владимирская» вследствие недостаточного учета инженерно-геологических условий при расчетах горного давления и выборе технологии проходки	СССР, Ленинград/ 1989	[75]
24	Обрушения породы в забое и кровле с разрушением временной крепи при проходке автодорожного тоннеля «Михаэль», вызванные снижением устойчивости породного массива вследствие трещиноватости блоков и пологого падения пластов	Германия, Баден-Баден/ 1989	[75]
25	Сверхнормативные деформации калотты при проходке автодорожных тоннелей Есикадзу	Япония/ до 2000-го	[75]
26	Вывалы и обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Канэтцу-II	Япония/ до 2000-го	[75]
27	Обрушения породы, сверхнормативные деформации и разрушения крепи при проходке железнодорожных тоннелей Ганновер-Вюрцбург вследствие недостаточного учета сложных инженерно-геологических условий	Германия, Ганновер/ до 2000-го	[75]
28	Вывалы породы при проходке тоннеля Ренгерхаузен, вызванные неожиданным	Германия/ до 2000-го	[75]

	появление участков неустойчивых пород и водопроявлений		
29	Обрушение породы в забое при проходке тоннеля Кайзерау	Германия/ 1985	[75]
30	Сверхнормативные деформации и повреждение обделки при проходке железнодорожного тоннеля Лилла, вызванные пучением пород в лотковой части тоннеля	Испания, Монблан/ 2003	[148]
31	Обрушения породы кровли выработки при проходке тоннеля Сейкан, вызванные повышением горного давления на крепь вследствие наличия слабых пучащих грунтов	Япония/ до 2000-го	[75]
32	Сверхнормативные деформации обделки и временной крепи при проходке железнодорожного тоннеля Рокко вследствие пучения глин и сланцев	Италия/ до 2000-го	[75]
33	Сверхнормативные деформации обделки и временной крепи при проходке железнодорожного тоннеля Круа де Л'Орли вследствие пучения глин и сланцев	Франция/ до 2000-го	[75]
34	Обрушения породы и повреждения обделки при проходке железнодорожного тоннеля Цугару	Япония/ до 2000-го	[75]
35	Обрушение породы кровли на длине 44 м при сооружении тоннеля Санаториум вследствие залегания в районе обрушения тонкослоистых песчано-глинистых отложений и пологого падения пластов	Франция/ до 2000-го	[75]
36	Оседание свода и сверхнормативные деформации арочной крепи при проходке железнодорожного тоннеля TVG, вызванные ошибкой при определении устойчивости породного массива, ослабленного фильтрацией подземных вод	Франция/ 1991	[75]
37	Вывал породы при проходке автодорожного тоннеля Пьюморен	Франция/ 1992	[75]
38	Обрушение породы свода калоттной прорези при проходке камерной выработки при строительстве станции метрополитена, вызванное недостаточным учетом влияния трещиноватости вмещающего массива при выборе технологии проходки и конструкции крепления	Франция, Марсель/ 1990	[75]
39	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Буковак вследствие влияния карстово-суффозионных процессов по трассе тоннеля	Югославия/ до 2000-го	[75]
40	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Требешица вследствие влияния карстово-суффозионных процессов по трассе тоннеля	Югославия/ до 2000-го	[75]

41	Обрушения породы при проходке автодорожных тоннелей Клюзетт вследствие влияния карстово-суффозионных процессов по трассе тоннеля	Швейцария/ до 2000-го	[75]
42	Обрушения породы при проходке автодорожных тоннелей Эпин вследствие влияния карстово-суффозионных процессов по трассе тоннеля	Франция/ до 2000-го	[75]
43	Обрушения породы при проходке автодорожных тоннелей Гран-Сассо вследствие влияния карстово-суффозионных процессов по трассе тоннеля	Италия/ до 2000-го	[75]
44	Обрушение породы в припортальной части (240 тыс.м ²) и разрушение обделки по длине 52 м при проходке горного автодорожного, вызванное обвалом неустойчивых пород откоса	Япония/ до 2000-го	[75]
45	Обрушение породы припортального участка при проходке автодорожного тоннеля Тарусава, вызванное обвалом неустойчивых пород откоса	Япония/ до 2000-го	[75]
46	Обрушение породы припортального участка при проходке автодорожного тоннеля, вызванное обвалом неустойчивых пород откоса	США, Магал/ 1990	[75]
47	Сверхнормативные деформации и разрушение (трещины) обделки при проходке железнодорожного тоннеля Танна, вызванные землетрясением магнитудой 7,1 балла	Япония, Идзу/ 1930	[75]
48	Сверхнормативные деформации и повреждения обделки при проходке железнодорожного тоннеля Окавадаи, вызванные землетрясением магнитудой 7,7 балла	Япония, Имабецу/ 1983	[75]
49	Сверхнормативные деформации и повреждения обделки при проходке перегонных тоннелей Красной линии метрополитена, вызванные землетрясением магнитудой 7,7 балла и нарушением технологии возведения обделки	США, Лос-Анжелес/ до 2000-го	[75]
50	Разрушение обделки протяженной части тоннеля выше горизонтального диаметра при проходке щитовым способом Лысогорского железнодорожного тоннеля, вызванное недостаточной несущей способностью обделки вследствие некачественно проведенных проектно-изыскательских работ при выборе трассы и конструкции обделки	СССР, Краснодар/ 1970	[75]
51	Разрушение обделки и обрушение породы при строительстве трех железнодорожных тоннелей в аэропорт Хитроу вследствие ошибок при проектно-изыскательских работах и нарушении технологии строительства	Великобритания, Лондон/ 1994	[94-97]
52	Прорыв воды и грунта (1400 м ³) в забой при проходке перегонного тоннеля метрополитена линии М2 с образованием воронки мульды оседания на поверхности, увеличением сроков	Швейцария, Лозанна/ 2005	[94]

	строительства (на 9 месяцев), нарушением социально-бытовых условий жизни людей, вызванный появлением по трассе тоннеля карстовой полости, заполненной водонасыщенным песком вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий и невыполнения опережающего исследования массива		
53	Обвал блоков пород кровли и разрушение обделки при проходке базового Готтардского тоннеля, вызванный перенапряжением пород массива	Швейцария, Альпы/ 2002	[94]
54	Обрушение породы при проходке щитовым способом автодорожного тоннеля, вызванная появлением по трассе водонасыщенных монтмориллонитовых глин вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий	Швеция, Халандсесен/ 1993	[75]
55	Вывал породы в забое при проходке щитовым способом железнодорожного тоннеля, вызванный повышенными водопритоками и наличием пучинистых грунтов	Франция, Лавенон/ 1989	[75]
56	Обрушение породы в забое при проходке перегонного тоннеля Линии № 5 метрополитена щитовым способом вследствие отсутствия необходимых мероприятий по улучшению свойств вмещающего массива	Германия, Берлин/ 1997	[75]
57	Обрушение породы в забое и повреждение рабочего органа щита при проходке железнодорожного тоннеля вследствие наличия слабых водонасыщенных грунтов по трассе	Швейцария, Граухольц/ 1993	[75]
58	Обрушения породы в забое и повреждение рабочего органа щита при проходке щитовым способом под действующей станцией перегонных тоннелей метрополитена от ст. «Орчард» до ст. «Ньютон» вследствие наличия слабых водонасыщенных грунтов по трассе	Сингапур/ 1985-88	[75]
59	Обрушения породы в забое при проходке щитовым способом перегонных тоннелей метрополитена от ст. «Сомерсет» до ст. «Сити Холл» вследствие некачественная цементация массива слабых пород в кровле тоннеля	Сингапур/ 1985-88	[75]
60	Обрушения породы в забое при проходке под сжатым воздухом перегонных тоннелей линии метрополитена под р. Сеной	Франция, Париж/ до 2000-го	[75]
61	Обрушение ограждающей стены котлована ст. «Московская» из металлических свай и выпуск породы, вызванные нарушениями в технологии сооружения свайного ограждения и увеличением давления увлажненного грунта на ограждение	СССР, Нижний Новгород/ 1984	[75]

	вследствие отсутствия водоотведения (погибли люди)		
62	Обрушение ограждающей стены котлована, выпуск воды и грунта в котлован при проходке тоннеля в электродепо метрополитена, вызванные образованием пустот вымытия и разуплотнения грунта вследствие поступлением воды из ливневой канализации и аварийной тепломагистрали в прилегающий к стене грунтовый массив, а также нарушениями от проектной технологии строительства	СССР, Свердловск/ 1989	[75]
63	Прорыв обводненной горной массы (3800 м ³) в забой при проходке Северо-Муйского тоннеля № 1, вызванный резким увеличением водопритока из зоны тектонического нарушения вследствие недостоверного прогноза тектонического разлома	СССР/ 1981	[75]
64	Прорывы воды и грунта в забой при проходке транспортно-дренажной штольни Северо-Муйского тоннеля, вызванные водопритоком из зоны тектонического нарушения вследствие недостоверного прогноза тектонического разлома	СССР/ 1979	[75]
65	Прорыв грунта в забой, сдавливание тоннелепроходческого щита, разрушение крепи при проходке разведочно-дренажной штольни Северо-Муйского тоннеля, вызванные перераспределением горного давления с поступлением обводненного щебенисто-песчано-глинистого грунта из зоны тектонического нарушения, подрубленного тоннелем, вследствие недостоверного прогноза тектонического разлома	СССР/ 1987	[75]
66	Прорыв грунта и воды (4150 м ³) в забой при проходке опытного участка Северо-Муйского тоннеля со стороны западного портала вследствие неэффективности проектного решения по инъецированию песчано-глинисто-щебенистых грунтов зоны тектонического разлома	СССР/ 1989	[75]
67	Вывалы породы кровли и прорыв грунта и воды в забое при проходке сопряжения штольни Северо-Муйского тоннеля со сбойкой, вызванные ошибками проектных решений вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий	СССР/ 1989	[75]
68	Вывалы породы кровли, прорыв грунта и воды в забое, повреждение тубинговой чугунной обделки при проходке Северо-Муйского тоннеля, вызванные недостоверным прогнозом инженерно-геологических и гидрогеологических условий тектонического разлома, а также неэффективностью химического закрепления массива	РФ/ 1999	[75]

69	Прорыв воды и песчаных пород в своде и забое тоннеля, , разрушение железобетонной тубинговой обделки при проходке перегонного тоннеля метрополитена от ст. «Проспект Просвещения» до депо «Выборгская» с образованием воронки мульды оседания на поверхности, повреждением зданий и подземных коммуникаций, вызванные резким ослаблением защитной кровли грунтов, развитием горного давления вследствие повышенной трещиноватости коренных глин, которая стала причиной вывала грунта в своде до водоносной линзы	СССР, Ленинград/ 1988	[75]
70	Вывал породы (450 м ³) и затопление монтажного ствола при строительстве тоннеля метрополитена с образованием воронки мульды оседания на поверхности диаметром 20 м и глубиной 18,5 м	Германия, Мюнхен/ 1994	[94]
71	Вывал породы при строительстве ст. «Пинеиро» метрополитена с образованием воронки мульды оседания на поверхности (погибли 7 человек)	Бразилия, Сан-Пауло/ 2007	[94]
72	Вывал породы (2500м ³) при строительстве ст. «Олиवास» метрополитена с образованием воронки мульды оседания на поверхности	Португалия, Лиссабон/ 1996	[94]
73	Прорыв воды и грунта при проходке сбойки между перегонными тоннелями метрополитена с образованием воронки мульды оседания на поверхности и повреждением зданий на поверхности вследствие неэффективного руководства и недостаточного контроля в ходе строительных работ	Китай, Шанхай/ 2003	[94]
74	Прорыв воды и грунта и разрушение перемычки при проходке тоннеля метрополитена с образованием воронки мульды оседания на поверхности и обрушением зданий на поверхности (погибли 3 человека)	Южная Корея, Тэгу/ 2001	[94]
75	Обрушение породы и разрушение обделки при проходке автодорожного тоннеля	Швейцария, Ашер/ 2001	[94]
76	Вывалы блоков породы в кровле при проходке автодорожных тоннелей Автомагистрали № 5	Австралия, Сидней/ 1985-01	[94]
77	Прорывы воды и затопления при проходке железнодорожного тоннеля Сейкан (подводная часть 23,3 км) (погибли 34 человека)	Япония, Цугару/ 1969-76	[94]
78	Стреляния и разрушения пород кровли и стен при проходке Лердальского автодорожного тоннеля, вызванные перенапряжением пород массива	Норвегия, Согн-ог-Фьюран/ 1995-00	[94]
79	Сверхнормативные деформации и разрушение обделки при проходке автодорожных тоннелей Маунт-Болу, вызванные непрогнозируемым	Турция, Болу/ 1994	[94]

	увеличением горного давления, превышающего несущую способность набрызг-бетонной крепи со стальными арками, в зоне тектонического разлома Асарсую вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий		
80	Прорыв воды и обрушение породы в забое при строительстве эскалаторного тоннеля метрополитена ст. «Металлургов» с образованием воронки мульды оседания на поверхности, вызванные снижением защитных свойств ледопородного ограждения и образованием зоны неустойчивых пород вследствие недостаточного контроля за состоянием ледопородного ограждения, а также недостаточности опережающих работ прогнозирования и появления трещиноватых пород с водоприток в забое	СССР, Днепропетровск/ 1988	[75]
81	Прорыв воды в котлован «Ветка в депо», затопление перегонных тоннелей метрополитена, разрушение обделки тоннеля, обрушение затяжки и деформация крепи бортов котлована, отслаивание грунта, вызванные поступлением воды при прорыве трубопровода горячего водоснабжения в недействующую неликвидированную канализационную систему, находившуюся вблизи подземных сооружений метрополитена	СССР, Свердловск/ 1989	[75]
82	Прорыв канализационных стоков и затопление котлована ст. «Первомайская», станционного комплекса и тоннелей метрополитена по причине отключения насосов на станции водоканала вследствие отключения электроэнергии при пожаре на ТЭЦ-2	СССР, Минск/ 1990	[75]
83	Затопление и разрушение стен котлована вестибюля ст. «Мечникова» Сырецко-Печорской линии, вызванные воздействием ливневых вод вследствие отсутствия водоотбойного бруса	СССР, Киев/ 1989	[75]
84	Прорыв воды и пород в забое и затопление при проходке автодорожного тоннеля Гран-Сассо, вызванные вызванный водоприток по границе тектонического разлома (сброса Валь Фреда), заполненного водой, песком и скальными обломками	Италия/ до 2000-го	[75]
85	Прорывы воды и породы (8500 м ³) в забое и затопление тоннеля при проходке автодорожного тоннеля Синвада, вызванные неблагоприятными гидрогеологическими условиями, неразведанными по причине сложной топографической ситуации по трассе, и неэффективностью мероприятий по водопонижению	Япония/ 1975	[75]

86	Прорывы воды при проходке железнодорожного тоннеля Накаяма, вызванные наличием по трассе слабоустойчивых сильнообводненных пород и неэффективностью выбранных технологий по закреплению массива	Япония/ 1980	[75]
87	Прорыв воды в забое при проходке железнодорожного тоннеля Энрэй, вызванный наличием по трассе трещиноватых сильнообводненных пород	Япония/ до 2000-го	[75]
88	Прорывы воды при строительстве железнодорожных тоннелей Урамото, Икута, Джоецу вследствие наличия по трассе пирокластических зон с резкими и неожиданными сменами характеристик устойчивости забоя, форм и размеров фракций грунта и значительным водопритоком	Япония/ до 2000-го	[75]
89	Прорыв воды и породы в забое с образование купола (высотой в 2 высоты тоннеля) и разрушением временной крепи при проходке железнодорожного тоннеля Босрук, вызванные увеличением дебита подземных вод в массиве трещиноватых известняков вследствие проливных дождей и таяния снега	Австрия, Арднинг/ 1981	[75]
90	Затопление тоннеля Сент-Жастино при проходке (водоприток 810 м ³ /час)	Франция, Ланды/ до 2000-го	[75]
91	Прорыв воды в забой, вывалы породы и сверхнормативные деформации арок крепи при проходке железнодорожного тоннеля, вызванные появлением по трассе нарушенного трещинами массива гранитов со значительными водопритоками вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий	Швейцария, Альпы/ до 2000-го	[75]
92	Прорыв воды и грунта в забой при проходке станционного тоннеля метрополитена с образованием каверн и осадкой поверхности	Китай, Гонконг/ 1983	[75]
93	Прорыв воды в забой с обрушением вмещающей каверны, образованной при повреждении водопропускного коллектора, при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванный отсутствием необходимого объема и качества мониторинга по трассе проходки тоннеля	Италия, Рим/ до 2000-го	[75]
94	Прорыв воды и грунта (2500 м ³) в забое при проходке автодорожного тоннеля Эпин, вызванный недостоверным прогнозом инженерно-геологических условий и отсутствием мероприятий по минимизации влияния на проходку развитой системы карстовых полостей, заполненных водой и рыхлыми породами	Франция, Савойя/ 1973	[75]
95	Затопление при проходке железнодорожного тоннеля Рауэберг, вызванное превышением (в 100	Германия/ до 2000-го	[75]

	раз) прогнозируемого водопритока при пересечении зоны закарстованных известняков		
96	Прорыв воды и грунта при проходке автодорожного тоннеля, вызванный недостоверным прогнозом инженерно-геологических условий и отсутствием мероприятий по минимизации влияния на проходку развитой системы карстовых полостей, заполненных водой и рыхлыми породами	Франция, Фредда/ до 2000-го	[75]
97	Прорывы обводненных слабых пород при проходке железнодорожного тоннеля, вызванные вскрытием непредвиденных карстовых пустот вследствие отсутствия возможности проведения детальных инженерно-геологических изысканий в начале 20-го века	Франция и Швейцария, Мон-д'Ор/ 1910-15	[75]
98	Прорыв агрессивных к бетону и арматуре подземных вод в забой при проходке щитовым способом автодорожного тоннеля Бецберг	Германия/ 1991	[75]
99	Обрушение породы в забое и протяженной части тоннеля (30 м), разрушение крепи НАТМ, затопление участка тоннеля (400 м), осадки поверхности при проходке перегонных тоннелей метрополитена, вызванные несоблюдением технологической схемы возведения крепи, недостаточной прочностью бетона крепи, некачественным тампонажем водопонижительных скважин	Бразилия, Сан-Пауло/ 1993	[75]
100	Прорыв воды при проходке автодорожного тоннеля	Исландия, Исафьяордюр/ 1993	[75]
101	Затопление тоннеля, обрушение породы, разрушение блочной обделки при проходке железнодорожного тоннеля под сжатым воздухом в водонасыщенных илистых мелкозернистых песках	Индия, Сиамбазар/ 1990	[75]
102	Затопление морской водой при проходке тоннельных участков тоннельно-мостового перехода «Большой Бельт» и выход из строя тоннелепроходческих щитов вследствие недостаточной проработки при проектно-изыскательских работах технологических решений при проходке подводного тоннеля	Дания, пролив Большой Бельт/ 1991	[75]
103	Утрата и повреждение подводных секций для тоннельного подводного участка тоннельно-мостового перехода при транспортировке	Дания и Швеция, пролив Эресунн/ 1998	[75]
104	Прорыв воды в протяженной части при проходке под р.Потомак перегонного тоннеля Желтой линии метрополитена, вызванный повреждением отводной дамбы	США, Вашингтон/ 1977	[75]

105	Прорыв воды в протяженной части при проходке автомобильного тоннеля, вызванный повреждением отводной дамбы	Великобритания, Эннердейл/ 1992	[75]
106	Пожар при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванный загоранием нефтепродуктов, поступивших из забоя	СССР, Баку/ 1983	[75]
107	Пожар в околоствольном дворе вертикального ствола, вызванный загоранием нефтепродуктов, поступающих из почвы выработок	СССР, Баку/ 1987	[75]
108	Загазованность парами бензина и нефтепродуктов при проходке тоннеля метрополитена, вызванная поступлением нефтепродуктов из забоя на участке, где ранее находилась автозаправочная станция	СССР, Нижний Новгород/ 1981	[75]
109	Вспышка метана, скопившегося в куполе вывала при проходке оборотного тупика околоствольного двора вертикального ствола метрополитена, вызванная нарушениями режима проветривания	СССР, Тбилиси/ 1985	[75]
110	Вспышка метана в забое при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванная нарушениями режима проветривания	СССР, Тбилиси/ 1989	[75]
111	Загазованность тоннеля, вызванная нарушением норм охраны труда и промышленной безопасности при производстве работ по искусственному замораживанию грунтов жидким азотом (погибли люди)	СССР, Москва/ 1989	[75]
112	Загазованность при проходке вертикального ствола метрополитена, вызванная разрушением замораживающей колонки при производстве работ по искусственному замораживанию грунтов жидким азотом (погиб 1 человек)	СССР, Ленинград/ 1983	[75]
113	Загазованность парами аммиака в забое при проходке наклонного хода ст. «Мечникова» метрополитена, вызванная неисправностью запорной арматуры компрессорной установки замораживающей станции	СССР, Киев/ 1988	[75]
114	Загазованность парами аммиака в забое при проходке вертикального ствола метрополитена ст. «Октябрьская площадь» метрополитена, вызванная неисправностью компрессорной установки замораживающей станции	СССР, Днепропетровск/ 1989	[75]
115	Вскрытие водоносных горизонтов, загрязненных токсичными хлорированными углеводородами при проходке перегонных тоннелей метрополитенов	Германия, Ганновер/ до 2000-го	[75]
116	Загазованность токсичными газами при проходке автодорожного тоннеля, вызванная поступлением газов из тектонического разлома вследствие	Италия, Палермо, Мессина/ до 2000-го	[75]

	недостатков инженерно-геологических изысканий		
117	Пожар в околоствольном дворе при строительстве метрополитена, отключение вентиляции и насосов водоотлива, перекрытие пути эвакуации людей, вызванный коротким замыканием в кабельной системе	СССР, Баку/ 1985	[75]
118	Загорание кабельных линий при строительстве метрополитена, вызванное коротким замыканием в кабельной системе	СССР, Ленинград/ 1986	[75]
119	Загорание кабельных линий в забое при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванное коротким замыканием в кабельной системе	СССР, Тбилиси/ 1982	[75]
120	Пожар в протяженной части рабочего вертикального ствола для проходки перегонных тоннелей к ст. «Площадь Ильича» метрополитена, вызванный коротким замыканием в кабеле освещения лестничного отделения	СССР, Днепропетровск/ 1987	[75]
121	Пожар на нулевой площадке рабочего вертикального ствола при строительстве 2-го пересадочного узла между ст. «Крещатик» и ст. «Площадь Жовтневой революции», вызванный нарушением ведения сварочных работ	СССР, Киев/ 1983	[75]
122	Пожар при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванный возгоранием разлитого масла вследствие нарушения промышленной безопасности, правил ведения сварочных работ и недостаточным контролем процесса производства работ	СССР, Ленинград/ 1987	[75]
123	Загорание в блоке служебных помещений при строительстве ст. «Ленинская» метрополитена, вызванное возгоранием стеклорубероида вследствие нарушения ведения огневых работ	СССР, Киев/ 1987	[75]
124	Пожар при проходке соединительного ходка при строительстве метрополитена, вызванный нарушением ведения огневых работ	СССР, Киев/ 1988	[75]
125	Загорание автодрезины при устройстве верхнего строения пути в перегонном тоннеле метрополитена от ст. «Шенгавит» до ст. «Площадь Спанарян», вызванное вспышкой горючего в дренажной канавке при сварке рельсовых нитей вследствие нарушений промышленной безопасности и недостаточным контролем процесса производства работ	СССР, Ереван/ 1986	[75]
126	Загорание деревянной вентиляционной перемычки при проходке Северо-Муйского тоннеля, вызванное резкой металлических конструкций вблизи перемычки вследствие нарушения промышленной безопасности и правил ведения огневых работ, а также	СССР/ 1986	[75]

	недостаточного контроля процесса производства работ		
127	Пожар вблизи забоя при проходке щитовым способом перегонного тоннеля метрополитена от ст. «Первомайская» до ст. «Пролетарская», вызванный возгоранием транспортной ленты вследствие нарушения промышленной безопасности и правил ведения огневых работ, а также недостаточного контроля процесса производства работ	СССР, Минск/ 1988	[75]
128	Пожар в помещении подземной пневматической мастерской при проходке перегонного тоннеля Серпуховского радиуса метрополитена вследствие нарушения промышленной безопасности и недостаточного контроля процесса производства работ	СССР, Москва/ 1982	[75]
129	Загорание подземного автобетоносмесителя при проходке Мысового тоннеля, вызванное неисправностями топливной системы машины	СССР/ 1982	[75]
130	Пожар при строительстве ст. «Лиговская» метрополитена, вызванный загоранием битумной мастики в электробитумоварке	СССР, Ленинград/ 1989	[75]
131	Пожар в проходческом копре при проходке вертикального ствола № 1 Северо-Муйского тоннеля, вызванный загоранием кабеля насоса вследствие неисправностей нарушений правил эксплуатации электромеханического оборудования	СССР/ 1983	[75]
132	Пожар в примыкающем к копру вертикального ствола № 4 Северо-Муйского тоннеля помещении приготовления химических растворов вследствие нарушений промышленной безопасности и правил ведения огневых работ	СССР/ 1985	[75]
133	Пожар при строительстве тягово-понижительной подстанции ст. «Дворец Ильича» метрополитена, вызванный неисправностями электрооборудования	СССР, Днепропетровск/ 1987	[75]
134	Пожар при строительстве ст. «Металлургов» метрополитена, вызванный нарушениями промышленной безопасности и правил ведения огневых работ	СССР, Днепропетровск/ 1988	[75]
135	Пожар при строительстве открытым способом перекрытия монтажной камеры щита для проходки перегонного тоннеля метрополитена вследствие нарушений промышленной безопасности и правил ведения огневых работ	СССР, Ташкент/ 1986	[75]
136	Пожар при проходке под сжатым воздухом тоннеля Дебрей, вызванный попаданием в тоннель из окружающего массива сульфида магния вследствие недостатков инженерно-	Великобритания/ до 2000-го	[75]

	геологических изыскания и недостаточной проработки проектных решений по устранению негативного влияния инженерно-геологических условий на технологию проходки (погибло 17 человек)		
137	Пожар в щитовом проходческом комплексе с повреждением оборудования и разрушением обделки при проходке железнодорожного тоннеля «Большой Бельт», вызванный неисправностями электромеханической системы щита	Дания, пролив Большой Бельт/ 1994	[75]
138	Пожар с разрушением обделки при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванный возгоранием деревянной временной крепи и постоянной обделки из высокопрочного полиэтилена	США, Лос-Анджелес/ до 2000-го	[75]
139	Пожар и проходке транспортного тоннеля, вызванный возгоранием полиуретановой пены, используемой для заполнения пустот от вывалов в заобделочном пространстве	Австралия/ 1986	[75]
140	Обрушение породы порталной части при проходке тоннеля Хой Ван, вызванное потерей устойчивости выветренных пород склона по причине отсутствия надежного временного крепления склона	Вьетнам, Дананг и Хуу/ 2001	[94]
141	Обрушение породы порталной части с образованием провала до дневной поверхности при проходке тоннеля высокоскоростной железной дороги, вызванное пересечением тоннелем тектонического разлома заполненного разрушенными неустойчивыми породами	Германия/ 1990	[94]
142	Обрушение породы в кровле, прорыв воды и породы, разрушение зданий на поверхности при проходке перегонного тоннеля метрополитена, вызванные наличием по трассе тоннеля заброшенного колодца (скважины) (погибли 5 человек)	Турция, Стамбул/ 2001	[94]
143	Разрушение обделки (400 м) с образованием воронок на поверхности при проходке тоннелей Болу, вызванное землетрясением	Турция, Элмалик/ 1999	[94]
144	Обрушение породы кровли, разрушение обделки, осадки поверхности с разрушением зданий при проходке перегонного тоннеля Линии № 5 метрополитена, вызванные пересечением зоны тектонического разлома вследствие недостаточной проработки трассы тоннеля на стадии проектно-изыскательских работ, а также отсутствием необходимого объема и качества работ по геотехническому мониторингу	Испания, Барселона/ 2005	[94]

145	Разрушение крепи, обрушение породы кровли и осадки поверхности при проходке автодорожных тоннелей Монтемор вследствие нарушения технологии возведения анкерной крепи	Португалия, Монтемор	[94]
146	Обрушения породы в кровле и забое, прорывы воды и грунта при проходке тоннеля Сюэшань, вызванные наличием по трассе большого количества тектонических разломов и напорных водоносных горизонтов (Всего при строительстве тоннеля погибли 25 человек).	Китай, Тайвань/ 1991-00	[94]
147	Обрушение породы в забое при проходке обходного автодорожного тоннеля Чинберг	Швейцария, Сиссах/ 2004	[94]
148	Сверхнормативные деформации (до 1,5 м) лотка при проходке обходного автодорожного тоннеля Чинберг, вызванные пучением пород, расположенных в почве, вследствие оставления незамкнутым контура обделки по причине обрушения породы в забое	Швейцария, Сиссах/ 2004	[94]
149	Вывалы блоков породы в кровле при проходке автодорожного тоннеля Кросс-Сити	Австралия, Сидней/ 2003-05	[94]
150	Вывалы блоков породы в кровле при проходке автодорожных тоннелей Автомагистрали № 5	Австралия, Сидней/ 1985-01	[94]
151	Обрушение породы, затопление и выход из строя щита при проходке автодорожного тоннеля Пин-Линь, вызванные пересечением трассы сдвиговой зоны тектонического разлома	Китай, Тайвань/ до 2000-го	[94]
152	Разрушение обделки (на горизонтальном диаметре) и обрушение породы при проходке восточного участка Винервальдского железнодорожного тоннеля, вызванное давлением воды, превышающим проектную прочность обделки	Австрия, Вена/ 2006	[94]
153	Обрушение породы с образованием воронки мульды оседания на поверхности при проходке западного участка Винервальдского железнодорожного тоннеля	Австрия, Вена/ 2006	[94]
154	Обрушения породы в забое и кровле, прорывы воды и породы, затопления, повреждения и разрушения обделки при проходке автодорожного тоннеля Караванкен, вызванные пересечением трассы тектонических разломов, заполненных неустойчивыми породы, и зон с повышенными водопритоками	Австрия, Словения/ 1986-91	[94]
155	Прорыв воды в забой из заброшенного водозаборного колодца, образование воронки мульды оседания, повреждение зданий на поверхности при проходке щитовым способом	Португалия, Порту/ 2000	[94]

	перегонного тоннеля линии «С» легкорельсового транспорта		
156	Образование воронки мульды оседания и повреждение зданий на поверхности при проходке щитовым способом перегонного тоннеля линии «С» легкорельсового транспорта, вызванные перебором грунта, избыточным выпуском грунта из камеры грунтопригруза и несоблюдением диаграммы грунтопригруза	Португалия, Порту/ 2000	[94]
157	Образование кратера на поверхности (размерами 8х8х6 м), обрушение здания при проходке щитовым способом перегонного тоннеля линии «С» легкорельсового транспорта, вызванные перебором грунта, избыточным выпуском грунта из камеры грунтопригруза, вследствие недостаточного контроля строительных работ, отсутствия необходимого объема и качества работ по геотехническому мониторингу, недостатков инженерно-геологических изысканий (погиб 1 человек)	Португалия, Порту/ 2001	[94]
158	Провалы земной поверхности при проходке тоннеля Шульвальд	Германия, Висбаден/ 1997-01	[94]
159	Обрушение породы при проходке тоннелей Северо-Восточной линии MRT	Сингапур, Пунггол/ 1996-03	[94]
160	Провалы земной поверхности при проходке тоннелей линии легкорельсового транспорта Гаосюн	Китай, Тайвань/ 2001-08	[94]
161	Обрушение породы при проходке обходного автодорожного тоннеля Чинберг	Швейцария, Сиссах/ 2004	[94]
162	Сверхнормативные деформации (до 1,5 м) лотка при проходке обходного автодорожного тоннеля Чинберг, вызванные пучением пород, расположенных в почве, вследствие оставления незамкнутым контура обделки по причине обрушения породы в забое	Швейцария, Сиссах/ 2004	[94]
163	Вывалы блоков породы в кровле при проходке автодорожного тоннеля Кросс-Сити	Австралия, Сидней/ 2003-05	[94]
164	Сверхнормативные деформации и образование воронки мульды оседания на поверхности при проходке железнодорожного тоннеля Ирлахул	Германия, Бавария/ 1999-05	[94]
165	Обрушение породы при проходке подводного автомобильного тоннеля Олессун Фьерд	Норвегия, Олессун/ до 1987-го	[94]
166	Провалы земной поверхности при проходке автодорожного тоннеля Мария Малуф	Бразилия, Сан- Пауло/ до 1994-го	[94]

167	Обрушение породы при строительстве Линии № 2 метрополитена	Греция, Афины	[94]
168	Сверхнормативные деформации и провалы земной поверхности при проходке железнодорожной линии тоннеля канала (CTRL)	Великобритания, Лондон/ 1996-07	[94]
169	Провалы земной поверхности при проходке автодорожного тоннеля Авиенда Санто Амаро	Португалия	[94]
170	Провалы земной поверхности при проходке тоннелей Линий № 1 и № 3 метрополитена	Китай, Гунджоу	[94]
171	Вывалы блоков породы и обрушения при проходке Герцогского тоннеля	Австрия, Штирия/ 1982-07	[94]
172	Провалы земной поверхности при проходке тоннелей Лейн-Коув	Великобритания, Южный Уэльс/ 2003-07	[94]
173	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Тузла, вызванные пересечением трассой зон тектонических разломов	Турция	[94, 144]
174	Обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Драназ	Турция, Синоп/ 2002-09	[94]
175	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Сангалдан (Джамму-Удхампур)	Индия, Кашмир/ 2002-10	[94]
176	Прорывы воды в забой при проходке автодорожного тоннеля Фюссен	Германия, Бавария/ до 1999-го	[94]
177	Обрушения породы при проходке тоннелей Калькутского метрополитена	Индия, Калькутта	[94]
178	Провалы земной поверхности при проходке автодорожных тоннелей Додони	Греция, Эпирус	[94]
179	Сверхнормативные деформации обделки и обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Тимфристос	Греция	[94, 145]
180	Провалы земной поверхности при проходке автодорожных тоннелей Джона Х. Вилсона	США, Гавайи/ 1954-60	[94]
181	Сверхнормативные деформации обделки при проходке железнодорожного тоннеля Тауэрн	Австрия, Зальцбург/ 1902-1909	[94]
182	Сверхнормативные деформации обделки и обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Манери-Уттаркаши	Индия, Уттаракханд	[94]
183	Сверхнормативные деформации обделки при проходке автодорожного тоннеля Анточори на автодорожной магистрали Эгнатия	Греция, Игуменица/ 1902-1909	[94]
184	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Ландрекен	Германия, Эссен	[94]
185	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Буэна-Виста	США, Калифорния/ 1913-28	[94]

186	Обрушение породы кровли калоттной прорези, разрушение временной крепи при проходке вентиляционной камеры на перегоне от ст. «Парк Победы» до ст. «Славянский бульвар» Арбатско-Покровской линии Московского метрополитена, вызванные превышением величин горного давления несущей способности временной крепи вследствие недостаточной проработки проектных решений в части технологии проходки и крепления тоннеля	РФ, Москва/ 2008	Информация автора
187	Обрушения породы и прорывы воды при проходке щитовым способом автодорожного тоннеля Сан Пелегрино (участок Фрасданелло и Антеа)	Италия, Ломбардия/ до 2003-го	[28]
188	Обрушения породы при проходке железнодорожных тоннелей Монтелунго	Италия, Рим и Наполи/ 1995-99	[94]
189	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Каллидромо	Греция, Птиотис/ до 2010	[94]
190	Обрушения породы при проходке железнодорожных тоннелей Гуадаррама	Испания, Сьерра- де-Гуадаррама/ 2002-07	[94]
191	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Абдаладжиса	Испания, Мадрид/ 2003-06	[94]
192	Обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Хуртиерес	Франция, Савой/ до 1997-го	[94]
193	Обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Парамития на автодорожной магистрали Эгнатия	Греция	[94]
194	Обрушения породы при проходке железнодорожного тоннеля Юн-Нань	Китай, Юн-Нань	[94]
195	Обрушения породы при проходке автодорожного тоннеля Вальгау	Австрия, Форарльберг	[94]
196	Сверхнормативные деформации обделки при проходке железнодорожного тоннеля Ивате-Ичинох	Япония, Токио и Аомори/ 1988- 2002	[94]
197	Заклинивание обделки, образование воронки мутьды оседания на поверхности, невозможность продолжения проходческих работ при проходке механизированным способом рабочего вертикального ствола № 748 от ст. «Деловой Центр» до ст. «Кутузовский проспект» Калининско-Солнцевской линии Московского метрополитена, вызванные резкой потерей гидропригруза при пересечении зоны трещиноватых известняков вследствие недостатков инженерно-геологических изысканий	РФ, Москва/ 2015	[77, 78]
198	Прорывы воды в перегонный тоннель при проходке щитовым способом и вентиляционный	Китай, Тайвань	[28]

	ствол при строительстве линии метрополитена Пан-Шиа		
199	Загазованность радоном (радиоактивный газ) при проходке Северо-Муйского, вызванная непрогнозируемым выделением газа в забой и протяженную часть тоннеля вследствие недостатков проектно-изыскательских работ	СССР/ до 1997-го	[149, 150]
200	Обнаружение снаряда времен Великой Отечественной Войны при строительстве ст. «Раменки» Калининско-Солнцевской линии	РФ, Москва / 2016	Средства массовой информации
201	Обнаружение снаряда времен Великой Отечественной Войны при строительстве ст. «Аминьевская» Большой кольцевой линии	РФ, Москва / 2019	Средства массовой информации
202	Обнаружение снаряда времен Великой Отечественной Войны при строительстве автодорожного тоннеля Ялтинского кольца	РФ, Севастополь/ 2021	Средства массовой информации
203	Взрыв авиабомбы времен Второй Мировой Войны при строительстве автодорожного тоннеля	Германия, Мюнхен/ 2021	Средства массовой информации
204	Обнаружение авиабомбы времен Второй Мировой Войны при строительстве тоннеля метрополитена	Болгария, София / 2018	Средства массовой информации
205	Взрыв боеприпасов времен Второй Мировой Войны при разработке котлована ¹ (погиб 1 человек) 1 – точной информации о назначении объекта строительства не имеется	Чехия, Острава / 2022	Средства массовой информации
206	Обнаружение снаряда времен Великой Отечественной Войны при строительстве вестибюля станции «Путиловская» Красносельско-Калининской линии	РФ, Санкт-Петербург / 2022	Средства массовой информации
207	Обнаружение снаряда времен Великой Отечественной Войны при строительстве ст. «Народное Ополчение» Большой кольцевой линии	РФ, Москва / 2021	Средства массовой информации
208	Повреждение наземных зданий и сооружений, образование воронки мульды оседания на поверхности, невозможность продолжения проходческих работ, затопление участка строящегося перегона, долгосрочные последствия (затопление построенных тоннелей в 1995 году и проходка по новой трассе), вызванные прорывом воды и грунта в забое нижнего и верхнего тоннелей при проходке между ст. «Лесная» и ст. «Площадь мужества» вследствие ошибок при проектировании трассы тоннелей и технологии проходки	СССР, Ленинград/ 1974	[147, 156]
209	Обрушение стен котлована при строительстве линии метрополитена. Площадь обрушения 100 x 130 м, глубина до 15 м. Пострадали 15 тыс. чел. и 700 предприятий.	Сингапур/ 2004	[146]

210	Обрушение при проходке тоннелепроходческим комплексом тоннеля Халл-Йоркшир	Великобритания / 1999	[146]
211	Повреждение резцов рабочего органа тоннелепроходческого комплекса в результате удара о стальную трубу с дальнейшей аварией из-за разрушения пришвартованной баржей пирса рядом с местом проходки	Сиэтл, Австралия / 2019	[146]
212	Сверхнормативные деформации и раскрытие деформационных швов обделки станционного комплекса «Ленинский проспект», вызванные всплытием обделки станции вследствие проявления баражного эффекта из-за строительства глубоких котлованов Гагаринских тоннелей	Москва, РФ / 2000	[157]
213	Прорыв воды и грунта, приведшие к затоплению котлована для сооружения водоотливной установки (ВОУ), увеличению сроков и стоимости строительства, а в дальнейшем к остановке и отказу от строительства ВОУ в данной зоне на перегоне между ст. «Лермонтовский пр.-т» и ст. «Жулебино» Таганско-Краснопресненской линии, вследствие нарушения герметичности ограждения из БСС и неэффективности компенсирующих мероприятий (замораживание, водопонижение)	Москва, РФ / 2013	[157]
214	Сверхнормативные деформации тоннельной обделки при проходке перегонного тоннеля между ст. «Сайран» и ст. «Москва», приведшие к увеличению сроков и стоимости строительства, необходимости демонтажа установленной обделки и замене на монолитные ж/б конструкции, вследствие отклонения тоннелепроходческого комплекса от проектной трассы тоннеля	Алма-Ата, Казахстан / 2014	[157]
215	Прорыв грунтовых вод, приведший к затоплению котлована при строительстве южного вестибюля ст. «Спартак» Московского метрополитена, пересмотру объемно-планировочных решений станции, выполнению водопонижения, вследствие недостаточного заглубления ограждающей стены в грунте в водоупор	Москва, РФ / 2014	[157]
216	Затопление перегонного тоннеля, частичное обрушение здания на поверхности, вызванные прорывом воды/грунта и разрушением обделки при проходке камеры металлоконструкций (затворов) на перегоне от ст. «Полежаевская» до ст. «Шелепиха» Московского метрополитена, вследствие нарушений технологии проходки	Москва, РФ / 2015	[157]
217	Образование воронки мульды оседания на поверхности, сверхнормативные деформации и разрушение тоннельной обделки, вызванные	Москва, РФ / 2017	[157]

	просадкой лотка тоннеля и разрушением тоннельной обделки при выходе тоннелепроходческого комплекса в котлован демонтажной камеры при камере съездов за ст. «Косино» Кожуховской линии Московского метрополитена вследствие нарушения герметичности «стены в грунте» из-за нарушения технологии при возведении и недостаточного давления грунтопригруза		
218	Разрушение (трещины) чугунной обделки на участке притоннельных сооружений при проходке левого перегонного тоннеля от ст. «Раменки» до ст. «Ломоносовский пр.-т» вызванные сверхпроектными величинами давления грунта и переборами при проходке тоннеля, вследствие ошибок при проектировании конструкции обделки и нарушением технологии проходки	Москва, РФ / 2014	Информация автора
219	Сверхнормативные деформации блочной железобетонной обделки в виде вертикальных смещений (уступов) при проходке с применением ТПМК с грунтопригрузом левого и правого перегонных тоннелей от ст. «Ломоносовский проспект» до ст. «Минская», ст. «Минская» до ст. «Парк Победы»	Москва, РФ / 2014-15	Информация автора
220	Сверхнормативные деформации блочной железобетонной обделки в виде вертикальных смещений (уступов) при проходке с применением ТПМК с грунтопригрузом левого и правого перегонных тоннелей от ст. «Саларьево» до ст. «Румянцево»	Москва, РФ / 2014-15	Информация автора
221	Повреждение железнодорожных путей Горьковского направления, вызванные образованием мульды оседания поверхности вследствие нарушений требований регламента по технологии проходки перегонных тоннелей в депо «Нижегородская» Московского метрополитена	Москва, РФ / 2017	[157]
222	Разрушение обделки при разборке участка тоннеля в котловане ст. «Беломорская» Московского метрополитена вследствие нарушения технологии работ (погиб 1 человек)	Москва, РФ / 2017	[157]
223	Затопление котлована притоннельного сооружения и участка перегонного тоннеля в депо «Солнцево» Московского метрополитена, вызванные прорывом воды и грунта и сверхнормативными деформациями обделки вследствие ошибки при определении необходимой толщины пригруза стены в месте выхода тоннелепроходческого комплекса	Москва, РФ / 2016	[157]

224	Сверхнормативные деформации обделки перегонного тоннеля от ст. «Верхние Лихоборы» до ст. «Селигерская» Московского метрополитена вследствие ошибки при определении давления грунтовых вод на фоне недостаточного объема инженерно-геологических изысканий	Москва, РФ / 2018	[157]
225	Обрушение здания на поверхности при проходке перегонного тоннеля от ст. «Верхние Лихоборы» до ст. «Селигерская» Московского метрополитена, вызванные ошибками при проектировании технологии проходки вследствие недостаточного объема инженерно-геологических изысканий и прогноза наличия зоны разуплотненных пород в зоне размыва	Москва, РФ / 2013	[157]
226	Образование мутьды оседания на поверхности, вызванное прорывом грунта в забое при проходке эскалаторного тоннеля пересадки ст. «Петровский Парк» на ст. «Динамо» вследствие ошибок при проектировании крепи забоя и дефектов низкого качества противифльтрационной завесы	Москва, РФ / 2016	[157]
227	Образование мутьды оседания на поверхности и затопление котлована для строительства вентиляционного узла на перегоне от ст. «Хорошевская» до ст. «Улица Народного ополчения», вызванные прорывом грунтовых вод в дне котлована при доработке грунта и разборке колец обделки вследствие низкого качества и отсутствия герметизации укрепленного массива грунта в дне котлована	Москва, РФ / 2020	[157]
228	Прорывы воды при проходке штолен и затопление ливневыми водами котлованов при строительстве Алабяно-Балтийского тоннеля вследствие недостатков качества укрепления грунта грунтоцементными сваями	Москва, РФ / 2009 - 13	[157]
229	Прорыв воды и грунта при проходке сбойки № 4 Серебряноборского тоннеля вследствие недостатков качества укрепления грунта грунтоцементными сваями	Москва, РФ / 2005	[157]
230	Выход из строй и аварийная остановка при врезке тоннелепроходческого комплекса при проходке Серебряноборского тоннеля вследствие ошибок при проектировании конструкции противифльтрационной завесы из грунтоцементных свай	Москва, РФ / 2006	[157]
231	Прорыв воды и грунта при строительстве котлована монтажной камеры на участке Большой кольцевой линии ст. «Ржевская» («Рижская»)	Москва, РФ / 2017	[157]

Распределение информации о рискованных ситуациях по типам сооружений 1-5 (согласно Приложению № 3)

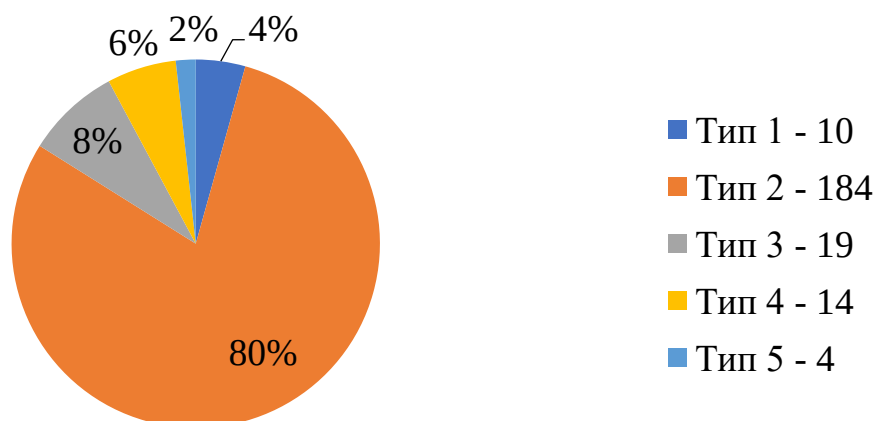
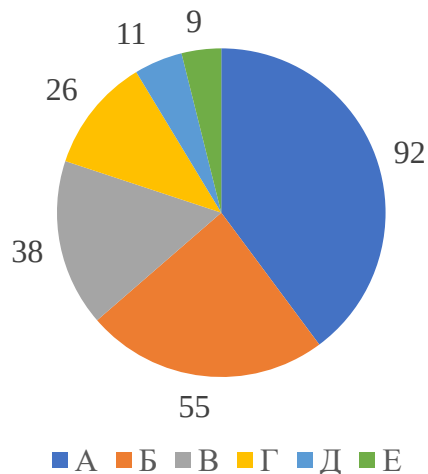


Рис. П.4.1

Распределение рискованных ситуаций по типу проявления (согласно Приложению № 3)



А	Обрушения, вывалы, прорывы грунта	92
Б	Прорывы воды, затопления	55
В	Деформации и разрушения обделки	38
Г	Пожары, загорания	26
Д	Взрывы, вспышки, обнаружения боеприпасов	11
Е	Загазованность, загрязнение химическими продуктами	9

Рис. П.4.2