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

Потапова Елена Владимировна

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

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
Куликова Елена Юрьевна

Москва, 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 2011–2022 гг. темпы строительства метрополитена в Москве увеличены в 2 раза по сравнению с предыдущими периодами, для проходки перегонных тоннелей одновременно задействовано рекордное количество тоннелепроходческих механизированных комплексов – 23 комплекса), 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 2001–2009 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, С.Н. Власов. В работах Е.Ю. Куликовой, Л.Л. Кауфмана, Б.А. Лысикова, Г.А. Фентона, Д.В. Гриффитса, Д.Ю. Чунюка, С.Н. Власова, Л.В. Маковского, М.Г. Зерцалов, 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, отсутствие учета, архивации, анализа и формализации результатов при ликвидации. При этом ущерб от проявления рисковых ситуаций при строительстве объектов метрополитена как правило всегда значительный, нередко включающий травмы и гибель людей. Зачастую происходит эскалация рисковых ситуаций по каскадному сценарию. Отсутствует система сбора, учета, анализа информации по рискам (архив рисков) для получения статистических данных, в том числе весьма ограниченное использование современных информационных технологий для получения информации о фактах проявлении геотехнических рисков.

Вышеизложенное позволяет считать, что задача научного обоснования прогноза, моделирования, подходов к анализу и оценке геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена для повышения безопасности

строительства и эффективности параметров технологий является весьма актуальной.

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 рисковой ситуации при строительстве объекта метрополитена, возможности каскадного сценария развития рисковой 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, позволяющих 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.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, сборе и обобщении статистических данных о рисковых ситуациях при строительстве объектов метрополитена и транспортных тоннелей (реестр из 231 рисковой ситуации), организации и проведении экспертных оценок, разработке анкет для экспертов, аналитической обработке массива данных по проектируемым, строящемся и построенным объектам метрополитена, разработке типологической кластерной модели, модели геотехнического риска и каскада геотехнических рисков, научном обосновании методики анализа и оценки геотехнических рисков.

Методы исследований базируются на использовании комплекса методов, включающего 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 рисковых 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 рисковых 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 рисковых ситуациях.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов 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 характеристик 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 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 поземных сооружений и горных предприятий (СПСиГП) Горного института НИТУ МИСиС (2019-2022 гг.)

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

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 7 публикациях автора, в том числе в 6 изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ и 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** выполнено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цель, задачи исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ изученности проблемы управления рисками при строительстве объектов метрополитена. Временной период 2001–2009 гг. можно считать периодом выделения из тематики рисков специализированной ветви исследования рисков в строительстве, метростроении, а также определения геотехнических рисков, как специфических рисков, возникающих в процессе строительства подземных сооружений. Существенный вклад в теорию и практику данного вопроса внесли отечественные и зарубежные исследователи Б.А. Картозия, Е.В. Петренко, Е.Ю. Куликова, С.Н. Власов, Л.В. Маковский, В.Е. Меркин, М.Г. Зерцалов, Д.С. Конюхов, Д.Ю. Чунюк, В.А. Гарбер, А.Г. Запрудин, О.С. Кофан, Е.А. Серова, А.В. Корчак, Л.Л. Кауфман, Б.А. Лысиков, Г.А. Фентон, Д.В. Гриффитс, Р.В. Уитман, Т. Телфорд, Р.Л. Соуза, Б.К. Макон, Г.Б. Бахер, Е. Хоек, А. Палмьери, Р.К. Мишра и другие.

В результате проведенных исследований решен ряд важных задач, связанных с управлением геотехнических рисков при строительстве метрополитенов, транспортных тоннелей и других городских подземных сооружений:

- даны определения нового раздела строительной геотехнологии – строительной георискологии, и геотехнического риска;

- сформированы основы стратегии управления рисками в городском подземном строительстве;

- выполнена подробная классификации рисков при строительстве городских подземных сооружений;

- представлен расширенный анализ различных методик оценки рисков в геотехническом строительстве, а также практические примеры использования численных инструментов для оценки геотехнических рисков при проектировании различных подземных сооружений;

- выполнен анализ аварий при строительстве транспортных тоннелей и метрополитенов, проанализированы причины и сформулированы общие рекомендации по прогнозированию и предупреждению аварий.

Таким образом, положение в части исследований по рассматриваемой тематике не позволяет охарактеризовать проблему как малоизученную в зарубежной и отечественной практике. 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 рисковой 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 рисковых ситуаций по каскадному сценарию.

На основе вышеизложенного обоснованным является решение следующих задач по теме исследования:

- исследование геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, определение составляющих геотехнического риска, разработка обобщенной модели геотехнического риска;

- исследование сценариев развития рисковой ситуации при строительстве объекта метрополитена, возможности каскадного сценария развития рисковой ситуации, разработка обобщенной модели каскада геотехнических рисков;

- 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, позволяющих прогнозировать каскадный сценарий развития рисковых ситуаций;

- обоснование подхода к анализу геотехнических рисков и разработка методики оценки геотехнических рисков;

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

Во **второй главе** выполняются исследования по определению составляющих геотехнического риска и обоснованию типологии сооружений метрополитена, как основания первого уровня классификации геотехнических рисков для их дальнейшей идентификации, на основании технологических, объемно-планировочных и конструктивных особенностей.

Сценарии развития рисковых ситуаций при строительстве метрополитенов характеризуются значительным разнообразием с точки зрения первопричин, развития дальнейших событий и последствий. Одни сценарии полностью уникальны, другие в некоторой степени схожи. Однако все сценарии обладают индивидуальностью, обусловленной спецификой объектов, на которых они локализуются.

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

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).

Определению вероятности наступления рисковой ситуации предшествует этап идентификации, которая основана на классификации. 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, рисковых ситуаций и возможных последствий для целей последующего анализа риска.

Сформулируем общие принципы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена:

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

1 – классификация рискообразующих факторов,

2 – классификация проявления рисковых ситуаций,

3 – классификация последствий рисковых ситуаций.

2. Структура классификации - многоуровневая.

3. Основанием первого уровня классификации проявления рисковых 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.

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. Они призваны упорядочить многомерные данные однородных подмножеств исследуемого массива объектов и выделить их в основные группы (типы) объектов метрополитена.

Практический опыт строительства, теоретические основы метростроения и утверждение о принадлежности сооружений метрополитена к природно-технической геосистеме (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» позволяет выделить две основные группы классификационных признаков: 1 – признаки, зависящие от технологии строительства сооружения; 2 – признаки, зависящие от объемно-планировочных и конструктивных особенностей сооружения. К 1-ой группе признаков отнесем технологические масштабы вскрытия земной поверхности и пересечения геологических слоев:

1) Разнообразие инженерно-геологических условий (X1).

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

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

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

Γ_{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:

$$X2 = S_{вскр.з.п.} \quad (2)$$

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

Ко 2-ой группе отнесем характеристики продольных и поперечных размеров, объем сооружаемых конструкций, пространственное положение сооружения в породном массиве:

1) Пропорции сооружения (X3).

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

$$X3 = \frac{S_{попер.сеч.}}{\Gamma_{max}} \quad (3)$$

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

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

2) Объем сооружения (X4).

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

$$X4 = V_{coop.} \quad (4)$$

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

3) Пространственное положение (X5).

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

Таким образом, процесс типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена можно представить в виде кластерной модели типологической классификации (типологии) сооружений метрополитена (рисунок 1).

Дальнейшая работа над типологией заключается в выделении основных групп сооружений на основании определенных признаков. Исследования основаны на результатах анализа строительства 40 различных объектов (станции мелкого и глубокого заложения, тягово-понизительные подстанции мелкого заложения, вентиляционные камеры на станциях, перегонные тоннели, эскалаторные тоннели, вертикальные стволы и др.) метрополитена 4-х линий мелкого и глубокого заложения города Москвы (рисунок 2).

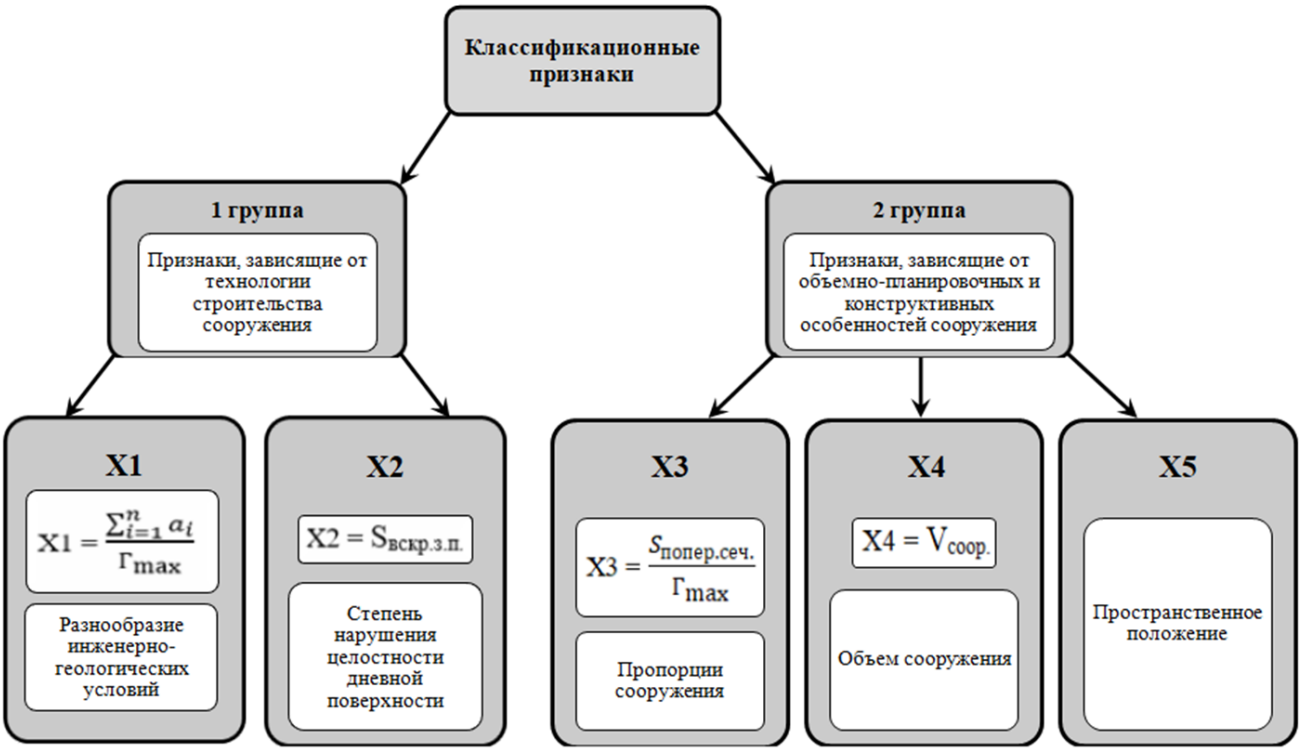
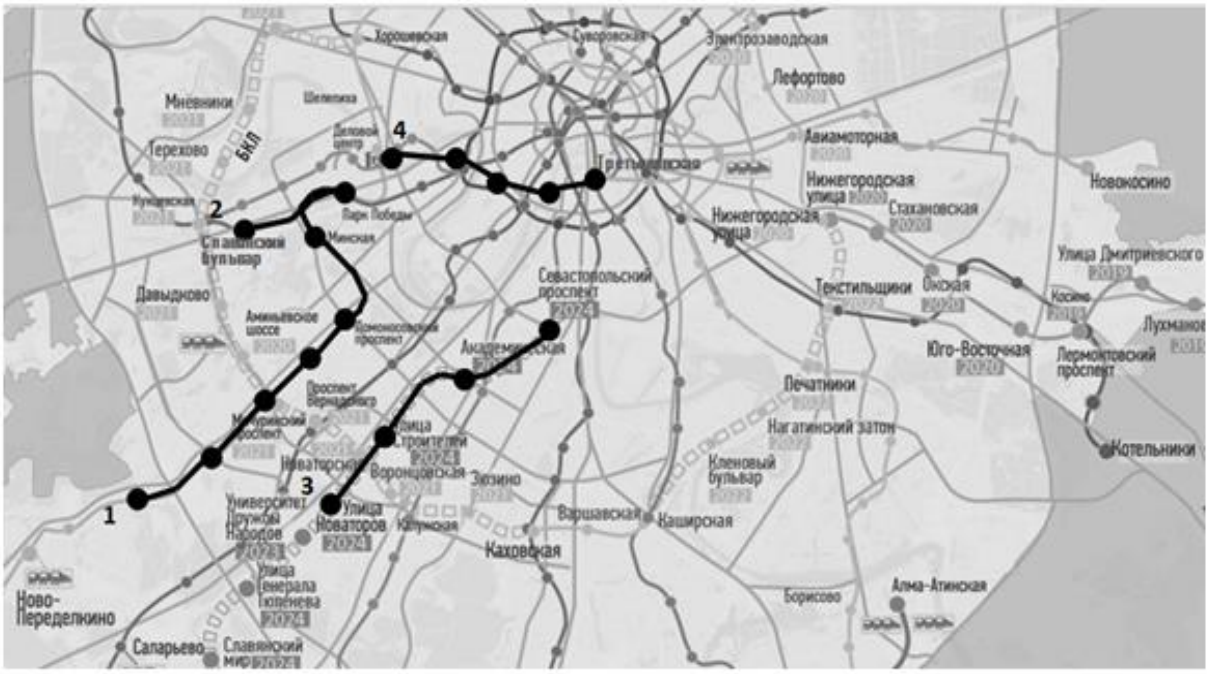


Рис. 1 – Кластерная модель типологической классификации сооружений метрополитена



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 – План линий Московского метрополитена

Для сооружений, расположенных на данных участках, были определены значения признаков X1÷X5 по выражениям в кластерной модели. Вычисленные значения X1÷X4 образуют дискретные вариационные ряды каждого признака. Для задачи формирования целостной картины типологической классификации требуется разделение на основании всех признаков в целом, а не по каждому в отдельности. Для этого следует применить методы прикладной статистики. В настоящем исследовании применен кластерный анализ по иерархическому агломеративному методу с алгоритмом объединения «ближайший сосед» с евклидовым расстоянием (метрикой). По результатам расчетов построена итоговая дендрограмма кластерного анализа (рисунок 3).

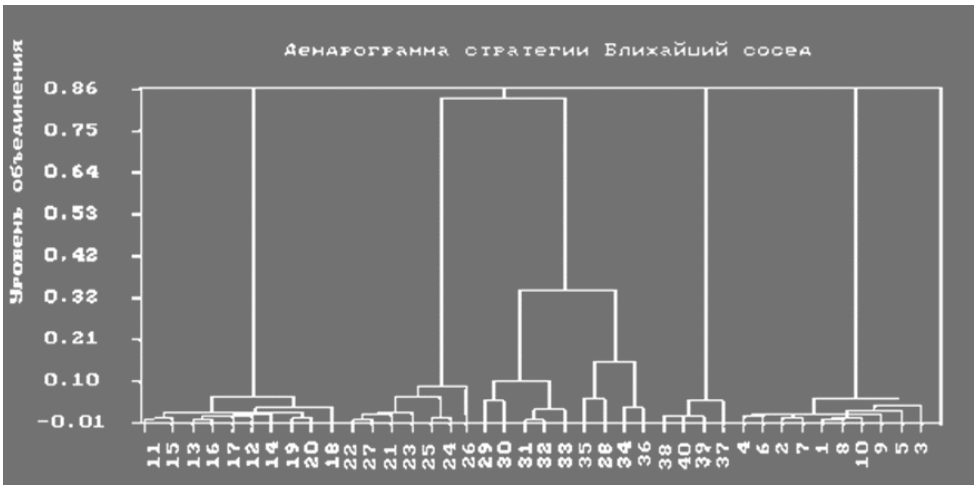


Рис. 3 – Дендрограмма кластерного анализа

Из рисунка 3 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 вертикальным стволам, перегонным тоннелям, станционным сооружениям мелкого заложения, сооружаемым открытым способом, станционным сооружениям глубокого заложения, сооружаемым закрытым способом, и эскалаторным тоннелям. Таким образом, выполненный кластерный анализ подтверждает предположение о наличии характерных типов сооружений метрополитена. На рисунке 4 представлена типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена.

В **третьей главе** выполняется обоснование и разработка классификаций геотехнических рисков на основании составляющих геотехнического риска при строительстве объектов метрополитена, позволяющих прогнозировать каскадный сценарий развития рисковых ситуаций, разработка обобщенной модели геотехнического риска и обобщенной модели каскада геотехнических рисков.

Классификации выполняются для трех составляющих геотехнического риска. Рискообразующий фактор в данной классификации может являться отдельной причиной проявления рисковой ситуации (простой фактор), либо представлять собой обобщенную формулировку для комплекса причин (сложный фактор).

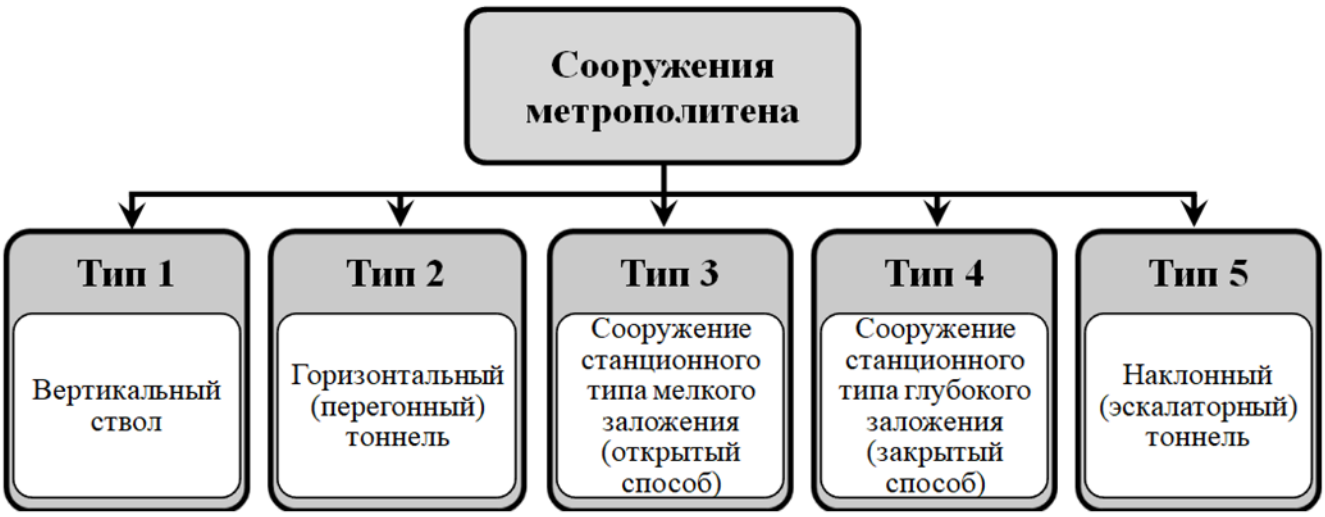


Рис. 4 – Типологическая классификация сооружений метрополитена

В настоящей работе введено понятие каскада геотехнических рисков (КГТР), как совокупности рисковых 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. Начало КГТР фиксируется уже на этапе формирования рискообразующих факторов (Ф). На рисунке 5 (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 рисковой ситуации (ПР) на 1-ом уровне, а с другой – являться причиной формирования рискообразующего фактора 3-го уровня, который провоцирует собственные проявления. На стадии КГТР проявления рисковых ситуаций наблюдается схожая картина перехода с одного уровня на другой при развитии рисковой ситуации. При этом хронология может характеризоваться как последовательным, так и параллельным течением событий. На стадии последствий (П) может возникать явление преобразования последствия рисковой ситуации в рискообразующий фактор и начало формирования нового КГТР. Возможные сочетания составляющих на разных уровнях образуют сценарные траектории (рисунок 6). 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, и представляет собой совокупность деревьев событий, которые являются сценарными траекториями КГТР с различными вероятностями реализации. Шифры составляющих согласно классификационным таблицам настоящей диссертации позволяют получить адаптированную классификациям схему КГТР.

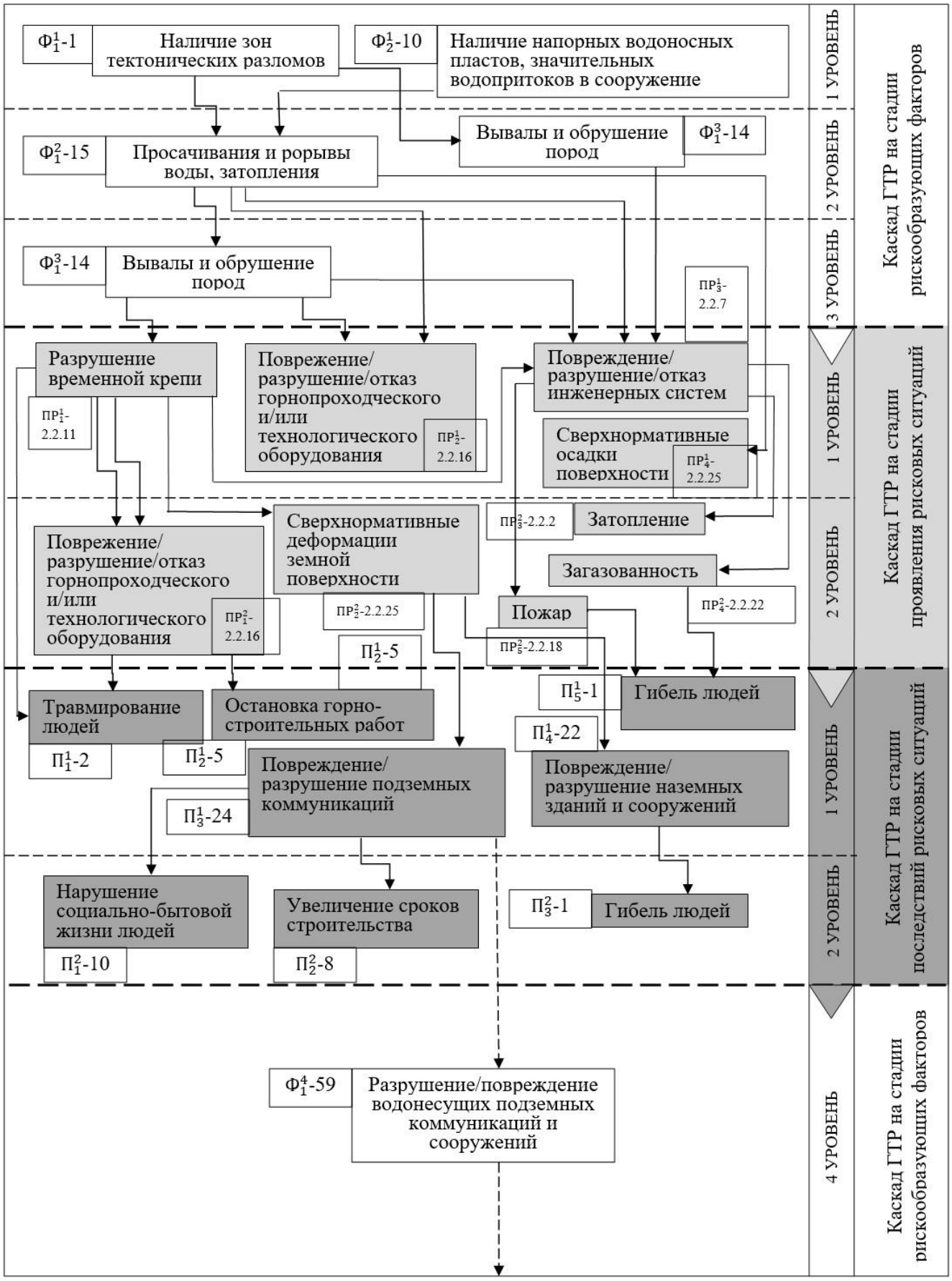


Рис. 5 – Схема каскада геотехнических рисков (КГТР)

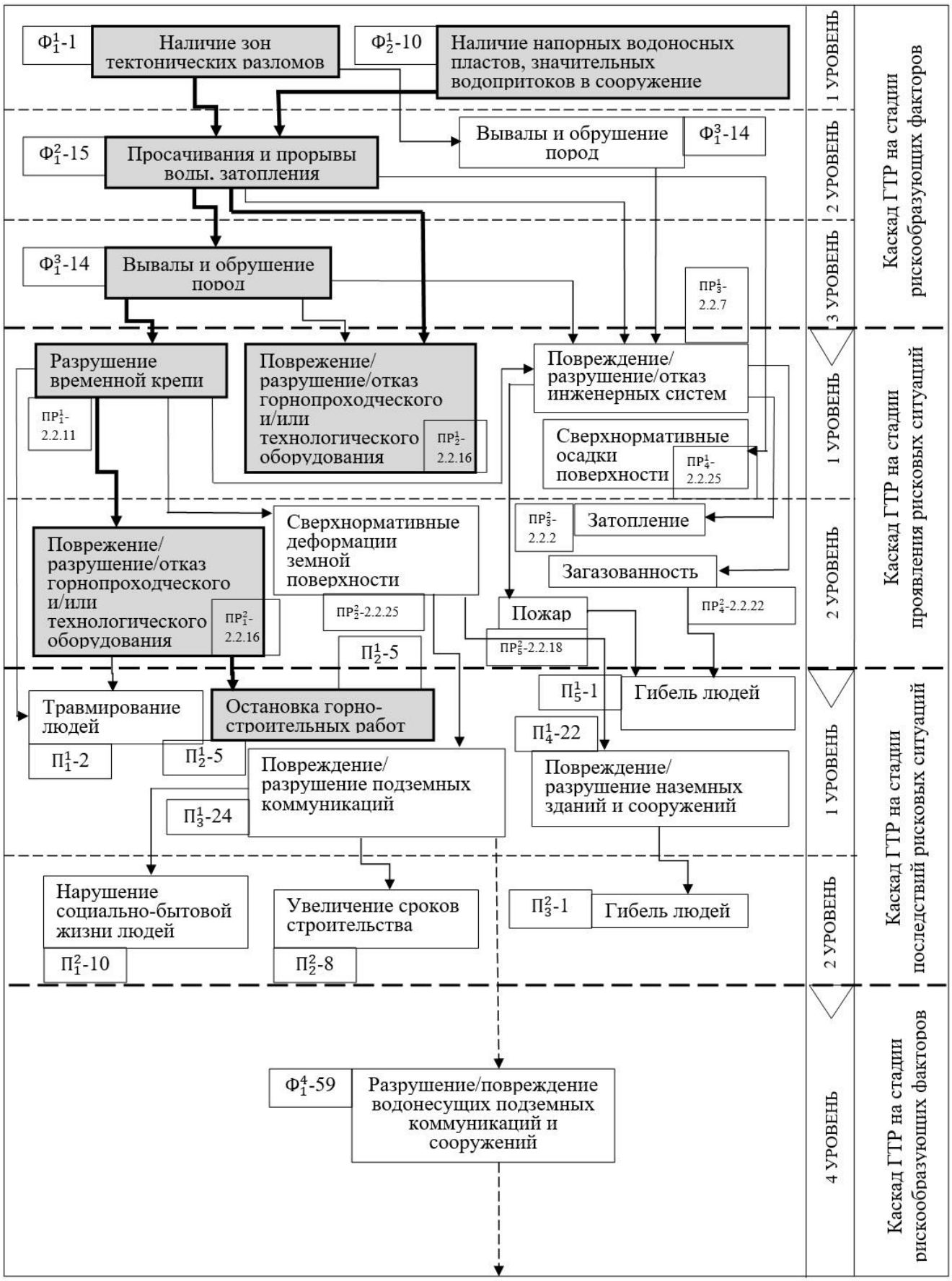


Рис. 6 – Схема одной из вероятных сценарных траекторий для КГТР на рисунке 5

Явление преобразования одной составляющей геотехнического риска в другую отличает ПТГС от других техногенных систем с точки зрения основного передающего элемента окружающей среды, а также возможности своевременной локализации аварии. В случае ПТГС основным элементом окружающей среды, испытывающим изменения и влияние риска от функционирования системы «массив – технология - подземное сооружение - окружающая среда», является породный массив. Породный массив является основным звеном, распространяющим и преобразовывающим составляющие геотехнического риска.

Идентификация i-го геотехнического риска $ГТР_i$ включает идентификацию его составляющих $Ф_i$ (рискообразующий фактор), $ПР_i$ (проявление рисковой ситуации) и $П_i$ (последствие рисковой ситуации). При этом составляющим $Ф_i$ и $П_i$ может соответствовать несколько вариаций, а составляющая $ПР_i$ определяется несколькими переменными (тип сооружения $Т_{i=const}$, характер происшествия $Х_i$, конкретный вид проявления с возможным дальнейшим разделением $В_i$, место локализации $МЛ_i$) в соответствии с классификациями проявлений рисковых ситуаций для сооружений Тип 1÷5 (выражения 5, 6). В свою очередь данные переменные также могут разделяться на большее количество качественных переменных (вид разрушения $Р_i$, или деформации $Д_i$, точка локализации $Т_i$ и т.д.) (выражение 7). При этом тип сооружения Т при идентификации геотехнического риска для конкретного сооружения изменятся не может ($Т_{i=const}$).

$$ГТР_i\ (Ф_i;\ ПР_i;\ П_i)\ \rightarrow\ \begin{cases} Ф_i \in [\ Ф^1_i;\ Ф^2_i;\ Ф^3_i;\ \ldots..\ ;\ Ф^n_i\ ] \\ ПР_i \in [\ ПР^1_i;\ ПР^2_i;\ ПР^3_i;\ \ldots..\ ;\ ПР^n_i\ ] \\ П_i \in [\ П^1_i;\ П^2_i;\ П^3_i;\ \ldots..\ ;\ П^n_i\ ] \end{cases} \quad (5)$$

где

$$ПР^n_i\ (Т_{i=const};\ Х_i;\ В_i;\ МЛ_i) \rightarrow \begin{cases} Х_i \in [\ Х_1;\ Х_2\ ] \\ В_i \in [\ В^1_i;\ В^2_i;\ В^3_i;\ \ldots..\ ;\ В^n_i\ ] \\ МЛ_i \in [\ МЛ^1_i;\ МЛ^2_i;\ \ldots.\ ;\ МЛ^n_i\ ] \end{cases} \quad (6)$$

где (например, для вида проявления «Разрушение ……. » $В^n_i = Р_i$)

$$В^n_i = Р_i \in [\ Р^1_i;\ Р^2_i;\ \ldots.\ ;\ Р^n_i\ ] \quad (7)$$

Из предложенных классификаций рискообразующих факторов (Ф), проявлений рисковых ситуаций (ПР) в соответствии с типологией сооружений (Тип 1÷5), последствий рисковых ситуаций (П) видно, что проявление рисковой ситуации может становиться фактором, а проявление может расцениваться как последствие. 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 КГТР).

Вместе с тем все предложенные классификации составляющих геотехнического риска образуют совокупность классификаций геотехнических рисков, позволяющую прогнозировать каскадный сценарий развития рисковых 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 получить обобщенную модель геотехнического риска для анализа и оценки геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена (рисунок 7). Обобщенная модель развития КГТР с учетом, составляющих геотехнического риска представлена на рисунке 8.

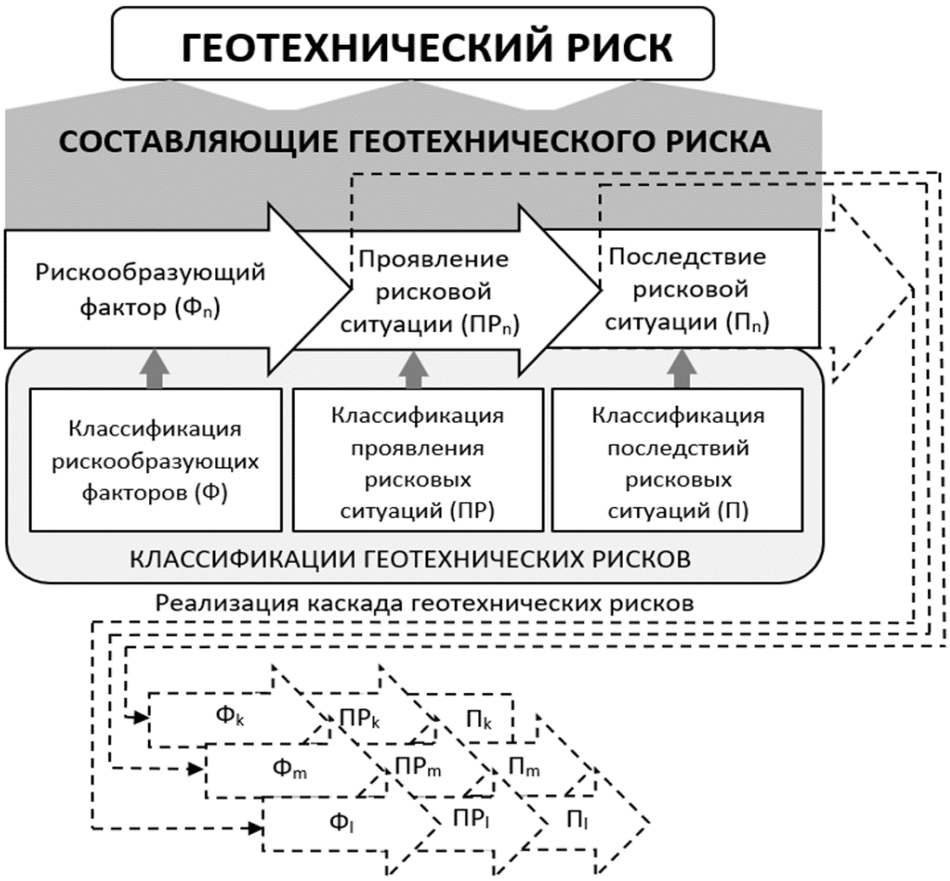


Рис. 7 – Обобщенная модель геотехнического риска

Четвертая глава посвящена исследованию сценариев развития рисковой ситуации при строительстве объекта метрополитена, обоснованию подхода к анализу геотехнических рисков, разработке алгоритма и методики оценки геотехнических рисков, обоснованию эффективности выбора технологических решений строительства объектов метрополитена и мероприятий по снижению последствий проявления рисков.

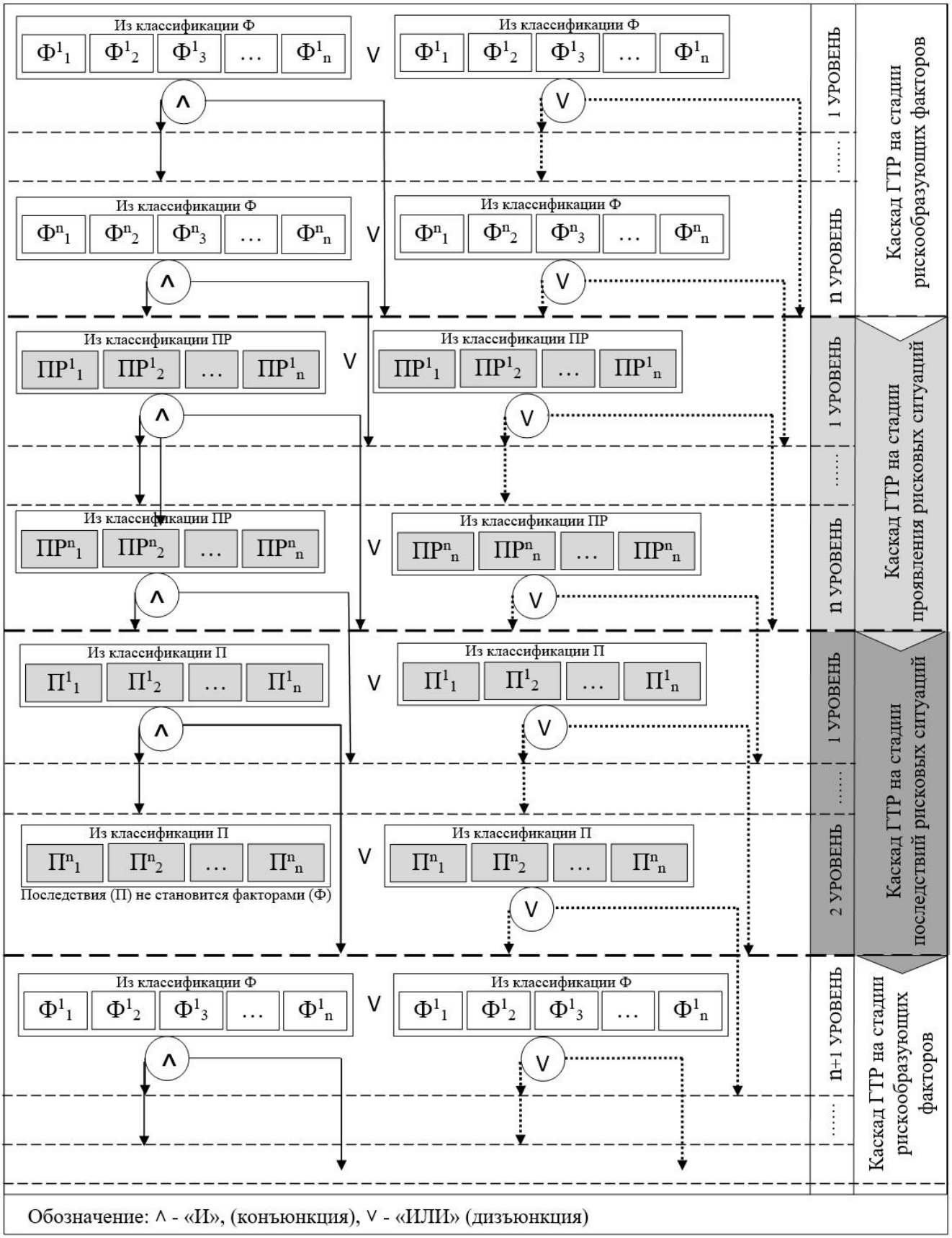


Рис. 8 – Обобщенная модель развития каскада геотехнических рисков

Исходя из утверждения, что каждую рисковую ситуацию определяют три составляющие, отдельную рисковую ситуацию $РС_i$ можно математически представить как точку некого пространства с координатами $Ф_i$, $ПР_i$, $П_i$ (выражение 8):

$$РС_i\ (РФ_i\ ;ПР_i\ ;П_i) \tag{8}$$

где $Ф_i$ – рискообразующий фактор рисковой ситуации $РС_i$,

$ПР_i$ – проявление i-ой рисковой ситуации $РС_i$,

$П_i$ - последствие i-ой рисковой ситуации $РС_i$.

Очевидно, что данное представление рисковых ситуаций основывается на идеализированной модели, при которой единственный фактор приводит к единственному проявлению рисковой ситуации с единственным последствием. Подобная идеализация не учитывает даже значимые рискообразующие факторы и находится на самом высоком уровне абстрагирования. На основании разработанных классификаций, можно предварительно определить общее количество рисковых ситуаций $V_{РС_{max}}$ в результате реализации возможных сценариев для каждого типа сооружений метрополитена (выражение 9):

$$V_{РС_{max}} = \sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{m} РС_j \tag{9}$$

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

Принимая, что объемы совокупности рисковых ситуаций по каждому типу сооружений образуют общий объем всех возможных рисковых ситуаций $V_{РС}$, можем представить $V_{РС}$ в виде объема на рисунке 9.

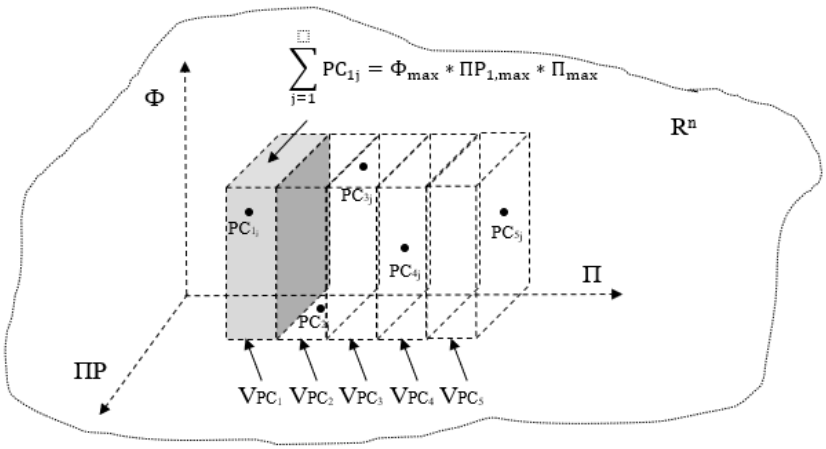


Рис. 9 – Объем всех возможных рисковых ситуаций $V_{РС}$ в пространстве R_n

Тогда выражение (5) принимает следующий вид (10) для определения общего объема многообразия k всех возможных рисковых ситуаций:

$$V_{PC_{max}} = \sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{k} PC_{ij} = \tag{10}$$

$$= \sum_{j=1} PC_{1j} + \sum_{j=1} PC_{2j} + \sum_{j=1} PC_{3j} + \sum_{j=1} PC_{4j} + \sum_{j=1} PC_{5j} = 31\,576\,608 \approx 32 \cdot 10^{6}$$

Идеализированная модель не учитывает особенности ПТГС и транспортной системы метрополитена. Она отличается от обобщенной модели и не подходит для моделирования реальных сценариев рисковых ситуаций в геотехническом строительстве, когда к проявлению рисковой ситуации приводит более одного рискообразующего фактора, имеет место более одного проявления рисковой ситуации и более одного последствия. В реальных условиях рисковых ситуациях, как правило, всегда имеется комбинация различного количества вариантов из составляющих риска. В соответствии с известной формулой комбинаторики можно получить общие выражения для сочетаний составляющих рисковых ситуаций (выражения 11-17):

$$C_{PC_i}(Ф)^{n}_{Ф_{PC_i}} = \frac{Ф_{PC_i}!}{\left(Ф_{PC_i} - n\right)!n!} \tag{11}$$

$$C_{PC_i}(ПР_1)^{k}_{ПР_{1,PC_i}} = \frac{ПР_{1,PC_i}!}{\left(ПР_{1,PC_i} - k\right)!k!} \tag{12}$$

$$C_{PC_i}(ПР_2)^{k}_{ПР_{2,PC_i}} = \frac{ПР_{2,PC_i}!}{\left(ПР_{2,PC_i} - k\right)!k!} \tag{13}$$

$$C_{PC_i}(ПР_3)^{k}_{ПР_{3,PC_i}} = \frac{ПР_{3,PC_i}!}{\left(ПР_{3,PC_i} - k\right)!k!} \tag{14}$$

$$C_{PC_i}(ПР_4)^{n}_{ПР_{1,PC_i}} = \frac{ПР_{4,PC_i}!}{\left(ПР_{4,PC_i} - n\right)!n!} \tag{15}$$

$$C_{PC_i}(ПР_5)^{k}_{ПР_{5,PC_i}} = \frac{ПР_{5,PC_i}!}{\left(ПР_{5,PC_i} - k\right)!k!} \tag{16}$$

$$C_{PC_i}(П)^{m}_{П_{PC_i}} = \frac{П_{PC_i}!}{(П_{PC_i} - m)!m!} \quad (17)$$

где $C_{PC_i}(Ф)^{n}_{Ф_{PC_i}}$ - сочетание из n рискообразующих факторов Ф из множества $Ф_{PC_i}$ рискообразующих факторов, которые могут привести к проявлению рисковой ситуации PC_i,

n – набор рискообразующих факторов Ф, которые могут привести к рисковой ситуации PC_i,

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

$C_{PC_i}(ПР_1)^{k}_{ПР_{1,PC_i}} \div C_{PC_i}(ПР_5)^{k}_{ПР_{5,PC_i}}$ – сочетание из k проявлений рисковых ситуации ПР из множества $ПР_{PC_i}$ проявлений, которые могут привести к проявиться при рисковой ситуации PC_i,

k – набор проявлений $ПР_1 \div ПР_5$ рисковой ситуации PC_i для сооружений Тип1÷5,

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

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

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

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

$ПР_{5,PC_i} = ПР_{5,max} - ПР_{5,(P(0))}$ - все множество проявлений рисковой ситуации PC_i для сооружений Тип 5 ($ПР_{1,(P(0))}$ – проявления рисковой ситуации PC_i, вероятность которых равна 0),

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

m – набор последствий П, к которых могут привести проявления рисковой ситуации PC_i,

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

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 серьёзной аварии. Следовательно, сценарии рисковой ситуации развиваются по принципу совокупности различных сочетаний, составляющих риска.

Для анализа и оценки геотехнических рисков должен применяться комплексный подход к оценке с использованием экспертных заключений и статистических данных о рисковых ситуациях, которые имели место на практике (экспертно-статистический подход).

По результатам проведенного исследования можно сформулировать рекомендации о компетентностном 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. При этом необходимо наличия в группе научных организаций специалиста в области управления геотехническими рисками в строительстве метрополитенов и транспортных тоннелей.

По результатам 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 решении о соответствии экспертов данным критериям; 3) недостатки методик расчета показателей компетентности экспертов; 4) субъективность экспертов в процессе экспертной оценки.

Обобщая достоинства и выявленные недостатки метода экспертных оценок и статистического метода, предполагается, что достоверная оценка геотехнических рисков при сооружении объектов метрополитена должна основываться на основе сопоставления результатов экспертной оценки и статистических данных. Структура и алгоритм методики представлены в виде блок-схемы (рисунок 10).

Результатами 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 рисковых ситуаций. Для сравнения и проверки достоверности оценки предложен критерий достоверности оценки рисков, заключающийся в выполнении условия (18):

$$X_c \in \begin{bmatrix} [X_A;\ X_B] \\ [P_0;\ X_A) \\ (X_B;\ P_{max}] \end{bmatrix} \qquad (18)$$

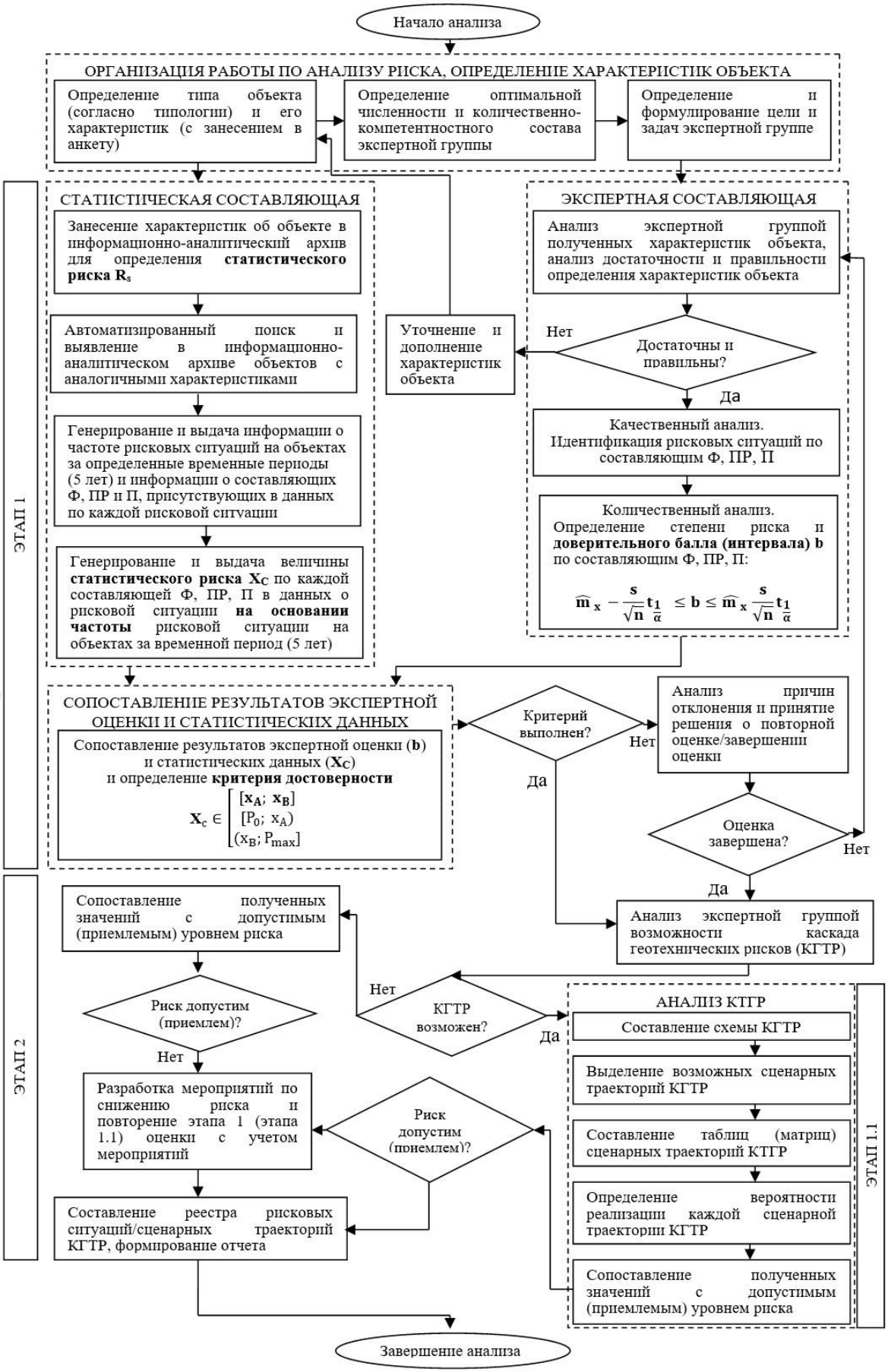


Рис. 10 – Структура и алгоритм методики анализа геотехнических рисков

Период, за который предлагается учитывать статистический риск по количеству рисковых ситуаций, принимается 5 лет. Ранжирование рисковых ситуаций по степени возникновения статистического риска X_c для статистической составляющей методики приведено в таблице 1.

Таблица 1

Ранжирование рисковых ситуаций по вероятности статистического риска

Частота возникновения (период – 5 лет)	Вероятность возникновения рисковой ситуации	Степень возникновения риска Xc (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

Оценка риска считается достоверной, если результаты экспертной оценки совпадают со статистическим риском. То есть значение статистического риска X_c принадлежит доверительному интервалу, определенному в ходе экспертной оценки на этапе 1: $X_c \in [X_A; X_B]$. При этом приняты следующие варианты результатов сравнения по критерию достоверности оценки рисков, влияющие на дальнейший алгоритм методики (таблица 2).

Таблица 2

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 возникновение риска экспертами по сравнению со статистикой
Вариант 3	$X_c \in (X_B; P_{max}]$	переоценка степени возникновения риска экспертами по сравнению со статистикой

После реализации этапа 1 экспертами дается обоснованное заключение о возможности формирования составляющих рисковых ситуаций в каскад геотехнических рисков (КГТР). В случае возможности КГТР анализ переходит на этап 1.1 графоаналитического анализа, в ходе которого составляется многоуровневая схема КГТР на основании обобщенной схемы КГТР, выделяются сценарные траектории КГТР и составляются сценарно-траекторные таблицы с указанием номера участка траектории от составляющей к составляющей, шифры составляющих и вероятности участка траектории. Пример сценарно-траекторной таблицы КГТР для сценарной траектории на рисунке 6 приведен в таблице 3.

Таблица 3

Сценарно-траекторная таблица КГТР

№ участка траектории	Шифры составляющих участка траектории	Вероятность участка траектории, P_{Ti}
Таблица сценарной траектории		
Т-2-1	$Ф_2^1$-10; $Ф_1^2$-15	$P_{T\text{-}2\text{-}1}=P(Ф_2^1)P(Ф_1^2)$
Т-2-2	$Ф_1^2$-15; $Ф_1^3$-14	$P_{T\text{-}2\text{-}2}=P(Ф_1^2)P(Ф_1^3)$
Т-2-3	$Ф_1^2$-15; $ПР_3^1$-2.2.7	$P_{T\text{-}2\text{-}3}=P(Ф_1^2)P(ПР_3^1)$
Т-2-4	$Ф_1^3$-14; $ПР_1^1$-2.2.11	$P_{T\text{-}2\text{-}4}=P(Ф_1^3)P(ПР_1^1)$
Т-2-5	$ПР_1^1$-2.2.11; $ПР_1^2$-2.2.16	$P_{T\text{-}2\text{-}5}=P(ПР_1^1)P(ПР_1^2)$
Т-2-6	$ПР_3^1$-2.2.7; $ПР_4^2$-2.2.22	$P_{T\text{-}2\text{-}6}=P(ПР_3^1)P(ПР_4^2)$
Т-2-7	$ПР_1^2$-2.2.16; $П_2^1$-5	$P_{T\text{-}2\text{-}7}=P(ПР_1^2)P(П_2^1)$
Т-2-8	$ПР_3^1$-2.2.7; $ПР_5^2$-2.2.18	$P_{T\text{-}2\text{-}7}=P(ПР_3^1)P(ПР_5^2)$
Т-2-9	$ПР_5^2$-2.2.18; $П_5^1$-1	$P_{T\text{-}2\text{-}7}=P(ПР_5^2)P(П_5^1)$
Вероятность реализации сценарной траектории СТ-2		$P_{СТ\text{-}2}=\prod_{i=1}^{n} P_{T_i}$

Реализация компонентов методики продемонстрирована для анализа рисковой ситуации взаимного смещения блоков обделки (образование уступов) при проходке перегонного тоннеля метрополитена тоннелепроходческим механизированным комплексом (ТПМК) и анализа рисковой ситуации и каскада геотехнических рисков с потерей гидропригруза при проходке вертикального ствола метрополитена стволопроходческим механизированным комплексом (СПМК). Технологические решения и мероприятия для снижения вероятности рисковой ситуации при проходке вертикального ствола метрополитена стволопроходческим механизированным комплексом (СПМК), разработанные на основании анализа КГТР, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Технологические решения и мероприятия для снижения вероятности рисковой ситуации

Составляющая рисковой ситуации (шифр классификаций)	Мероприятие по снижению вероятности составляющей рисковой ситуации
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.
Резкое понижение уровня гидропригруза ($ПР_1^1$-1.2.14)	Организация дополнительного водоснабжения для поддержания уровня гидропригруза
Потеря тиксотропной рубашки ($ПР_1^2$-1.2.15)	Изменение конструкции уплотнителя стартового стакана ножевой части. Повышение вязкости бентонита путем внесения специальных добавок

Образование воронок мульд оседания на поверхности ($П_3^2$-35) Образование подъемов поверхности ($П_4^2$-36)	Организация и проведение геотехнического мониторинга и компенсационных мероприятий. Хранение аварийного запаса материалов для компенсационный мероприятий.

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 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 рисковой 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 рисковых ситуаций при строительстве объекта метрополитена и возможности каскадного сценария развития рисковой ситуации, разработана обобщенная модель каскада геотехнических рисков, составлен реестр из 231 рисковой ситуации.

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 рисковых ситуаций.

6. Разработан алгоритм и методика анализа и оценки 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 (Big Data, Internet of Things). 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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ и индексируемых в наукометрической базе Scopus:

1. 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.

2. Potapova E.V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020), September 2020, Sochi). 2020. Vol. 962. pp. 6-12.

3. Потапова Е.В. Перспективы использования информационного ресурса Big Data в управлении геотехническими рисками при строительстве объектов метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 155-163.

4. Потапова Е.В. Методика оценки геотехнических рисков для объектов метрополитена с использованием ресурса Big Data // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 164-173.

5. Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков // Горные науки и технологии. 2021. №6. С. 52–60.

6. Куликова Е. Ю., Потапова Е. В. Синтез управленческих решений для обеспечения безопасности подземного строительства // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 62–69.

В других научных изданиях:

7. 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.