ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений

Е.Ю.КУЛИКОВА[1]✉, **А.Г.ПОЛЯНКИН**[1], **А.М.ПОТОКИНА**[2]
[1] *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*
[2] *ОАО «Мосинжпроект», Москва, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Куликова Е.Ю., Полянкин А.Г., Потокина А.М. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 895-905. EDN DGEAGK

Аннотация. Освоение подземного пространства сопряжено с возникновением сложных и опасных ситуаций, часто приводящих к авариям. Условием для их развития являются потенциальные геотехнические риски. Качественное выполнение и анализ проектных работ на всех этапах проектирования, начиная с ранних стадий, является одним из эффективных способов управления рисками. Уточнение характеристик и особенностей вмещающего проектируемого подземного сооружения породного массива позволяет выявить потенциальную причину наступления неблагоприятного события при строительстве и эксплуатации подземного сооружения. Целью качественного анализа риска является выявление факторов риска в подземном строительстве. Значение общего геотехнического риска, выраженного суммой каждого из возможных рисков, должно быть численно оценено на стадии проектирования конкретного подземного объекта. Описана методика управления геотехническими рисками, которая позволит оценить их вероятность развития на ранней стадии подготовки проекта и предложить меры по их снижению или предотвращению. Результаты исследования, проведенного в соответствии с представленной методикой, показали, что управление геотехническими рисками оказалось эффективным методом в предотвращении несчастных случаев при подземном строительстве.

Ключевые слова: подземное строительство; факторы риска; строительство; геотехнический риск; оценка рисков; управление рисками; аварийная ситуация

Поступила: 03.04.2022 ***Принята: 02.03.2023*** ***Онлайн: 23.06.2023*** ***Опубликована: 25.12.2023***

Введение. Безопасность подземных объектов в процессе строительства и эксплуатации зависит от оценки риска потенциальной нештатной ситуации [1-3], а также от возможности предотвращения причины ее возникновения [4]. Аварийные ситуации обусловлены специфическими инженерно-геологическими, гидрогеологическими и градостроительными условиями размещения подземных объектов: наличием мощного слоя техногенных и закарстованных грунтов; плотной городской застройкой и стесненными условиями; высокой активностью грунтовых вод; суффозионными проявлениями; техногенными воздействиями на геологическую компоненту города, осложняющими условия строительства и эксплуатации подземных сооружений; вовлеченностью в строительный процесс большого числа непрофильных специалистов и организаций. Эти факторы риска определяют необходимость их идентификации и учета в течение всего жизненного цикла подземного сооружения, что призвано оптимизировать выбор места расположения объекта и соответствующих защитных мероприятий.

Исследования многих российских ученых затрагивают вопросы развития аэрологических [5, 6], геоэкологических и геотехнических рисков [7, 8], их количественной оценки [9, 10], управления рисками [11, 12], однако не учитывают специфику развития рисков в условиях освоения подземного пространства города. Рассматриваются вопросы горного производства, где риск обусловлен процессами добычи полезного ископаемого. Ряд работ [13-15] напрямую связан с рисками в подземном строительстве. Зарубежные авторы акцентируют внимание на геотехнических рисках [16, 17] или рассматривают методы минимизации риска применительно к горному производству [18, 19]. Слабым

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

местом этих исследований является отсутствие единого нормативно-методического подхода к оценке и управлению рисками.

Анализ отечественной и международной нормативной базы по рискам, основу которых составляют более 30 национальных и международных стандартов, отраслевых правил, норм, рекомендаций и руководств, позволяет сделать следующие выводы.

• Возрастающая сложность и комплексность проявления рисков в мировой практике тоннелестроения требует создания кодексов, стандартов, инструкций и руководств, которые служат своеобразным «передовым опытом» того, как должно быть выстроено управление рисками. Однако нормативно-методические материалы разрознены – между ними отсутствуют связи и источники использованной информации, область применения и технические требования. Многообразие подходов к формализации, описанию, определению и оценке риска создает условия для развития важных для этой исследовательской области категорий: классификаций, терминов и определений, применяемых на практике.

• Нормативно-правовые подходы к управлению риском в России определяются двумя аспектами – оперированием справочной литературой, содержащей терминологию, сведения по идентификации рисков, процедуре их анализа, управления ими и следованием государственным правовым документам в виде федеральных законов, ведомственных и других правил, требований, распоряжений, а также переводных международных стандартов по риск-менеджменту и документов Банка России.

• Все имеющиеся в мировой практике нормативные документы по управлению рисками ориентированы на соблюдение коммерческого или финансового интереса, при этом практически не затрагивается технологическая и организационно-управленческая сторона.

• В нормативно-технической документации РФ по строительству технически сложных и опасных производственных объектов отсутствует понятие «геотехнический риск», а также методика его оценки.

• В силу изменчивости условий ведения подземных строительных работ [20] процесс управления рисками должен предусматривать формирование закрепленной в стандарте организационной инфраструктуры, в функции которой входил бы анализ внутренней и внешней ситуации для оценки риска.

• Необходим новый подход к отраслевой компоненте управления рисками с учетом тенденций финансовой политики и регулирования отдельных элементов деятельности организаций при осуществлении мероприятий по предотвращению или минимизации риска в подземном строительстве. При этом риск-менеджмент должен учитывать все лучшее, что создано в мировой практике, но основываться на культуре управления, которая сложилась в России. Жесткие требования нужно предъявлять к управленческому персоналу, который должен в равной степени обладать высоким искусством выработки наилучшей стратегии управления рисками в конкретном случае и владеть специальными знаниями в области тоннелестроения.

При возведении подземных сооружений строительный риск является одним из основных видов рисков [10, 21]. Во время строительства аварийная ситуация возникает из-за двух независимых негативных событий – внешнего непроектного воздействия [22] и ошибок в проектах [23]. Ошибки на проектной стадии и в период строительства определяют динамику развития рисков на последующих этапах. Ведущая роль в определении характера проявления одного из видов строительных рисков – геотехнического – принадлежит грамотной оценке инженерно-геологических условий проведения горных работ [24].

Геотехнические риски влияют на возникновение неблагоприятных факторов из-за присущей массиву горных пород неоднородности [25], способствующей значительной изменчивости геотехнических параметров. Это влечет за собой экономический ущерб, снижает безопасность и качество проведения строительных работ [13]. Поскольку подземные разработки характеризуются совместной работой горного оборудования и людей, то сочетание ограниченности рабочего пространства с неопределенностью геотехнических данных приводит к неизбежному возрастанию риска несчастных случаев. Так, например, на объектах метрополитена 10 % аварий связано с недостатками изысканий; 6 % – с нарушениями технологических режимов, правил и норм;

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 895-905
© Е.Ю.Куликова, А.Г.Полянкин, А.М.Потокина, 2023

8 % – ненадлежащими и несвоевременными профилактическими осмотрами; 14 % – конструктивными недостатками или неправильно подобранными материалами; около 30 % – отступлениями от паспорта производства работ [14]. Остальные причины аварий обусловлены неучетом характера взаимодействия подземного сооружения и окружающей среды.

Формальной оценкой риска является его определение как произведения вероятности рассматриваемой опасности и последствий, вызванных неблагоприятными событиями. Данная оценка подразумевает [26] определение объема данных для оценки риска и выявление опасностей в этом объеме. Чтобы определить вероятность развития данного события и его последствие, необходимо провести сравнительную качественную и количественную оценку [11]: в результате получаем рискообразующие факторы [27] и их суммарное количество. Таким образом, появляется возможность оценки фактической вероятности и последствия опасности [16]. Разработка методики управления рисками позволяет их контролировать во время строительства [28].

Методология. Существует много методов для оценки геотехнического риска: Монте-Карло, Дельфи, анализ дерева отказов, событий, неисправностей, ведомости проверок, структурная схема надежности, квалиметрическая оценка, метод аналогий и др. Выбор метода зависит от того, насколько полно он учитывает цели и критерии оценки, возможность получения информации, уровень приемлемого риска, тип анализируемой системы, характер возникающих опасностей, наличие материальных, финансовых и трудовых ресурсов для выполнения работ и т.п. Также выбираемый метод должен быть научно обоснован, достоверен и результативен в плане назначения мероприятий по минимизации риска. Чтобы выбрать метод управления рисками, составляется план.

• Выбор основных контролируемых параметров производства подземных работ:

– проектные – обусловленные недоработкой материалов проекта, неправильной интерпретацией исходных данных, завышенной сметной стоимостью, непониманием заказчиками и подрядчиками цели и задач проекта и т.д.;

– инженерно-геологические – вызванные проявлением геологических рисков, в том числе развившихся под влиянием техногенных факторов;

– конструктивные – обусловленные конструктивными недостатками и выбором материалов с неподходящими для данных условий характеристиками;

– геоэкологические – тепломассоперенос, агрессивная среда и другие, т.е. факторы, влияющие на выбор технологии строительства подземного объекта и безопасность окружающей среды;



Рис.1. Мероприятия по мониторингу состояния строящегося объекта

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

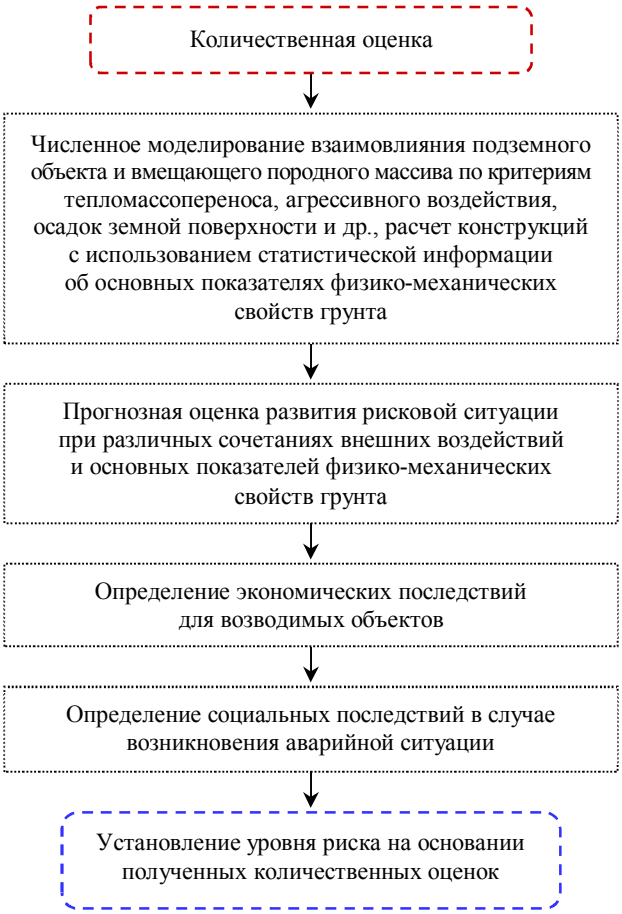


Рис. 2. Количественная оценка риска

– технологические – факторы, влияющие на качество строящегося и эксплуатируемого объекта;

– факторы, влияющие на безопасность окружающих объект застроек и коммуникаций в районе строительства.

Данные параметры тесно связаны между собой и являются неотъемлемыми частями геотехнического риска, оценка которого может быть проведена балльными или экспертными методами.

• Обоснование мероприятий по комплексной системе наблюдений за состоянием строящегося подземного объекта и близкорасположенных наземных сооружений (рис.1).

• Выбор метода оценки риска. Балльная оценка, учитывающая качественные характеристики факторов влияния (рис.2) и базирующаяся на учете поправочных коэффициентов, позволяет группе экспертов находить вариации решений в зависимости от информационной обеспеченности и специфики технологий и способов подземного строительства.

Критерием геотехнического риска на участке подземного объекта в период его строительства и эксплуатации, пропорциональным величине балльной оценки, является частота аварий, которая напрямую связана с конкретной технологией освоения подземного пространства. Для подземных сооружений тоннельного типа в соответствии с ожидаемыми нештатными ситуациями варьируют длину каждого участка трассы, по которой оценивают удельные показатели риска. Таким образом, на каждом участке можно уточнить информацию о техническом состоянии подземного сооружения и спрогнозировать локальную частоту потенциальных аварий.

Техническое состояние подземного сооружения для *n*-го участка можно определить на основе балльных оценок по следующей зависимости [29]:

$$F_n = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J(i)} p_i q_{ij} B_{ij};$$

$$B^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} F_n,$$

где p_i – доля i-й группы факторов; q_{ij} – доля j-го фактора в i-й группе; B_{ij} – оценка фактора F_{ij}, формализованная в баллах; B^* – средняя балльная оценка подземного сооружения по всей длине, полученная на основе балльной оценки каждого участка.

Локальную частоту аварии можно определить на основании зависимости [29]:

$$\lambda_n = \bar{\lambda} \frac{F_n}{B^*},$$

где $\bar{\lambda}$ – среднестатистическая частота аварий на подземном сооружении, число аварий/(км·год).

Величину коэффициента влияния как отношение локальной частоты аварий на участке к ее среднему значению можно определить по формуле

$$K_{\text{вл}} = \frac{\lambda_n}{\bar{\lambda}}.$$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 895-905
© Е.Ю.Куликова, А.Г.Полянкин, А.М.Потокина, 2023



Рис.3. Мероприятия по систематизации и анализу материалов района строительства

Если в результате расчетов не удалось получить представительный объем статистических данных, то риск оценивается с помощью экспертных оценок нечисловой этиологии с присвоением уровня риска (высокий, низкий и т.п.). Обработка результатов при этом подразумевает анализ вероятности потенциальных неточностей в инженерно-геологических изысканиях, осложняющих выбор технологий, и достоверности результатов геотехнических и геомеханических обследований зданий и сооружений на поверхности. Сложность геотехнических условий в районе строительства [30] предопределяет развитие неблагоприятных рисковых событий, что необходимо учитывать в предлагаемой методике. Проведение мероприятий по систематизации материалов, характеризующих район строительства [31], в том числе их анализ, является важным этапом в системе управления геотехническими рисками, так как с их помощью можно выявить причины развития неблагоприятного события при строительстве подземного объекта и перейти к количественной оценке рисков [32] (рис.3).

Эксперты играют ключевую роль в идентификации и систематизации причин возникновения геотехнических рисков в период строительства подземных сооружений, а также в количественной оценке рисков при определении наибольшего возможного ущерба от наступления рискового события. Величину ожидаемого ущерба от ведения строительных работ можно установить при помощи идентификации геотехнических рисков, которые вносят в регистрационную ведомость, что дает основание для их количественной оценки. Задача, стоящая перед экспертами, разделяется на несколько этапов: определение возможных неблагоприятных событий, их ранжирование, выявление величины потенциального ущерба на соответствующем этапе ведения строительных работ, назначение технологических, конструктивных и организационных мероприятий, направленных на минимизацию рисков.

Один из этапов количественной оценки состоит из определения комбинации вероятности возникновения рискового события и ожидаемого ущерба. Здесь важным этапом для экспертов является определение увеличения сроков строительства либо стоимости производства работ против тех же показателей, заложенных в проекте в процентном отношении. Выделяют численные значения степени риска: очень высокому уровню риска (5 баллов) присуща частота 0,6-1 и вероятность наступления события 70; высокому уровню (4 балла) – $1\text{-}10^{-1}$ с вероятностью 50-70; среднему (3 балла) – $10^{-1}\text{-}10^{-2}$ и 30-50; низкому (2 балла) – $10^{-2}\text{-}10^{-3}$ и 10-30; очень низкому (1 балл) – менее 10^{-3} с вероятностью менее 10. Данные по ожидаемому ущербу в количественном выражении: 10 % – 5 баллов; 8-10 % – 4 балла; 4-8 % – 3 балла; 1-4 % – 2 балла; 1 % – 1 балл.

С помощью системного анализа [27] по вероятностно-статистической методике обрабатывается экспертная оценка, после устанавливается численное значение степени риска. Чтобы оценить уровень неблагоприятного события и степень необходимости принятия решений для его предотвращения, на основе анализа величины ожидаемого ущерба выстраивают шкалу численного значения риска (см. таблицу).

Количественная оценка риска и определение мер по минимизации аварийных ситуаций

Уровень риска	Меры по снижению вероятности возникновения неблагоприятного события
Очень низкий 1-5	Отсутствуют
Низкий 6-10	Незначительные конструктивные и укрепительные преобразования
Средний 11-15	Внесение в проект конструктивных или других изменений без добавочных финансовых вложений
Высокий 16-20	Прекращение строительных работ до момента стабилизации нежелательных изменений и снижения степени риска (требуются добавочные финансовые вложения)
Очень высокий 21-25	Запрет на осуществление проекта

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Е.Ю.Куликова, А.Г.Полянкин, А.М.Потокина, 2023

После первого этапа количественной оценки рисков эксперты приступают к повторной оценке степени проявления неблагоприятных событий и внесению новых результатов в регистрационную ведомость с учетом проведенных мероприятий.

• Составление алгоритма управления рисками при строительстве подземных объектов (рис.4).

Результаты. По методике проведено исследование при проектировании и строительстве межтерминального перехода аэропорта Шереметьево. Объектом исследования является группа сооружений, состоящая из северного и южного станционных комплексов и тоннельного участка между ними, проходящего под взлетно-посадочной полосой (ВПП) действующего аэропорта Шереметьево. Транспортный участок объекта под ВПП включает: однопутные тоннели автоматизированной системы перевозки пассажиров и багажа; три технологические сбойки; камеру водоотливной установки. Строительство одного из тоннелей совмещается с демонтажем и возведением конструкций проектируемого терминала B, второго – с объединением терминалов D и E и надземной пешеходной галереи между ними. Два перегонных однопутных тоннеля сооружаются закрытым способом с применением тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) от северного станционного комплекса до южного. Для организации проходки перегонных тоннелей предусматривается монтажно-щитовая камера в котловане со стороны северного станционного комплекса и демонтажно-щитовая камера со стороны южного. На врезке и выходе щитов

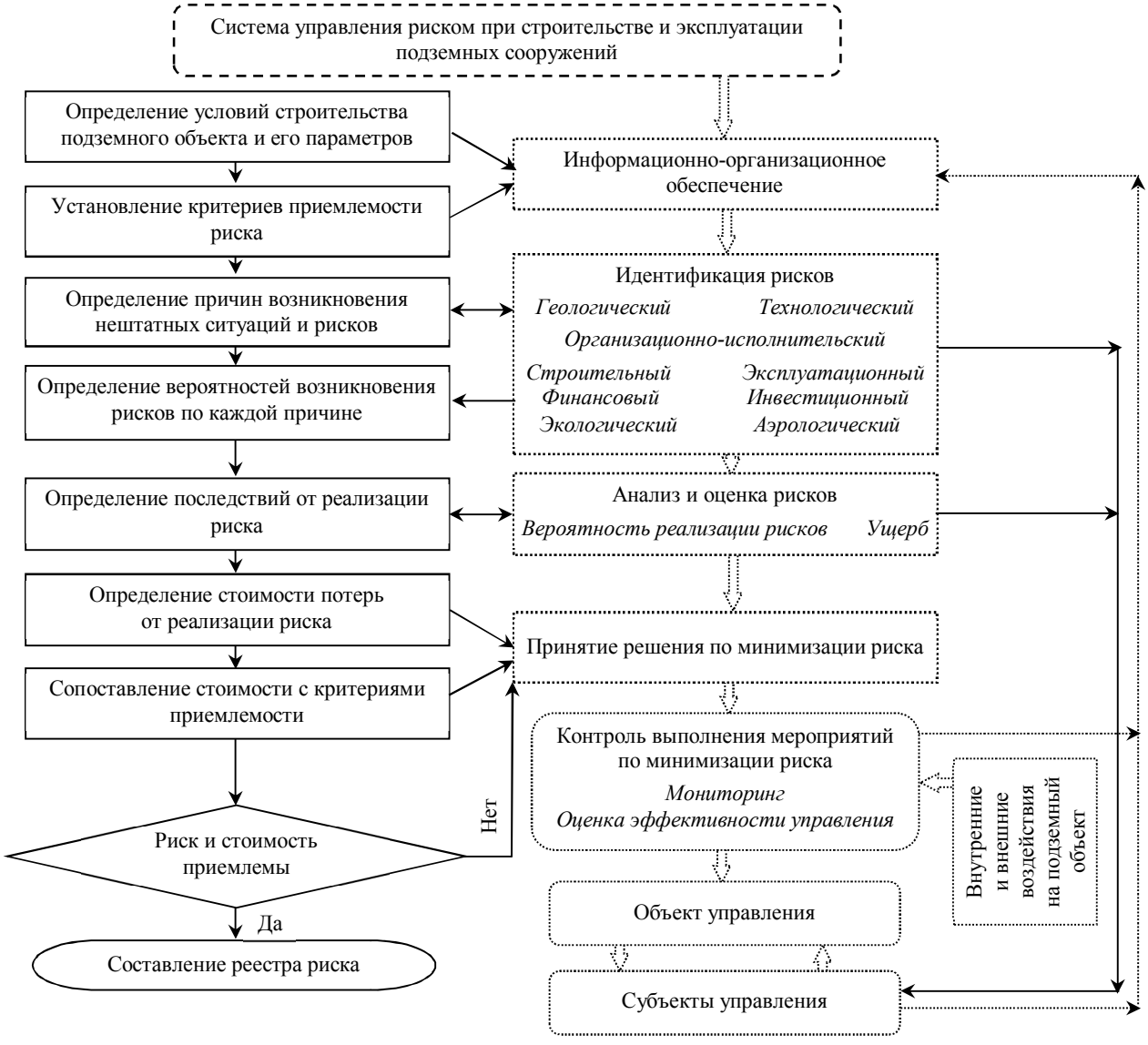


Рис.4. Общий алгоритм управления риском в подземном строительстве

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 895-905
© Е.Ю.Куликова, А.Г.Полянкин, А.М.Потокина, 2023

укрепляются грунты методом струйной цементации. Для устойчивости котлованов [23] станционные комплексы сооружаются методом «стена в грунте» [31]. Из-за большой ширины и длины котлована их закрепляют анкерами и поясами из двутавровых балок. Основанием тоннелей служат пески средней крупности и суглинок полутвердый. В пределах участка строительства на исследованную глубину до 80 м встречаются четыре водоносных горизонта. При строительстве тоннельного участка закрытым способом применена сборная железобетонная обделка. Для обеспечения ее полного контакта с окружающим грунтом предусматривается устройство рубашки из тампонажного раствора при установке блоков. Для сообщения между транспортным и багажным тоннелями предусмотрены технологические сбойки. Строительство сооружений ведется закрытым способом в размыкании колец перегонных тоннелей при экранировании трубами. Обделка сбоек имеет прямоугольное очертание. Конструкция запроектирована в монолитном железобетоне с внутренней металлоизоляцией, которая защищается от коррозии слоем торкрет-раствора, наносимого по сетке. Конструкция ограждения котлована северного станционного комплекса принята из монолитной «стены в грунте». Ограждение крепится с помощью анкерно-подкосной системы. Для передачи нагрузки [33] на анкеры и подкосы устанавливается продольный пояс из двух двутавровых балок, а также расстрелов и подкосов. Для обделок сооружений, возводимых открытым способом, предусмотрена гидроизоляция из ПВХ-мембраны. Гидроизоляция по покрытию защищается слоем мелкозернистого бетона, армированного двумя арматурными сетками.

Все данные изучены, и на их основе проведено исследование, по результатам которого описаны риски, отнесенные к высоким (рис.5, *а*).

Кроме высоких рисков, выявлена вероятность возникновения средних и 18 низких. Риски, отнесенные к средним, и их уровень: неучет фильтрационных и консолидационных свойств грунтового массива – 12,57; вскрытие неучтенных инженерных водонесущих коммуникаций при разработке котлована – 13,86; неучет технологических осадок от разработки траншеи при устройстве «стены в грунте» – 14,14; незакрытые строительные швы, фильтрующие воду, – 14,14; поступление воды в котлован через грунтовые включения в массиве «стены в грунте», образовавшиеся

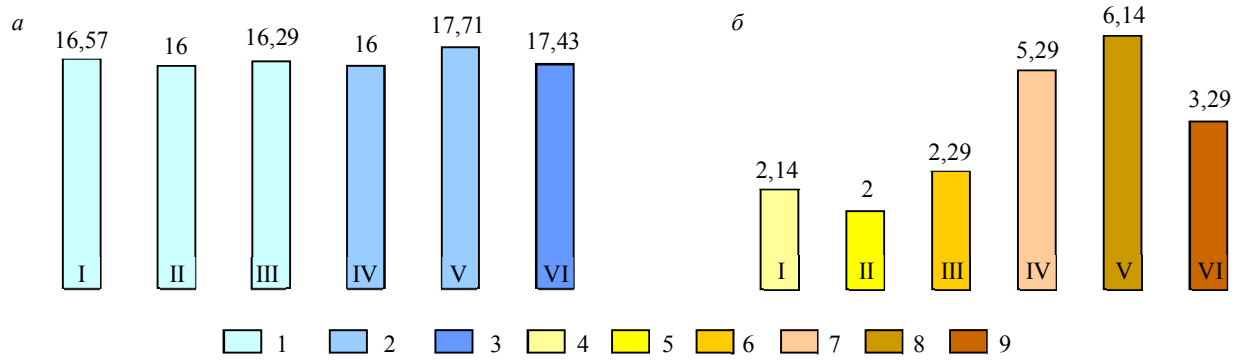


Рис.5. Уровень риска возникновения неблагоприятного события и ожидаемого ущерба, в зависимости от причины их возникновения (*а*), и нештатных ситуаций после предотвращающих мероприятий (*б*)

I – ошибки в расчетах несущих и ограждающих конструкций; II – неверное проектирование узлов соединения распорок и обвязочных поясов; III – ошибки при проектировании грунтовых анкеров; IV – наложение мульд деформаций поверхности из-за близкорасположенных тоннелей; V – суффозия основания ВПП с образованием пустот под ВПП; VI – вход ТПМК в линзу водонасыщенного песка

1 – недостаточная несущая способность несущих и ограждающих конструкций, которая приведет к недопустимым деформациям и деформациям зданий окружающей застройки; 2 – дополнительные осадки поверхности, которые приведут к нарушению работоспособности и эксплуатационной надежности аэродромных покрытий и инфраструктуры; 3 – дополнительные осадки поверхности летного поля из-за неопределенности геологических условий по трассе тоннеля (линзы водонасыщенного песчаного грунта, валуны, неучтенные коммуникации), которые приведут к деформации корпуса и оболочки щита, заклиниванию ротора или провалам на поверхности; 4 – проведение поверочных расчетов независимой организацией в сертифицированном геотехническом программном комплексе; 5 – проведение геотехнической экспертизы проектной документации и геотехнический мониторинг; 6 – проведение поверочных расчетов независимой организацией в сертифицированном геотехническом программном комплексе, мониторинг за анкерами, предварительное испытание анкеров; 7 – компенсация деформаций за счет усиления грунтового массива; 8 – геофизические исследования основания ВПП, заполнение пустот перед проходкой под ВПП, геотехнический мониторинг; 9 – разведочное бурение и геофизические исследования перед проходкой опасных участков

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

в процессе производства работ по бетонированию, – 11,71; низкое качество работ при устройстве узлов крепления расстрелов – 11,71; несоответствие проекту геометрических параметров конструкции «стены в грунте», обвязочных поясов, распределительной системы – 12,57; обводнение массива при прорыве водонесущих коммуникаций – 13,86; протечка топлива в тоннель при прорыве топливопроводов – 12,14; некачественное устройство гидроизоляции притоннельных сооружений – 13,57; вывалы на портальных участках тоннеля – 12,14; некачественный монтаж блоков – 11,71; нагнетание недостаточного объема тампонажного раствора в заобделочное пространство тоннеля – 14,43; несвоевременный закрепный тампонаж – 12,29.

Для предотвращения рисков высокого уровня предложены рекомендации, направленные на их минимизацию: проведение поверочных расчетов независимой организацией в сертифицированном геотехническом программном комплексе; геофизические исследования основания ВПП; заполнение пустот [24] перед проходкой под ВПП; разведочное бурение и геофизические исследования перед проходкой опасных участков. Для минимизации рисков среднего и низкого уровней необходимы мероприятия, не требующие дополнительных затрат, после которых оценка рисков проведена повторно (рис.5, *б*).

При реализации строительных работ приоритетом является сохранение здоровья и жизни работников, поэтому планирование строительных работ с высоким или средним уровнем риска неприемлемо. Основываясь на результатах анализа риска, можно быстрее отреагировать на вероятность возникновения аварийной ситуации. Когда уровень потенциального риска стремится к средним или высоким значениям, нужно своевременно принять меры по его снижению, предотвращению несчастных случаев, травматизма персонала, потерь оборудования и т.п. В соответствии с предложенной методикой после проведенных мероприятий уровень производственного травматизма может быть снижен на 63,15 %. Из рис.5, *б* следует, что при проведении дополнительных мероприятий по предотвращению рисков их уровень значительно снижается и колеблется в диапазоне от малого до очень малого.

Обсуждение. Сложность освоения подземного пространства в современных условиях и нестабильность инженерно-геологических и технологических условий влекут развитие нештатных ситуаций. Принимая это во внимание, следует выбирать такую методику, где каждый риск будет учитываться индивидуально в комплексной системе оценки рисков, характерных для конкретного объекта строительства, что позволит учесть их специфические черты и выработать эффективные способы контроля и управления. Предложенная методика эффективна при оценке геотехнических рисков и прогнозировании неблагоприятных ситуаций, снижающих безопасность ведения строительных работ и увеличивающих их стоимостные показатели, так как включает в себя целый комплекс гибкого управления, характеризующийся интерактивной связью технологического процесса с его контролем, направленным на снижение вероятности возникновения риска. Разработан алгоритм управления рисками в подземном строительстве.

Методика на основе риск-ориентированного подхода позволяет выявить слабое звено в подборе технологии и организации строительства, выбрать инструмент контроля уязвимости элементов природно-технической геосистемы подземное сооружение – породный массив – технология – окружающая среда и меры устранения возникающей нестабильности. Основными преимуществами предложенного подхода являются:

- минимизация и своевременное устранение ошибок при проектировании подземного объекта;
- раннее выявление геотехнических рисков и рискообразующих факторов;
- повышение эффективности подземного строительства;
- возможность моделирования динамики развития рисков на конкретном подземном объекте на основе архивных, оперативных и прогнозных данных;
- определение оптимальных мероприятий по минимизации геотехнических рисков на основе наиболее полной информации об объекте;
- возможность гибкого реагирования на показатели уязвимости элементов природно-технической геосистемы;
- углубленная аналитика по всем элементам формируемой природно-технической геосистемы на всех этапах ее жизненного цикла, включающая анализ причин и взаимосвязей между рисками.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.264. С. 895-905
© Е.Ю.Куликова, А.Г.Полянкин, А.М.Потокина, 2023

Такая аналитика становится инструментом построения сложных моделей и шаблонов риска для более точных прогнозов развития нештатных ситуаций.

Недостатками подхода являются сложности формирования группы высококвалифицированных экспертов. Перспективы развития подобных методов управления рисками при реализации технологических процессов в подземном строительстве – создание банка больших данных (Big Data) и внедрение BIM-технологий. Это позволит добиться упреждающего управления геотехническими рисками до их полного развития за счет выявления признаков наступления негативного события на ранней стадии его развития и уменьшения времени реагирования на факторы проявления нештатной ситуации.

Заключение. Спецификой управления геотехническими рисками в подземном строительстве является: необходимость тщательного анализа изменчивости инженерно-геологического состояния массива горных пород, вмещающего подземное сооружение, которая может повлечь ошибочное конструктивное или техническое решение по строительству данного объекта; уточнение геотехнических данных на всех этапах подготовки проекта и в процессе его реализации. Исследование, проведенное в соответствии с предложенной методикой, показало, что при своевременном реагировании на возникновение нештатных и аварийных ситуаций при освоении подземного пространства, качественном выполнении строительно-монтажных работ и проведении дополнительных мероприятий уровень риска можно существенно минимизировать. Этого можно добиться при комплексном подходе к управлению геотехническими рисками на всех этапах жизненного цикла подземного сооружения.

Синтезирован общий алгоритм управления риском в подземном строительстве, предусматривающий выбор основных контролируемых параметров производства подземных работ, систематизацию и анализ материалов района строительства, обоснование мероприятий по комплексной системе наблюдений за состоянием строящегося подземного объекта и близкорасположенных наземных сооружений.

Правильно подобранная методика оценки геотехнических рисков определяет эффективность управления ими и корректность мероприятий по безопасной реализации строительных работ. Представленная методика на примере оценки рисков при сооружении межтерминального перехода аэропорта Шереметьево позволила поставить вопрос о создании гибких систем управления рисками в подземном строительстве, основанных на экспертной оценке, своевременных и эффективных методах мониторинга и варьировании коэффициентами запаса и влияния.

Установлено, что применительно к межтерминальному переходу аэропорта Шереметьево значительные потенциальные риски обусловлены недостаточной несущей способностью конструкций. Это ведет к недопустимым деформациям конструкций и зданий окружающей застройки с дополнительными осадками земной поверхности в районе строительства и летного поля, влекущими нарушение работоспособности и эксплуатационной надежности аэродромных покрытий и инфраструктуры из-за неопределенности геологических условий по трассе тоннеля (линзы водонасыщенного песчаного грунта, валуны, неучтенные коммуникации), что спровоцирует деформации корпуса и оболочки щита, заклинивание ротора или приведет к провалам на поверхности. Поэтому углубленная аналитика всех факторов развития риска на стадии проектирования становится инструментом построения сложных моделей и шаблонов риска для более точных прогнозов развития нештатных ситуаций. Это позволяет по-новому проектировать городские подземные объекты при скрытых условиях строительства, недостоверности или недостаточности изыскательской и аналитической базы данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конюхов Д.С.* Анализ параметров механизированной проходки тоннелей для определения характеристик перебора грунта // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7. № 1. С. 49-56. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-49-56

2. *Волохов Е.М.*, *Мукминова Д.З.* Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 826-839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Карасев М.А.*, *Сотников Р.О.* Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 626-638. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.2

4. *Потапова Е.В.* Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков // Горные науки и технологии. 2021. Т. 6. № 1. С. 52-60. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-1-52-60

5. *Баловцев С.В.*, *Скопинцева О.В.* Оценка влияния повторно используемых выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 40-53. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-40-53

6. *Скопинцева О.В.*, *Баловцев С.В.* Оценка влияния аэродинамического старения выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 6-1. С. 74-83. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-74-83

7. *Куликова А.А.*, *Харламова Т.А.*, *Хабарова Е.И.*, *Ковалева А.М.* К вопросу оценки влияния микробиологических биоценозов на геоэкологические и геотехнические риски горных предприятий // Уголь. 2022. № 4. С. 67-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-67-71

8. *Чунюк Д.Ю.* Обеспечение безопасности и снижение рисков в геотехническом строительстве // Вестник Московского государственного строительного университета. 2008. № 2. С. 107-111.

9. *Дейнеко А.В.*, *Серова Е.А.*, *Чунюк Д.Ю.* Специфика количественного анализа геотехнического риска // Вестник Московского государственного строительного университета. 2010. № 4. С. 369-373.

10. *Куликова Е.Ю.* Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 124-133. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133

11. *Кузнецова М.О.* Практики внедрения риск-менеджмента в российских промышленных компаниях: результаты эмпирического исследования // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2019. Т. 10. № 4. С. 410-423. DOI: 10.17747/2618-947X-2019-4-410-423

12. *Меркин В.Е.*, *Зерцалов М.Г.*, *Конюхов Д.С.* Управление геотехническими рисками в подземном строительстве // Метро и тоннели. 2013. № 6. С. 36-39.

13. *Конюхов Д.С.* Критериальный анализ современных технологий подземного строительства // Геотехника. 2021. Т. XIII. № 1/2021. С. 40-55. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-40-54

14. *Kulikova E.Yu.*, *Balovtsev S.V.* Risk control system for the construction of urban underground structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Iss. 4. № 042020. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042020

15. *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. 2020. Vol. 962. Iss. 4. № 042052. DOI: 10.1088/1757-899X/962/4/042052

16. *Clayton C.R.I.* Managing geotechnical risk: time for change? // Geotechnical Engineering. 2001. Vol. 149. Iss. 1. P. 3-11. DOI: 10.1680/geng.2001.149.1.3

17. *Mishra R.K.*, *Rinne M.* Geotechnical Risk Classification for Underground Mines // Archives of Mining Sciences. 2015. Vol. 60. № 1. P. 51-60. DOI: 10.1515/amsc-2015-0004

18. *Hebblewhite B.K.* Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management // Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, 9-11 April 2019, Perth, Australia. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. P. 299-308. DOI: 10.36487/ACG_rep/1905_17_Hebblewhite

19. *Mishra R.K.*, *Janiszewski M.*, *Uotinen L.K.T. et al.* Geotechnical Risk Management Concept for Intelligent Deep Mines // Procedia Engineering. 2017. № 191. P. 361-368. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.192

20. *Трушко В.Л.*, *Протосеня А.Г.* Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 162-166. DOI:10.31897/PMI.2019.2.162

21. *Carlsson M.* Management of geotechnical risks in infrastructure projects: an introductory study. Stockholm: KTH, 2005. 156 p.

22. *Поддубный В.В.* Обоснование инженерных решений по эффективному освоению подземного пространства крупнейших и крупных городов: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2008. 20 с.

23. *Игнатьев С.А.*, *Судариков А.Е.*, *Имашев А.Ж.* Современные математические методы прогноза условий поддержания и крепления горных выработок // Записки Горного института. 2019. Т. 238. С. 371-375. DOI: 10.31897/PMI.2019.4.371

24. *Султанов К.С.*, *Логинов П.В.*, *Исмоилова С.И.*, *Салихова З.Р.* Квазистатичность процесса динамического деформирования грунтов // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 1 (85). С. 71-91. DOI: 10.18720/MCE.85.7

25. *Деменков П.А.*, *Голдобина Л.А.*, *Трушко О.В.* Метод прогноза деформации земной поверхности при устройстве котлованов в условиях плотной городской застройки с применением способа «стена в грунте» // Записки Горного института. 2018. Т. 233. С. 480-486. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.480

26. *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

27. *Yajie Xu, Xiangsheng Chen.* Quantitative analysis of spatial vitality and spatial characteristics of urban underground space (UUS) in metro area // Tunnelling and Underground Space Technology. 2021. Vol. 111. № 103875. DOI: 10.1016/j.tust.2021.103875

28. *Зиновьева О.М.*, *Кузнецов Д.С.*, *Меркулова А.М.*, *Смирнова Н.А.* Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2-1. С. 113-123. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123

29. *Куликова Е.Ю.*, *Корчак*, *А.В.*, *Левченко А.Н.* Анализ факторов риска при строительстве городских подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 5-11.

30. *Tidlund M.*, *Spross J.*, *Larsson St.* Observational method as risk management tool: the Hvalfjörður tunnel project, Iceland // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2022. P. 1-15. DOI: 10.1080/17499518.2022.2046784

31. *Bourget A.P.F.*, *Chiriotti E.*, *Patrinieri E.* Evolution of risk management during an underground project's life cycle // Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation meet Archaeology, Architecture and Art. London: CRC Press, 2019. P. 4375-4385. DOI:10.1201/9780429424441-463

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Proprenter M.*, *Lenz G.* Risk Management in Tunneling – A Joint Approach of all Involved // Proceedings of the World Tunnel Congress, 21-26 April 2018, Dubai, UAE. 2018. P. 439-450.

33. *Лебедев М.О.* Обоснование выбора метода расчета напряженно-деформированного состояния крепей и обделок транспортных тоннелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1. С. 47-60. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-47-60

***Авторы*: Е.Ю.Куликова,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *fragrante@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-9290-671X* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*, *Москва*, *Россия*), **А.Г.Полянкин,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *https://orcid.org/0000-0003-2258-0299* (*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»*, *Москва*, *Россия*), **А.М.Потокина,** *инженер*, *https://orcid.org/0000-0002-4899-1638* (*ОАО «Мосинжпроект»*, *Москва*, *Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0