



**ОЦЕНКА И КОНТРОЛЬ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ РИСКОВ  
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ТОННЕЛЕЙ БАМ**

**М. О. Лебедев, К. В. Романевич**

*ОАО “Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт “Ленметрогипротранс”,  
E-mail: mail@lmgt.ru, ул. Большая Московская 2, г. Санкт-Петербург 191002, Россия*

Рассмотрен новый подход к количественной оценке геотехнических рисков на основе упрощенной количественной классификации природно-техногенных опасностей при строительстве транспортных тоннелей для Байкало-Амурской железнодорожной магистрали. Оценка риска выполнена ретроспективно, учитываются в основном этапы проектирования и строительства. Доказана целесообразность разработки аналогичных алгоритмов для более детальной оценки и прогнозирования актуальных геотехнических рисков, а также для динамического контроля изменений уровня риска в процессе строительства и эксплуатации с помощью системы комплексного геотехнического мониторинга как для транспортных тоннелей, так и для других подземных сооружений.

*Геотехнические риски, оценка рисков, контроль рисков, геотехнический мониторинг, железнодорожный тоннель, Байкало-Амурская магистраль*

**ASSESSMENT AND CONTROL OF GEOTECHNICAL RISKS IN CONSTRUCTION  
OF UNDERGROUND STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF THE BAM TUNNELS**

**M. O. Lebedev and K. V. Romanevich**

*SJC Research, Design and Survey Institute “Lenmetrogiprotrans”,  
E-mail: mail@lmgt.ru, ul. Bolshaya Moskovskaya 2, Saint Petersburg 191002, Russia*

The paper reviews a new approach to quantitative geotechnical risk assessment. This approach is applicable to a preliminary rough risk assessment based on a simplified quantitative classification of hazards for tunnel projects. We consider its applicability on the example of the railway tunnels on the Baikal-Amur Mainline. Quantitative risk assessment for the BAM tunnels is performed retrospectively – mainly the design and construction stages are taken into account. The expediency of developing similar algorithms for a more detailed assessment and forecasting of current geotechnical risks, as well as for the dynamic control of risk level changes during construction and operation using the integrated geotechnical monitoring system for both transport tunnels and other underground structures has been proved.

*Geotechnical risks, risk assessment, risk control, geotechnical monitoring, railway tunnel, Baikal-Amur Mainline*

На всех этапах существования системы “подземное сооружение – вмещающая среда” фиксируются природные и техногенные воздействия со сложной структурой их взаимовлияний. Опасные процессы и явления могут существенно отличаться на разных интервалах протяженного подземного сооружения и в разное время. Это требует динамического подхода к оценке, прогнозированию и снижению вероятности возникновения аварийных ситуаций, а также минимизации потерь на разных участках одного объекта, поэтому учет негативных природных и техногенных факторов на подземные сооружения целесообразно выполнять с позиций теории управления рисками [1, 2].

Одними из основных видов в подземном строительстве являются геотехнические риски [3]. Ввиду нелинейной изменчивости как по площади и глубине, так и во времени они вносят значительный вклад в уровень неопределенности при принятии проектных и конструктивных решений. Базовым элементом в структуре их управления становится идентификация всех характерных для данного объекта факторов риска с последующей их качественной и количественной оценкой. Другие составляющие системы управления геотехническими рисками в подземном строительстве — определение допустимого уровня риска, разработка мероприятий по его снижению и другие процедуры. Существенную роль при этом играет временной фактор — действие различных переменных параметров среды, изменение условий и воздействий природного и техногенного происхождения. В связи с этим контроль опасных явлений и процессов, возникающих в системе “подземное сооружение – вмещающая среда” и анализ их изменений должен вестись непрерывно на всех этапах существования подземного сооружения, особенно это актуально для подземных сооружений с массовым пребыванием людей — транспортных тоннелей и метрополитенов.

В настоящее время для контроля геотехнических рисков могут быть успешно применены инструменты цифровой геомеханики, математическое моделирование природных и техногенных процессов, методика глубокого обучения на основе нейронных сетей, алгоритмы оценки технического состояния подземных сооружений с применением ВМ-технологий. Исходной информацией являются натурные исследования напряженно-деформированного состояния конструкций и вмещающих массивов в составе системы комплексного геотехнического мониторинга.

Наибольший объем работ по строительству транспортных тоннелей в нашей стране выполнен на Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ). Всего с учетом подходных тоннелей к трассе, транспортных и вспомогательных штолен возведено 70 км капитальных выработок. Всего на трассе БАМа насчитывается 11 тоннелей: пять однопутных перевальных и пересекающих средневысотные горные хребты, четыре двухпутных мысовых на побережье оз. Байкал и два тоннеля на обходе Северо-Муйского хребта [4, 5].

Проектирование отдельных наиболее сложных объектов магистрали и решение научных проблем осуществлялось специализированными институтами Минтрансстроя и МПС, значительным числом научно-исследовательских и проектных организаций других ведомств. Коллектив института “Ленметрогипротранс” участвовал в проектировании практически с 1967 г., когда начата разработка основных положений строительства магистрали [6, 7]. В результате за длительный период строительства тоннелей БАМа накоплен большой опыт проектирования и научно-технического сопровождения сооружения транспортных тоннелей большого сечения (56 – 120 м<sup>2</sup>) в сейсмически активном районе (более 10 баллов) в самых разнообразных и очень сложных горно-геологических условиях. Тоннели БАМа построены в массивах пород от слабоустойчивых до совершенно неустойчивых, опасных по горным ударам, осложненных множеством крупных разрывных тектонических нарушений, заполненных рыхлообломочной массой с уровнем гидростатического давления до 5 МПа, с водопритоками от 2 – 3 десятков до нескольких тысяч кубических метров воды в 1 ч с напором до 30 атм и температурой до +40°С, а также в условиях вечной мерзлоты.

При строительстве тоннелей БАМа в сложных горно-геологических условиях и на участках разломов впервые в нашей стране разработаны и применены: технология проходки подземных выработок с устройством арочно-бетонной крепи и двухслойной обделки, конструкции опережающих экранов из труб, взрыво-инъекционный метод упрочнения грунтов; в опытный порядок — замораживание обводненных грунтов жидким азотом и др.

Для проходки зон разломов усовершенствованы и откорректированы для суровых условий специальные способы работ по инъекционному закреплению грунтов, комплексному водопонижению, заполнению пустот, образованных при выносах породы из сводовой части и другие

технологии. Перечисленные достижения в тоннелестроении в последующие годы совершенствовались и применялись при строительстве тоннелей метрополитенов, “Олимпийских” тоннелей “Адлер–Красная Поляна” и других подземных сооружений, а в настоящее время могут использоваться при строительстве новых тоннелей БАМа.

Повышение пропускной и провозной способности Восточно-Сибирской железной дороги на участке БАМа имеет стратегическое значение для экономики региона и страны в целом. Пик грузоперевозок по БАМу пришелся на 1990 г. К 1997 г. по разным причинам он упал практически вдвое, после открытия в 2003 г. сквозного движения по Северо-Муйскому тоннелю грузопоток повышался и к 2018 г. составлял порядка 12 млн т в год [8].

В настоящее время грузопоток по БАМу непрерывно растет, ведется модернизация действующих участков и возникает необходимость строительства дублирующих железнодорожных тоннелей, с помощью которых значительно будет увеличена пропускная способность на самых проблематичных участках железнодорожной магистрали. Так, с вводом уже построенного Нового Байкальского тоннеля предусматривается увеличение провозной способности БАМа в 2.5 раза — до 32 млн т в год [8], а возведением Второго Северо-Муйского тоннеля пропускную способность на этом участке планируется увеличить до 100 млн т в год.

Оценка и стратегический прогноз геотехнических рисков на этапе проектирования новых тоннелей БАМа позволяет выбирать оптимальные варианты расположения трасс новых тоннелей, определять технологии строительства и адекватные рискам предупредительные мероприятия, обеспечивающие промышленную и экологическую безопасность как при строительстве новых тоннелей, так и при эксплуатации существующих.

В качестве основных методик для оценки и прогнозирования рисков при строительстве тоннелей используются различные подходы, учитывающие требования Российских<sup>1</sup> и международных<sup>2</sup> нормативно-методических документов. Кроме этого, в тестовом режиме выполняется апробация различных современных алгоритмов качественной и количественной оценки рисков в период строительства подземных сооружений.

В [9] рассматривается унифицированная упрощенная количественная классификация рисков при строительстве тоннелей, разработанная для предоставления страховым организациям средства для оценки общего технического риска, связанного с любым тоннельным проектом. Классификация основана на следующих пяти ключевых опасностях подземного строительства: сейсмичность района строительства; геологические и гидрогеологические условия; размер и геометрические параметры сооружения; глубина заложения сооружения; оценка деформаций массива и конструкций крепей в процессе строительства.

Одним из преимуществ данного подхода является то, что каждая из перечисленных опасностей может быть оценена, если имеется общая информация по району строительства. В ходе классификации определяется 3–4 категориями для каждой из пяти ключевых опасностей. Числовой взвешенный рейтинг, называемый “риск-рейтинг”, представляется для определенной категории каждой из пяти ключевых опасностей на основе различных степеней влияния, которые эти опасности могут оказывать на проект, исходя из исторического опыта подземного строительства. Предложенные ключевые опасности, их подкатегории и соответствующие риск-рейтинги приведены в табл. 1.

<sup>1</sup>ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 Менеджмент риска. Методы оценки риска. Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО/МЭК 31010:2009 “Менеджмент риска. Методы оценки риска” (ISO/IEC 31010:2009 “Risk management - Risk assessment techniques”).

<sup>2</sup>A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works. 2nd Edition (May 2012). The International Tunneling Insurance Group.

ТАБЛИЦА 1. Ключевые опасности, их подкатегории и соответствующие опасностям риск-рейтинги

Опасность	Риск-рейтинг
Сейсмическая активность	
Сейсмоопасный район $\geq 9$ баллов	15
Сейсмичность 7-8 баллов	10
Несейсмический район	5
Геологические опасности	
Большое количество нарушенных зон/разломов	25
Наличие нарушенных зон/разломов	15
Отсутствие нарушенных зон/разломов	5
Размер выработки	
Очень большой $\varnothing > 12$ м	20
Большой $6 \text{ м} < \varnothing < 12$ м	15
Средний $3 \text{ м} < \varnothing < 6$ м	10
Малый $\varnothing < 3$ м	5
Глубина выработки $D$	
Глубокое заложение, $D > 50\varnothing$	20
$1.5\varnothing < D < 50\varnothing$	5
Неглубокое заложение, $D < 1.5\varnothing$	10
Деформации в процессе строительства	
Большие	20
Средние	15
Малые	5

Использование подхода требует выбора соответствующего риск-рейтинга из каждой подкатегории пяти ключевых опасностей для определенного тоннеля. Суммированием находим итоговый риск-рейтинг тоннеля и его риск-класс, который может изменяться от 0 до 100 (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. Риск-класс и риск-рейтинг тоннеля на основе суммирования риск-рейтингов табл. 1

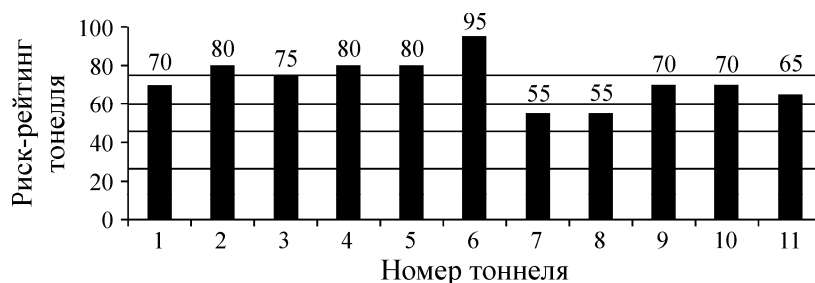
Риск-класс тоннеля	Риск-рейтинг тоннеля
Очень высокий	больше 75
Высокий	60 – 75
Средний	45 – 60
Низкий	25 – 45
Очень низкий	меньше 25

Рассчитанный по методике упрощенной количественной оценки рисков при строительстве подземных сооружений [9] риск-рейтинг тоннелей трассы БАМа представлен в табл. 3 и на рисунке. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что предложенный подход является довольно грубым и может быть применен только в качестве предварительной интегральной оценки всего сооружения в целом без учета его особенностей. Методика не учитывает многие факторы, характерные как для существующих, так и для проектируемых тоннелей БАМа: радиационная обстановка, влияние вечной мерзлоты и склоновых процессов, наличие смежных или пересекаемых подземных выработок в горных массивах и др.

В работе [9] подчеркивается, что используя предлагаемый подход, страховые организации, в помощь которым разрабатывалась методика, должны дополнительно проводить анализ соответствующих технических данных и запрашивать мнение независимого специалиста в области тоннелестроения для оценки актуального уровня риска каждого проекта.

ТАБЛИЦА 3. Основные данные о тоннелях трассы БАМа и риск-рейтинг тоннелей, рассчитанный по методике упрощенной количественной оценки рисков при строительстве подземных сооружений [9]

Номер тоннеля	Наименование тоннеля	Участок Байкало-Амурской магистрали	Протяженность тоннеля, м	Количество путей	Риск-рейтинг тоннеля
1	Байкальский	Усть-Кут – Нижнеангарск-I	6683	1	70
Мысовые тоннели на побережье оз. Байкал					
2	№ 1	Нижнеангарск-I – Нижнеангарск-II	387	2	80
3	№ 2		1821	2	75
4	№ 3		1624	2	80
5	№ 4		1239	2	80
6	Северо-Муйский	Нижнеангарск-II – Витим	15343	1	95
Тоннели на обходе Северо-Муйского хребта					
7	№ 1	Нижнеангарск-II – Витим	1708	1	55
8	№ 3		752	1	55
9	Кодарский	Витим – Чара	1940	1	70
10	Нагорный	Бам – Тында	1300	1	70
11	Дуссе-Алиньский	Ургал – Комсомольск	1807	1	65



Гистограмма распределения риск-рейтинга тоннелей БАМа по упрощенной количественной оценке рисков: 1 — Байкальский тоннель; 2–5 — Мысовые тоннели на побережье оз. Байкал; 6 — Северо-Муйский тоннель; 7, 8 — тоннели на обходе Северо-Муйского хребта; 9 — Кодарский тоннель; 10 — Нагорный тоннель; 11 — Дуссе-Алиньский тоннель. Горизонтальными линиями показаны уровни риск-классов тоннелей от низкого (25) до очень высокого (75) (табл. 2)

Наряду с применением упрощенных методик оценки геотехнических рисков при строительстве подземных сооружений требуется качественная и количественная оценка рисков с большей степенью детализации, учитывая опыт строительства действующих тоннелей в аналогичных горно-геологических условиях. При крайней неоднородности горных массивов также необходимо выполнять краткосрочный прогноз инженерно-геологических рисков и актуализацию сценариев возможных осложнений впереди забоев тоннелей. Для этого должны использоваться методы системы комплексного геотехнического мониторинга непосредственно в процессе проходки выработки для оперативного управления физическим состоянием массива горных пород и предотвращения техногенных катастроф. Итогом контроля геотехнических рисков средствами геотехнического мониторинга в процессе проходки тоннеля становится актуальный прогноз инженерно-геологических условий впереди забоя и состояния крепей, обделок и вмещающего массива на пройденных участках [10].

## ВЫВОДЫ

Интегральная оценка опасных явлений и процессов в терминах теории управления рисками позволяет унифицировать подходы к разработке предупредительных и восстановительных мероприятий, осуществлять выбор надежных индикаторов уровня опасности и разработку мер реагирования для каждого из них. Методики упрощенной количественной оценки рисков могут применяться на этапе предпроектной подготовки и быть полезными при страховании объектов строительства.

Представляется целесообразной разработка аналогичных алгоритмов для более детальной оценки актуальных геотехнических рисков, а также для динамического контроля изменений уровня риска в процессе строительства и эксплуатации подземных сооружений. В качестве инструмента контроля и прогнозирования изменения уровня геотехнических рисков рекомендуется применять систему комплексного геотехнического мониторинга. В нее интегрированы возможности применения новых экспериментальных методов, приборов и оборудования, технологий исследования напряженно-деформированного и геодинамического состояния, оценки физико-механических свойств и процессов разрушения горных пород на всех этапах жизненного цикла транспортных тоннелей. Внедрение и применение подобных систем является гарантией успешного контроля геотехнических рисков на всех этапах существования подземных сооружений для обеспечения возможности раннего реагирования на возникающие инженерные осложнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Perry J. C.** Risk management: an approach for project managers, *International Journal of Project Management*, 1986, vol. 4, no. 4, pp. 211–216. [**Перри Дж. С.** Риск менеджмент: подход для проект-менеджеров // *Междунар. журн. проект-менеджмента*. — 1986. — № 4. — С. 211–216.]
2. **Krantikumar Mhetre, Konnur V. A., and Amarsinh Landage.** Risk Management in Construction Industry, *International Journal of Engineering Research*, 2016, vol. 5, issue special 1, pp. 153–155. [**Крантикумар Мехре, Коннур В. А., Амарсинх Лардаже.** Риск менеджмент в строительной отрасли // *Междунар. журн. инженерных исследований*. — 2016. — № 1. — С. 153–155.]
3. **Clayton C. R.** Management Geotechnical Risk: time for change. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2001, vol. 149, issue 1, pp. 3–11. [**Клэйтон С. Р.** Управление геотехническими рисками: время для изменений // *Тезисы института гражданских инженеров*. — 2001. — № 1. — С. 3–11.]
4. **Handbook for the help to builders of BAM, Tunnels.** Moscow, Transport, 1979. (in Russian). [**Справочно-методическое пособие** в помощь строителям БАМа. Тоннели / под ред. Д. И. Федорова. ВНИИ транспортного строительства. — М., Транспорт, 1979. — 176 с.]
5. **Nosarev A. V.** Bridges and tunnels on the Great Siberian Way, Moscow, МИИТ, 2002. (in Russian) [**Носарев А. В.** Мосты и тоннели на Великом Сибирском пути (включая БАМ). — М., МИИТ, 2002. — 288 с.]
6. **Bessolov V. A., Bezrodnyi K. P., Vlasov S. N., Kulagin N. I. et al.** Baikal-Amur railway Mainline. Technical report of survey, design and construction. Moscow, MPS, 1999. (in Russian) [**Бессолов В. А., Безродный К. П., Власов С. Н., Кулагин Н. И. и др.** Байкало-Амурская железнодорожная магистраль. Технический отчет об изысканиях, проектировании и строительстве 1974–1989 гг. В 5 частях: Тоннели. Проектирование и строительство 1974–1998 гг. — М., МПС, 1999. — 240 с.]
7. **Kulagin N. I.** The main scientific and technical results of the design and construction of tunnels of the BAM, *Metro i tonneli*, 2019, no. 2, pp. 18–23. (in Russian) [**Кулагин Н. И.** Основные научно-технические результаты проектирования и строительства тоннелей БАМ // *Метро и тоннели*. — 2019. — № 2. — С. 18–23.]
8. **Kozhevnikov A. P.** Active step in modernization of the BAM, *Transportnoe stroitel'stvo*, 2018, no. 4, pp. 13–14. (in Russian) [**Кожевников, А. П.** Активный шаг в модернизации БАМа // *Транспортное строительство*. — 2018. — № 4. — С. 13–14.]
9. **Brox D.** A simplified quantitative risk assessment for the insurability of tunnel projects, *World Tunnel Congress 2018, International Tunnel Association, Dubai, UAE*, pp. 3718–3731. [**Брокс Д.** Упрощенная количественная оценка риска для страхования тоннельных проектов // *Всемирный тоннельный конгресс 2018. Междунар. тоннельная ассоциация*. — Дубай, 2018. — С. 3718–3731.]
10. **Methodological guideline for integrated mining and environmental monitoring in the construction and operation of transport tunnels**, Moscow, IPKON RAN, NIPPII “Lenmetrogiprotrans”, 2009. (in Russian) [**Методическое руководство** по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. — М.: ИПКОН РАН, НИПИИ “Ленметрогипротранс”, 2009. — 68 с.]