

УДК 624.19.035.2

Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи

В. Н. Кавказский¹, Е. А. Ермонин¹, Л. А. Андреева²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ФГБУ «Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России», Российская Федерация, 119331, Москва, пр-кт Вернадского, 29

Для цитирования: Кавказский В. Н., Ермонин Е. А., Андреева Л. А. Анализ аварийных ситуаций при сооружении автодорожных тоннелей горным способом в инженерно-геологических условиях г. Сочи // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 4. — С. 947–957. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957

Аннотация

Цель: Цель выполненного исследования — обобщить и классифицировать риски, возникшие при строительстве Дублера Курортного проспекта — ключевого олимпийского инфраструктурного объекта, включавшего 15 автодорожных тоннелей общей длиной 13 км. **Методы:** Теоретического уровня, основанные на анализе ранее выполненных натурных работ, сборе фактов и их проверке, систематизации, выявлении зависимостей и определении причинно-следственных связей. **Результаты:** Проведенный анализ позволит получить обобщенную информацию о рисках и причинах их возникновения для проектирования тоннельных сооружений, сооружаемых горным способом, на черноморском побережье Краснодарского края. Разобраны основные аварийные ситуации, связанные с технологическими особенностями в конкретных инженерно-геологических условиях. **Практическая значимость:** Установлены основные пробелы в нормативной документации.

Ключевые слова: Автодорожный тоннель, горный способ, риски, проходка тоннелей, проектирование тоннелей.

Статья посвящена анализу основных аварийных ситуаций, возникших при строительстве Дублера Курортного проспекта в Сочи — масштабного инфраструктурного проекта, включающего 15 автодорожных тоннелей общей протяженностью 13 км [1, 2].

Рассмотрены причины аварийных ситуаций, связанных со сложными инженерно-геологическими условиями (малопрочные полускальные грунты, высокая сейсмичность), и предложены меры по их предотвращению. Полученные выводы актуальны для будущих проектов, включая развитие проекта «Южный кластер», где ожидаются аналогичные вызовы.

Современная геополитическая ситуация способствует активному росту туристического потока по всему северо-восточному побережью Черного моря. Это обстоятельство требует комплексного развития транспортной инфраструктуры в целом и автодорожной в частности. В условиях ограниченного пространства между горными массивами и Черноморским побережьем ключевым решением становится прокладка автодорожных магистралей в горной местности.

В настоящее время разрабатывается масштабный инфраструктурный проект с рабочим названием «Южный кластер» протяженностью 152,5 км (рис. 1).



Рис. 1. Схема проекта автодорожной магистрали «Южный кластер» [3]

Трасса пройдет по уникальной схеме:

- начальный участок от М-4 «Дон» (район Горячего Ключа) через горный перевал до Туапсе;
- прибрежный сегмент — далее трассу предполагается проложить вдоль Черноморского побережья до аэропорта Адлер;
- дополнительная ветка от города Горячий Ключ до села Агой [3].

Проект предусматривает следующие технические особенности:

- прокладка трассы в сложных инженерно-геологических условиях (малопрочные полускальные грунты, обводненные зоны);
- высокая сейсмичность региона (до 9 баллов);
- сохранение экосистемы Черноморского побережья.

Реализация проекта позволит:

- увеличить пропускную способность транспортной сети региона на 40–45 %;
- сократить время в пути между ключевыми точками на 30–35 %;

- обеспечить безопасность движения в сложных погодных условиях;
- снизить антропогенную нагрузку на прибрежные экосистемы.

«Южный кластер» станет образцом современного инфраструктурного строительства, сочетающего инженерные инновации с бережным отношением к уникальной природе Черноморского побережья. Опыт реализации этого проекта может быть тиражирован на других сложных участках транспортной сети России.

Для успешного решения этих задач критически важен опыт, полученный при строительстве Дублера Курортного проспекта — ключевого олимпийского инфраструктурного объекта, включавшего 15 автодорожных тоннелей общей длиной 13 км.

Схема расположения трассы представлена на рис. 2. Общие характеристики тоннелей приведены в табл. 1.

Все тоннели сооружались горным способом. Различные вариации уступных методов строительства тоннелей Дублера Курортного про-

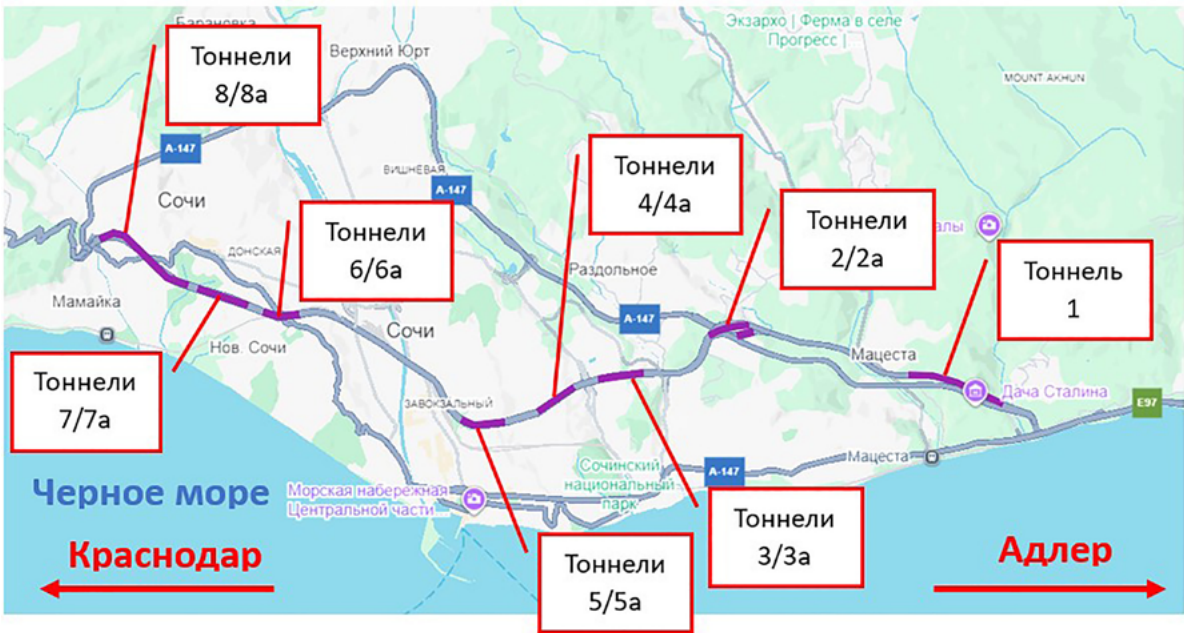


Рис. 2. Схема Дублера Курортного проспекта в Центральном районе г. Сочи, построенного к XXII зимним Олимпийским играм

Таблица 1. Автодорожные тоннели Дублера Курортного проспекта

№ тоннеля	Длина, м	Число полос	Способ строительства
1	1472,5	2 · 3,75 м	Встречными забоями способом опертого свода в три уступа
2, 2а	672,0		
	259,2		
3, 3а	660,8		Встречными забоями способом опертого свода в два уступа
	683,5		
4, 4а	668,4		Встречными забоями способом опертого свода в три уступа
	669,4		
5, 5а	670,5		
	695,7		Встречными забоями способом опертого свода в два уступа
6, 6а	554,8		
	564,1		
7, 7а	804,2		Полным сечением с предварительным укреплением грунтового массива (ADECO-RS)
	824,2		
8, 8а	1561,9		
	1538,1		

спекта обеспечивали скорость проходки 40–60 м в месяц. Показатель зависел от:

- сложности инженерно-геологических условий;
- типа временной крепи;
- наличия или отсутствия специальных способов строительства.

Так, парные тоннели № 5/5а суммарной длиной 1365 м были пройдены за 24 месяца (57 м в месяц). Использование метода ADECO-RS при строительстве тоннелей № 8/8а позволило увеличить скорость проходки полным сечением до 80 м в месяц [5].



Рис. 3. Панорама северного портала автодорожных тоннелей № 5/5а
Дублера Курортного проспекта г. Сочи [4]

Таблица 2. Характеристики инцидентов и зоны их возникновения

Зона возникновения	Количество	Доля, %	Характерные последствия
Портальные участки	5	38	Оползневые смещения, деформации крепей
Призабойная зона	4	31	Вывалы грунта, обрушения временной крепи
Участки сопряжения	3	23	Трещинообразование в обделке
В тоннеле	1	8	Локальные просадки

В ходе сооружения тоннелей по трассе Дублера Курортного проспекта было зафиксировано 13 аварийных инцидентов (табл. 2).

Основными причинами инцидентов на портальных участках являются сложные геологические условия. Большинство порталов расположены в зонах активных оползней, устойчивость которых зависит от наличия водоносных прослоев в глинистых грунтах. Сложность этих условий отягощается технологическими нарушениями при строительстве [6, 7]. В частности, в четырех случаях из пяти сползание склона вызвано преждевременной подрезкой склонов и несоблюдением проектных решений по анкерному креплению откосов предпортальных выемок. Немаловажной проблемой является и отсутствие

временного водоотведения. Гидродинамический выпор грунта являлся причиной возникновения оползней в трех случаях из пяти. Типичный сценарий развития аварийной ситуации, вызванный обводнением грунта, следующий. Скрытое насыщение устойчивого откоса грунтовыми водами (зачастую вызванное стихийным устройством несанкционированных систем водоотведения городской застройки). Процесс развития оползня составляет до 2–5 см/час. Эти изменения приводят к развитию глубины зоны разрушения до трех диаметров тоннеля. Вышеуказанные процессы отражаются на устойчивости основания порталов и вызывают размягчение контакта между грунтом и крепью, снижение адгезии набрызгбетона на 40–60 % и, как следствие, создают опасность



Рис. 4. Проходка и крепление калотты автодорожного тоннеля № 5
Дублера Курортного проспекта г. Сочи (фото: Е. А. Ермнина)



Рис. 5. Общий вид стройплощадки северного портала строительства автодорожных тоннелей
№ 6/6а Дублера Курортного проспекта г. Сочи (фото: Е. А. Ермнина)



Рис. 6. Деформация жилого дома на порталном участке строительства автодорожных тоннелей № 8/8а Дублера Курортного проспекта в г. Сочи [8]

Таблица 3. Последствия и ущерб от инцидентов на порталных участках

Параметр	Среднее значение	Максимальные показатели
Смещение портала	12–18 см	35 см (тоннель № 4а)
Время восстановления	14–21 день	47 дней
Доп. затраты в ценах 2014 г.	8–12 млн руб.	28 млн руб.



Рис. 7. Обрушение забоя при строительстве автодорожного тоннеля № 2 Дублера Курортного проспекта в г. Сочи (фото: Е. А. Ермнина)



Рис. 8. Воронка обрушения на северном портале автодорожного тоннеля № 2 Дублера Курортного проспекта в г. Сочи, обусловленная прорывом напорного канализационного коллектора (фото: Е. А. Ермолина)

Таблица 4. Последствия и ущерб от инцидентов в призабойной зоне

Параметр	Средние значения	Максимальные показатели
Объем вывала	8–12 м ³	25 м ³ (тоннель № 6а)
Время простоя	3–5 дней	11 дней
Дополнительные затраты в ценах 2014 г.	4–6 млн руб.	15 млн руб.

обрушения контура выработки. Последствия и ущерб приведены в табл. 3.

Анализ инцидентов в призабойной зоне тоннелей (4 инцидента — 31 % от общего количества) показал, что основными типами разрушений являются внезапные вывалы грунта (3 случая) и обрушение временной крепи (1 случай). Все инциденты произошли в 5–15 м от забоя. Основными причинами возникновения вывалов являются наличие песчаных линз в глинистых грунтах (в 75 % случаев) и переувлажнение мас-

сива в кровле выработки [9]. В ходе ликвидации последствий аварийных ситуаций был выявлен ряд нарушений технологического характера. Установлено превышение допустимого отставания крепи ($>1,2$ пролета выработки), соответствие плотности анкерного поля ($<0,8$ анкеров/м²), применение набрызгбетона классом ниже В20. Последствия инцидентов приведены в табл. 4.

Анализ трещинообразования в обделке на участках сопряжения тоннелей. Зафиксировано три случая образования трещин: два случая с рас-

Таблица 5. Объемы работ и ущерб от локальной просадки тоннеля

Параметр	Значение
Выемка поврежденного грунта	28 м ³
Цементация основания	32 м ³
Устройство 9 буроинъекционных свай	10 м ³
Восстановление обделки	6 м ³
Сроки ликвидации	37 дней
Затраты	14,7 млн руб.
Снижение несущей способности	12 % → восстановлено до 95 %

крытием радиальных трещин до 8 мм и один случай с кольцевым раскрытием трещины до 12 мм. Обозначенные дефекты зафиксированы в стыках тоннельных секций и в зоне примыкания к порталу. Причинами возникновения трещин являются недостаточная жесткость стыковых узлов, перепад толщин обделки (от 35 до 25 см), преждевременная нагрузка на недозревший бетон.

Анализ инцидента с локальными просадками в тоннеле. Единственный случай зафиксирован в тоннеле № 7 между пикетами 145–148 при глубине заложения данного участка 22 м от поверхности. Выявлена просадка тоннельной обделки до 9 см. Причиной возникновения осадок стала карстовая полость диаметром 1,8 м в известняках. Для ликвидации полости было произведено нагнетание 28 м³ цементного раствора, устройство 9 буроинъекционных свай (Ø 300 мм, $L = 15$ м). Внутри выработки выполнен монтаж стальной арочной конструкции (профиль 20 ШС) и дополнительный слой набрызгбетона В30 толщиной 12 мм. Последствия данного инцидента вызвали необходимость внедрения системы волоконно-оптического контроля и ежемесячного геодезического мониторинга. Последствия инцидента приведены в табл. 5.

Заключение

Анализ причин аварий позволяет лучше понять закономерности в работе тоннельных сооружений, выявить недостатки проектных решений, разработать меры по предупреждению аварий и повысить надежность сооружений.

В контексте строительства «Южного кластера» в аналогичных инженерно-геологических условиях проведенное исследование приобретает особую значимость.

По результатам исследования выявлены следующие ключевые выводы. Наибольшие проблемы зафиксированы при разработке и креплении предпортальных выемок. Критические ситуации возникали на участках врезки тоннеля.

Экономический анализ показывает: прямые дополнительные затраты на ликвидацию аварий при строительстве дублера Курортного проспекта составили около 200 млн руб. (в ценах 2014 г.). В ценах 2025 г. эта сумма эквивалентна 450–500 млн руб., что составляет примерно 1,2 % от стоимости строительно-монтажных работ.

Несмотря на относительно небольшой процент, абсолютные значения потерь значительны, не учитывая косвенные затраты и задержки сроков реализации проекта.

Анализ также показал, что до 80 % аварийных ситуаций можно было предотвратить при условии внедрения современных систем мониторинга (лидар, георадар, аэрофотосъемка, волоконно-оптический контроль) и строгого соблюдения проектных решений на всех этапах строительства.

В связи с этим рекомендуется:

1. Разработать и внедрить специализированный свод правил (СП) «Мониторинг технического состояния и управление рисками при строительстве и эксплуатации тоннелей». Доку-

мент должен включать обязательные требования к мониторингу, применению современных методов контроля и управлению рисками на всех этапах жизненного цикла тоннельных сооружений.

2. Включить в состав проектной документации обязательный раздел по оценке рисков аварийных ситуаций и их экономических последствий. Раздел должен содержать анализ прямых и косвенных затрат, а также сравнение с расходами на внедрение превентивных мер.

Проведенная работа и полученные результаты подчеркивают экономическую и инженерную целесообразность внедрения современных технологий мониторинга и совершенствования нормативной базы. Это необходимо для повышения надежности и безопасности тоннельных сооружений, особенно при реализации масштабных инфраструктурных проектов в сложных инженерно-геологических условиях.

Список источников

1. Стройпроект. Три десятилетия. 1990–2020. — URL: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mld1j1pbdyk7vnu2hu/Книга%20к%2030-летию.pdf> (дата обращения: 15.06.2025).
2. Ермонин Е. А. Использование β -метода при расчете тоннелей, сооружаемых горным способом / Е. А. Ермонин. — 2020. — URL: <https://geoinfo.ru/product/ermonin-evgenij-alekseevich/ispolzovanie-metoda-pri-raschete-tonnelej-sooruzhaemyh-gornym-sposobom-43544.shtml> (дата обращения: 15.06.2025).
3. Ведомости. — URL: <https://www.vedomosti.ru/realty/articles/2018/08/02/777065-krasnodarskom-krae-doroga-moryu> (дата обращения: 15.06.2025).
4. ФКУ Упрдор «Черноморье». — URL: <https://chnm.rosavtodor.gov.ru/departament/press-center/novosti/672181> (дата обращения: 15.06.2025).
5. Lunardi P. Full-face excavation in difficult ground / P. Lunardi, G. Barla // *Journal of Geomechanik und Tunnelbau*. — 2014. — Vol. 7. — Iss. 5. — Pp. 461–468. — DOI: 10.1002/geot.201400037. — URL: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (дата обращения: 15.06.2025).
6. Куликова Е. Ю. Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений / Е. Ю. Куликова, А. Г. Полянкин, А. М. Поткина // *Записки Горного института*. — 2023. — Т. 264. — С. 895–905.
7. Кауфман, Л. Л. Опыт оценки рисков подземного строительства / Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысыков, К. И. Заполова, И. Ж. Сирачев // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. — 2010. — № 32. — С. 55–60. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-otsenki-riskov-podzemnogo-stroitelstva/viewer> (дата обращения: 15.06.2025).
8. Livejournal. — URL: <https://fotoserg.livejournal.com/67057.html> (дата обращения: 15.06.2025).
9. Proprenter M. Risk Management in Tunnelling — A Joint Approach of all Involved / M. Proprenter, G. Lenz // *ITA Library*. — URL: https://ic-group.org/fileadmin/Magazin_PDFs/2018_WTC_Risk_Management_PROPRENTER_LENZ.pdf (дата обращения: 15.06.2025).

Дата поступления: 17.08.2025

Решение о публикации: 03.10.2025

Контактная информация:

КАВКАЗСКИЙ Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доц.; kavkazskiy_vn@mail.ru
АНДРЕЕВА Людмила Александровна — д-р техн. наук; andreeva4you@yandex.ru
ЕРМОНИН Евгений Алесеевич — аспирант; eermonin@bk.ru

Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the Town of Sochi

V. N. Kavkazsky¹, E. A. Ermonin¹, L. A. Andreeva²

¹Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Branch FSBI “TsNIIP Minstroy Russia”, 29, Vernadsky pr., Moscow, 119331, Russian Federation

For citation: Kavkazsky V. N., Ermonin E. A., Andreeva L. A. Analysis of Emergency Situations During the Construction of Road Tunnels by Mining Methods in the Engineering-Geological Conditions of the town of Sochi // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 4, pp. 947–957. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-4-947-957

Summary

Purpose: To generalize and classify the risks that arose during the construction of the Kurortny Prospekt bypass, a key Olympic infrastructure facility. It included 15 road tunnels with a total length of 13 km. **Methods:** Theoretical studies of the previously completed fieldwork, fact-finding and verification, systematisation, followed by identification of correlations, and determination of cause-and-effect relationships. **Results:** This analysis will provide a comprehensive overview of the risks and their causes associated with the design of tunnels excavated by mining methods along the Black Sea coast of Krasnodar region. This paper examines major emergencies stemming from the specific engineering and geological conditions present in a particular area. **Practical significance:** The main gaps in the regulatory documentation have been identified.

Keywords: Road tunnel, mining method, risks, tunnel boring, tunnel design.

References

1. *Stroyproekt. Tri desyatiletiya. 1990–2020* [Construction project. Thirty years. 1990–2020]. Available at: <https://www.stpr.ru/upload/iblock/020/zcmb98m54647mljd1j1pb-dyk7vnuv2hu/Книга%20к%2030-летию.pdf> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
2. Ermonin E. A. *Ispol'zovanie β -metoda pri raschete tonneley, sooruzhaemykh gornym sposobom* [Using the β -method in calculating tunnels constructed by mining method]. 2020. Available at: <https://geoinfo.ru/product/ermonin-evgenij-alekseevich/ispolzovanie-metoda-pri-raschete-tonnelej-sooruzhaemykh-gornym-sposobom-43544.shtml> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
3. *Vedomosti*. Available at: <https://www.vedomosti.ru/realty/articles/2018/08/02/777065-krasnodarskom-krae-doroga-moryu> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
4. *FKU Uprдор “Chernomor’e”* [Federal Public Institution Road Directorate “Black Sea”]. Available at: <https://chnm.rosavtodor.gov.ru/departament/press-center/novosti/672181> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)
5. Lunardi P., Barla G. Full-face excavation in difficult ground. *Journal of Geomechanik und Tunnelbau*, 2014, vol. 7, Iss. 5, pp. 461–468. DOI: 10.1002/geot.201400037. Available at: https://www.researchgate.net/publication/266378833_Full_face_excavation_in_difficult_ground (accessed: June 15, 2025).
6. Kulikova E. Yu., Polyankin A. G., Potokina A. M. Spetsifika upravleniya geotekhnicheskimi riskami pri proektirovanii podzemnykh sooruzheniy [Specific features of geotechnical risk management in underground construction design]. *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute]. 2023, vol. 264, pp. 895–905. (In Russian)

7. Kaufman L. L., Lysikov B. A., Zapolova K. I., Sirachev I. Zh. Opyt otsenki riskov podzemnogo stroitel'stva [Experience in assessing underground construction risks]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo natsional'nogo universitetu zaliznichnogo transportu im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]. 2010, Iss. 32, pp. 55–60. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-otsenki-riskov-podzemnogo-stroitelstva/viewer> (accessed: June 15, 2025). (In Russian)

8. *Livejournal*. Available at: <https://fotoserg.livejournal.com/67057.html> (accessed: June 15, 2025).

9. Proprenter M., Lenz G. Risk Management in Tunneling — A Joint Approach of all Involved. ITA Library.

Available at: https://ic-group.org/fileadmin/Magazin_PDFs/2018_WTC_Risk_Management_PROPRENTER_LENZ.pdf (accessed: June 15, 2025).

Received: August 17, 2025

Accepted: October 03, 2025

Author's information:

Vladimir N. KAVKAZSKY — PhD in Engineering, Associate Professor; kavkazskiy_vn@mail.ru

Ludmila A. ANDREEVA — Dr. Sci. in Engineering; andreeva4you@yandex.ru

Evgeniy A. ERMONIN — Postgraduate Student; eermonin@bk.ru