Оригинальная статья *Original Paper*

УДК 622.281: 622.83 © Е.С. Ильина✉[1] А.С. Федянин[2], В.А. Карасев[3], 2026

[1] ООО «РАНК 2», 650000, г. Кемерово, Россия
[2] НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
[3] ООО НИЦ-ИПГП «РАНК», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: ilyina@rank42.ru

UDC 622.281: 622.83 © E.S. Ilina✉[1], A.S. Fedyanin[2], V.A. Karasev[3], 2026

[1] RANK 2 LLC, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[2] National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
[3] RANK Research Centre-Institute for Designing Mining Operations LLC, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: ilyina@rank42.ru

Интегрированная риск-ориентированная модель для управления жизненным циклом подземных горных выработок

Integrated risk-oriented model for managing the lifecycle of underground mining workings

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-1-56-60

ИЛЬИНА Е.С.
Заместитель генерального директора по развитию ООО «РАНК 2», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: ilyina@rank42.ru

ФЕДЯНИН А.С.
PhD, доцент, эксперт научного проекта Горного института НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия

КАРАСЕВ В.А.
Канд. техн. наук, доцент, ведущий специалист по инновационному развитию ООО НИЦ-ИПГП «РАНК», 650000, г. Кемерово, Россия

В статье рассмотрен современный риск-ориентированный подход, позволяющий перейти от пассивного реагирования к проактивному предотвращению аварийных ситуаций при креплении и поддержании подземных горных выработок, основанный на создании универсальной вероятностной модели для оценки и агрегации геотехнических рисков в единую риск-ориентированную систему, позволяющую не только прогнозировать неблагоприятные события, но и снижать совокупную стоимость владения (TCO) объектом. Представлен обзор научных подходов к управлению рисками и мониторингу приконтурного массива горных выработок. Рассмотрена реализованная комплексная программа по креплению и мониторингу состояния целевой выработки на одном из горнодобывающих предприятий с привлечением ООО «РАНК 2». Практическая часть статьи содержит анализ кейса внедрения риск-ориентированной системы в условиях реального предприятия на основе показаний системы АСДК «ЭЛМОН». Итогом внедрения риск-ориентированной модели для управления жизненным циклом горной выработки является значительный экономический эффект, выраженный в общей оценке снижения TCO в совокупной стоимости владения выработки в среднем на 22-25%.

Ключевые слова: *АСДК «Элмон», временные ряды, крепление горных выработок, индекс Q, индикатор риска, мониторинг, проактивное управление рисками, рейтинг RMR, риск-ориентированный подход.*

Для цитирования: Ильина Е.С., Федянин А.С., Карасев В.А. Интегрированная риск-ориентированная модель для управления жизненным циклом подземных горных выработок // Уголь. 2026;(1):56-60. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-56-60.

Abstract

The article discusses a modern risk-oriented approach that allows for a transition from passive response to proactive prevention of accidents in *the reinforcement and maintenance of underground mine workings. This approach is based on the creation of a universal probabilistic model for assessing and aggregating geotechnical risks into a single risk-oriented system that not only predicts adverse events but also reduces the total cost of ownership (TCO) of the facility. The article presents an overview of scientific approaches to risk management and monitoring of the surrounding massif of mine workings. It also discusses the implementation of a comprehensive program for securing and monitoring the condition of a target mine workings at a mining enterprise with the involvement of RANK 2 LLC. The practical part of the article provides an analysis of the implementation of a risk-oriented system at a real mining enterprise based on the data from the Elmon ADCK system. The implementation of a risk-based model for mine workings lifecycle management resulted in a significant economic effect, expressed in a total assessment of a 22-25% reduction in TCO in the total cost of ownership of mine workings.*

Keywords

Elmon ADCK, time series, mine workings support, Q index, risk indicator, monitoring, proactive risk management, RMR rating, risk-based approach.

For citation

Ilina E.S., Fedyanin A.S., Karasev V.A. Integrated risk-oriented model for managing the lifecycle of underground mining workings. *Ugol'*. 2026;(1):56-60. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-56-60.

ВВЕДЕНИЕ

Подземные горные выработки представляют собой сложные объекты, жизненный цикл которых требует обеспечения безаварийности и экономической целесообразности на всех стадиях – от проектирования до ликвидации. Ключом к достижению этой цели является переход от реагирования на инциденты к проактивному управлению рисками. В данной статье рассматривается современный подход, основанный на создании универсальной вероятностной модели для оценки и агрегации разнородных рисков.

Цель работы – продемонстрировать, как интеграция данных мониторинга и экспертных оценок в единую риск-ориентированную систему позволяет не только прогнозировать неблагоприятные события, но и снижать совокупную стоимость владения (TCO) объектом. Практическая часть статьи содержит анализ кейса внедрения такой системы в условиях реального предприятия.

ЧАСТЬ 1: ОБЗОР НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ РИСКАМИ И МОНИТОРИНГУ ВЫРАБОТОК

Актуальность риск-менеджмента в горной отрасли

Согласно Федеральному закону № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» подземные шахты классифицируются как ОПО. Это обусловлено комплексом взаимосвязанных процессов, способных привести к авариям и травматизму. Статистика Ростехнадзора свидетельствует, что 35-40% несчастных случаев при подземных работах происходят из-за обрушений пород кровли и боков, что напрямую связывает надежность крепления выработок с производственной безопасностью. Риски на горнодобывающем предприятии вызывают аварии, травмирование персонала и репутационный ущерб, что в конечном итоге трансформируются в финансовые потери, влияя на экономические показатели.

Совершенствование подходов к управлению рисками направлено на преодоление автокорреляции рисков, когда один опасный фактор усиливает другой. Оптимальный эффект достигается при интеграции количественных и качественных показателей в единую систему оценки [1]. Традиционные методы, такие как тендерные закупки, не всегда обеспечивают оптимальный результат из-за возможных задержек, низкого качества работ, связанных с этим простоем, что приводит не к экономии, а к росту убытков и упущенной выгоде.

Методология интегрированной оценки рисков

Основная сложность проактивного управления рисками заключается в гетерогенности данных мониторинга состояния горного массива.

Данные включают:

– Количественные показатели (смещение контура выработки в мм) [2].

– Качественные (экспертные) оценки (рейтинги по методикам надзорных органов) [3, 4, 5].

– Событийные данные (частота инцидентов) [6, 7].

Для их интеграции учеными НИТУ МИСИС (А.С. Федянин, В.А. Еременко) предложен вероятностно-статистический подход, позволяющий агрегировать риски от разнородных процессов в рамках единой риск-ориентированной модели.

– Прогнозирование на основе временных рядов. Принцип метода – стандартизация гетерогенных данных через их трансформацию во временные ряды. На их основе вычисляется универсальный нормированный индикатор риска – вероятность (*Pfail*) возникновения нештатной ситуации за определенный промежуток времени. Это позволяет абстрагироваться от физической природы параметров и сравнивать риски от разных процессов. Динамика параметров (например, смещений) может описываться линейным или экспоненциальным трендом. Результат модели – прогноз достижения критических смещений, определяющий необходимость превентивных мероприятий [8, 9, 10, 11].

– Прогнозирование на основе экспертных данных. Метод использует рейтинговые показатели, включающие геотехнические и геометрические параметры, и адаптируется к конкретным условиям. Он служит инструментом для применения стандартных систем классификации (индексы Q, RMR). Результатом является оценка вероятности аварии на основе ретроспективной частоты отказов, рассчитанной для выработок со схожими рейтингами.

– Расчет вероятности для статистической выборки. Метод базируется на историческом анализе частоты аварий. Использование доверительных интервалов позволяет оценить, с заданной надежностью уровень риска (низкий/средний/высокий) возникновения инцидента в будущем периоде (например, в следующем полугодии), что формирует основу для планирования профилактических работ.

Фреймворк для расчета совокупной стоимости владения (TCO)

Снижение TCO горной выработки является ключевым экономическим результатом внедрения риск-ориентированной модели. Оценка достигается за счет анализа вклада каждого управляемого фактора [12]:

1. Выбор оптимальной технологии крепления: Снижение капитальных и эксплуатационных затрат на материалы и работы за счет точного инжиниринга, минимизирующего избыточный запас прочности.

2. Сокращение времени простоя: Устранение или минимизация простоев, вызванных аварийными ситуациями и внеплановыми ремонтами. Экономический эффект (Э) рассчитывается как: $Э = B \times C$, где В – количество сэкономленных дней простоя, C – средняя стоимость потерь в день (для угольной шахты может составлять от 16,7 до 50 млн руб., исходя из указанного в источниках диапазона 0,5-1,5 млрд руб. в месяц).

3. Повышение технологичности: Снижение трудоемкости и продолжительности работ по креплению и поддержанию, что увеличивает объем добычи.

4. Инвестиции в обучение персонала: Снижение количества инцидентов из-за человеческого фактора и повышение эффективности работ.

5. Снижение страховых премий и штрафов: Демонстрация действенной системы управления рисками может положительно влиять на стоимость страховки и уменьшать риски предписаний надзорных органов.

Совокупный экономический эффект формируется как сумма положительных вкладов по всем указанным направлениям за вычетом инвестиций в систему мониторинга и превентивные мероприятия [13].

ЧАСТЬ 2: ПРАКТИЧЕСКИЙ КЕЙС ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

В качестве примера реализации описанных подходов рассмотрен проект на одном из горнодобывающих предприятий с привлечением ООО «РАНК 2».

Описание проекта и внедряемых решений

В рамках проекта была реализована комплексная программа по креплению и мониторингу состояния целевой выработки, включавшая следующие этапы [14, 15, 16]:

1. Технический аудит исходного состояния выработки.

2. Разработка инженерного решения по креплению, балансирующего требования безопасности, технологичности и экономики.

3. Производство и поставка анкерных систем с параметрами, оптимизированными под конкретные условия выработки.

4 .Выполнение работ по креплению силами квалифицированных специалистов.

5. Организация непрерывного мониторинга с использованием автоматизированной системы деформационного контроля (АСДК «ЭЛМОН»), способной работать в режиме 24/7 и фиксировать смещения в реальном времени.

6. Проведение обучения инженерно-технических работников и рабочих предприятия.

7. Страхование подрядной организацией своей гражданской ответственности.

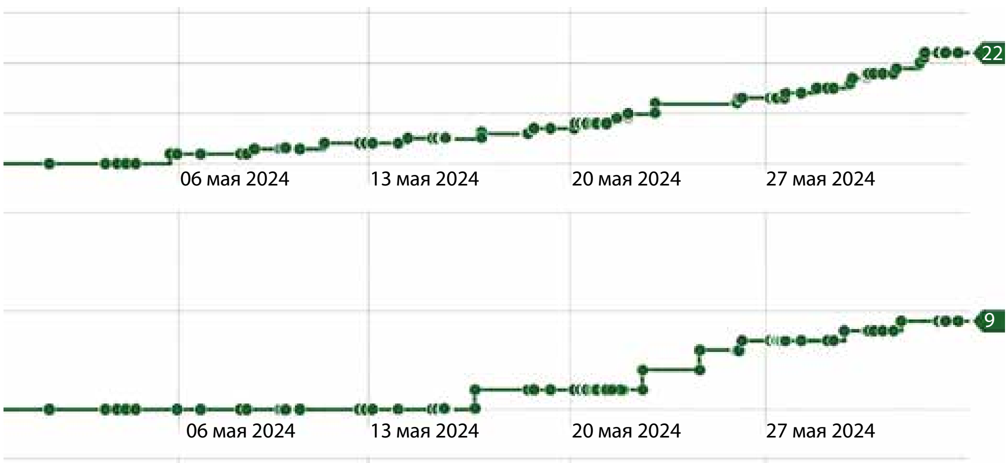
Ключевым инструментом мониторинга стала Автоматическая система деформационного контроля «Элмон» (АСДК «Элмон»), которая, наряду с традиционными механическими реперами (РГ2, РГ3), обеспечила получение ряда данных о смещениях контура выработки (*см. рисунок*).

Накопленные архивные данные стали основой для анализа трендов и прогнозирования [17].

Использование данных датчика АСДК «Элмон» для прогнозирования на основе временных рядов

Датчик АСДК «Элмон», будучи автоматизированной системой деформационного контроля, предоставляет идеальные данные для построения прогнозных моделей на основе временных рядов. Его применение в рамках описанной методологии включает следующие ключевые шаги:

– формирование первичного временного ряда для каждого контролируемого участка выработки;



Пример графика показаний системы АСДК «Элмон», установленной в зоне опорного давления. Зафиксированные смещения позволяют строить тренды и прогнозы

Example of the readings graph of the Elmon ADCK system installed in the reference pressure zone. The recorded displacements allow for the construction of trends and forecasts

– расчет производных индикаторов и трендов (скорость смещения, ускорение смещения). При этом рост ускорения – критический сигнал о переходе к нестабильному состоянию;

– стандартизация и расчет универсального индикатора риска (Pfail), при котором ожидается переход выработки в критическое состояние;

– построение прогнозной модели: на основе исторических данных о связи между динамикой параметров (тренд, ускорение) и последующими событиями (требовалось вмешательство / происходило обрушение) строится вероятностная модель;

– расчет $Pfail$: для текущего момента t на основе выявленного тренда и его параметров модель вычисляет вероятность $Pfail(t+\Delta t)$ – вероятность достижения критического смещения в течение следующего прогнозного интервала Δt (например, в ближайшие 72 часа).

Практическое применение для проактивного управления заключается в том, что результат работы модели на основе данных АСДК «Элмон» используется следующим образом:

– зеленая зона: $Pfail < 0,1$ – режим нормальной эксплуатации, плановый мониторинг;

– желтая зона: $0,1 \leq Pfail < 0,5$ – усиленный режим контроля, планирование превентивных работ в ближайшей перспективе;

– красная зона: $Pfail \geq 0,5$ – выдача автоматического оповещения о необходимости немедленных превентивных мероприятий (дополнительное крепление, вывод людей, остановка работ).

Пример конкретного сценария:

1. Датчики АСДК «Элмон» на участке № 5 фиксируют рост скорости смещения с 0,5 до 2,0 мм/сут. за неделю.

2. Анализ показывает, что тренд лучше описывается экспоненциальной моделью.

3. Прогнозная модель рассчитывает, что с вероятностью Pfail = 0,85 через 14 суток смещение превысит критический порог в 50 мм.

4. Система автоматически генерирует предупреждение для диспетчера и начальника участка с рекомендацией провести усиление крепи в течение ближайших двух суток.

5. После проведения работ и стабилизации показаний система переводит участок в «зеленую» зону, фиксируя успешность превентивного воздействия.

Таким образом, датчик АСДК «Элмон» выполняет роль ключевого поставщика высокочастотных количественных данных. Его ценность раскрывается не просто в факте регистрации смещений, а в интеграции его данных в алгоритмы анализа временных рядов, что позволяет трансформировать сырые показания в количественную оценку будущего риска и конкретные управленческие решения.

Анализ достигнутых результатов и трудностей

Результаты:

– Повышение безопасности: на протяжении 24 месяцев эксплуатации выработки после внедрения системы не было зафиксировано ни одного инцидента, связанного с обрушением или значительной деформацией крепи. Количество тревожных событий, требующих немедленного внепланового вмешательства, сократилось на 70%.

– Экономический эффект: за счет исключения аварийных простоев, связанных с ремонтом выработки, была достигнута экономия, оцененная в порядке 380 млн рублей за двухлетний период. Сокращение сроков плановых работ по поддержанию выработки на 15% высвободило дополнительные производственные мощности. Общая оценка снижения ТСО по данному объекту составила около 22-25% от прогнозных затрат при традиционном сценарии.

– Повышение управляемости: внедрение количественных критериев для принятия решений о превентивных мероприятиях позволило перейти от регламентного к фактически обоснованному обслуживанию.

Возникшие трудности:

– Интеграция данных: первоначальное сопряжение новой АСДК с существующими на предприятии системами диспетчеризации потребовало дополнительных временных и финансовых затрат.

– Квалификация персонала: потребовались дополнительные циклы обучения для формирования у эксплуатационного персонала навыков интерпретации данных вероятностной модели, а не только первичных показаний датчиков.

– «Сопротивление» традициям: внедрение прогнозного подхода встретило первоначальное недоверие со стороны части ИТР, привыкшей работать по нормативным графикам осмотров, что потребовало этапа активного пилотирования и демонстрации эффективности модели на исторических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная интегрированная риск-ориентированная модель, сочетающая методологию агрегации гетерогенных данных в единый вероятностный показатель и комплекс практических инжиниринговых решений, доказала свою эффективность на практике. Она позволяет перейти от пассивного реагирования к проактивному предотвращению аварийных ситуаций в подземных горных выработках.

Ключевым итогом внедрения является снижение совокупной стоимости владения на протяжении всего периода жизнедеятельности выработки, получив значительную экономию средств (в среднем на 30%) за счет:

– выбора оптимальной технологии крепления и поддержания горных выработок;

– максимального снижения времени простоя выработок из-за увеличения уровня безопасности ведения горных работ (недополученная прибыль за месяц при подземной добыче угля от простоев выработок варьируется от 500 млн руб. до 1,5 млрд руб.);

– увеличения уровня технологичности крепления и поддержания выработок;

– постоянного совершенствования и повышения профессионального квалификационного уровня рабочих и управленческого персонала посредством дополнительного обучения на любых этапах комплексного подхода к креплению и поддержанию горных выработок.

Список литературы • References

1. Гусева И.Б., Кудряшова О.В. Исследование подходов к оценке рисков НИОКР // Наука в центральной России. 2013. № 4. С. 94-96.
Guseva I.B., Kudryashova O.V. Research of Approaches to Assessing R&D Risks. *Nauka v tsentralnoj Rossii*. 2013;(4):94-96. (In Russ.).
2. Чудинов П.Ю., Галкин В.И., Пономарева И.Н. Оценка характера насыщения продуктивных пластов на основе анализа геологических параметров // Недропользование. 2025. Т. 25. № 2. С. 86-94.
Chudinov P.Yu., Galkin V.I., Ponomareva I.N. Assessment of the nature of saturation of productive formations based on the analysis of geological parameters. *Nedropolzovanie*. 2025;25(2):86-94. (In Russ.).
3. Khakzad N., Khakzad S., Khan F. Probabilistic risk assessment of major accidents: application to offshore blowouts in the Gulf of Mexico. *Natural Hazards*. 2014;(74):1759-1771.
4. Kokangül A., Polat U., Dağsuyu C. A new approximation for risk assessment using the AHP and Fine Kinney methodologies. *Safety Science*. 2017;(91):24-32.
5. Еременко В.А., Лушников В.Н., Косырева М.А. Метод рейтинговой оценки устойчивости подземных горных выработок R_m // Горный журнал. 2025. № 1. С. 9-19.
Eremenko V.A., Lushnikov V.N., Kosyreva M.A. The R_m Rating Method for Assessing the Stability of Underground Mine Workings. *Gornyj zhurnal*. 2025;(1): 9-19. (In Russ.).
6. Чунюк Д.Ю., Магомедов М.М. Снижение геотехнического риска и реализация мер по повышению безопасности проектирования и строительства подземных сооружений // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 381-383.
Chunyuk D.Yu., Magomedov M.M. Reducing Geotechnical Risk and Implementing Measures to Improve the Safety of Design and Construction of Underground Structures. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2014;(9-10):381-383. (In Russ.).
7. Hoej N.P. Risk and Safety Considerations at Different Project Phases. Safety, risk, and reliability – trends in engineering. International Conference. Malta, 2001, pp. 1-8.
8. Contreras L.-F., Hormazabal E., Ledezma R., Arellano M. Geotechnical risk analysis for the closure alternatives of the Chuquicamata open pit. MGR 2019: Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019, pp. 373-388.
9. Mishra R., Uotinen L., Rinne M. A Bayesian network approach for geotechnical risk assessment in underground mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2021; 121(6): 471-477.
10. Rusek J., Baraniak B., Karpiński Z. Bayesian predictive system for assessing the damage intensity of residential buildings located in mining areas. *Scientific Reports*. 2025;(15):82038.
11. Lan M., Tang Y., Sun X. Hybrid Bayesian network-based landslide risk assessment and early warning for storage tanks in sensitive industrial installations. *Expert Systems with Applications*. 2021;(168):114303.
12. Федянин А.С. Стратегия организации контроля и управления технико-производственными рисками горнодобывающих предприятий // Горный журнал. 2022. № 1. С. 11-15.
Fedyanin A.S. Strategy of organization of control and management of technical and production risks of mining enterprises. *Gornyj zhurnal*. 2022;(1):11-15. (In Russ.).
13. Федосова Р.Н., Крюкова О.Г. Управление рисками промышленного предприятия: опыт и рекомендации. М.: ЗАО «Издательство «Экономика», 2008. 125 с.
14. Самматов В.А., Карасев В.А. Технологические решения, повышающие устойчивость крепления горных пород // Уголь 2025;(5): 22-26. URL: https://ugolinfo.ru/Jour/052025.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
Sammatov V.A., Karasev V.A. Technological solutions that enhance rock stability. *Ugol'*. 2025;(5):22-26. Available at: https://ugolinfo.ru/Jour/052025.pdf (accessed 15.12.2025). (In Russ.).
15. Голавинский В.Н., Ломакин А.Ю., Карасев В.А. Опытно-конструкторское внедрение (ОПИ) активных и комбинированных (пассивных) типов крепления на участках развития опорного давления в горных выработках АО «ТНК «Казхром» // Уголь. 2025;(6): 62-68. URL: https://ugolinfo.ru/Jour/062025.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
Golavinskiy V.N., Lomakin A.Yu., Karasev V.A. Pilot implementation of active and combined (passive) types of rock support in the bearing pressureareas in mine workings of TNC Kazchrome JSC. *Ugol'*. 2025;(6):62-68. Available at: https://ugolinfo.ru/Jour/062025.pdf (accessed 15.12.2025). (In Russ.).
16. Ильина Е.С. Управление рисками – гарантия бесперебойной и безопасной работы шахты // Уголь. 2023;(8): 59-61. URL: https://ugolinfo.ru/Jour/082023.pdf (дата обращения: 15.12.2025).
Ilina E.S. Risk management – an assurance of uninterrupted and safe operation of mine. *Ugol'*. 2023;(8):59-61. Available at: https://ugolinfo.ru/Jour/082023.pdf (accessed 15.12.2025). (In Russ.).
17. Носков В.А., Бадтиев Б.П., Павлович А.А. Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ // Горный журнал. 2020. № 2. С. 51-55.
Noskov V.A., Badtiev B.P., Pavlovich A.A. Risk Management in Open-Pit Mining. *Gornyj zhurnal*. 2020;(2):51-55. (In Russ.).

Authors Information

Ilina E.S. – Deputy Director General for Development, RANK 2 LLC, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ilyina@rank42.ru

Fedyanin A.S. – PhD, Associate Professor, Expert of the scientific project of the Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Karasev V.A. – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Specialist in Innovative Development, RANK Research Centre-Institute for Designing Mining Operations LLC, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.12.2025
Поступила после рецензирования: 17.12.2025
Принята к публикации: 29.12.2025

Paper info

Received December 1, 2025
Reviewed December 17, 2025
Accepted December 29, 2025