



Параметрическая оценка вероятности аварийных событий регионального масштаба при разработке легкорастворимого минерального сырья шахтным способом

Е.Р. Ковальский, Г.Б. Поспехов, А.В. Холмский, Ч.Б. Конгар-Сюрюн ✉, Н.А. Миронов

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ kongarsiuriun@gmail.com

Резюме: В статье приводятся сведения об аварийных событиях регионального масштаба при разработке легкорастворимого минерального сырья шахтным способом, а также о методологических подходах к оценке их частоты и вероятности возникновения. Аварийные события классифицируются по двум сценариям: гидрогеологическому (неконтролируемое затопление рудника с растворением пород через каналы фильтрации в водозащитной толще) и геомеханическому (масовое обрушение несущих элементов системы разработки с сейсмодинамическими проявлениями и образованием провалов на поверхности). На основе данных о более чем 340 рудниках мира выполнен ретроспективный анализ частоты аварий. Установлено, что несмотря на совершенствование технических средств мониторинга и нормативных требований удельная частота аварийных событий в последние десятилетия не снижается и держится на среднем значении 0,09, а вероятность аварии к среднему сроку службы рудника (40 лет) составляет более 0,3. Для моделирования надёжности геомеханической системы «рудник–массив» применено распределение Вейбулла с параметрами $\beta = 1,25$ и $\eta = 80$ лет, что подтверждает монотонное «старение» геомеханической системы «рудник–массив» и возрастающую со временем интенсивность отказов. На основе определенных параметров в статье сделан вывод о недостаточности традиционных нормативно-технических подходов и предложена перспектива их совершенствования путем включения вероятностных оценок рисков проектных решений.

Ключевые слова: аварийные события, легкорастворимое минеральное сырьё, подземная разработка, калийные рудники, соляные рудники, система рудник–массив, распределение Вейбулла, вероятностная оценка риска

Благодарности: Работа выполнена по государственному заданию FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов».

Для цитирования: Ковальский Е.Р., Поспехов Г.Б., Холмский А.В., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Миронов Н.А. Параметрическая оценка вероятности аварийных событий регионального масштаба при разработке легкорастворимого минерального сырья шахтным способом. *Горная промышленность*. 2026;(4S):105–112. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-105-112>

Parametric assessment of the probability of regional-scale emergency events in underground mining of readily soluble mineral raw materials

E.R. Kovalsky, G.B. Pospheov, A.V. Kholmanskiy, Ch.B. Kongar-Syuryun ✉, N.A. Mironov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ kongarsiuriun@gmail.com

Abstract: The article presents data on regional-scale emergency events in underground mining of readily soluble mineral raw materials, their consequences, and an assessment of their occurrence frequency. Emergency events are classified according to two scenarios: hydrogeological, i.e. uncontrolled mine flooding accompanied by rock dissolution through filtration channels in the water-retaining strata; and geomechanical, i.e. a large-scale collapse of load-bearing elements of the mining system, accompanied by seismodynamic manifestations and formation of day surface subsidences. A retrospective analysis of the emergency event frequency was performed based on the information on more than 340 mines worldwide. It has been established



that despite improvements in the technical monitoring tools and regulatory requirements, the specific frequency of emergency events has not decreased in recent decades and remains at an average value of 0.09, while the probability of an accident over the average mine service life (40 years) exceeds 0.3. Reliability of the 'mine-rock mass' geomechanical system was modelled using the Weibull distribution with parameters $\beta = 1.25$ and $\eta = 80$ years, which confirms the steady "aging" of the system and the failure rate increasing over time. Based on certain parameters, the authors make a conclusion that the conventional regulatory and technical approaches are insufficient and they propose a way of their improvement by incorporating probabilistic risk assessments of the design decisions.

Keywords: emergency events, readily soluble mineral raw materials, underground mining, potash mines, salt mines, mine-rock mass system, Weibull distribution, probabilistic risk assessment

Acknowledgements: This research was conducted under Government Assignment FSRW-2026-0003, "Study of the processes of integrated development of the Earth's interior and deep processing of geological resources".

For citation: Kovalsky E.R., Posphehov G.B., Kholmshiy A.V., Kongar-Syuryun Ch.B., Mironov N.A. Parametric assessment of the probability of regional-scale emergency events in underground mining of readily soluble mineral raw materials. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):105–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-105-112>

Введение

Существенная доля легкорастворимого минерально-го сырья (сильвиниты, карналлиты, галиты, полигалиты, хартзалы, в меньшей степени – трона) разрабатывается шахтным способом [1–4]. Разработка в основном ведется с применением камерной системы с удержанием кровли на жестких целиках [5, 6], как правило, без применения закладки камер в качестве конструктивного элемента системы разработки [7–9].

Исторически известно, что процессу шахтной разработки данного сырья сопутствуют риски проникновения в рудничные выработки ненасыщенных рассолов из перекрывающих или, реже, подстилающих водоносных горизонтов, и последующего растворения пород, а также риски внезапного массового обрушения целиков на больших площадях, сопровождающегося сейсмодинамическими воздействиями и образованием провалов на поверхности [10].

Так, в последние десятилетия известны случаи неконтролируемых водопритоков на рудниках, которые привели к существенному снижению или остановке добычи руды, в том числе с полной потерей запасов и инфраструктуры: Praid Salt Mine (Румыния, 2024); K1/K2 (Канада, 2021); СКРУ-2 (Россия, 2014); БКПРУ-1 (Россия, 2006). Обрушения с региональными последствиями имели место на рудниках Avery Island (США, 2020); СКРУ-2 (Россия, 1995); Solvay Trona Mine (США, 1995); Merkers (Германия, 1989). Статистика аварийных событий включает также случаи нарушения земной поверхности и/или проникновения в поверхностную экосистему засоленных вод и выброса газов на поверхность уже после окончания ведения горных работ: Rössing-Barnten (Германия, 2023); Солотвинские рудники (Украина, 2007–2008); Buggingen (Германия, 1996); Teutschenthal (Германия, 1996); Weeks Island (США, 1995).

В контексте данной статьи подобные случаи классифицируются как «аварийные события регионального масштаба» – труднопрогнозируемые, развивающиеся во времени и пространстве процессы потери геомеханической устойчивости техногенно-возмущенной части горного массива в масштабах всего шахтного поля (или его крупного, технологически обособленного блока), которые характеризуются переходом системы «рудник–массив» или её части в лавинообразную, неуправляемую стадию разрушения.

Аварийные ситуации регионального масштаба приводят систему «рудник–массив» к одному из следующих финальных состояний (или их комбинации):

а) гидрогеологический сценарий – формирование сквозного канала фильтрации в водозащитной толще (через связанную сеть дефектов или магистральную трещину) и последующее неконтролируемое затопление рудника с растворением запасов шахтного поля и вмещающих соленосных пород;

б) геомеханический сценарий – внезапное, крупномасштабное разрушение несущих элементов (целиков, потолочин) на обширной площади, сопровождающееся выделением сейсмической энергии, образованием провалов земной поверхности и разрушением поверхностных объектов, и создающее предпосылки для будущего прорыва вод.

Последствия аварийных событий регионального масштаба являются катастрофическими. Потеря запасов в результате гибели рудников наносит урон стратегической безопасности государства, сокращает потенциал его развития и лишает последующие поколения значительных объемов ценных георесурсов. Безвозвратно теряются рудничная инфраструктура и активы предприятий, снижается рыночная стоимость компаний. Происходят полномасштабные нарушения поверхности, образование воронкообразных провалов, в том числе в пределах селитебных зон [11]. Фиксируется засоление водоемов, почв и грунтовых вод [12; 13]. На ликвидацию последствий аварийных событий выделяются существенные финансовые средства, ресурсы, материалы, машино- и человекочасы. Значительные силы предприятий и организаций тратятся на длительные судебные тяжбы и разбирательства по факту аварийного события. Возрастает социальная, экологическая и экономическая нагрузка на пострадавшие регионы [14–16]. Обесценивается труд нескольких поколений производителей, проектировщиков и ученых.

Таким образом, региональные аварии на калийных и соляных рудниках по своей природе следует относить к классу так называемых «черных лебедей» (редкие, труднопредсказуемые, катастрофические), что требует наличия соответствующих риск-ориентированных подходов к их предотвращению [17]. Однако анализ аварийных событий регионального масштаба в научно-технической литературе фактически сводится к описанию исторических прецедентов и характеризуется отсутствием системности, то есть аварии представляются с точки зрения риска как обособленные события, не связанные общими вероятностными закономерностями. Очевидно, что такой подход снижает эффективность разработки адекватных мер по



оценке и митигации риска их возникновения. Ниже предложены некоторые методологические подходы, связанные, в частности, с параметрической оценкой вероятности аварийных событий на рудниках рассматриваемого типа, которые могут быть положены в основу дальнейших исследований в области анализа рисков эксплуатации калийных и соляных рудников.

Оценка частоты аварийных событий регионального масштаба

Аварийное событие может произойти на этапе строительства рудника (например, затопление шахтных стволов при их проходке), на этапе эксплуатации и в постэксплуатационный период работы рудника [18–20]. В двух последних случаях аварийные события практически всегда приобретают региональный масштаб либо являются его предпосылками – например, долговременные водопритоки в выработки, которые, как правило, либо катастрофически возрастают со временем, либо значительно снижают эффективность технологической цепочки предприятия, вплоть до неконкурентоспособного уровня.

В рамках исследований выполнено обобщение опыта эксплуатации более чем 340 крупных рудников мира (РФ, Германия, Канада, США, Польша, Великобритания, Франция, другие страны) с момента начала интенсивного развития калийной и соляной промышленности (середина XIX в.) до настоящего времени, включая рассмотрение горнотехнических и горно-геологических условий их эксплуатации, данных о сроках эксплуатации, а также сведений об аварийных событиях, если они происходили на руднике. В силу существенной разрозненности информации об аварийных событиях на рудниках рассматриваемого типа источниками агрегирования информации для выполненного обобщения являлись: статьи из рецензируемых журналов; научно-технические отчеты; монографии; архивные данные; экспертные заключения; данные из открытой печати. Всего было проанализировано порядка 50 источников (см., например [21–35]).

Случаи обрушения целиков, затоплений шахтных полей и образования провалов на поверхности после окончания отработки запасов (постэксплуатационный период) были включены в общую статистику аварийных событий, так как они являются следствием некорректных технических решений (или их отсутствия), принятых на предшествующих этапах эксплуатации и ликвидации рудников, и наносят существенный экологический ущерб. Аварии на этапе строительства рудников, напротив, не приводят к полномасштабным последствиям, поэтому они были исключены из анализа.

Анализ аварийности проводился на основе данных о рудниках, расположенных в тех регионах (областях, бассейнах, месторождениях), где была зафиксирована хотя бы одна аварийная ситуация. Таким образом, была сформирована база данных об аварийности рудников, представляющая собой выборку по регионам, уязвимым по гидрогеологическим и геомеханическим факторам, что позволило получить консервативную и статистически значимую оценку риска для условий, априорно predisposed к развитию аварий регионального масштаба.

Отдельно отметим, что рудники, восстановленные после аварии и продолжившие работу (например: авария локализована, участок изолирован, водопритоки переведены в управляемый режим, массив затампонирован, рудник осу-

шен), рассматривались как две независимые ситуации (до и после аварии) с обнулением времени наработки на отказ в год возобновления работы. С позиции теории надежности такое событие интерпретировалось как восстанавливаемый отказ, после которого система «рудник–массив» начинает новый период эксплуатации с потенциально измененными параметрами остаточной прочности. С точки зрения геомеханики такой подход обуславливался скачкообразным изменением граничных условий и перераспределением напряжений в массиве, что позволило интерпретировать такой рудник как новую геомеханическую систему. Данный прием увеличил объем статистической выборки для параметрической оценки вероятности аварийных событий и позволил корректно рассчитать частоту отказов за счет исключения завышения времени безаварийной работы.

Некоторые характерные данные по оценке аварийности на основе сформированной базы данных и описанных методологических подходов приведены в табл. 1. За весь проанализированный период аварийные события произошли в 45% рассмотренных ситуаций, т.е. пострадал практически каждый второй рудник из числа вошедших в статистику.

Таблица 1
Сводная характеристика аварийности на рудниках, разрабатывающих легкорастворимое минеральное сырье

Table 1
Summary characteristics of accidents in mines extracting readily soluble raw materials

Показатель	Значение
Всего проанализировано ситуаций	385
Всего аварийных событий на рудниках:	173
из них количество аварий в процессе эксплуатации	129
из них количество аварий после закрытия рудника	44
Безаварийные рудники (работают по настоящее время):	34
Безаварийные рудники (закрыты к настоящему времени):	178
Средний срок работы безаварийных рудников, лет	40
Средний срок от начала отработки запасов до аварийного события (в период эксплуатации), лет	33
Средний срок от закрытия рудника до аварийного события (в постэксплуатационный период), лет	20

На основе ретроспективного анализа построено распределение по временным отрезкам частоты аварийных событий, связанных с региональной потерей устойчивости горного массива и прорывами вод и рассолов в выработанное пространство рудников (рис. 1). Частота аварийных событий определялась как отношение числа рудников, на которых были зафиксированы аварии в течение рассматриваемого отрезка времени к общему числу рудников, функционировавших в этот отрезок. В расчет брались рудники, которые эксплуатировались в регионах, где было зафиксировано хотя бы одно аварийное событие.

Как видно из гистограммы (см. рис. 1), несмотря на более

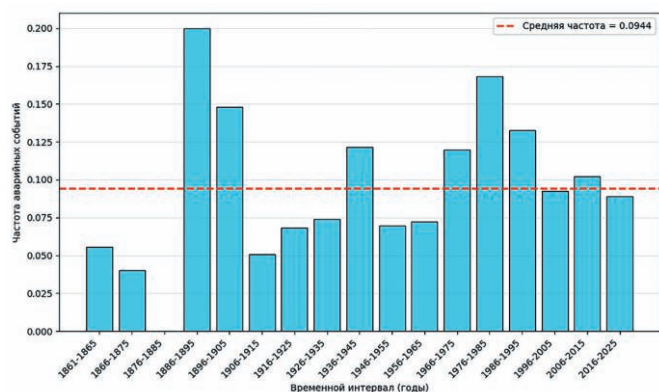


Рис. 1
Гистограмма частоты
аварийных событий
регионального масштаба
на рудниках рассматриваемого
типа по периодам
длиной 10 лет

Fig. 1
A bar chart of the frequency
of regional-scale emergency
events in the considered
type of mines
over 10-year periods

чем полуторавековой опыт освоения калийных и соляных месторождений частота аварийных событий регионального масштаба не демонстрирует устойчивого снижения в текущий исторический период и сохраняется на уровне среднего значения ~0,09.

Таким образом, в последние десятилетия аварийные ситуации регионального масштаба происходят в среднем на 9% рудников, находящихся в эксплуатации в течение каждого десятилетия, причем сохранение столь высокой частоты аварий отмечается на фоне сокращения общего числа рудников более чем в 4 раза (по сравнению с началом XX в.), совершенствования технических средств мониторинга и прогноза, а также нормативно-технических требований.

Данное обстоятельство объясняется совокупностью долгосрочных факторов: постепенной деградацией несущих элементов горного массива, в том числе переходом целиков в стадию развитой ползучести спустя 30–50 лет после их оставления; запоздалым проявлением проектных решений 1960–1980-х годов (повышенная степень извлечения, отсутствие закладки); вовлечением в отработку горизонтов с уровнями гравитационных напряжений, превышающими предел длительной прочности соляных пород; постэксплуатационными аварийными событиями на шахтных полях рудников, закрытых десятилетия назад; запаздывающей реакцией научно-технического сообщества в части изменений нормативно-технической документации, которые происходят уже после возникновения аварийных ситуаций.

Таким образом, отсутствие выраженных тенденций к снижению частоты региональных аварий в последние десятилетия свидетельствует о недооценке риска их возникновения и недостаточной эффективности принимаемых на рудниках мер по предотвращению аварийных ситуаций.

Выбор и оценка параметров функции надежности системы «рудник–массив»

В рамках данной работы предлагается рассмотреть систему «рудник–массив» как систему, работающую на износ, вероятность аварии (отказа) которой монотонно увеличивается с течением времени, что соответствует физиче-

ской природе процессов деформирования и разрушения в массиве: росту техногенной трещиноватости, нарастанию прогибов, отслаиванию краевых частей, разрушению междупластовых потолочин, ускоряющейся ползучести несущих целиков, прогрессирующему снижению водозащитных свойств толщи и т.п. В качестве адекватной модели такой системы выбрано распределение Вейбулла, которое широко используется для описания отказов систем, подверженных износу и кумулятивному накоплению повреждений.

Функция надежности, описывающая вероятность безаварийной работы системы «рудник–массив» до момента времени t , имеет вид:

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}, \quad (1)$$

где β – параметр формы; η – параметр масштаба (характерное время жизни системы).

При $\beta > 1$ $R(t)$ стремится к 0 при $t \rightarrow \infty$, соответственно, вероятность отказа $P_{failure}(t) = 1 - R(t)$ с течением времени асимптотически приближается к единице.

Определение параметров функции надежности (1) осуществлялось на основе составленной базы данных по аварийности. В качестве исходных данных для каждого рудника выступали год начала отработки запасов, год окончания отработки запасов, год наступления аварийного события (если происходило). Оценка параметров производилась методом максимального правдоподобия с учётом правостороннего цензурирования. Также проводились тесты согласия входных данных с распределением Вейбулла. Результаты оценки приведены в виде графиков на рис. 2.

По результатам анализа коэффициент детерминации на вероятностном графике составил $R^2 = 0,986$ (близко к единице), вероятностная оценка дала значение $p\text{-value} = 0,13$ (более 0,05), что подтвердило принадлежность анализируемых данных распределению Вейбулла.

Значение параметров формы и масштаба получено равным соответственно $\beta = 1,236$ и $\eta = 80$ лет, что, в свою очередь, подтвердило гипотезу о выраженном процессе «старения» системы «рудник–массив» и о наличии масштабных деградиационных процессов в горном массиве, приводящих на длительных отрезках времени к нарушению региональной безопасности рудников.

С учетом того что в среднем срок службы рудников по результатам статистического анализа составляет 40 лет, рассчитанная вероятность наступления на руднике аварийного события к данному времени эксплуатации превышает 0,3.

Следует отметить, что по мере роста периода безаварийной работы рудника, вероятность аварийного события на нём в последующий период возрастает. Так, вероятность аварии в первые 10 лет работы рудника составляет 0,07, а в те же 10 лет, но после 40 лет безаварийной работы – 0,13.

Предварительные исследования показывают, что существует методологическая возможность увязать параметры функции Вейбулла с интенсивностью горно-геомеханических процессов, протекающих в нарушенном массиве под воздействием горных работ. Установление такой связи откроет перспективы обоснованного управления риском при принятии проектных решений на основе расчета вероятности аварийного события с использованием функции Вейбулла с модернизированными параметрами β и η , определяемыми принятой технологией разработки и конкретными горно-геологическими условиями.

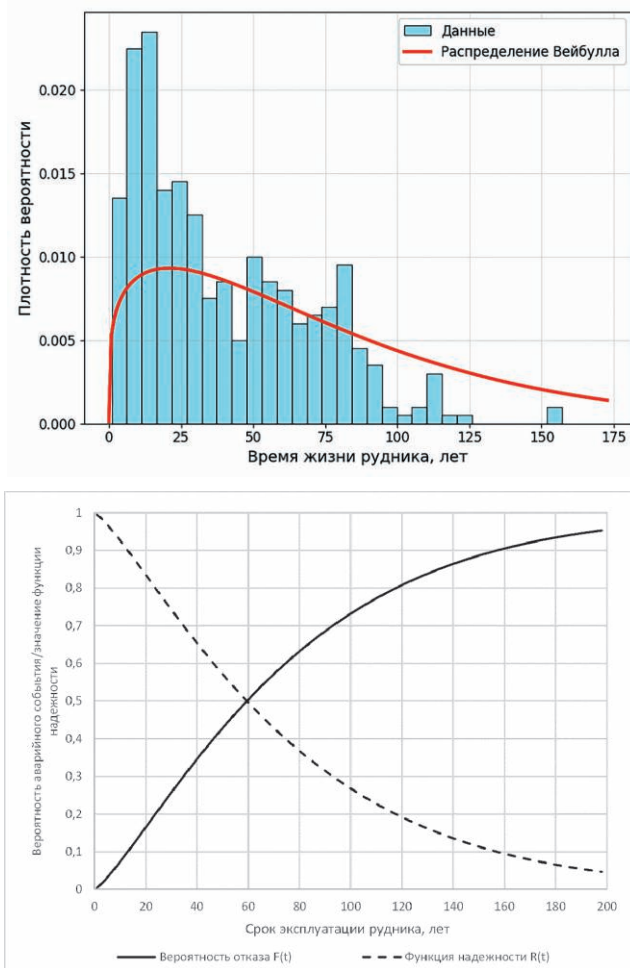


Рис. 2
Графики функции распределения Вейбулла для оценки вероятности аварийных событий на рудниках рассматриваемого типа

Fig. 2
Charts of the Weibull distribution function for assessing the probability of accidents in the considered type of mines

Вклад авторов

Е.Р. Ковальский – концептуализация исследования, постановка задач, анализ результатов, написание текста статьи, формирование выводов.

Г.Б. Поспехов – разработка методики параметрической оценки, анализ геологических факторов риска.

А.В. Холмский – сбор и систематизация базы данных аварийных событий, выполнение статистического анализа, адаптация распределения Вейбулла для системы «рудник–массив».

Ч.Б. Конгар-Сюрюн – формирование и верификация базы данных рудников, анализ литературных источников, подготовка графических материалов, написание текста статьи.

Н.А. Миронов – сбор данных по аварийным событиям, анализ постэксплуатационных рисков, оформление списка литературы и табличных материалов.

Author's Contribution

Evgeny R. Kovalsky – development of the research concept, formulation of the problem, analysis of the outcomes, drafting of the article, formulation of the conclusions

Georgy B. Pospheov – development of the parametric assessment methodology, analysis of geological risk factors

Alexey V. Kholmnskiy – collection and systematization of the emergency event database, execution of the statistical analysis, adaptation of the Weibull distribution for the 'mine–ore body' system

Cheyneesh B. Kongar-Syuryun – creation and verification of the mine database, analysis of the literature sources, preparation of graphical materials, drafting of the article

Nikita A. Mironov – collection of data on the emergency events, analysis of post-operational risks, compilation of the reference list and tables

Заключение

Аварийные события регионального масштаба на рудниках, разрабатывающих легкорастворимое минеральное сырье, связаны с катастрофическими прорывами ненасыщенных рассолов в горные выработки и внезапными площадными разрушениями несущих элементов горного массива.

Анализ статистики аварийных событий на основе полученных параметров распределения показывает, что частота аварий в последние десятилетия держится на уровне 0,09, а вероятность их возникновения в течение среднего срока службы рудника превышает 0,3. Основываясь на полученных результатах, следует признать, что аварийность рудников рассматриваемого типа высока и носит системный характер.

В работе подтверждено, что надежность геомеханической системы «рудник–массив» может быть описана функцией распределения Вейбулла. Полученные параметры распределения количественно подтверждают, что данная система подвержена необратимому «старению»: интенсивность отказов (аварийных событий) монотонно возрастает с течением времени.

Установленные закономерности указывают на необходимость совершенствования применяемых нормативно-технических требований и мер охраны рудников от аварийных событий регионального масштаба. Перспективным направлением следует считать разработку вероятностно-временных методологических подходов, учитывающих связь проектных решений с величиной риска возникновения аварийных ситуаций. С помощью таких подходов возможно обоснованно назначать приоритеты при выборе параметров систем разработки и отдавать предпочтение тем технологическим решениям, которые снижают темп и интенсивность деградационных процессов в геомеханической системе «рудник–массив» и обеспечивают приемлемый для недропользователя риск.



Список литературы / References

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования. *Горная промышленность*. 2022;(1):41–50. <https://doi.org/10.30686/16099192-2022-1-41-50>
Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Russian potash industry: Issues of rational and safe mining. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):41–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-41-50>
2. Emons H.-H., Baumbach H. *Die Kaliindustrie Geschichte eines deutschen Wirtschaftszweiges?* Berlin: Trafo- Verlag Weist; 2002. 140 S.
3. Зубов В.П., Сокол Д.Г. Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования. *Записки Горного института*. 2023;264:874–885. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14924> (дата обращения: 17.04.2026).
Zubov V.P., Sokol D.G. Technologies of intensive development of potash seams by longwall faces at great depths: current problems, areas of improvement. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:874–885. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14924> (accessed: 17.04.2026).
4. Козловский Е.Я., Журавков М.А. Определение и верификация параметров расчетной модели соляных пород с учетом разупрочнения и ползучести. *Записки Горного института*. 2021;247:33–38. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.4>
Kozlovskiy E.Y., Zhuravkov M.A. Determination and verification of the calculated model parameters of salt rocks taking into account softening and plastic flow. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:33–38. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.4>
5. Зубов В.П., Смычник А.Д. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод. *Записки Горного института*. 2015;215:29–37. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5180> (дата обращения: 17.04.2026).
Zubov V.P., Smychnik A.D. The concept of reducing the risks of potash mines flooding caused by groundwater inrush into excavations. *Journal of Mining Institute*. 2015;215:29–37. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5180> (accessed: 17.04.2026).
6. Петров Д.Н., Абашин В.И., Карасев М.А., Селихов А.А. Исследование возможности применения методов неразрушающего контроля для оценки прочностных свойств горных пород в условиях подземного рудника Гремячинского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(12-1):227–244. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1_2024_227-244.pdf (дата обращения: 17.04.2026).
Petrov D. N., Abashin V. I., Karasev M. A., Selikhov A. A. Non-destructive testing applicability in rock mass strength estimation in underground mine at the Gremyachinsk deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(12-1):227–244. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2024/12/12-1_2024_227-244.pdf (accessed: 17.04.2026).
7. Ermolovich E.A., Sergeev S.V., Zaytsev D.A., Ermolovich O.V. Studying of stowage massifs formation conditions in deep-laying rich KMA iron oxides developing and efficient stowage composition projection. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(24):45287–45291. Available at: https://ripublication.com/ijaer10/ijaerv10n24_212.pdf (accessed: 17.04.2026).
8. Карасев М.А., Петрушин В.В., Рысин А.И. Применение метода конечно-дискретных элементов для описания механики поведения соляных пород на макроструктурном уровне. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(4):48–66. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_48
Karasev M.A., Petrushin V.V., Rysin A.I. The hybrid finite/discrete element method in description of macrostructural behavior of salt rocks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(4):48–66. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_4_0_48
9. Khayrutdinov M.M., Aleksakhin A.V., Kibuk T.N., Korshunova L.N., Lozinskaya M.A., Legoshina O.Y. et al. Technogenic waste in backfill composite is a paradigm of circular economy. *Mining*. 2025;5(3):57. <https://doi.org/10.3390/mining5030057>
10. Беляков Н.А., Беликов А.А. Прогноз целостности водозащитной толщи на верхнекамском месторождении калийных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-2):33–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_33
Belyakov N.A., Belikov A.A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the verkhnekamskoye potash ore deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-2):33–46. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_33
11. Zhang Y., Lapatsin S., Zhuravkov M., Yu G., Karpovich I. The stability and failure of deep underground structures at potash mining deposits. *Applied Sciences*. 2024;14(20):9434. <https://doi.org/10.3390/app14209434>
12. Пелипенко М.В., Баловцев С.В., Айнбиндер И.И. К вопросу комплексной оценки рисков аварий на рудниках. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):180–192. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>
Pelipenko M.V., Balovtsev S.V., Aynbinder I.I. Integrated accident risk assessment in mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(11):180–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>
13. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Chenlong D., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Increase in recovery efficiency of iron-containing components from ash and slag material (coal combustion waste) by magnetic separation. *Minerals*. 2024;14(2):136. <https://doi.org/10.3390/min14020136>



14. Куликова А.А., Овчинникова Т.И. К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):251–262. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262>
Kulikova A.A., Ovchinnikova T.I. On the issue of reducing geoecological risks at mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):251–262. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262>
15. Алиева Л., Жуков И.А. Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(4):1681–1694. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694>
Alieva L., Zhukov I.A. Upgrading rotary-percussion drilling of high – strength rocks by improving the structure of a rock-crushing blade-free tool. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(4):1681–1694. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694>
16. Korelskiy D., Mentsiev A., Dengaev A., Novikova A., Babyr N. Land assessment in mining regions considering ecology. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024;37(11):2344–2353. <https://doi.org/10.5829/IJE.2024.37.11B.19>
17. Овчинникова Т.И., Потоцкий Е.П., Фирсова В.М. Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):199–208. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208>
Ovchinnikova T.I., Pototskiy E.P., Firsova V.M. Risk-based approach to hazard assessment in the mining industry. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):199–208. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208>
18. Федосеев А.К. О возможности минимизации риска нарушения сплошности водозащитной толщи на потенциально опасных участках. *Горное эхо*. 2021;(2):27–31. <https://doi.org/10.7242/echo.2021.2.7>
Fedoseev A.K. On the possibility to minimize the risk of disrupting the integrity of the water-retaining strata in potentially hazardous areas. *Gornoe Ekho*. 2021;(2):27–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2021.2.7>
19. Казанин О.И., Евсюкова А.А. Обоснование технологии проведения спаренных выработок с отработкой межштрековых целиков короткими забоями. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(11-1):23–37. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/23.pdf> (дата обращения: 17.04.2026).
Kazanin O.I., Evsiukova A.A. Justification of the parameters of the paired workings development technology with the extracting of the pillar between workings by continuous miner. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(11-1):23–37. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/23.pdf> (accessed: 17.04.2026).
20. Tien D.L., Trung T.V., Anh S.D., Babyr N.V. Ground pressure and methods to enhance roof stability in mechanized coal mining. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2026;39(4):862–869. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.04a.05>
21. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
22. Шиман М.И. *Предотвращение затопления калийных рудников*. М.: Недра; 1992. 160 с.
23. Шокин Ю.П. О нарушениях сплошности подработанной водозащитной толщи на калийных рудниках. *Горный журнал*. 2019;(1):70–75. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.15>
Shhokin Yu.P. Undermined water-impervious strata discontinuity in potassium mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(1):70–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.15>
24. Khevpa Z., Dolin V., Yakovlev E., Kuzmenko E., Bagriy S. Development of a water and ecological emergency from mine flooding of Stebnyk potassium deposit owing to natural and technogenic factors. *Geochemistry of Technogenesis*. 2022;7(35):51–56. (In Ukraine) <https://doi.org/10.32782/geotech2022.35.09>
25. Gimm W. Kali- und Steinsalzbergbau. *Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; 1968. Band I. 600 S.
26. Gnutzmann H., Kowalewski O., Śpiewanowski P. Market structure and resilience: evidence from potash mine disasters. *American Journal of Agricultural Economics*. 2020;102(3):911–933. <https://doi.org/10.1093/ajae/aaz041>
27. Kowalewski O., Śpiewanowski P. Stock market response to potash mine disasters. *Journal of Commodity Markets*. 2020;20:100124. <https://doi.org/10.1016/j.jcomm.2020.100124>
28. Garrett D.E. *Potash: Deposits, Processing, Properties and Uses*. London: Chapman & Hall; 1996. 734 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1545-9>
29. Земсков А.Н., Кудряшова О.С., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю. Разработка мероприятий по предотвращению затопления рудника Дехканабадского калийного завода (Узбекистан). *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;(2):270–283.
Zemskov A.N., Kudryashova O.S., Zaalishvili V.B., Shamrin M.Yu. Development of measures to prevent flooding of the mine of the Dehkanabad potash plant (Uzbekistan). *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2022;(2):270–283. (In Russ.)



30. Baumgarten L. *Die Kali- und Steinsalzschächte Deutschlands*. Available at: <https://www.lars-baumgarten.de/> (accessed: 16.06.2026).
31. Jeremic M.L. *Rock Mechanics in Salt Mining*. London: CRC Press; 1994. 544 p. <https://doi.org/10.1201/9781003077589>
32. Sambeek L.L.V., Gowan S.W., Payment K.A. Loss of the retsof salt mine: engineering analysis. In: *Geertman R.M. (ed.) Proceedings of the 8th World Salt Symposium, Hague, 7–11 May 2000*. Amsterdam, Elsevier; 2000, pp. 411–416.
33. Gendzwill D., Martin N. Flooding and loss of the Patience Lake potash mine. *CIM Bulletin*. 1996;89(1000):62–73.
34. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений. *Безопасность труда в промышленности*. 2011;(12):41–46. Режим доступа: <https://btpnadzor.ru/archive/1-827> (дата обращения: 17.04.2026).
Laptev B.V. Historiography of accidents when developing salt mines. *Occupational Safety in Industry*. 2011;(12):41–46. (In Russ.) Available at: <https://btpnadzor.ru/archive/1-827> (accessed: 17.04.2026).
35. Bérest P., Brouard B., Feuga B., Karimi-Jafari M. The 1873 collapse of the Saint-Maximilien panel at the Varangeville salt mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2008;45(7):1025–1043. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.10.007>

Информация об авторах

Ковальский Евгений Ростиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений подземным способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6656-9377>

Поспехов Георгий Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-9090-5150>

Холмский Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры разработки месторождений подземным способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1311-0949>

Конгар-Сюрюн Чейнеш Буяновна – аспирант кафедры разработки месторождений подземным способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6097-905X>; e-mail: kongarsiuriun@gmail.com

Миронов Никита Артурович – аспирант кафедры разработки месторождений подземным способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Evgeny R. Kovalsky – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Underground Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6656-9377>

Georgy B. Posphehov – Cand. Sci. (Geol.&Mineral.), Associate Professor, Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-9090-5150>

Alexey V. Kholmiski – Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Underground Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1311-0949>

Cheynesh B. Kongar-Syuryun – Postgraduate Student, Department of Underground Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6097-905X>; e-mail: kongarsiuriun@gmail.com

Nikita A. Mironov – Postgraduate Student, Department of Underground Mining, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Article info

Received: 01.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 04.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 01.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 04.08.2026