

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИЙ И НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ ПРИ ДОБЫЧЕ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

**\*Зарипова С.Н., Дорофеева В.Д., Зарипов Р.Ф., Кичаева А.А.**

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»,  
Казань, e-mail: zsn10@mail.ru

***Аннотация.** Целью работы является установление закономерностей возникновения аварий и инцидентов на рудниках калийно-магниевых солей Верхнекамского месторождения. На основе проведенного анализа статистических данных и источников литературы выявлена необходимость исследования закономерностей возникновения аварий и инцидентов, способствующих возникновению несчастных случаев. Информационной базой исследования являются статистические отчеты компании «Уралкалий» и отчеты по показателям аварийности и смертельного травматизма на объектах, поднадзорных Западно-Уральскому управлению Ростехнадзора. Получены зависимости между уровнями аварийности и несчастных случаев на опасных производственных объектах, которые являются основой при планировании мероприятий, направленных на снижение уровня потенциальных опасностей и угроз.*

***Ключевые слова:** месторождения калийно-магниевых солей, аварии, несчастные случаи, травматизм, закон распределения, вероятность.*

## PREDICTING THE PROBABILITY OF ACCIDENTS AND INCIDENTS IN THE EXTRACTION OF POTASSIUM-MAGNESIUM SALTS

**#Zaripova S.N., Dorofeeva V.D., Zaripov R.F., Kichaeva A.A.**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev», Kazan, e-mail: zsn10@mail.ru

***Abstract.** The aim of the work is to establish patterns of accidents and incidents in the mines of potassium-magnesium salts of the Verkhnekamskoye deposit. Based on the analysis of statistical data and literature sources, it is revealed that it is necessary to study the patterns of accidents and incidents that contribute to accidents. The information base of the study is the statistical reports of Uralkali and reports on accident rates and fatal injuries at facilities supervised by the West Ural Rostekhnadzor Department. The dependences between the levels of accidents and accidents at hazardous production facilities are obtained, which are the basis for planning measures aimed at reducing the level of potential hazards and threats.*

***Keywords:** deposits of potassium-magnesium salts, accidents, injuries, distribution law, probability.*

***Введение.** Россия относится к числу 16 стран, осуществляющих добычу калийно-магниевых солей (далее – КМС). При этом на долю Канады, России, Белоруссии и Китая приходится более 83% добычи полезного ископаемого в мире [1]. В настоящее время на территории России зарегистрировано 9 месторождений КМС, однако добыча в промышленных масштабах осуществляется на Верхнекамском месторождении, на долю которого приходится более 90% учтенных запасов хлористого калия в стране.*

*Разработку Верхнекамского месторождения КМС осуществляет ПАО «Уралкалий» (далее – Уралкалий,*

*компания), в составе которого пять рудников (БКПРУ-2 и БКПРУ-4 – далее Березниковская площадка, СКРУ-1, СКРУ-2 и СКРУ-3 – далее Соликамская площадка), шесть калийных фабрик и одна карналлитовая фабрика.*

*Применяемые компанией технологии основаны на использовании камерной системы разработки месторождения короткими очистными забоями, когда в выработанном пространстве остаются рудные целики для минимизации оседаний земной поверхности и сохранения водозащитной толщи. Добыча КМС осуществляется подземным способом с использованием высокотехнологичного и*

энергоемкого промышленного оборудования. В компании зарегистрировано более 80 опасных производственных объектов, на которых используется порядка 6,5 тыс. технических устройств [2]. Распределение опасных производственных объектов по классам опасности следующее: I класс – 6,1%, II класс – 8,5%, III класс - 50%, IV класс – 35,4%.

Ежегодное увеличение объемов добычи КМС сопровождается ухудшением горно-геологических и горнотехнических условий, а также условий труда горнорабочих. На безопасности работ негативно отражается увеличение глубины и протяженности горных выработок, которые способствуют росту количества техногенных аварий и инцидентов, связанных:

с газодинамическими явлениями (выбросы соляных пород и горючего газа), характеризующимися разрушениями междукammerных целиков, пород кровли в выработанном пространстве, взрывами газа, оседанием земной поверхности над очагом и приводящими к разрушению шахтного оборудования, системы вентиляции;

с внезапными прорывами в горные выработки надсолевых вод, характеризующимися затоплением калийно-магниевых рудников, не подлежащих восстановлению.

В 2012 – 2022 годах на предприятиях компании произошло 13 аварий и инцидентов, то есть в среднем 1,2 происшествия в год. Доля несчастных случаев (далее – НС), происходивших непосредственно на рудниках, составляет в среднем 66% от общего количества несчастных случаев на всех участках предприятий Уралкалия, а доля смертельного травматизма – в среднем 80% от общего количества всех смертельных травм у работников предприятий компании. Число случаев легкого травматизма на рудниках превышает значение аналогичного показателя на всех других участках предприятий в 1,3 раза, тяжелого травматизма – в 2,6 раза, смертельного травматизма – в 4,0 раза. Распределение травм по степени тяжести на разных участках представлено на рисунке 1, из которого видно, что отношение долей травм «тяжелые и смертельные» и «легкие» на рудниках составляет 40:60 %, на других участках – 20:80 %.

Представленная статистика свидетельствует об актуальности исследования по установлению закономерностей возникновения аварий (инцидентов) и несчастных случаев на рудниках КМС для обеспечения приемлемого уровня безопасности горнорудного производства.

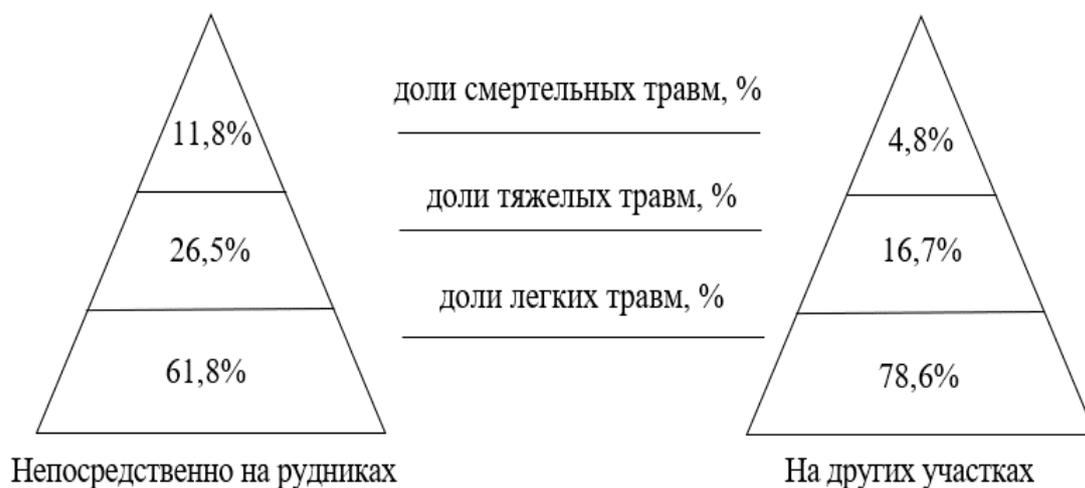


Рисунок 1 – Распределение долей несчастных случаев по степени тяжести

Публикации за последние 10 лет показывают, что значительный объем исследований в данной области посвящен изучению влияния опасных производственных факторов и вредных условий труда на здоровье горнорабочих угольных шахт. Исследований по вопросам обеспечения безопасности и охраны труда работников горнорудных предприятий существенно меньше – научные работы принадлежат Баранникову В.Г., Кириченко Л.В. [3], Жегловой А.В. [4], Зайцеву А.В. [5], Карначеву И.П. [6], Кормщикову Д.С. [7], Николаеву А.В. [8], Пелипенко М.В., Баловцеву С.В., Айнбиндер И.И. [9], Страшниковой Т.Н., Олещенко А.М., Суржинову Д.В. [10], Шалимову А.В. [11], Шляпникову Д.М. [12] и ряду других исследователей.

Отличительной особенностью данной работы является то, что в ней для установления закономерностей возникновения аварий (инцидентов) и несчастных случаев на рудниках КМС Уралкалия применены известные статистические методы, а также получены математические модели, позволяющие прогнозировать интенсивности аварий (инцидентов) и несчастных случаев, устанавливая зависимости между аварийностью, несчастными случаями и другими показателями компании.

*Целью исследования* является установление закономерностей возникновения аварий и инцидентов на рудниках КМС Верхнекамского месторождения.

*Материалы и методы исследования.* Информационной базой исследования являются размещенные в открытом доступе ежегодные статистические отчеты ПАО «Уралкалий» за 2012 – 2022 годы [13], сводные ведомости результатов специальной оценки условий труда в 2018 – 2022 годах [14], отчеты по показателям аварийности и смертельного травматизма на объектах, поднадзорных Западно-Уральскому управлению Ростехнадзора [2]. В работе использован вероятностно-статистический метод прогнозирования уровня аварийности.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Процесс разработки месторождений КМС подземным способом сопровождается авариями и инцидентами, происходящими в случайные моменты времени. В соответствии с [15] в качестве показателя аварийности при добыче и обогащении КМС можно рассматривать функцию распределения количества аварий (инцидентов) на рудниках или функцию распределения интенсивности возникновения аварий (инцидентов), которая представляет собой количество аварий (инцидентов) в течение года, приходящихся на один рудник. Тогда уровень безопасности технологических процессов есть вероятность того, что продолжительность функционирования рудников без аварий (инцидентов) меньше наперед заданного периода времени, например, времени безаварийной работы.

Аварии (инциденты) на рудниках в течение года можно рассматривать как поток однородных событий с переменной интенсивностью, который обладает свойствами ординарности и без последствия, то есть представляют собой нестационарный пуассоновский поток. Поэтому вероятность наступления за время  $(t; t+\Delta t)$  хотя бы одной аварии (инцидента) равна

$$Q_i(t) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_i(\tau) d\tau\right)$$

где:  $\lambda_i(\tau)$  – среднестатистическая интенсивность аварии (инцидента)  $i$ -го вида,

$P_i(t) = \exp\left(-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_i(\tau) d\tau\right)$  – вероятность отсутствия аварии (инцидента)  $i$ -го вида.

Укрупненный алгоритм оценки вероятности возникновения аварий (инцидентов) на рудниках КМС состоит из следующих шагов:

1) определение статистических показателей аварийности рудников (интенсивность аварий (инцидентов), продолжительность безаварийной работы рудников, дисперсия, среднеквадратическое отклонение);

2) установление параметров теоретического закона распределения аварийности рудников;

3) определение зависимости(ей)  $\lambda = \lambda(t)$ , отбор наиболее подходящей зависимости на основе критериев, например, на основе метода наименьших квадратов;

4) оценка вероятности наступления аварии (инцидента) или вероятности безаварийной работы рудника.

В соответствии с п. 1) алгоритма определены статистические показатели

аварийности рудников, которые сведены в таблицу 1. Данные столбца 2 – это число аварий (инцидентов), приходящихся на один рудник в течение года; данные столбца 3 – среднее количество дней безаварийной работы одного рудника в течение года. В качестве дополнительных показателей уровня безопасности рудников рассмотрены дисперсия и среднеквадратическое отклонение времени безаварийной работы рудников.

Таблица 1. Статистические показатели аварийности рудников

| Виды аварий                                   | Статистическая оценка интенсивности аварий, 1/год | Длительность функционирования без аварий, дни | Дисперсия, 1/год <sup>2</sup> | Среднеквадратическое отклонение, 1/год |
|---|---|---|-------------------------------|--|
| <i>1</i>                                      | <i>2</i>  | <i>3</i>                                      | <i>4</i>                      | <i>5</i>                               |
| Пожары  | 0,11  | 146   | 2,20                          | 1,48                                   |
| Затопления и подтопления                      | 0,06  | 292   | 1,32                          | 1,15                                   |
| Газодинамические явления                      | 0,03  | 66  | 252,00                        | 15,87                                  |
| Обрушения породы                              | 0,03  | 64  | 410,56                        | 20,26                                  |
| Механические повреждения движущихся устройств | 0,03  | 73  | 159,11                        | 12,61                                  |

Гистограмма и кривая теоретического закона распределения интенсивности аварий на рудниках представлены на рисунке 2. Проверка адекватности теоретического распределения по критерию согласия Пирсона при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы 9 подтверждает гипотезу о распределении Пуассона:  $\chi^2_{набл} = 2,67$  меньше  $\chi^2_{крит} = 2,33$ .

В соответствии с методом наименьших квадратов наилучшей функцией для оценки интенсивности аварий на рудниках является  $\lambda(t) = 9,34(t+1)^3 - 38(t+1)^2 + 44,66(t+1) - 11$ , где:  $R^2 = 0,99$  – коэффициент аппроксимации.

На основании полученного уравнения тренда выполнена оценка вероятности возникновения аварий на рудниках Уралкалия (рисунок 3).

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что основными видами крупных аварий на рудниках являются пожары. Помимо крупных пожаров ежегодно фиксируются задымления горных выработок и возгорания, как правило, при проведении огневых работ. Несмотря на наличие положительной динамики количества задымлений / возгораний за исследуемый период, инциденты, связанные с ними, способствуют нарушению технологических процессов на рудниках (рисунок 4). Гистограмма и кривая теоретического закона распределения интенсивности инцидентов, связанных с возгораниями и задымлениями на рудниках, представлены на рисунке 5, графики вероятностей возникновения (отсутствия) возгораний / задымлений на рудниках – на рисунке 6.

Безопасность в техносфере: наука и технологии №1, 2024

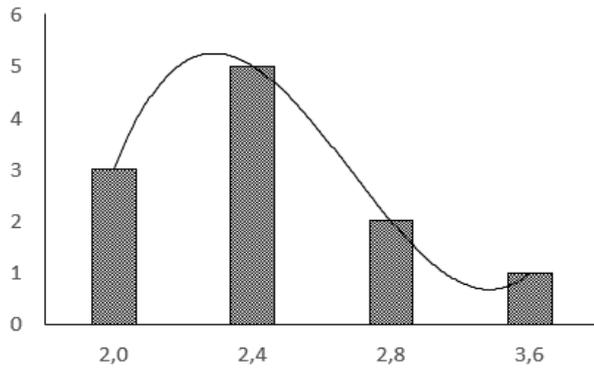


Рисунок 2 – Гистограмма и кривая теоретического закона распределения аварийности на рудниках

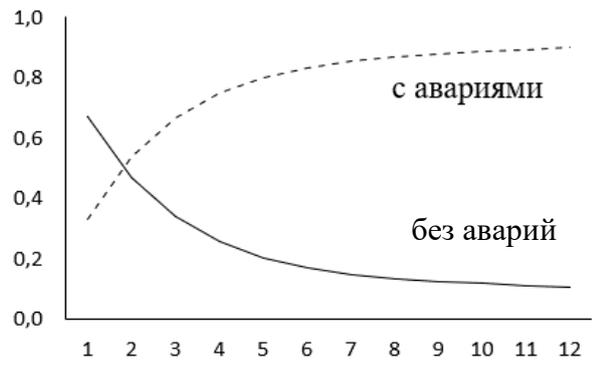


Рисунок 3 – Графики вероятностей безаварийной и аварийной работы рудников в течение года

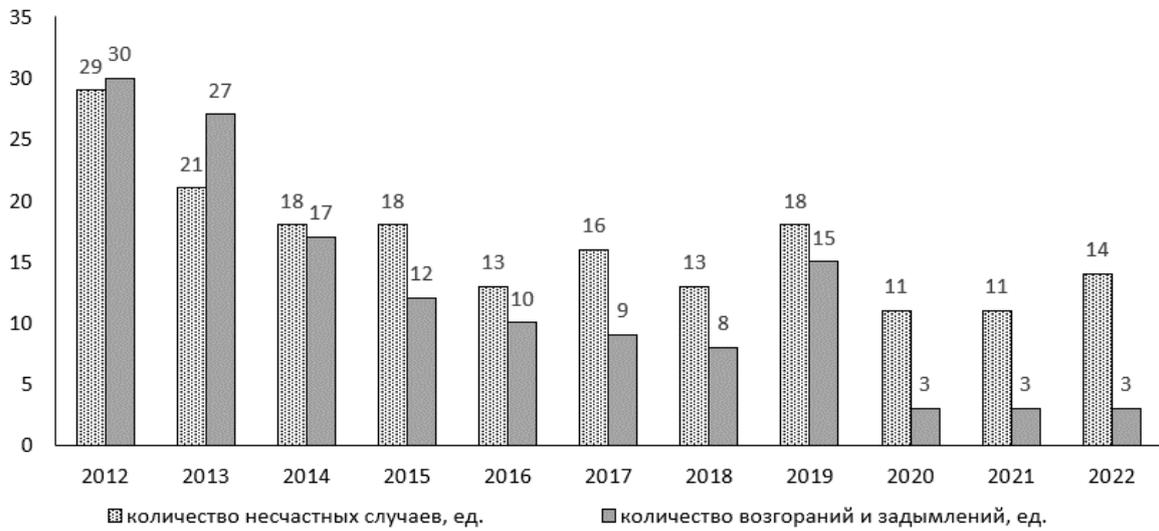


Рисунок 4 – Динамика пожаров и НС в 2012 – 2022 годах

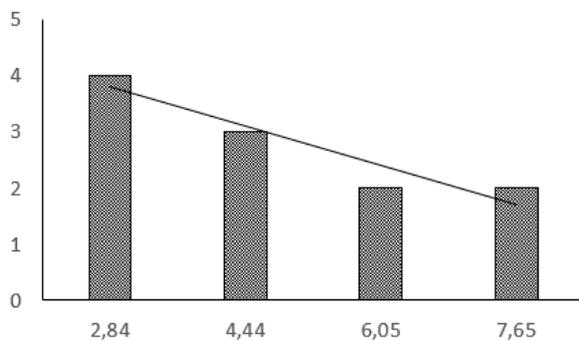


Рисунок 5 – Гистограмма и кривая теоретического закона распределения инцидентов

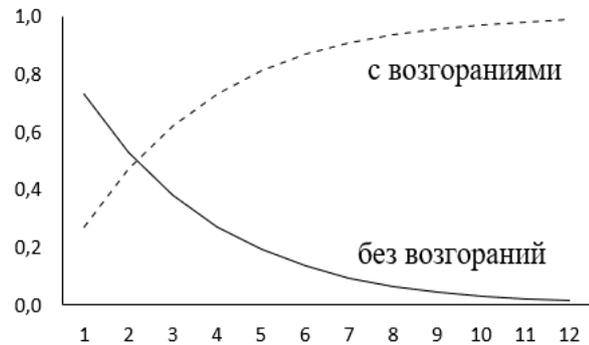


Рисунок 6 – Графики вероятностей инцидентов с возгораниями и задымлениями в течение года

Из рисунков 3 и 6 видно, что, начиная с пятого месяца вероятности появления возгораний и задымлений на рудниках выше, чем вероятности появления крупных аварий.

Из рисунка 4 следует, что динамика количества несчастных случаев, как и динамика количества задымлений и возгораний, имеет тенденцию к снижению. Значение парного коэффициента корреляции, равное 0,82, указывает на наличие сильной связи между показателями. Значение  $t$  – статистики (7,59), вычисленное при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы 9, подтверждает статистическую значимость коэффициента корреляции Пирсона. Следовательно, принимая превентивные

меры, направленные на уменьшение количества инцидентов с возгораниями, можно регулировать уровень производственного травматизма на рудниках.

В соответствии с отчетами компании одни рудники представляют большую опасность, чем другие: более высокий уровень производственного травматизма за исследуемый период наблюдается на Соликамской площадке, рост количества НС наблюдается на руднике БКРУ-4 Березниковской площадки и рудниках СКРУ-2, СКРУ-3 Соликамской площадки.

С целью анализа данных о НС, представленных в разрезе пяти рудников, определены статистические показатели НС (таблица 2).

Таблица 2. Статистические показатели НС на рудниках

| Рудники | Количество НС за исследуемый период | Интенсивность НС, 1/год | Средняя длительность работы рудника без НС, дней | Дисперсия, 1/год <sup>2</sup> | Среднеквадратическое отклонение, 1/год |
|---------|-------------------------------------|-------------------------|--|-------------------------------|--|
| СКРУ-1  | 11                                  | 1,57                    | 207  | 14993,33                      | 122,45                                 |
| СКРУ-2  | 7                                   | 1,00                    | 273  | 13173,67                      | 114,78                                 |
| СКРУ-3  | 10                                  | 1,43                    | 178  | 14379,00                      | 119,91                                 |
| БКРУ-2  | 7                                   | 1,00                    | 234  | 16459,00                      | 128,29                                 |
| БКРУ-4  | 20                                  | 2,86                    | 187  | 15221,67                      | 123,38                                 |

Из таблицы следует, что наиболее неблагоприятная ситуация с НС наблюдается на рудниках СКРУ-1, СКРУ-3 и БКРУ-4, средняя длительность работы без НС меньше, чем средняя длительность работы без НС, вычисленная по всем пяти рудникам компании, которая составляет 216 дней. При этом интенсивность НС на БКРУ-4 в 1,8 раза выше, чем на СКРУ-1 и в 2,0 раза выше, чем на СКРУ-3. На основании значений среднеквадратического отклонения можно отметить, что на СКРУ-2 и СКРУ-3 значения НС более плотно сгруппированы вокруг средних значений, а на СКРУ-1, БКРУ-2 и БКРУ-4 наблюдается больший разброс, что свидетельствует о сильном расхождении интенсивности НС со средним значением интенсивности.

Для установления факта влияния условий труда на разных рудниках (факторная переменная) на уровень производственного травматизма (функция-отклик) в компании применен однофакторный дисперсионный анализ, основанный на исследовании значимости различий в средних значениях. Нулевая гипотеза заключается в том, что исследуемый фактор (условия труда на рудниках) не влияет на уровень травматизма. Рассматривая пять групп данных по количеству рудников (число параметров факторной переменной) за последние 7 лет (число наблюдений), в MS Excel получены результаты однофакторного дисперсионного анализа, которые сведены в таблицу 3

Таблица 3. Результаты однофакторного дисперсионного анализа

| Источник вариации | Сумма квадратов | Степени свободы | Средний квадрат (дисперсия) | F - статистика Фишера | p-значение | F - критическое при $\alpha = 0,05$ |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|------------|-------------------------------------|
| 1                 | 2               | 3               | 4                           | 5                     | 6          | 7                                   |
| Между группами    | 11,03           | 4               | 2,76                        | 1,04                  | 0,41       | 2,87                                |
| Внутри групп      | 52,97           | 20              | 2,65                        |                       |            |                                     |
| Итого             | 64,00           | 24              |                             |                       |            |                                     |

Из таблицы 3 следует, что сумма квадратов, обусловленная влиянием исследуемого фактора (условия труда на рудниках), равна 11,03, остаточная сумма квадратов (внутригрупповая) – 52,97. Межгрупповая дисперсия для исследуемого фактора – 2,76, внутригрупповая – 2,65. На основании данных столбцов 5–7 есть основания принять нулевую гипотезу, то есть условия труда на рудниках незначительно влияют или не влияют на уровень травматизма в компании. Значение выборочного коэффициента детерминации указывает на то, что всего в 17% случаях уровень травматизма зависит от условий труда на рудниках, остальные 83% обусловлены другими факторами.

*Заключение.* Проведенное исследование позволило на основании статистических данных установить закономерности возникновения аварий на рудниках КМС Верхнекамского месторождения, а также инцидентов, связанных с возгораниями и задымлениями, оценить вероятности появления аварий и инцидентов в течение года. Показано, что влияние условий труда горнорабочих на рудниках на уровень производственного травматизма в компании незначимо. Другими словами, средние значения уровня травматизма в пяти рудниках компании равны. Обеспечение необходимого уровня безопасности рудников КМС зависит от реализации превентивных мероприятий, направленных на минимизацию функций  $\lambda_i(t)$  и  $Q_i(t)$ .

### Литература:

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gd2021.data-geo.ru/nm/k/> (дата обращения: 05.03.2024).
2. Уральское управление: сайт / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. - Москва [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ural.gosnadzor.ru/>
3. Баранников В.Г. Особенности формирования функционального состояния горнорабочих в условиях микроклимата калийных рудников / В.Г. Баранников, Л.В. Кириченко. – Текст: электронный // Медицина труда и промышленная экология. – 2018. – № 4. – С.19-23. <https://doi.org/10.31089/026-9428-2018-4-19-23>
4. Жеглова А.В. Системный подход к управлению профессиональным риском нарушений здоровья работников горнорудной промышленности: 14.00.50: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук: / Жеглова Алла Владимировна. – Москва, 2009. – 49 с.
5. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: 25.00.20: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2013. – 20 с.
6. Карначев И.П. Научное обоснование методов анализа производственного травматизма и профессиональной заболеваемости при подземной добыче полезных ископаемых: 05.26.01: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: / Карначев Игорь Павлович. – Тула, 2013. – 40 с.
7. Кормщиков Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: 25.00.20: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: / Кормщиков Денис Сергеевич. – Пермь, 2015. – 24 с.
8. Николаев А.В. Научное обоснование и разработка технических и технологических решений по обеспечению безопасности труда на подземных горнодобывающих предприятиях средствами энергоэффективной вентиляции: 05.26.03: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: / Николаев Александр Викторович. – Кемерово, 2020. – 47 с.
9. Пелипенко М. В. К вопросу комплексной оценки рисков аварий на рудниках / М.В. Пелипенко, С.В. Баловцев, И.И. Айнбиндер. // Горный

информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 11. – С. 180–192. <https://doi: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-180-192>

10. Страшникова Т.Н. Оценка риска профессионально-обусловленной патологии у работников горнорудной промышленности / Т. Н. Страшникова, А. М. Олещенко, Д. В. Суржиков. – Текст: электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 20–31. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=13673>

11. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: 25.00.20: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: / Шалимов Андрей Владимирович. – Пермь, 2012. – 34 с.

12. Шляпников Д.М. Гигиеническая оценка риска развития артериальной гипертензии и эффекта профилактических мер по его минимизации у

работников предприятий по добыче калийных солей в условиях подземных горных работ: 14.02.01: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук: / Шляпников Дмитрий Михайлович. – Пермь, 2016. – 20 с.

13. Отчетность и раскрытие: сайт / ПАО «Уралкалий». – г. Березники: 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.uralkali.com/ru/investors/reporting\\_and\\_disclosure/](https://www.uralkali.com/ru/investors/reporting_and_disclosure/)

14. Безопасность: сайт / ПАО «Уралкалий». – г. Березники: 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.uralkali.com/ru/sustainability/safety/> (дата обращения: 12.03.2024). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

15. Качурин Н.М. Прогнозная оценка вероятности возникновения аварий в шахтах Подмосковского бассейна / Н.М. Качурин, Л.Э. Шенкман, В.М. Панарин. // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2011. – Вып. 2. – С. 109-115.

#### **Сведения об авторах:**

**Зарипова С.Н.** (г. Казань, Россия), доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ, [zsn10@mail.ru](mailto:zsn10@mail.ru).

**Дорофеева В.Д.** (г. Казань, Россия), магистрант кафедры промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

**Зарипов Р.Ф.** (г. Казань, Россия), аспирант кафедры промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

**Кичаева А.А.** (г. Казань, Россия), магистрант кафедры промышленной и экологической безопасности; ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ.

