

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

Чавкина Людмила Юрьевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ И УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ
АВАРИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЗОЛОТА**

Специальность 2.10.3 – «Безопасность труда»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Меркулова Анна Михайловна

Москва 2026

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Цветная металлургия является основной для многих ключевых отраслей, обеспечивая их необходимыми материалами для аэрокосмической, оборонной, электротехнической и автомобильной промышленности. В этом ряду металлургия золота занимает особое положение, выполняя не только экономическую функцию пополнения золотовалютных резервов и обеспечения финансовой стабильности государства, но и критически важную технологическую роль. Золото является незаменимым материалом для микроэлектроники, телекоммуникационного оборудования и высокоточной промышленности, что делает его добычу и аффинаж важным звеном в создании современных технологических цепочек и поддержании обороноспособности страны.

Наращивание золотовалютных резервов укрепляет экономическую стабильность во время кризисов. Это стимулирует рост как разработки новых месторождений, так и запуск новых предприятий по производству золота. На 2023 год Россия занимала пятое место в мировом рейтинге по количеству золотых резервов страны (рис.1).

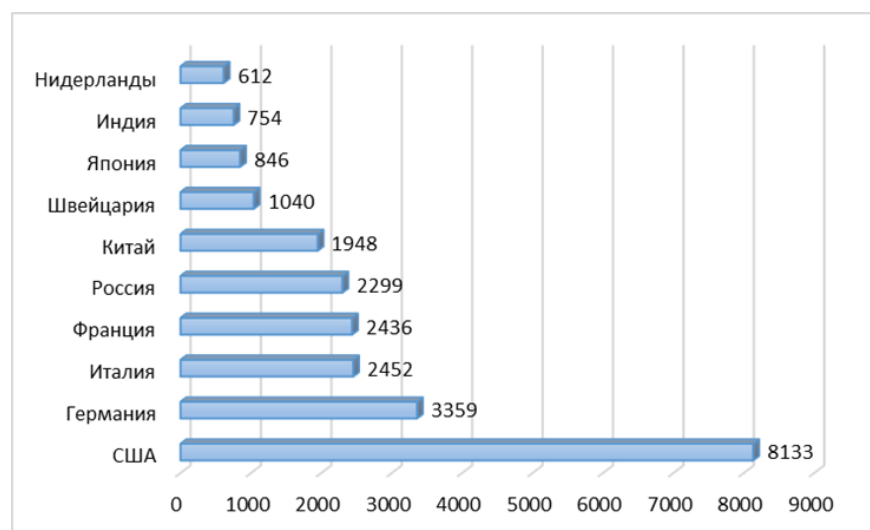


Рисунок 1 – Золотовалютные резервы стран в 2023 году

Золотодобывающая отрасль России динамично развивается: объемы добычи и производства золота с каждым годом увеличиваются, вводятся в эксплуатацию новые активы. К 2023 году страна удвоила разработку золота со 143 т (2000 г.) до 310 т., занимая на текущий момент третье место в мировом рейтинге. Также за последние годы Россия значительно увеличила свои показатели по производству золота (рис. 2). В период 2022–2023 гг. многие ранее общедоступные сведения о добыче и производстве золота перестали

официально публиковаться, последние официальные данные были опубликованы в 2022 году.

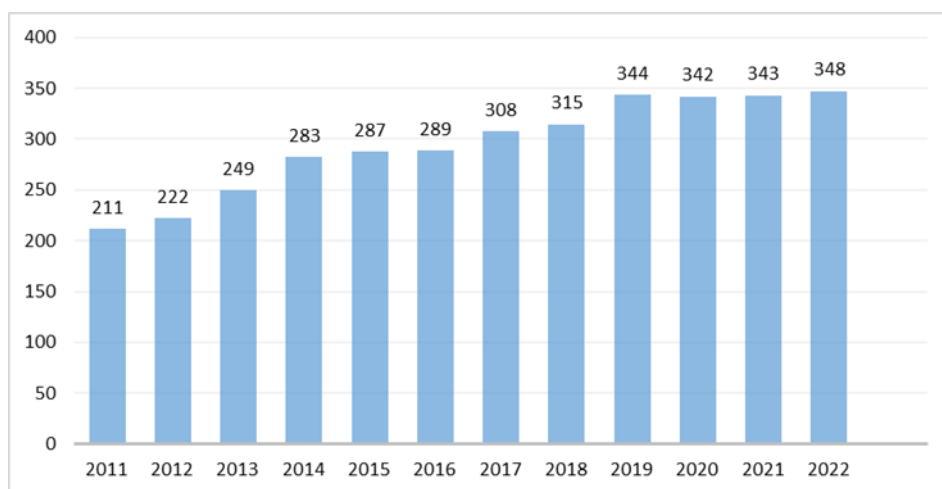


Рисунок 2 – Произведенное золото в России в период с 2011 по 2022 гг., т

Увеличение объемов добычи и производства золота напрямую ведет к росту числа и мощностей предприятий по производству золота, возрастает сложность применяемых технологий, увеличивается количество «опасных точек» в отрасли.

Технологический цикл металлургического производства, от добычи до производства чистого металла и изделий, сопряжен с большим количеством опасностей на каждом этапе. Сюда можно отнести применение опасных веществ в технологических процессах, энергоемкость процессов, использование грузоподъемных механизмов, наличие дефектов оборудования, зданий и сооружений, низкоквалифицированный персонал и др.

К основным причинам аварий на металлургических предприятиях по данным Ростехнадзора относят: нарушение технологического процесса, неудовлетворительный производственный контроль, нарушение дисциплины труда, низкий уровень квалификации персонала. Несмотря на функционирование систем управления промышленной безопасностью, увеличение автоматизированных технологических процессов, количество аварий и уровень травматизма по-прежнему сохраняют высокие значения. С целью предотвращения и минимизации аварийности и травматизма металлургические предприятия используют риск ориентированный подход, в основе которого лежит оценка риска аварий.

Проблемы оценки и управления риском аварий в металлургической отрасли рассмотрены в работах Бикмухаметова М.Г., Белова П.Г., Ерёмина А.К., Карнаух М.Н., Кравчук И.Л., Мاستрюкова Б.С., Тимиргалиевой Л.Ш., Фомичевой О.А. Методы оценки

риска аварий на опасных производственных объектах, применяемые в смежных отраслях (в т.ч. горнодобывающей, нефтегазовой, угольной отраслях), были освещены в работах следующих авторов: А Артюшин Ю.И., Гражданкин А.И., Заернюк В.М., Захарова М.И., Коробов А.В., Лисанов М.В., Овчаров С.В., Савина А.В., Суворова В.В., Файнбург Г.З. Методы оценки риска аварий, применяемые за рубежом, приведены в работах авторов: Хенли Э.Д., Кумамото Х., Маршалл В., Туйтебаевой Д.С., Имангазина М.К., Саттаровой Г.Н., Zeqiri Kemajl, Qingwei Xu, Kaili Xu.

Проведенный анализ нормативных документов и существующих методов оценки риска показал, что в настоящее время отсутствует документ, регламентирующий оценку риска аварий в металлургической отрасли. Кроме того, на данный момент не существует конкретного метода оценки риска аварий для предприятий по производству золота, в частности, который учитывал бы характерные особенности и специфику данного производства. В связи с вышеизложенным, разработка метода оценки риска аварий с учетом аспектов производства золота в настоящее время является актуальной научной задачей.

Целью исследования является разработка метода оценки и управления риском аварий на металлургических предприятиях по производству золота.

Идея работы заключается в учете взаимосвязи критериев при оценке рисков аварий на предприятиях по производству золота, учитывающих специфику производства золота.

Исходя из цели исследования, были поставлены следующие **задачи**:

1. Идентифицировать опасности для каждого технологического процесса и установить характерные аварии на основании технологической схемы производства золота.
2. Разработать методику оценки риска аварий для предприятий по производству золота.
3. Составить алгоритм для качественной и количественной оценки риска аварий для предприятий по производству золота.
4. Разработать перечень рекомендаций по снижению риска аварий в зависимости от установленного уровня опасности.

Объектом исследования являются методы оценки риска аварий, применяемые на металлургических предприятиях.

Предметом исследования является взаимосвязь условий производства золота с величиной риска аварий.

Научная новизна работы заключается в разработке метода оценки риска аварий на основе критериев, учитывающих специфику предприятий по производству золота.

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании механизма оценки риска аварий для предприятий по производству золота, позволяющего повысить уровень промышленной безопасности производства на основе комплексного подхода к оценке каждого этапа технологического процесса производства золота.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики оценки и управления риском аварий, применение которой при проектировании и эксплуатации предприятий позволит предотвратить и минимизировать последствия аварий на предприятиях по производству золота.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач в процессе исследований применялись следующие методы, приемы: сбор, обработка, анализ, обобщение, систематизация и ранжирование данных, кластеризация, формализация, синтез, верификация. Также использованы методы экспертных оценок, балльных оценок.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Интегральная оценка риска аварий при производстве золота базируется на комплексе выявленных критериев, учитывающих природные, технологические, конструктивные особенности производства, а также непреднамеренный и преднамеренный человеческий фактор.

2. Разработанные алгоритм оценки опасностей и механизм управления риском при производстве золота позволяют устанавливать значимые причинно-следственные связи между природными и технологическими факторами опасности и оценивать роль человеческого фактора, приводящего к возникновению аварии, а также выявлять наиболее эффективные меры по обеспечению безопасности предприятия в соответствии с уровнем риска.

3. Повышение уровня безопасности при производстве золота может быть обеспечено применением разработанного метода оценки риска аварий, включающего оценку взаимоувязки природно-технологических факторов опасности с человеческим фактором для определения наиболее уязвимого участка технологического цикла производства золота и выбора целенаправленных мероприятий по снижению его уязвимости.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Тема диссертации соответствует паспорту заявленной специальности 2.10.3 «Безопасность труда», пункту 1 «Разработка научно обоснованных методов анализа и прогнозирования параметров состояния производственной среды, опасных ситуаций и опасных зон».

Степень достоверности

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается: репрезентативным массивом статистических данных об аварийности в металлургии; корректным применением актуальной нормативно-правовой базы; использованием апробированных научных методов и современного математического инструментария для обработки информации, включая программный комплекс MS Excel («Анализ данных»); а также высокой степенью согласованности мнений экспертной группы.

Апробация результатов

Основные положения диссертационной работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Охрана труда и техносферная безопасность на объектах промышленности, транспорта и социальных инфраструктур» (г. Пенза, март 2025); IV Международной научно-практической конференции "Экологическая, промышленная и пожарная безопасность" (г. Астрахань, июнь 2025); Общероссийской научно-практической конференции «Экология. Риск. Безопасность» (г. Курган, ноябрь 2025); на научных семинарах кафедры техносферной безопасности (НИТУ МИСИС, 2020–2025).

Публикации по теме исследования

По теме диссертационной работы опубликовано 7 работ в журналах, рекомендованных ВАК, из них 5 работ опубликованы в изданиях, индексируемых в SCOPUS.

Личный вклад автора

Формулировка основной идеи, определение цели и задач исследования; сбор и обработку статистической информации с последующей интерпретацией полученных результатов; идентификацию производственных опасностей, характерных для процесса производства золота; а также разработку анкет для экспертного опроса, проведение опроса и обработку результатов. Подготовка научных статей по теме диссертационного исследования к публикации.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, пяти приложений; содержит 128 страниц, 19 рисунков, 19 таблиц, библиографический список из 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность темы диссертационной работы, установлены цели и основные задачи исследования, а также сформулированы объект,

предмет исследования, идея, степень достоверности результатов. Определены теоретическая и практическая значимость, раскрыта научная новизна.

Первая глава диссертации посвящена анализу аварийности и травматизма в металлургической отрасли России за последние десять лет и роли оценки риска аварий в обеспечении промышленной безопасности на предприятиях. Рассмотрены основные причины аварий на производстве. Проведен анализ существующих методов по оценке риска аварий в России и за рубежом, как в металлургии, так и смежных отраслях (нефтегазовая и угольная отрасли). Существующие методы оценки риска аварий не учитывают специфику производства золота: режимность объектов, секретность, которые могут повлечь трудности при эвакуации персонала в случае аварии.

На рис. 3 представлена динамика аварийности и несчастных случаев, включая смертельные, на металлургических предприятиях за 2014 по 2024 годы.

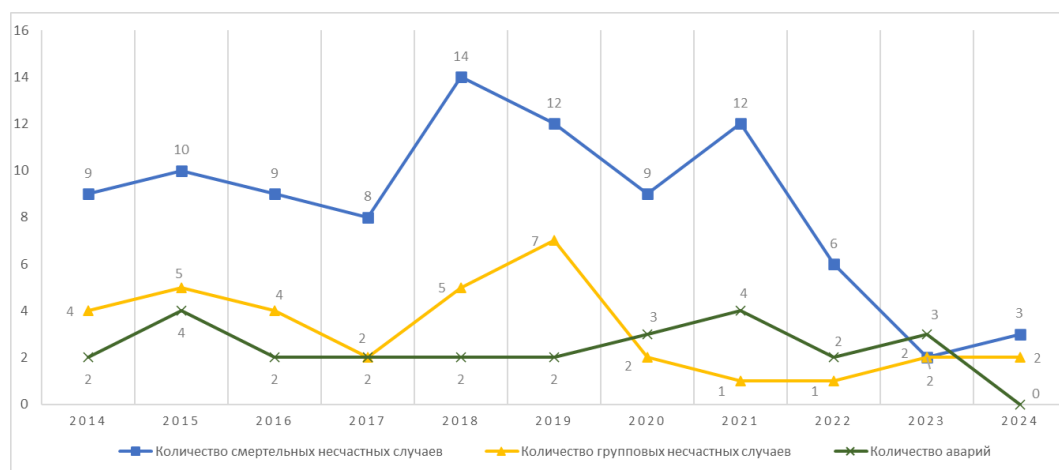


Рисунок 3 – Динамика аварийности и несчастных случаев в металлургической отрасли за 2014–2024 гг.

Количество аварий остается достаточно стабильным – в среднем, 2–3 аварии в год. Это говорит о том, что несмотря на предпринимаемые меры на предприятиях, риск аварий и сопутствующего травматизма по-прежнему сохраняется.

Согласно законодательству, предприятия, эксплуатирующие опасные производственные объекты I и II класса опасности (предприятия по производству золота – II и III классы опасности), обязаны иметь систему управления промышленной безопасностью (СУПБ), которая помогает повысить уровень промышленной безопасности, контролировать процессы и уменьшать влияние производственных факторов. Важнейшими элементами СУПБ являются идентификация опасностей, оценка и анализ риска аварий.

Во второй главе приведен анализ объемов добычи и производства золота, специфика производства золота, рассмотрена принципиальная технологическая схема аффинажа золота, выделены основные и вспомогательные процессы производства.

Объемы добычи и производства золота в России сохраняет положительную динамику: с каждым годом количество добытого золота увеличивается, вводятся в эксплуатацию новые разработки. Российская Федерация входит в лидирующую пятерку стран по добыче золота и занимает третье место, сразу после Китая и Австралии. Здесь следует отметить основные компании, которые вносят существенный вклад в переработку золота: ПАО «Полюс», Highland Gold, ОАО «УГМК», АО «Полиметалл», АО «ЮГК» и Нордголд.

На данный момент аффинаж драгоценных металлов могут осуществлять двенадцать предприятий России согласно Постановлению Правительства №972 от 17.08.1998 г.

На рис. 4 приведена принципиальная технологическая схема производства чистого золота. Проведена идентификация опасностей для основных (выделены на рисунке синим цветом) и вспомогательных (выделены на рисунке голубым цветом) этапов технологического процесса, выявлены характерные аварийные ситуации, которые могут возникнуть при производстве золота.

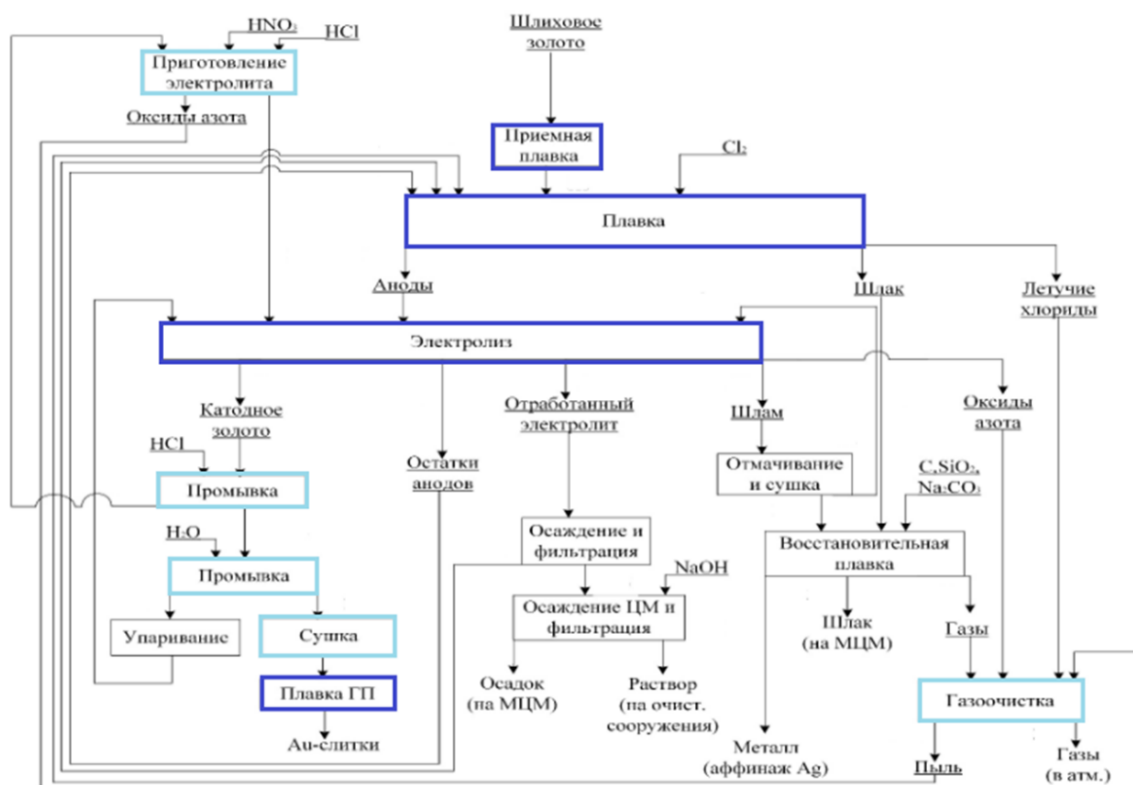


Рисунок 4 – Технологическая схема получения золота

Выделены следующие основные этапы:

- приемная плавка;
- хлорная плавка (метод Миллера);
- электролиз в «царской водке»;
- плавка готовой продукции.

В табл. 1 представлены основные этапы производства золота и идентифицированы опасности, характерные для каждого из них.

Таблица 1 – Идентификация опасностей, характерных для основных этапов производства золота

Этап технологического процесса получения золота	Наименование опасности	Аварии/Инциденты
Приемная плавка	Полное или частичное отключение электроэнергии	Полная остановка технологического процесса; Перегрев оборудования
	Разрушение футеровки индукционной печи	Остановка работы печи; взрыв при контакте воды с расплавом
	Выброс расплава	Пожар
	Нарушение гидроизоляции в системе водоохлаждения	Взрыв в результате попадания воды в расплав
	Использование грузоподъемных механизмов, технических устройств, падение грузов	Разрушение технологического оборудования, сооружений
Хлорная плавка (процесс Миллера)	Полное или частичное отключение электроэнергии	Полная остановка технологического процесса
	Разрушение футеровки индукционной печи	Остановка работы печи
	Применение газообразного хлора	Взрыв в следствие подачи хлора большими дозами и активного бурления массы
	Выброс расплава	Пожар
	Нарушение гидроизоляции в системе водоохлаждения	Взрыв в результате попадания воды в расплав
	Использование грузоподъемных механизмов, технических устройств, падение грузов	Разрушение технологического оборудования, сооружений
Электролиз в «царской водке»	Наличие азотной и соляной кислот	Неконтролируемый выброс кислот в результате разгерметизации трубопроводов подачи кислот
	Полное или частичное отключение электроэнергии	Полная остановка технологического процесса
	Поломка электродов	Остановка процесса электролиза
	Наличие химической агрессивной среды	Коррозия оборудования
	Перегрев электролита	Нарушение гидроизоляции электролизной ванны; коррозия оборудования

Плавка готовой продукции	Полное или частичное отключение электроэнергии	Полная остановка технологического процесса
	Выброс расплава	Пожар
	Использование грузоподъемных механизмов, технических устройств, падение грузов	Разрушение технологического оборудования, сооружений
	Разрушение футеровки индукционной печи	Остановка работы печи
	Нарушение гидроизоляции в системе водоохлаждения	Взрыв в результате попадания воды в расплав
	Наличие влаги в изложницах	Разбрызгивание расплава; взрыв; пожар
	Наличие дефектов изложниц	Взрыв; пожар

Аналогично была проведена идентификация опасностей для вспомогательных процессов производства золота (табл.2).

Таблица 2 – Идентификация опасностей, характерных для вспомогательных этапов производства золота

Этап технологического процесса получения золота	Наименование опасности	Аварии/Инциденты
Приготовление электролита	Наличие соляной и азотной кислот	Взрыв; пожар
Промывка катодного золота (соляная кислота, вода)	Разрывы шлангов и трубопроводов из-за наличия воды под высоким давлением	Разгерметизация системы
	Наличие соляной кислоты	Разрушение трубопроводов, оборудования
Сушка (электропечь)	Наличие высокой температуры	Возгорание; коррозия оборудования; разрушение футеровки печи
Газоочистка (Рукавный фильтр)	Засорение фильтра	Остановка работы фильтра
	Перегрев фильтра	Разрушение или разгерметизация фильтра; воспламенение фильтра
Газоочистка (Скруббер)	Перегрев скруббера	Выход из строя насосов; остановка работы газоочистной системы
	Забивание форсунок	Остановка процесса; разрушение скруббера или его частей
Хранение опасных и вредных веществ	Нарушение условий хранения и транспортировки газообразного хлора	Взрыв; пожар
	Нарушение условий хранения и транспортировки соляной и азотной кислот	Взрыв; пожар

На основании проведенной идентификации опасностей определено, что наиболее частыми авариями в результате возникновения тех или иных опасностей могут быть: полная остановка технологического процесса, взрыв, пожар, выход из строя или разрушение оборудования.

В третьей главе приводится разработанная методика по оценке риска аварий для предприятий по производству золота, учитывающая специфику производства, обоснование выбранных критериев.

Методика оценки риска аварий на предприятиях по производству золота заключается в следующем:

1. Идентификация опасностей для конкретного цеха/предприятия на основании установленного перечня опасностей (критериев).
2. Присвоение баллов каждому критерию в зависимости от установленных для него сценариев и баллов.
3. Суммарная балльная оценка по всем критериям определяется по формуле:

$$B = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{J_i} p_i \cdot q_{ij} \cdot B_{ij} \quad (1)$$

где p_i – весовой коэффициент, показывающий долю группы критериев; q_{ij} – весовой коэффициент, показывающий долю одного критерия в группе; B_{ij} – балльная оценка критерия; i – номер группы; j – номер критерия в группе.

4. По полученным результатам балльной оценки определяется уровень опасности цеха/предприятия и принимается решение о необходимости проведения мероприятий по снижению или устранению риска аварий в зависимости от установленного уровня опасности.

5. На основании результатов балльной оценки можно рассчитать удельную частоту аварий по формуле:

$$\lambda_n = \lambda_{cp} \cdot k_p \cdot k_b \cdot \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{J_i} p_i \cdot q_{ij} \cdot B_{ij}}{B_{const}}, \quad (2)$$

где λ_{cp} – средняя удельная частота аварий за последние пять лет (2020–2024 гг.); k_p – региональный коэффициент, отражающий особенности региона расположения предприятия; k_b – коэффициент учета срока эксплуатации здания; B_{const} – постоянная величина, равная 5,61, которая является средней балльной оценкой по всем критериям суммарно и определяется один раз на этапе разработки данной методики на основании статистических данных. По мере накопления отраслевой статистики значение средней балльной оценки может быть скорректировано.

Разработанная методика содержит группы критериев в соответствии с источниками аварий, которые были выявлены благодаря анализу технологических процессов получения золота, статистических данных по аварийности в металлургической отрасли, анализу климатических зон и природных явлений в регионах расположения предприятий.

Опасности при производстве были разделены на пять групп с указанием доли каждой группы Γ_{pi} с помощью коэффициента p_i , который показывает значимость каждой группы критериев. В каждой группе Γ_{pi} присутствует разное количество критериев J_i . Каждый критерий F_{i-j} имеет свое обозначение, в котором i – номер группы, j – номер критерия в группе. Для каждого значения критерия F_{i-j} (опасности возникновения того или иного события) на основании экспертной оценки было определено количество баллов B_{i-j} (по 10-балльной шкале), показывающих значимость критерия.

Выделены пять групп критериев: природные, технологические, конструктивные, непреднамеренный человеческий фактор; преднамеренный человеческий фактор.

Распределение значений коэффициентов p_i по различным группам причин аварий показано в табл. 3. Значимость критериев определена методом экспертной оценки.

Таблица 3 – Распределение значений коэффициентов p_i по различным группам причин аварий

Наименование группы		Доля группы, p_i
Γ_4	Непреднамеренный человеческий фактор	0,244
Γ_3	Технологические	0,235
Γ_2	Конструктивные	0,209
Γ_5	Преднамеренный человеческий фактор	0,177
Γ_1	Природные	0,135

В табл. 4, 6–9 представлены причины аварий для групп «Природные», «Технологические», «Конструктивные», «Непреднамеренный человеческий фактор» и «Преднамеренный человеческий фактор» соответственно.

В группе критериев №1 «Природные» рассматривают причины аварий, связанные с природными процессами, такие как высокие уровни воды, пожары, сильные ветра и пр. (табл. 4).

Таблица 4 – Группа критериев № 1 «Природные»

Наименование критерия		Доля критерия в группе, q_i
F_{1-1}	Высокие уровни воды (половодье, дождевой паводок, затор, зажор)	0,250
F_{1-2}	Комплекс неблагоприятных явлений	0,241
F_{1-3}	Крупный град	0,160
F_{1-4}	Сильный ливень	0,142
F_{1-5}	Лесные (и другие природные) пожары	0,131
F_{1-6}	Сильный, ураганный ветер	0,076

Доля природных источников аварий в процентном отношении была получена благодаря анализу климатических зон, где располагаются действующие аффинажные предприятия, и анализу статистических данных по природным явлениям и их последствиям в регионах (Московская, Рязанская, Челябинская, Свердловская, Костромская и Орловская области, Красноярский край) за последние пять лет.

Группа критериев №2 «Технологические» (табл. 6) включает причины аварий, которые связаны с возможными нарушениями в ходе технологических процессов, в работе оборудования, условиях хранения вредных веществ.

Современный завод по производству драгоценных металлов перерабатывает в среднем 150–250 кг золота в сутки. Поэтому из представленного ряда печей ИСТ (табл. 5) была выбрана печь наиболее подходящей емкости ИСТ-0,25, рассчитанная на расплав массой 250 кг.

Таблица 5 – Индукционные тигельные печи и их технические характеристики

Технические характеристики печи	Индукционные печи ИСТ					
	ИСТ-0,1	ИСТ-0,25	ИСТ-1	ИСТ-2,5	ИСТ-6	ИСТ-10
Емкость печи, т	0,1	0,25	1	2,5	6	10
Мощность печи, кВт	100	320	790	2350	2330	3200
Максимальная температура процесса, °С	1500	1600	1650	1600	1650	1650
Максимальная производительность, кг/ч	100	320	1330	4000	3500	5000

Электролиз золота ведут в небольших ваннах из фарфора или винипласта вместимостью 20–65 л. Процесс электролиза ведут при плотности тока 170–200 А/м², тепловой баланс ванны устанавливается при 60 °С, при 250 А/м² температура электролита

повышается до 65 °С, а при 340–360 А/м² она достигает 75 –78 °С. Плотность тока такой величины при нарушении хода технологического процесса либо при нарушении контакта в цепи способна привести к возникновению электрической дуги, короткому замыканию, перегреву установки (разрушение ванны или электродов, разгерметизация ванны).

При аффинаже золота на производстве используются такие вредные вещества, как газообразный хлор (хлорная плавка), серная и соляная кислоты (электролиз в царско-водочном растворе). Учет количества этих веществ и созданий условий хранения обязателен.

Таблица 6 – Группа критериев №2 «Технологические»

Наименование критерия		Доля критерия в группе, q_i
Основные технологические процессы		
F_{2-2}	Выброс расплава	0,071
F_{2-11}	Разрушение футеровки индукционной печи	0,066
F_{2-4}	Нарушение гидроизоляции в системе водоохлаждения	0,064
F_{2-10}	Наличие газообразного хлора	0,061
F_{2-1}	Нарушение в работе грузоподъемных механизмов, технических устройств, падение грузов	0,060
F_{2-6}	Наличие влаги в изложницах	0,057
F_{2-9}	Дефекты изложниц	0,054
F_{2-5}	Химически агрессивная среда	0,053
F_{2-3}	Полное или частичное отключение электроэнергии	0,051
F_{2-8}	Повышенная температура электролита	0,051
F_{2-7}	Поломка электродов	0,049
Вспомогательные технологические процессы		
F_{2-14}	Нарушение условий хранения газообразного хлора	0,062
F_{2-13}	Нарушение условий хранения соляной и азотной кислот	0,056
F_{2-15}	Перегрев скруббера	0,056
F_{2-18}	Забивание форсунок скруббера	0,053
F_{2-16}	Засорение рукавного фильтра	0,049
F_{2-17}	Перегрев фильтра	0,046
F_{2-12}	Повышенная температура при сушке золота	0,041

Группа критериев №3 «Конструктивные» (табл. 7) включает причины аварий, которые связаны с проектными, конструктивно-технологическими решениями. К первопричинам аварий зданий и сооружений относят грубые ошибки, просчеты на этапах проектирования, строительства и эксплуатации здания. При оценке надежности зданий и сооружений учитывается соответствие использованных материалов разработанному проекту; наличие (или их отсутствие) видимых повреждений (трещины различных видов, коррозионные повреждения); деформации конструкций (осадки, прогибы); превышение проектных нагрузок; условия эксплуатации здания. Также в этой группе учитывается специфика предприятий по производству золота (наличие дополнительных контрольно-пропускных пунктов внутри предприятия с целью предотвращения хищений), что может создавать трудности при эвакуации сотрудников в случае аварии).

Таблица 7 – Группа критериев №3 «Конструктивные»

Наименование критерия		Доля критерия в группе, q_i
F_{3-6}	Ошибки проектирования	0,195
F_{3-2}	Превышение проектных нагрузок	0,187
F_{3-5}	Использование некачественных и дефектных строительных материалов	0,177
F_{3-3}	Трещины (технологические, усадочные, волосные, продольные, вертикальные, сквозные)	0,173
F_{3-1}	Коррозия металлических конструкций	0,158
F_{3-4}	Наличие дополнительных контрольно-пропускных пунктов для прохода персонала внутри предприятия (режимность, высокий уровень секретности предприятий)	0,110

Группы критериев №4 «Непреднамеренный человеческий фактор» (табл. 8) включает причины аварий, которые связаны с воздействием человеческого фактора. По данным Ростехнадзора, около 60% аварий на производстве происходят по вине человека. К основным причинам аварий относят нарушение дисциплины труда, низкий уровень образования и квалификации сотрудников, нарушения в ходе технологического процесса. Также усталость, стресс или болезнь человека снижают внимание и скорость реакции, повышая вероятность ошибки при управлении технологическим процессом.

Таблица 8 – Группа критериев №4 «Непреднамеренный человеческий фактор»

Наименование критерия		Доля критерия в группе, q_i
F_{4-2}	Неудовлетворительное состояние здоровья сотрудника	0,279
F_{4-1}	Стаж работы сотрудника	0,255
F_{4-3}	Низкий уровень образования, квалификации сотрудника	0,241
F_{4-4}	Психозэмоциональное состояние сотрудника (ссоры, переживания, депрессия, болезни близких и другое)	0,225

В группу критериев №5 «Преднамеренный человеческий фактор» вошли критерии» (табл. 9), возникающие в результате осознанных, целенаправленных действий человека или групп лиц, направленных на нарушение рабочего процесса, нанесение ущерба или хищение материальных ценностей.

Таблица 9 – Группа критериев «Преднамеренный человеческий фактор»

Наименование критерия		Доля критерия в группе, q_i
F_{5-1}	Нарушение правил пожарной и промышленной безопасности, охраны труда	0,425
F_{5-3}	Диверсии	0,333
F_{5-2}	Противоправные действия (конфликты, беспорядки)	0,241

Для определения значимости и балльной оценки каждого критерия была применен метод экспертной оценки. Была определена группа экспертов в количестве 15 человек. В группу экспертов вошли специалисты в области оценки риска аварий, профессорско-преподавательский состав НИТУ МИСИС, сотрудники металлургических предприятий (АО «Московский завод по обработке специальных сплавов», АО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов», АО «НГМК»), государственные служащие (Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору).

Методом экспертных оценок были определены основные опасности производства золота, значимость групп критериев и каждого критерия в частности, проведено ранжирование критериев в каждой группе от наиболее опасного критерия к менее опасному, установлена балльная оценка для каждого критерия для различных сценариев развития событий. В табл. 10 приведены некоторые примеры установления балльных оценок критериев.

Таблица 10– Пример установления балльных оценок

Критерий	Категория	Балл
Технологические		
Разрушение футеровки индукционной печи F_{2-1}	Физический износ футеровки печи, температура процесса $>1200^{\circ}\text{C}$	10
	Наличие небольших трещин на футеровки печи, перегрев отдельных зон печи	6
	Футеровка печи без дефектов, соблюдение температурного режима	1
Выброс расплава F_{2-2}	Наличие расплавленного материала >100 кг	10
	Наличие расплавленного материала >50 кг	6
	Наличие расплавленного материала ≤ 50 кг	1
Конструктивные		
Ошибки проектирования F_{3-1}	Несоответствие расчетных моделей реальным условиям строительства и эксплуатации	10
	Конструктивные ошибки в отдельных элементах зданий/конструкций	6
	Соответствие расчетных моделей реальным условиям строительства и эксплуатации	1
Коррозия металлических конструкций F_{3-4}	Сквозная коррозия несущих элементов; глубокие очаги коррозии по всей конструкции; видимые деформации, вызванные коррозией	10
	Равномерная поверхностная коррозия; коррозия в местах соединений (сварные швы, болты); отслоение защитного покрытия (краски)	4
	Незначительная поверхностная ржавчина, не влияющая на несущую способность; конструкция имеет целостное антикоррозионное покрытие	2
Непреднамеренный человеческий фактор		
Низкий уровень образования, квалификации сотрудника F_{4-1}	Сотрудник не имеет образования, не проходит дополнительное обучение и аттестацию в области промышленной безопасности	10
	Сотрудник имеет соответствующее образование, но не проходит дополнительное обучение и аттестацию в области промышленной безопасности	4
	Сотрудник имеет соответствующее сфере деятельности образование, регулярно получает дополнительное образование и проходит аттестацию в области промышленной безопасности согласно законодательству	1
Стаж работы сотрудника F_{4-2}	Менее 1 года	9
	От 1 – го года до 5 лет	6
	От 5 до 10 лет	3
	Свыше 10 лет	1
Преднамеренный человеческий фактор		
Нарушение правил пожарной и промышленной безопасности, охраны труда F_{5-1}	Систематические, умышленные и осознанные нарушения правил пожарной и промышленной безопасности, охраны труда; грубые нарушения, создающие прямую угрозу возникновения аварии	10
	Несистематические нарушения, связанные с невнимательностью, желанием сэкономить время или недостаточной обученностью; наличие нескольких негрубых	6

	нарушений, выявленных у одного сотрудника или на одном участке	
	Единичные, случайные и быстроустраняемые нарушения; нарушения фиксируются редко и сразу же исправляются	2

Всего в работе приведено и оценено 37 критериев. Определение согласованности мнений экспертов проводилось путем расчета коэффициента конкордации, который показал высокую степень согласованности мнений экспертов (W в диапазоне 0,675–0,982).

Для определения уровня опасности конкретного участка или предприятия в целом предлагается использовать следующие уровни опасности, основанные на результатах балльной оценки:

- чрезвычайно высокий (более 7 баллов);
- высокий (от 5 до 7 баллов);
- средний (от 3 до 5 баллов);
- низкий (менее 3 баллов).

В работе введены региональный коэффициент и коэффициент учета срока эксплуатации зданий. Региональный коэффициент учитывает возможные риски, связанные с местом расположения предприятия и климатические особенности этого региона (табл. 11). Климатические регионы принимаются, исходя из климатического районирования России на основании Технического регламента таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты».

Таблица 11 – Определение регионального коэффициента

Наименование региона и климатического пояса	Красноярский край – Iб	Челябинская область, Свердловская область – II	Москва и Московская область, Костромская, Рязанская, Орловская и области - III
k_p	1,0	0,5	0,3

Коэффициент учета срока эксплуатации здания учитывает срок постройки и ввода в эксплуатацию зданий и сооружений предприятия. На сегодняшний день подавляющее большинство действующих аффинажных предприятий (более 60%) имеют срок эксплуатации более 50 лет, что подразумевает естественный износ и старение как зданий, так и используемого технологического оборудования. Около 17% предприятий имеют срок эксплуатации до 10 лет, тем самым уменьшая вероятность возникновения аварий по причине износа фондов (табл. 12).

Таблица 12– Определение коэффициента учета срока эксплуатации

Срок эксплуатации предприятия (цеха, участка)	Не более 10 лет	От 10 до 35 лет	От 35 до 50 лет	более 50 лет
k_b	0,5	0,3	1,0	1,5

В четвертой главе приведены результаты расчета по разработанной методике оценки риска аварий для двух действующих аффинажных предприятий. В ходе расчета были идентифицированы основные опасности производства. Разработанная методика показала свою практическую применимость, позволив не только количественно оценить уровень опасности, но и выделить ключевые точки — «слабые звенья» технологического процесса за счет применения балльной оценки.

В пятой главе приведены алгоритмы проведения оценки риска аварий на предприятиях по производству золота и определения удельной частоты аварий, разработан перечень мероприятий, направленных на снижение риска аварий и минимизацию их последствий.

Для проведения оценки риска аварий и определения мероприятий по снижению риска на предприятиях по производству золота предлагается алгоритм, приведенный на рис. 5. Алгоритмом предусмотрена дифференциация мероприятий по предотвращению аварий в зависимости от уровня опасности конкретного цеха либо предприятия.

При чрезвычайно высоком уровне опасности (более 7 баллов) предусмотрена временная приостановка деятельности предприятия и реализация мероприятий, направленных на снижение уровня опасности.

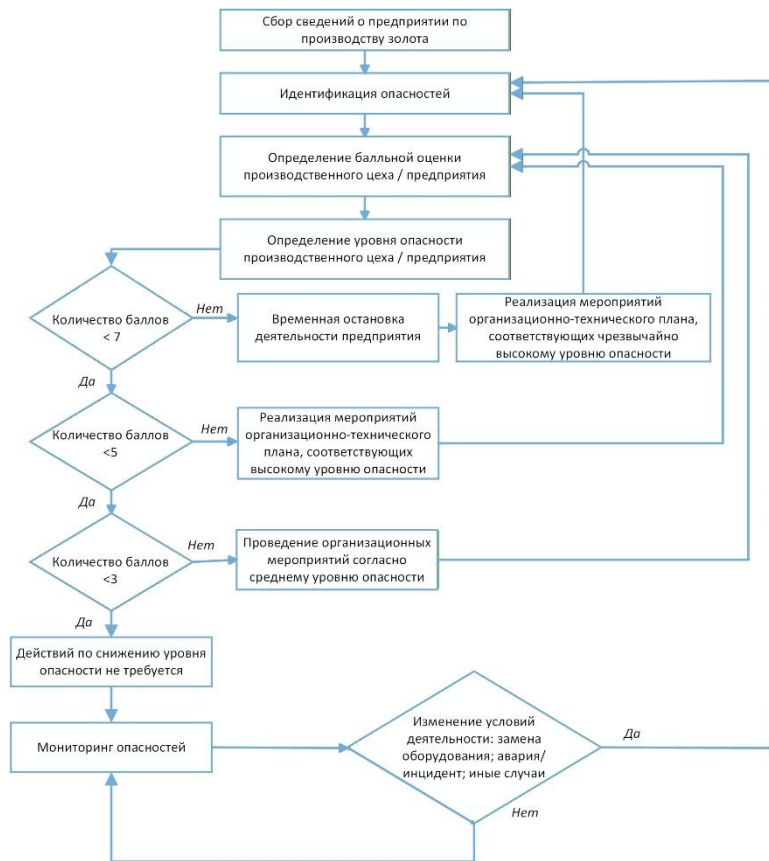


Рисунок 5 – Алгоритм проведения оценки риска аварий на предприятиях по производству золота

Также был разработан алгоритм определения удельной частоты аварий (рис. 6).

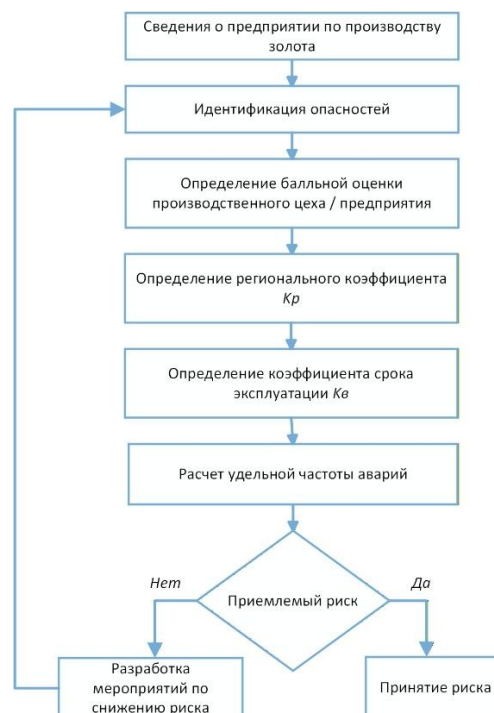


Рисунок 6 – Алгоритм определения удельной частоты аварий

Все мероприятия можно классифицировать на организационные и технические, а также в разрезе управляемости рисков (управляемые, частично управляемые и неуправляемые). В табл. 13 приведены мероприятия по снижению риска аварий по установленным уровням опасности.

Таблица 13 – Перечень мероприятий по снижению риска аварий

Уровень опасности (баллы)	Характеристика уровня опасности	Мероприятия
Чрезвычайно высокий (более 7)	грубые нарушения требований охраны труда и промышленной безопасности; частичное разрушение зданий и сооружений / технологического оборудования; возможны несчастные случаи с летальным исходом	Временная остановка деятельности предприятия; блокировка опасных зон; выполнение внеплановых капитальных ремонтов или усиления несущих конструкций цехов, фундаментов, оборудования; полная замена или глубокая модернизация аварийного технологического оборудования; проверка и ремонт всех систем аварийной сигнализации, вентиляции, пожаротушения и световой/звуковой сигнализации; переаттестация и обязательное обучение всего персонала, отстранение от работ неквалифицированных сотрудников; расследование несчастных случаев на производстве
Высокий (от 5 до 7)	частичное разрушение зданий и оборудования; возможны несчастные случаи различной степени тяжести	Локализованный ремонт и укрепление конструкций; корректировка планово-предупредительных ремонтов; замена изношенного оборудования или его частей; установка дополнительных средств защиты (ограждений, защитных кожухов); увеличение числа и регулярности инструктажей и обучений; проведение тренировок по эвакуации, оказанию ПМ; усиления контроля за соблюдением правил ППБ и ОТ, ужесточение контроля за допуском к работам повышенной опасности
Средний (от 3 до 5)	фиксируются незначительные нарушения требований охраны труда и промышленной безопасности; возможны редкие нарушения в ходе технологических процессов	Оперативное устранение нарушений; увеличение количества инструктажей, в том числе дополнительных тематических (по видам работ с большим количеством нарушений); корректировка графиков ТО в сторону увеличения их частоты для оборудования, где были зафиксированы сбои
Низкий (от 1 до 3)	предприятие функционирует в нормальном режиме, соответствует требованиям безопасности	регулярные инструктажи, обучение персонала, своевременная модернизация оборудования

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой дано решение актуальной для металлургической отрасли задачи разработки метода оценки и управления риском аварий при производстве золота, основанного на идентификации опасностей для

каждого участка технологической схемы, балльной оценки и выявлении наиболее уязвимых участков производства, для минимизации или предотвращения аварийных ситуаций.

Основные выводы и рекомендации, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведен анализ существующих методов по оценке риска аварий в металлургической отрасли и смежных отраслях, анализ существующих нормативных документов в области оценки риска аварий на опасных производственных объектах. Применяемые на данный момент методы носят общий характер и не учитывают специфику производства золота.

2. Определены опасности для основных и вспомогательных процессов производства золота, сформированы пять групп критериев: природные, технологические, конструктивные, непреднамеренный и преднамеренный человеческий фактор.

3. Разработан комплексный оценочный аппарат, позволяющий проводить оценку риска как для конкретного технологического процесса (приемная плавка, хлорная плавка, электролиз в «царской водке», плавка готовой продукции), так и для всей технологической цепочки в целом.

4. Методом экспертных оценок определена значимость групп критериев, каждого критерия отдельно и установлена их балльная оценка для различных категорий критериев.

5. На основании полученной балльной оценки сформированы четыре уровня опасности (низкий, средний, высокий и чрезвычайно высокий), которые позволяют провести ранжирование помещений и определить необходимые меры по устранению и минимизации риска аварий.

6. В качестве показателя риска предлагается расчет удельной частоты риска аварий, который учитывает регион нахождения предприятия и его срок эксплуатации.

7. Проведена апробация разработанной методики на примере двух предприятий, осуществляющих аффинаж золота. На основании полученной балльной оценки предприятий были определены наиболее уязвимые участки технологической схемы, установлены уровни опасности.

8. Разработано алгоритмическое обеспечение оценки риска аварий для предприятий по производству золота и расчета удельной частоты риска аварий.

9. Предложены мероприятия организационного и технического характера для минимизации или устранения риска аварий в зависимости от установленного уровня опасности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Меркулова А.М., Чавкина Л.Ю. Разработка метода балльной оценки риска аварий при производстве золота // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 11. С. 35–39. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-11-35-39. (ВАК, Scopus)
2. Арефьева Н.М., Горячев С.В., Зайцев И.Л., Чавкина Л.Ю. Анализ причин аварийности и травматизма на опасных производственных объектах металлургии// Безопасность труда в промышленности. 2025. № 5. С. 63–68. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-5-63-68. (ВАК, Scopus)
3. Меркулова А.М., Чавкина Л.Ю. Оценка риска аварий на предприятиях по производству золота// Безопасность труда в промышленности. 2025. № 4. С. 62–67. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-4-62-67. (ВАК, Scopus)
4. Арефьева Н.М., Чавкина Л.Ю. Оценка влияния человеческого фактора на промышленную безопасность предприятий цветной металлургии// Безопасность труда в промышленности. — 2024. — № 5. — С. 80-85. DOI: 10.24000/0409-2961-2024-5-80-85. (ВАК, Scopus)
5. Константинова А.А., Меркулова А.М., Переладов А.И., Чавкина Л.Ю. Риск-ориентированный подход в обеспечении промышленной безопасности при добыче золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2—1. — С. 100–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-100-112. (ВАК, Scopus)
6. Меркулова А.М., Чавкина Л.Ю. Анализ промышленной безопасности в горно – металлургическом комплексе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5 (специальный выпуск 14). – С. 88–97. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-14-88-97. (ВАК)
7. Меркулова А.М., Чавкина Л.Ю. Об изменениях в российском законодательстве о промышленной безопасности для горно – металлургического комплекса // Промышленная и экологическая безопасность в горно – металлургической отрасли: Горный информационно-аналитический бюллетень, №1 (специальный выпуск 1). – 2020. – с. 260-270. DOI:10.25018/0236-1493-2020-1-1-260-270. (ВАК)