ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):85-97
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.61:553.411:622.342.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_85

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ НА ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИХ ОЦЕНКИ

К.В. Беляков

Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: kirill.belyakov.000@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема негативного воздействия золотодобывающих предприятий на окружающую среду, обусловленного как постоянными выбросами и сбросами, так и потенциальными аварийными ситуациями. Цель работы – анализ источников геоэкологических рисков и современных методов их оценки. Проведен анализ 85 значительных аварий и инцидентов на золотодобывающих предприятиях за период 1971–2025 гг., выявлены и классифицированы их причины и масштабы последствий. Установлено, что наибольшая доля крупных происшествий (36%) связана с потерей устойчивости откосов хвостохранилищ, 29% – с нарушением дренажа и водоотлива. Показано, что доля аварий на золотодобывающих предприятиях составляет около 20–25% от всех аварий на хвостохранилищах в горной промышленности. Выявлено отсутствие комплексного риск-ориентированного подхода, учитывающего отраслевую специфику, взаимодействие элементов природно-технической геосистемы и экономические аспекты. Сформулированы критерии безопасности для ключевых рисков. Обоснована необходимость разработки интегрированной методологии оценки геоэкологических рисков, сочетающей количественные, качественные и вспомогательные методы (моделирование, картографирование, анализ чувствительности). Результаты исследования формируют теоретическую базу для создания эффективных систем управления геоэкологической безопасностью на золотодобывающих предприятиях.

Ключевые слова: геоэкологическая безопасность, экологический риск, золотодобывающие предприятия, риск-ориентированный подход, управление риском.

Для цитирования: *Беляков К. В.* Анализ источников геоэкологических рисков на золотодобывающих предприятиях и современных методов их оценки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 85–97. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_85.

Analysis of sources of geoecological risks at gold mines and the modern assessment methods

K.V. Beliakov

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia, e-mail: kirill.belyakov.000@yandex.ru

Abstract: The article deals with the problem of the environmental impact of gold mines, conditioned by both permanent emission and discharging, and by potential emergency situations. The aim of the study is to analyze the sources of geoecological risks and their assessment methods. The scope of the review encompassed 85 large accidents and incidents at gold mines

© К.В. Беляков. 2026.

over the period from 1971 to 2025, and identified and classified their causes and scales of consequences. It is found that the major percent of accidents (36%) are connected with slope instability at tailings dams, and 29%–with violation of drainage and water removal. The accidents at gold mines reach 20–25% of all accidents at tailings dams in the mining industry. There is no any integrated risk-oriented approach including the branch specifics, the interaction of elements inside a natural-and-technical geosystem and the economic aspects. The safety criteria are formulated for the key types of risk. The necessity of an integrated assessment methodology for the geoecological risks, involving the quantitative, qualitative and auxiliary methods (modeling, mapping, sensitivity analysis) is substantiated. The research results shape a theoretical framework for the creation of geological safety control systems at gold mines.

Key words: geoecological safety, environmental risk, gold mines, risk-oriented approach, risk management.

For citation: Beliakov K. V. Analysis of sources of geoecological risks at gold mines and the modern assessment methods. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1):85-97. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_85.

Введение

Добыча рудного золота — высокорентабельное направление горного производства, оказывающее значительное негативное воздействие на окружающую среду. Технический прогресс позволил заменить токсичные методы (амальгамацию) на более безопасные, но одновременно снизил бортовое содержание золота, что привело к переработке бедных руд и резкому увеличению объемов отходов — вскрышных пород и хвостов обогащения. Мощности крупных предприятий достигают 1 млн т руды в год, а объемы отходов сопоставимы с перерабатываемой массой [1].

Существующая проблема выражается как в хроническом загрязнении, так и в потенциальных катастрофических рисках. Инциденты на золотодобывающих предприятиях способны нанести огромный ущерб геологической, гидрогеологической и гидрологической системам. Специфическим фактором является наличие цианидов и роданидов в технологических растворах, а также повышенные содержания тяжелых металлов и мышьяка в рудах и грунтах. Разнообразие технологий добычи и переработки увеличивает число возможных аварийных сценариев.

Цель работы — анализ источников геоэкологических рисков на золотодобывающих предприятиях и современных методов их оценки. Основной вопрос, рассматриваемый в данной статье: каковы основные причины рисков и как они оцениваются.

Методы

Исследование выполнено с применением анализа российских и зарубежных литературных данных, открытых баз данных аварий, системного подхода, методов аналогий и статистики. Стратегия исследования включала два этапа: 1) детальная оценка типичных рисков и анализ аварийных ситуаций для выявления ключевых уязвимостей; 2) обработка статистики, графическое представление результатов и формулировка выводов.

Результаты

Анализ научных работ показал [2—4], что большинство исследований сосредоточено на оценке негативного воздействия (особенно при кучном выщелачивании), изучении хвостохранилищ, проблемах кислотообразования. При этом рассматриваются вопросы, посвященные уровню негативного воздействия на

окружающую среду со стороны золотодобывающих предприятий [5—7], причинам аварий, факторам риска, последствиям аварий и инцидентов, а также снижению экологических рисков.

При анализе проблем размещения хвостохранилищ и сопряженных с ними геоэкологических загрязнений особое внимание уделяется рискам залпового, единовременного сброса потенциально токсичных или токсичных хвостов на большие площади. Данные события описываются как риски при ненадлежащем управлении предприятием и хвостохранилищами. Исследователи часто и подробно изучали состав хвостов и вод хвостохранилищ. Внимание уделяется также наблюдению за закрытыми или заброшенными объектами, которые подвержены особому риску, а также применению наилучших доступных технологий на активных предприятиях [8, 9].

Ряд исследователей особое внимание уделяет вопросам кислотообразования и кислых стоков на территории предприятий. Из перечисленных исследований следует, что достаточно часто на территориях с отвалами и хвостохранилищами наблюдаются кислые подотвальные стоки, которые также включают в себя и тяжелые металлы. Авторы отмечают и подтверждают в своих исследованиях, что последствия данных загрязнений и само кислотообразование могут быть растянуты на десятки и даже сотню лет, что подтверждается фактическими измерениями и моделированием [10, 11].

Вопросы анализа и классификации типовых аварийных ситуаций и их причин (источников) на золотодобывающих предприятиях раскрываются в публикациях L.N. Bowker, D.M. Chambers et al. [12]. Стоит отметить, что в проанализированных работах данных авторов рассматриваются именно проблемы с хвостохранилищами и их безопасностью в целом, но при этом значительная доля данных сооружений относится к золотодобывающим предприятиям. В работах L.N. Bowker и D.M. Chambers отмечается, что старые предприятия часто не готовы к активному росту современных производственных мощностей. Возросшая производительность стимулирует наращивание отвалов и хвостохранилищ, повышая риски потери устойчивости, так как старые проекты могли не учитывать таких темпов или масштабов. В своих работах авторы приводят примеры подобных проблем на золотодобывающих предприятиях. Некоторые данные об авариях подробно анализируются в публичных отчетах организаций или собираются в публикациях/отчетах исследователей из отрасли или профильных организаций (таких как ICOLD — International Commission on Large Dams и др.) [13].

В работах по оценке экологических рисков материал также достаточно тесно связан с анализом/оценкой геоэкологических условий. В них приводятся методы анализа и оценки геоэкологических и геотехнологических/геотехнических рисков. Однако крайне малое количество работ затрагивает оценку подобных рисков с учетом всех ключевых особенностей золото-добывающих предприятий, большинство работ несут в себе более универсальный подход [14].

Вопросы разработки и совершенствования систем по обеспечению геоэкологической безопасности широко раскрывались с разных сторон. В работах по данному направлению часто затрагивается тема применения риск-ориентированного подхода. Среди различных горнодобывающих предприятий в основном риск-ориентированный подход оказался востребованным и получил развитие в управлении экологической безопасностью, промышленной безопасностью и охране труда в угольном секто-

ре. Данный подход нашел применение в управлении промышленной безопасностью в золотодобыче и горной промышленности в целом. При этом работ, которые освещали бы применение или эффекты от реализации данного подхода в компаниях по добыче золота, крайне мало [15].

Однако в исследованиях существуют и недоработки. В работах по оценке негативных воздействий со стороны золотодобывающих предприятий часто не оцениваются риски. Оценка воздействия происходит либо в рамках текущей производственной ситуации и будущего накопленного вреда, либо в формате упоминания рисков при реализации аварии на хвостохранилищах. В некоторых работах не учитываются факторы рисков при сравнении негативной нагрузки от разных объектов, например, участков кучного выщелачивания и обогатительных фабрик. Большинство работ, охватывающих горную промышленность, включали в себя более укрупненную и универсальную оценку риска, без учета ряда ключевых факторов по некоторым из объектов/операций предприятий.

В приведенных работах риски практически всегда рассчитывались без установления корреляции с экономическим ущербом.

Первые результаты по предложениям, связанные с развитием риск-ориентированного подхода, в настоящее время наблюдаются в области промышленной безопасности и охраны труда, преимущественно в угольной промышленности. В области геоэкологической безопасности золотодобычи данный подход еще не развивался, несмотря на свою высокую актуальность, согласно имеющимся данным. Подавляющее большинство существующих трудов по геоэкологической безопасности в промышленности останавливались на оценке рисков и предложении мероприятий по их снижению. В работах часто не учитывались отраслевая специфика, аварийная статистика, геологические и гидрогеологические данные, а также оценка состояния природно-технической геосистемы (ПТГС).

Таким образом, по итогам изучения множества исследовательских работ различных авторов можно подтвердить относительно низкий уровень проработки вопроса источников геоэкологических рисков и аварий на золотодобывающих предприятиях, а также стоит отметить отсутствие в настоящее время комплексных отраслевых подходов к оценке обозначенных рисков на данных предприятиях. Далее представлены результаты анализа материалов по данным проблемам, а также составленная по итогам анализа классификация.

Был проведен обширный анализ наиболее известных аварий и инцидентов на золотодобывающих предприятиях, произошедших в период с 1971 по 2025 гг.: проанализировано 85 аварийных случаев, из них 77 — по масштабу и 74 — по причинам. В анализ входили также значительные утечки, аварийные сбросы и прочие инциденты, основная доля аварий была связана с хвостохранилищами. Следует отметить, что мелкомасштабные типовые негативные воздействия, превышения лимитов выбросов/сбросов, прочие административные нарушения в данной статистике не учитывались в связи с иной спецификой учета, а также меньшей оглаской в публичных источниках; такие инциденты имеют значительно меньшие масштабы и доступная о них информация крайне ограничена.

Из результатов анализа исследований и перечней происшествий на хвостохранилищах следует вывод о значительной доле золотодобывающих предприятий в данной статистике. Доля подобных аварий на золотодобывающих предприя-

тиях к общему числу аварий в горной промышленности составляет около 1/4 или 1/5 части (по разным подборкам/перечням) от общего числа происшествий с хвостохранилищами горных предприятий по всему миру.

В процессе анализа наиболее публично известных аварий и инцидентов на золотодобывающих предприятиях были выявлены и классифицированы следующие основные типовые и значительные виды геоэкологических аварий на золотодобывающих предприятиях:

- утечки (потери) цианидов/роданидов из хвостохранилищ, установок или систем сорбционного/кучного выщелачивания, а также технологических коммуникаций и пульпопроводов (систем гидротранспорта);
- фильтрация кислых стоков подотвальных вод или вод хвостохранилищ, а также вод, загрязненных тяжелыми металлами и другими веществами;
- разрушения дамб хвостохранилищ и их оснований;
- переливы на хвостохранилищах;
- обрушения откосов отвалов/карьеров/дамб, что влечет за собой разрушение хвостохранилищ или других производственных объектов, например, установок кучного выщелачивания или других обогатительных систем, которые включают в себя технологические растворы.

В мировой практике крупные аварии чаще всего происходили на хвостохранилищах. Именно хвостохранилища представляют собой объекты со значительным объемом сухих, жидких и (или) пастообразных отходов, которые часто отличаются повышенными содержаниями примесей тяжелых металлов, мышьяка и прочих элементов. В ряде случаев в состав хвостов могут входить остаточные продукты обогащения (цианиды, роданиды), если они не были обезврежены или не успели разложиться в хвостах под воздействием ультрафиолета. Однако в подавляющем большинстве случаев основными негативными эффектами подобных крупных аварий на хвостохранилищах являлись селевые потоки, к которым ситуативно могли добавляться эффекты, связанные с проблемами специфики состава руд и грунтов территории добычи. Данные специфичные проблемы относятся не только к авариям на хвостохранилищах, но и к прочим инцидентам с отвалами вскрышных и пустых пород, потенциально связанным с загрязнениями поверхностных и подземных вод. К таким особенностям можно отнести:

- повышенный потенциал кислотообразования почв и грунтов;
- специфичные высокие содержания тяжелых металлов, мышьяка или других элементов в составе грунтов и руды.

По аналогии с классификацией аварий из трудов N.B. Lindsay, посвященной анализу аварий на хвостохранилищах, схожие параметры оценки были применены в т.ч. для прочих значительных аварий на золотодобывающих предприятиях. Это обосновывается аналогичными геоэкологическим воздействием и причинами данных инцидентов. Таким образом, составлена классификация аварий (геоэкологические происшествия) в сфере золотодобычи по шкале их серьезности, которая соответствуют определенному уровню геоэкологического ущерба, тесно связанного с объемом сбросов.

По масштабу (серьезности) последствий были выделены следующие типы аварий:

- очень серьезные аварии;
- серьезные аварии;
- другие аварии.

Каждый тип имеет свои характерные параметры.

В данной классификации учитываются следующие параметры аварий:

- очень серьезные аварии — объем сброса ⩾ 1 000 000 м^3;

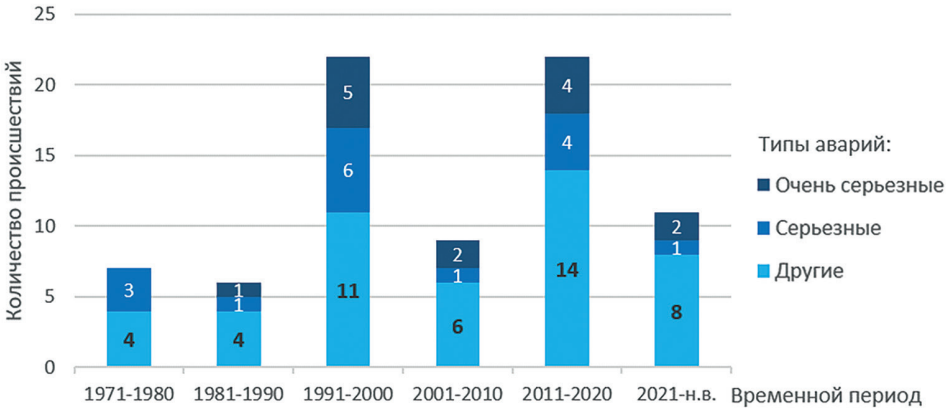


Рис. 1. Статистика геоэкологических происшествий в сфере золотодобычи
Fig. 1. Statistics of geoecological incidents in the gold mining industry

• серьезные аварии — сброс отходов объемом ⩾ 100 000 м³;

• другие аварии — сброс полутвердых отходов < 100 000 м³.

В ходе работы проводились классификация и статистический анализ аварий (геоэкологических происшествий) на золотодобывающих предприятиях, как в разбивке аварий различного масштаба по временным периодам, так и общее соотношение аварий по масштабу, в соответствии с принятой классификацией. Это было необходимо для обоснованной идентификации основных источников аварий, их причин, основных факторов рисков [16]. При наличии соответствующих данных и аналитических материалов по инцидентам и авариям осуществлялся более подробный технический анализ происшествий, проводились сравнения с нормативной базой и определялась степень отклонений от нее.

Статистика и классификация аварий (геоэкологических происшествий) на золотодобывающих предприятиях по масштабу последствий (серьезности) в разбивке по временным периодам приведена на рис. 1.

Более ранние годы в инфографику не включены в связи с более низким качеством учета аварий в прошлом, однако среднее количество серьезных и очень серьезных аварий с 1991 г. по настоящее время сильно возросло относительно периода 1971 — 1990 гг. Это связано с сильно возросшими производственными мощностями, скоростью наращивания дамб, освоением все более слож-

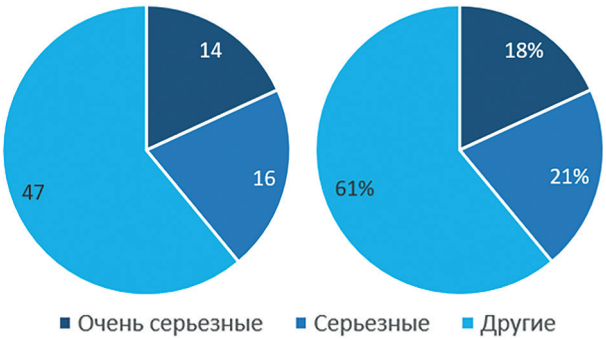


Рис. 2. Соотношение масштаба геоэкологических происшествий
Fig. 2. Ratio of the scale of geoecological incidents

ных ландшафтов и геологических условий, размещением больших объемов отходов.

Также нами было рассмотрено и проанализировано общее соотношение выделенных типов аварий по масштабу последствий (рис. 2).

По итогам анализа было выявлено, что количество «серьезных» и «очень серьезных» аварий достаточно схоже и составляет почти половину от всех учтенных в анализе значительных аварий. Так, даже относительно малые потери, фильтрации или обрушения часто приводят к значительным геоэкологическим последствиям. Подтвержденные загрязнения цианидом (по всей выборке из 74 происшествий по идентифицированным причинам): 19 (26%).

На следующем этапе анализировались и классифицировались причины аварий [17]. Те случаи, где истинную причину аварии установить не удалось, в статистику не включались, чтобы избежать искажений результатов. Важно отметить, что данная классификация является модифицированным вариантом классификации аварий на хвостохранилищах от ICOLD, которую L.N. Bowker использовал в своих работах. Как ранее уже отмечалось, в классификацию включены крупные аварии не только с хвостохранилищами, при этом в нее внесено несколько важных корректировок по части учета причин аварий. Некоторые причины, приведенные в работах L.N. Bowker, были отсеяны или переформулированы, на что есть соответствующие обоснования. К примеру, сейсмичность должна учитываться при проектировании и при выборе места размещения объекта, тогда основными причинами аварий при ожидаемых (характерных для территории) землетрясениях являются неустойчивость откосов или иные комплексные причины (за исключением аномальных, особенно разрушительных случаев). Перелив на хвостохранилище может влиять на размытие дамбы, но у него имеются свои первопричины (нарушение дренажа и водоотлива), что характеризует сам перелив уже как последствие сбоев в штатной проектной работе, а не первоначальную причину. Исходя из данных корректировок нами систематизированы причины значительных геоэкологических происшествий (инцидентов и аварий) на хвостохранилищах и прочих объектах золотодобывающих предприятий:

- разрушение основания дамбы хвостохранилища;
- нарушение дренажа и водоотлива;
- комплексные;
- неустойчивость откоса (хвостохранилища, отвала, элемента рельефа);
- ошибки в гидроизоляционных решениях.

Все перечисленные выше инциденты и аварии, их причины, а также возможные последствия (различные по масштабу и ущербу) образуют единую систему рисков. Итоги анализа распределения аварий по причинам их возникновения, в соответствии с приведенной классификацией, представлены на рис. 3.

Из анализа следует вывод о преобладании следующих причин аварий:

- неустойчивость откоса (21 событие (28 %));
- комплексные (19 событий (26%));
- нарушение дренажа и водоотлива (18 событий (18%)).

Данные категории составляют 78% от общего объема идентифицированных причин произошедших аварий. Около 14% от общего числа идентифицированных аварийных процессов дополнительно сопровождались подтвержденным разжижением грунтов дамбы хвостохранилища. Был проведен анализ распределения причин аварий и инцидентов по типам серьезности последствий, его результаты представлены в табл. 1.

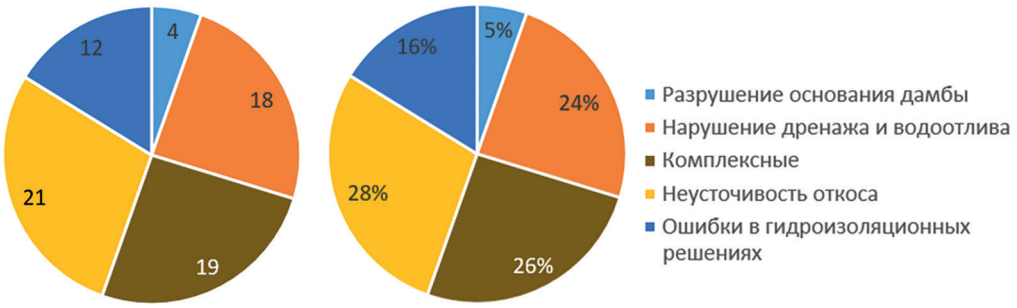


Рис. 3. Анализ и классификация причин геоэкологических происшествий в сфере золотодобычи
Fig. 3. Analysis and classification of the causes of geoecological incidents in the gold mining industry

Наибольшая доля всех самых масштабных и серьезных происшествий происходила из-за аварий на хвостохранилищах при разрушении оснований их дамб, потере устойчивости откоса, нарушениях дренажа и водоотлива, а также при комплексе причин. В процентном выражении от общего числа «очень серьезных» происшествий показатели следующие: неустойчивость откоса — 36%; нарушения дренажа и водоотлива — 29%; комплексные причины — 14%; разрушение основания дамбы — 14%.

Отдельно следует отметить результаты анализа соотношения происшествий на действующих объектах золотодобывающих предприятий и недействующих (законсервированных). Для золотодобывающих предприятий доля аварий и инцидентов на действующих объектах составила около 70—80% из всей выборки, что говорит о выраженном преобладании рисков крупных происшествий именно на объектах такого типа. Говоря о долях «серьезных» и «очень серьезных» аварий на действующих и недействующих объектах, можно подтвердить аналогичные закономерности: на активных объектах серьезные и масштабные происшествия случались чаще.

Таким образом, проведенные классификация и анализ аварий на золотодобывающих предприятиях позволили получить исчерпывающий объем информации об их масштабах и уровнях серьезности, о потенциальных последствиях и причинах реализации. Данные результаты в совокупности с изученными источниками информации представляют собой фундаментальную базу для наших разработок.

Анализ позволил выявить основные типы проблем и рисков на предприяти-

Таблица 1

Распределение причин аварий и инцидентов по типами серьезности последствий
Distribution of causes of accidents and incidents by type of severity of consequences

Причина / Масштаб аварии	Разрушение основания дамбы	Нарушение дренажа и водоотлива	Комплексные	Неустойчивость откоса	Ошибки в гидроизоляционных решениях	Всего
Очень серьезные	2 (50%)	4 (22%)	2 (11%)	5 (24%)	1 (8%)	14 (19%)
Серьезные	1 (25%)	4 (22%)	4 (21%)	3 (14%)	1 (8%)	13 (18%)
Другие	1 (25%)	10 (56%)	13 (68%)	13 (62%)	10 (83%)	47 (64%)
Всего	4 (100%)	18 (100%)	19 (100%)	21 (100%)	12 (100%)	74 (100%)

Таблица 2

Критерии безопасности, коррелирующие с реализацией рисков
Safety criteria correlating with risk realization

Риск	Критерий безопасности
Потеря устойчивости дамбы (обрушение)	Фактор безопасности или коэффициент запаса устойчивости
Перелив через дамбу (с обрушением дамбы или без)	Превышение гребня дамбы над уровнем воды
Внутренняя эрозия дамбы (с потерями)	Сравнительное отношение критического градиента напора и действующего градиента
Инфильтрации технологических растворов или загрязненных вод на различных объектах	Коэффициент фильтрации

ях, разработать ключевые критерии безопасности (табл. 2).

На основе вышеприведенных результатов и изученных актуальных подходов к оценке рисков был проведен анализ методологической базы по оценке экологических рисков [18, 19]. Как наиболее эффективные и применимые методы для оценки геоэкологических, геотехнологических, экологических и ряда прочих производственных рисков, были выделены следующие:

- квантитативные — основаны на количественном анализе (дисперсионный анализ и нормальное распределение, кластерный и факторный анализ, регрессионно-корреляционный анализ);
- качественные — основаны на экспертных оценках (качественная характеристика вероятности и воздействия событий);
- смешанные/гибридные (качественно-количественные) или интегрированные;
- матрица последствий/вероятности (матрица рисков или тепловая карта);
- анализ чувствительности;
- метод «Дерева событий»;
- метод моделирования.

Все перечисленные методы имеют свои преимущества и недостатки (ограничения). Наибольшую эффективность они будут представлять в комплексном применении, с адаптацией под конкретную специфику и тип объекта. Все перечисленные методы применяются на практике, но обычно это происходит в упрощенном виде (например, применение экспертных оценок и расчет риска на их основе).

Квантитативные (основанные на количественном анализе) и качественные методы, а также совмещенные — интегрированные методы могут применяться повсеместно в сфере управления предприятиями, в том числе в области управления геоэкологическими, геотехнологическими, экологическими и прочими рисками. Наиболее эффективным дополнением для квантитативных и интегрированных подходов будут являться методы моделирования, картографирования, анализ чувствительности. Это связано с их возможностью визуализировать закономерности и понятно демонстрировать изменения в динамике, что очень важно для управления безопасностью и рисками. Необходимо отметить, что существующие стандарты и методики не привязаны к отдельным видам промышленности, не учитывают их специфику и ключевые уязвимости.

Важно отметить, что различные расчетные или интегрированные методы оценки экологических, геоэкологических и геотехнологических рисков основаны на интерпретации в количественные значения: то есть экспертных оценках,

данных об ущербе окружающей среде (в площади, объеме, флоре, фауне, превышении нормативов и т.д.). Но в исследованиях, посвященных разработке и применению данных методов, не решен вопрос соотношения различных показателей риска, а также предпосылок для их расчета, с экономическими, финансовыми и юридическими рисками. При множественности методов и подходов, компаний и объектов такие методологические пробелы усложняют интеграцию методологии оценки рисков на предприятия. Таким образом, данные проблемы в методах оценки рисков еще предстоит решать исследователям и специалистам компаний в ближайшем будущем, это позволит повысить безопасность и принимать более эффективные управленческие решения.

Обсуждение результатов

Результаты исследований подтверждают существование ряда значительных пробелов в области методологии оценки геоэкологических рисков, в частности, оценки рисков для золотодобывающих предприятий. К подобным пробелам можно отнести:

- фрагментарное раскрытие информации по авариям и инцидентам в исследованиях по золотодобывающим предприятиям, часто акцент исследователей смещается к одной из форм негативного воздействия, из-за чего страдает качество оценки иных явлений и процессов;
- слабый акцент на потенциальном ущербе и рисках, отсутствие единого обоснованного вектора по развитию риск-ориентированного подхода. Часто идет оценка негативного воздействия и его моделирование по текущим показателям, но упускается вопрос превентивного снижения ряда критических рисков, не ведется подробное моделирование рисков по экологическому и финансовому ущербу;
- редкость применения комплексного (интегрированного) подхода при оценке экологических, геоэкологических и геотехнологических рисков. Исследователи часто ограничиваются расчетными методами или экспертной оценкой, без использования других методов для подтверждения выводов или оценки различных сценариев.
- отсутствие комплексного риск-ориентированного подхода, основанного на анализе характера взаимодействия всех элементов формируемой природно-технической геосистемы и учитывающего отраслевую специфику предприятия.

По итогам исследования, направленного на закрытие данных пробелов, нами были получены следующие важные результаты:

- составлена классификация и проведен анализ аварий и инцидентов на золотодобывающих предприятиях по серьезности (масштабу) и причинам. Классифицированы сами происшествия;
- сформирован перечень основных, наиболее эффективных подходов к оценке экологических рисков и обозначены их наиболее эффективные сочетания;
- подготовлена обоснованная теоретико-аналитическая база для дальнейших инновационных разработок методологии по управлению рисками, которая будет лишена типовых недостатков актуальных подходов.

Наши результаты показывают доминирующую роль хвостохранилищ в структуре рисков, что часто упускается исследователями, сосредоточенными на текущем негативном воздействии. Анализ причин аварий позволяет сфокусироваться на ключевых критериях безопасности. Выводы о преобладании аварий на действующих объектах согласуются с общемировыми тенденциями для горнодобычи.

Считаем наиболее эффективным интегрированный подход с привлечением вспомогательных методов (моделирова-

ние, картографирование, анализ чувствительности) и учетом всех специфических характеристик объекта (геология, гидрогеология, климат, технология). Такая комплексная оценка обеспечит принятие обоснованных управленческих решений.

Отсутствие общепринятых подходов к геоэкологической безопасности в горной отрасли, особенно в золотодобыче, объясняется неразработанностью риск-ориентированной методологии. Даже при наличии стандартов ISO и ГОСТов предприятия не имеют эффективных инструментов управления безопасностью на всех стадиях — от эксплуатации до ликвидации. Существующие меры не включают оценку природно-технического состояния геосистемы.

Концепция риск-ориентированного подхода часто прорабатывается лишь на концептуальном уровне. Требуется внедрение специализированных комплексных решений, сочетающих экологическую и финансовую эффективность, что создаст мотивацию для руководства. Полученные результаты создают основу для развития такого подхода в золотодобыче.

Заключение

В ходе исследования проведены анализ и классификация аварий на золотодобывающих предприятиях, систематизированы современные методы оценки экологических рисков. Подтверждено отсутствие комплексных отраслевых критериев и методов геоэкологической безопасности. Основные причины — недостаточный учет технологических, геологических и гидрогеологических характеристик, а также экономических аспектов. Риск-ориентированный подход находится на начальной стадии развития.

Результаты работы могут служить агрегированным аналитическим материалом для будущих разработок в области геоэкологической безопасности золотодобычи. Рекомендуется исследователям и компаниям применять вспомогательные методы (моделирование, сравнительный анализ, финансовые расчеты ущерба) для повышения эффективности управления рисками. Дальнейшее развитие методологии в теоретическом и практическом направлениях будет способствовать внедрению риск-ориентированного подхода на реальных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Glotov V. E.*, *Chlachula J.*, *Glotova L. P.*, *Little E.* Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East // Engineering Geology. 2018, vol. 245, pp. 236—247. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.08.012.

2. *Laker M. C.* Environmental impacts of gold mining—With special reference to South Africa // Mining. 2023, vol. 3, no. 2, pp. 205—220. DOI: 10.3390/mining3020012.

3. *Mestanza-Ramón C., Ordoñez-Alcivar R., Arguello-Guadalupe C., Carrera-Silva K., D'Orio G., Straface S.* History, socioeconomic problems and environmental impacts of gold mining in the Andean region of Ecuador // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022, vol. 19, no. 3, article 1190. DOI: 10.3390/ijerph19031190.

4. *Mencho B. B.* Assessing the effects of gold mining on environment: A case study of Shekiso district, Guji zone, Ethiopia // Heliyon. 2022, vol. 8, no. 12, article e11882. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11882.

5. *Capparelli M. V.*, *Cabrera M., Rico A., Lucas-Solis O., Alvear-S. D., Vasco S., Galarza E., Shiguango L., Pinos-Velez V., Pérez-González A., Espinosa R.*, *Moulatlet G. M.* An integrative approach to assess the environmental impacts of gold mining contamination in the Amazon // Toxics. 2021, vol. 9, no. 7, article 149. DOI: 10.3390/toxics9070149.

6. *Tampushi L. L., Onyari J. M., Muthama N. J.* A review of mining regulations and environmental sustainability of artisanal gold mining sector // Asian Journal of Environment & Ecology. 2021, vol. 16, no. 4, pp. 1—16, article AJEE.73853. DOI: 10.9734/AJEE/2021/v16i430253.

7. *González-Morales M., Rodríguez-González M. Á., Fernández-Pozo L.* Status of ecosystem services in abandoned mining areas in the Iberian peninsula: Management proposal // Toxics. 2023, vol. 11, article 275. DOI: 10.3390/toxics11030275.

8. *Федянин А. С.*, *Зотеев О. В.* Методика оценки геотехнических рисков горнодобывающих предприятий // Горный журнал. — 2024. — № 1. — С. 9—14. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.02.

9. *Рыбникова Л. С.*, *Рыбников П. А.*, *Галин А. Н.* Процессы формирования подотвальных вод и мероприятия по минимизации их влияния на гидросферу (на примере Лёвихинского рудника, Средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2025. — Т. 336. — № 2. — С. 102—115. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517.

10. *Куликова Е. Ю.*, *Баловцев С. В.*, *Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205—216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

11. *Куликова А. А.*, *Овчинникова Т. И.* К вопросу снижения геоэкологических рисков на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2-1. — С. 251—262. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

12. *Bowker L. N.*, *Chambers D. M.* In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk & public liability reach all time highs // Environments. 2017, vol. 4, no. 4, article 75. DOI: 10.3390/environments4040075.

13. *Cacciuttolo C., Cano D., Custodio M.* Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru // Toxics. 2023, vol. 11, article 462. DOI: 10.3390/toxics11050462.

14. *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.

15. *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. — С. 199—208. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.

16. *Leonenko A. V.*, *Krupskaya L. T., Usikov V. I., Filatova M. Yu., Bubnova M.* Geoecological assessment and environmental monitoring within the boundaries of the impact of the development of gold deposits using GIS technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022, vol. 1061, no. 1, article 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012016.

17. *Соколов И. В.* Результаты геотехнологических и геомеханических исследований, направленных на повышение безопасности и эффективности горного производства // Горная промышленность. — 2025. — № 4S. — С. 127—123. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133.

18. *Зиновьева О. М.*, *Колесникова Л. А.*, *Меркулова А. М.*, *Смирнова Н. А.* Управление экологическими рисками на горнодобывающих предприятиях // Уголь. — 2022. — № 3. — С. 76—80. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80.

19. *Куликова Е. Ю.*, *Баловцев С. В.*, *Скопинцева О. В.* Геоэкологический мониторинг при ведении горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 580—588. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588. ГИАБ

REFERENCES

1. Glotov V. E., Chlachula J., Glotova L. P., Little E. Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East. *Engineering Geology*. 2018, vol. 245, pp. 236—247. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.08.012.

2. Laker M. C. Environmental impacts of gold mining—With special reference to South Africa. *Mining*. 2023, vol. 3, no. 2, pp. 205—220. DOI: 10.3390/mining3020012.

3. Mestanza-Ramón C., Ordoñez-Alcivar R., Arguello-Guadalupe C., Carrera-Silva K., D'Orio G., Straface S. History, socioeconomic problems and environmental impacts of gold mining in the Andean region of Ecuador. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, vol. 19, no. 3, article 1190. DOI: 10.3390/ijerph19031190.

4. Mencho B. B. Assessing the effects of gold mining on environment: A case study of Shekiso district, Guji zone, Ethiopia. *Heliyon*. 2022, vol. 8, no. 12, article e11882. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11882.

5. Capparelli M. V., Cabrera M., Rico A., Lucas-Solis O., Alvear-S. D., Vasco S., Galarza E., Shiguango L., Pinos-Velez V., Pérez-González A., Espinosa R., Moulatlet G. M. An integrative approach to assess the environmental impacts of gold mining contamination in the Amazon. *Toxics*. 2021, vol. 9, no. 7, article 149. DOI: 10.3390/toxics9070149.

6. Tampushi L. L., Onyari J. M., Muthama N. J.. A review of mining regulations and environmental sustainability of artisanal gold mining sector. *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2021, vol. 16, no. 4, pp. 1 — 16, article AJEE.73853. DOI: 10.9734/AJEE/2021/v16i430253.

7. González-Morales M., Rodríguez-González M. Á., Fernández-Pozo L. Status of ecosystem services in abandoned mining areas in the Iberian peninsula: Management proposal. *Toxics.* 2023, vol. 11, article 275. DOI: 10.3390/toxics11030275.

8. Fedyanin A. S., Zoteev O. V. Procedure of geotechnical risk assessment in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 1, pp. 9 — 14. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.02.

9. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Galin A. N. Processes of formation of waste waters and measures to minimize their impacton the hydrosphere (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2025, vol. 336, no. 2, pp. 102 — 115. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2025/2/4517.

10. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoecological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205 — 216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

11. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. On the issue of reducing geoecological risks at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 251 — 262. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-251-262.

12. Bowker L. N., Chambers D. M. In the dark shadow of the supercycle tailings failure risk & public liability reach all time highs. *Environments*. 2017, vol. 4, no. 4, article 75. DOI: 10.3390/environments4040075.

13. Cacciuttolo C., Cano D., Custodio M. Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*. 2023, vol. 11, article 462. DOI: 10.3390/toxics11050462.

14. Konstantinova A. A., Merkulova A. M., Pereladov A. I., Chavkina L. Yu. Risk-based approach to keep industrial safety in the mining of gold-bearing ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 100 — 112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-100-112.

15. Ovchinnikova T. I., Pototskiy E. P., Firsova V. M. Risk-based approach to hazard assessment in the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2-1, pp. 199 — 208. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.

16. Leonenko A. V., Krupskaya L. T., Usikov V. I., Filatova M. Yu., Bubnova M. Geoecological assessment and environmental monitoring within the boundaries of the impact of the development of gold deposits using GIS technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022, vol. 1061, no. 1, article 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/1061/1/012016.

17. Sokolov I. V. Results of geotechnological and geomechanical studies aimed at improving the safety and efficiency of mining operations. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 4S, pp. 127 — 123. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4S-127-133.

18. Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M., Smirnova N. A. Environmental riskmanagement at mining enterprises. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 76 — 80. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80.

19. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Geoecological monitoring during mining operations. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 580 — 588. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Беляков Кирилл Валерьевич — аспирант, Университет науки и технологий МИСИС, e-mail: kirill.beliakov.000@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

K.V. Beliakov, Graduate Student, University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: kirill.beliakov.000@gmail.com.

Получена редакцией 12.07.2026; получена после рецензии 10.08.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 12.07.2026; received after the review 10.08.2026; accepted for printing 20.10.2026.