ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(12):84-99
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 504.61:553.411:622.342.1 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_84

РАЗРАБОТКА РИСК-ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИТЕРИЕВ И ПОДХОДА К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

К.В. Беляков

[1] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия, e-mail: kirill.beliakov.000@gmail.com

Аннотация: Всемирная статистика аварий на объектах золотодобычи показывает, что недропользователи часто недооценивают риски, что приводит к масштабным негативным геоэкологическим последствиям. Отличительной чертой данных происшествий является загрязнение окружающей среды цианидами и тяжелыми металлами, часть аварий сопровождается селевыми потоками. Современные подходы к обеспечению геоэкологической безопасности не учитывают характер взаимодействия всех элементов сформированной природно-технической геосистемы и отраслевую специфику предприятия. Таким образом, целью нашего исследования является разработка критериев, основанных на оценке риска, и подхода к обеспечению геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях, которые позволят гораздо эффективнее управлять уровнем геоэкологической опасности на предприятиях. Методология работы основана на индуктивном подходе с использованием математической статистики и системного анализа. В ходе исследования был проведен обширный анализ аварий на золотодобывающих предприятиях, который позволил выявить основные типы рисков на предприятиях, разработать ключевые критерии и интерпретировать их в соответствии с выбранным подходом. Для комплексной оценки геоэкологических опасностей разработаны коэффициенты весомости, а также подход, основанный на приведенном алгоритме расчета. Результаты данной работы являются важным шагом для дальнейшей разработки обоснованного и апробированного перечня критериев и методов обеспечения геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях, которые потенциально могут быть внедрены на практике.

Ключевые слова: геоэкологическая безопасность, риск, золотодобывающие предприятия, риск-ориентированный подход, критерии безопасности, снижение рисков, управление риском.

Для цитирования: *Беляков К. В.* Разработка риск-ориентированных критериев и подхода к обеспечению геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 12. – С. 84–99. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_84.

Development of risk-based criteria and an approach to ensuring geoecological safety at gold mining enterprises

K.V. Beliakov

[1] National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia,
e-mail: kirill.beliakov.000@gmail.com

© К.В. Беляков. 2026.

Abstract: Global statistics on accidents at gold mining facilities show that subsoil users often underestimate the risks, which leads to large-scale negative geo-ecological consequences. A distinctive feature of these incidents is the pollution of the environment with cyanides and heavy metals; some accidents are accompanied by mudflows. Modern approaches to ensuring geo-ecological safety do not take into account the nature of the interaction between all elements of the formed natural-technical geosystem and the industry-specific characteristics of the enterprise. Thus, the goal of our research is to develop criteria based on risk assessment and an approach to ensuring geo-ecological safety at gold mining enterprises, which will make it possible to manage the level of geo-ecological hazard at the enterprises much more effectively. The methodology of the work is based on an inductive approach using mathematical statistics and system analysis. During the study, an extensive analysis of accidents at gold mining enterprises was carried out, which made it possible to identify the main types of risks at the enterprises, develop key criteria, and interpret them in accordance with the chosen approach. For a comprehensive assessment of geo-ecological hazards, weighting coefficients have been developed, along with an approach based on the provided calculation algorithm. The results of this work represent an important step towards further development of a well-founded and proven set of criteria and methods for ensuring geo-ecological safety at gold mining enterprises, which can potentially be implemented in practice.

Key words: geoecological safety, risk, gold mining enterprises, risk-based approach, safety criteria, risk reduction, risk control.

For citation: Beliakov K. V. Development of risk-based criteria and an approach to ensuring geoecological safety at gold mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(12):84-99. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_12_0_84.

Введение

Статистика аварий на золотодобывающих объектах подтверждает недооценку рисков в данной области, что грозит геоэкологическими инцидентами и авариями различного масштаба. В результате таких происшествий происходит загрязнение окружающей среды — как селевыми потоками жидких отходов и грунтов, так и специфичными загрязнителями золотодобычи: цианидами и тяжелыми металлами [1—3].

Проблема выражается в отсутствии отраслевых критериев и методов геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях, что связано с недостаточным учетом технологических, геологических и гидрогеологических характеристик, а также экономических аспектов. С этим связаны потенциальные негативные последствия как для экологии и социального окружения, так и для предприятия — в виде экономических и прочих эффектов [4, 5]. В подобных условиях особо актуальным становится вопрос о разработке и развитии отраслевого риск-ориентированного подхода.

Цель работы — разработка риск-ориентированных критериев и подхода к обеспечению геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях.

Методы

Работа выполнена с применением системного анализа на основе ранее проведенного аналитического исследования аварий на золотодобывающих предприятиях и материалов по оценке экологи-

ческих рисков [6]. В части разработки риск-ориентированных критериев и подхода используется интегративный метод, позволяющий объединить и преобразовать данные по ключевым методикам с учетом специфики выбранных предприятий и принятых на них решений [7—9]. В интегрированном виде использовались и тестировались качественный и квантитативный подходы для балльной оценки риска и оптимизации расчетов.

Результаты

В работе предложен новый комплексный риск-ориентированный подход к обеспечению геоэкологической безопасности для золотодобывающих предприятий, основанный на исключении основных недостатков других методов и учете модифицированных интегрированных факторов при оценке рисков (уровня опасности).

Структура разработанного риск-ориентированного подхода включает:

- определение значений риск-ориентированных критериев (показателей) и модифицирующих факторов для выбранных объектов предприятия;
- оценку уровня геоэкологической опасности (риска) выбранных объектов;
- идентификацию опасных зон и объектов, их визуальную локализацию, картографирование;
- прогнозное моделирование потенциальных геоэкологических происшествий на основе проведенных расчетов и оценок;
- проведение анализа чувствительности, определение и обоснование основных векторов по принятию решений по снижению рисков;
- разработку предложений и рекомендаций в части снижения рисков, повторного моделирования с учетом потенциальных улучшений, прогнозное подтверждение эффективности предлагаемых решений. Экономическое обоснование предлагаемых решений;
- реализацию предложений и рекомендаций для эффективного повышения геоэкологической безопасности, исходя из ранее полученных итогов оценок, расчетов и моделирования (внесение коррективов по принципу обратной связи, при необходимости).

Схематично данный подход представлен на рисунке.

Анализ статистических данных по факторам, влияющим на развитие и причины аварий, позволил составить перечень основных рисков на золотодобыва-

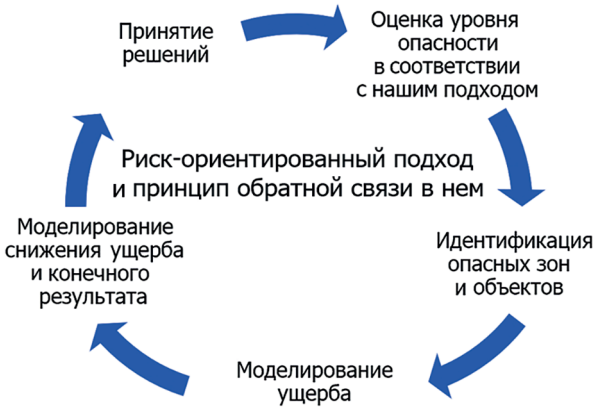


Схема реализации риск-ориентированного подхода
The scheme of implementation of the risk-based approach

Таблица 1

Значения, диапазоны значений показателей (критериев) безопасности и их описание, коррелирующие с реализацией рисков для хвостохранилищ
The values, ranges of values of safety indicators (criteria), and their descriptions that correlate with the realization of risks for tailings ponds

Риск	Критерий безопасности	Значения показателей и их описание
Потеря устойчивости дамбы хвостохранилища (обрушение)	k_s (коэффициент запаса устойчивости) или аналог: FoS (Factor of Safety — фактор безопасности)	$\geqslant 1{,}5$ — высокая устойчивость; $1{,}2 \leqslant k_s < 1{,}5$ — удовлетворительная устойчивость; $1{,}0 \leqslant k_s < 1{,}2$ — низкая устойчивость; $< 1{,}0$ — аварийное состояние
Перелив через дамбу хвостохранилища (с обрушением дамбы или без)	$H_{freeboard}$ (превышение гребня дамбы над уровнем воды)	$\geqslant 1{,}5$ м — высокая безопасность; $1{,}0 \leqslant H_{freeboard} < 1{,}5$ — удовлетворительная безопасность; $0{,}5 \leqslant H_{freeboard} < 1{,}0$ — низкая безопасность; $< 0{,}5$ м — критическое состояние
Внутренняя эрозия дамбы хвостохранилища (с потерями)	I_{result} — сравнительное отношение I_{cr} (критический градиент напора) и I_{est} (действующий градиент)	$I_{est} < 0{,}5\ I_{cr}$ — высокая безопасность; $0{,}5\ I_{cr} \leqslant I_{est} < I_{cr}$ — умеренный риск; $I_{est} \geqslant I_{cr}$ — критическое состояние
Инфильтрации технологических растворов или загрязненных вод на различных объектах	k_f (коэффициент фильтрации)	$< 0{,}005$ — практически водонепроницаемые; $0{,}005 \leqslant k_f \leqslant 0{,}3$ — слабоводопроницаемые; $k_f > 0{,}3$ — водопроницаемые

ющих предприятиях и соответствующих им критериев безопасности. Так как подавляющее большинство серьезных и катастрофических аварий на золотодобывающих предприятиях связано с хвостохранилищами [10, 11], в данной работе методика оценки опасности (риска) демонстрируется именно для хвостохранилищ (табл. 1).

В соответствии с данными табл. 1 был разработан ряд коэффициентов для оценки рисков: K_{ks}; K_H; K_I; K_{kf} — коэффициенты в соответствии со значениями показателей состояния объекта.

Были разработаны отдельные модифицирующие показатели (коэффициенты), которые выражаются в числовом формате и представлены переменными, характеризующими:

- сейсмичность региона (*Q*);
- коэффициент деформации (*D*);
- состояние дренажных и водоотводящих систем (*W*);
- наличие и состояние противофильтрационных решений (*F*);
- способ наращивания (намыва) дамбы (*N*);
- интенсивность осадков (*R*);
- потенциально сбрасываемые отходы по превышению ПДК — концентрации загрязняющих веществ (*C*);
- потенциал кислотообразования грунта/пород территории (*X*);
- объем/тоннаж потенциально сбрасываемых отходов (*Y*);
- наличие рядом с объектом поверхностных водоемов (*Z*).

Важно отметить, что часть коэффициентов относится к специфичным и применима лишь для отдельных типов объектов (например, показатель «способ наращивания (намыва) дамбы (*N*)» —

применим только для хвостохранилищ). Предложенный подход подразумевает как индивидуальную оценку риска для каждого из выбранных типов объектов на предприятии (хвостохранилища, отвалы и другие), так и интегративную [12, 13], в связи с чем существует вариативность в коэффициентах и в формулах для различных типов объектов (хвостохранилища, отвалы и т.д.).

Для формирования обоснованных расчетов и дальнейшей интеграции дополнительных правил оценки требовалось предварительное установление связи между ключевыми и модифицирующими коэффициентами, а также соответствующими им рисками. При этом ключевые и некоторые модифицирующие коэффициенты отражают вероятность аварийного события, а ряд остальных модифицирующих коэффициентов — ущерб и тяжесть последствий от потенциальной реализации аварийного события.

В табл. 2 приведены установленные сочетания ключевых и модифицирующих коэффициентов безопасности хвостохранилищ золотодобывающих предприятий для использования в расчетах.

Таблица 2

Сочетания ключевых и модифицирующих коэффициентов безопасности хвостохранилищ золотодобывающих предприятий для использования в расчетах
Combinations of key and modifying safety factors for tailings ponds of gold mining enterprises for use in calculations

Ключевые коэффициенты	**Модифицирующие коэффициенты**	**Риск или опасность**
K_{ks} — коэффициент запаса устойчивости	Q — коэффициент фактора сейсмичности региона	Потеря устойчивости дамбы хвостохранилища (обрушение)
	D — коэффициент показателя деформации	
	N — коэффициент способа наращивания дамбы XX	
$K_{н}$ — коэффициент запаса гребня по высоте	W — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем	Перелив через дамбу хвостохранилища (с обрушением дамбы или без)
	R — коэффициент интенсивности осадков	
K_{I} — коэффициент внутренней эрозии	W — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем	Перелив через дамбу хвостохранилища (с обрушением дамбы или без)
	F — коэффициент состояния противофильтрационных мер	
K_{kf} — коэффициент показателя фильтрации	W — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем	Инфильтрации технологических растворов или загрязненных вод на различных объектах
	F — коэффициент состояния противофильтрационных мер	
Часть расчета, касающаяся вероятности возникновения аварии и включающая в себя расчет с коэффициентами: K_{ks}; $K_{н}$; K_{I}; K_{kf}	C — коэффициент концентрации загрязняющих веществ	Масштаб, распространенность и серьезность геоэкологического ущерба в случае реализации аварии
	X — коэффициент потенциала кислотообразования	
	Y — коэффициент массы / объема сбрасываемых при потенциальной аварии отходов	
	Z — коэффициент наличия поверхностных водоемов вблизи объекта	

Для каждого выделенного критерия (показателя) безопасности можно установить значения или диапазоны значений, которые можно охарактеризовать с технической стороны и по уровню опасности/риска. Для каждого выделенного значения или диапазона были разработаны коэффициенты, которые в числовом значении отражают уровень геоэкологической опасности/геоэкологического риска. Значения данных коэффициентов соответствуют конкретным диапазонам каждого из показателей. Такой подход позволяет привести значения различных показателей к единым формату и единицам измерения, что обеспечивает возможность проведения прозрачных и обоснованных расчетов.

Значения коэффициентов представлены в табл. 3.

В табл. 4 представлены модифицирующие показатели и значения соответствующих показателям коэффициентов.

Вышеперечисленные критерии и коэффициенты используются для дальнейших расчетов и оценки рисков.

Ниже приведены формулы для расчета и оценки геоэкологической опасности/риска (*GD* — geoecological danger), которые составляют расчетно-оценоч-

Таблица 3

Критерии безопасности для хвостохранилищ золотодобывающих предприятий, коррелирующие с реализацией рисков, и соответствующие им коэффициенты
Safety criteria for tailings ponds of gold mining enterprises, correlating with the realization of risks, and their corresponding coefficients

Критерий (показатель) безопасности	**Соответствующий критерию (показателю) коэффициент**	**Значения показателей и их описание**	**Значение коэффициента**
k_s (коэффициент запаса устойчивости) или аналог: FoS (фактор безопасности)	K_{ks} — коэффициент запаса устойчивости	$\geqslant 1{,}5$ — высокая устойчивость	$K_{ks} = 0{,}2$
		$1{,}2 \leqslant k_s < 1{,}5$ — удовлетворительная устойчивость	$K_{ks} = 0{,}3$
		$1{,}0 \leqslant k_s < 1{,}2$ — низкая устойчивость	$K_{ks} = 0{,}7$
		$< 1{,}0$ — аварийное состояние	$K_{ks} = 1$
$H_{freeboard}$ (превышение гребня дамбы над уровнем воды)	K_H — коэффициент запаса гребня по высоте	$\geqslant 1{,}5$ м — высокая безопасность	$K_H = 0{,}2$
		$1{,}0 \leqslant H_{freeboard} < 1{,}5$ — удовлетворительная безопасность	$K_H = 0{,}3$
		$0{,}5 \leqslant H_{freeboard} < 1{,}0$ — низкая безопасность	$K_H = 0{,}7$
		$< 0{,}5$ м — критическое состояние	$K_H = 1$
I_{result} — сравнительное отношение I_{cr} (критический градиент напора) и I_{est} (действующий градиент)	K_I — коэффициент внутренней эрозии	$I_{est} < 0{,}5\ I_{cr}$ — высокая безопасность	$K_I = 0{,}3$
		$0{,}5\ I_{cr} \leqslant I_{est} < I_{cr}$ — умеренный риск	$K_I = 0{,}6$
		$I_{est} \geqslant I_{cr}$ — критическое состояние	$K_I = 1$
k_f (коэффициент фильтрации)	K_{kf} — коэффициент показателя фильтрации	$< 0{,}005$ — практически водонепроницаемые	$K_{kf} = 0{,}3$
		$0{,}005 \leqslant k_f \leqslant 0{,}3$ — слабоводопроницаемые	$K_{kf} = 0{,}6$
		$k_f > 0{,}3$ — водопроницаемые	$K_{kf} = 1$

Таблица 4

Модифицирующие показатели безопасности и соответствующие им коэффициенты безопасности для хвостохранилищ золотодобывающих предприятий
Modifying safety indicators and their corresponding safety coefficients for tailings ponds of gold mining enterprises

Модифицирующий критерий (показатель) безопасности	**Соответствующий модифицирующему показателю коэффициент**	**Значение критерия (показателя) и его описание**	**Значение соответствующего коэффициента**
Сейсмичность региона (по шкале MSK-64)	*Q* — коэффициент фактора сейсмичности региона	> 9 баллов — очень высокая сейсмичность	*Q* = 1
		8 — 9 баллов — высокая сейсмичность	*Q* = 0,7
		6 — 7 баллов — умеренная сейсмичность	*Q* = 0,3
		< 6 баллов — низкая сейсмичность	*Q* = 0,2
Модуль деформации	*D* — коэффициент показателя деформации	*E* ⩽ 10 МПа — сильнодеформируемый грунт	*D* = 1
		10 < *E* ⩽ 50 МПа — среднедеформируемый грунт	*D* = 0,6
		E > 50 МПа — слабодеформируемый грунт	*D* = 0,3
Способ наращивания (намыва) дамбы	*N* — коэффициент способа наращивания дамбы XX	Дамба с верхним намывом — менее устойчива (в среднем)	*N* = 1
		Дамба с центральным наращиванием	*N* = 0,8
		Дамба с нижним намывом — лучше сохраняет устойчивость	*N* = 0,3
Состояние дренажных и водоотводящих систем	*W* — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем	Дренаж не работает, водоотведение не предусмотрено или не работает — аварийное состояние	*W* = 1
		Дренаж частично забит, водоотведение не предусмотрено или работает частично — высокая опасность	*W* = 0,8
		Дренаж частично забит, водоотведение предусмотрено и работает — средняя опасность	*W* = 0,6
		Дренаж исправен, водоотведение предусмотрено и работает — низкая опасность	*W* = 0,2
Интенсивность осадков	*R* — коэффициент интенсивности осадков	Превышение гребня дамбы над уровнем воды при выпадении максимального суточного количества осадков за 10 лет составляет менее 0,5 м — высокий или аварийный риск	*R* = 1
		Превышение гребня дамбы над уровнем воды при выпадении максимального суточного количества осадков за 10 лет составляет от 0,5 до 1 м — средний риск	*R* = 0,7
		Превышение гребня дамбы над уровнем воды при выпадении максимального суточного количества осадков за 10 лет составляет от 1 до 1,5 м — низкий риск	*R* = 0,3
		Превышение гребня дамбы над уровнем воды при выпадении максимального суточного количества осадков за 10 лет составляет 1,5 м или более — очень низкий риск	*R* = 0,2

Наличие и состояние противофильтрационных решений	F — коэффициент состояния противофильтрационных мер	Отсутствие или полное разрушение противофильтрационных мер — высокий или аварийный риск	$F = 1$
		Геомембрана присутствует, но существуют разрывы, локальные протечки — средний риск	$F = 0{,}6$
		Геомембрана присутствует и является исправной, фильтрация отсутствует — низкий риск	$F = 0{,}3$
Потенциально сбрасываемые отходы по превышению ПДК — концентрации (C) загрязняющих веществ	C — коэффициент концентрации загрязняющих веществ	$C >$ 10 × ПДК — крайне высокий уровень загрязнений	$C = 1$
		ПДК < $C \leqslant$ 10 × ПДК — высокий уровень загрязнений	$C = 0{,}6$
		$C \leqslant$ ПДК — низкий или умеренный уровень загрязнений (в зависимости от компонента среды и типа ПДК)	$C = 0{,}3$
Потенциал кислотообразования грунта/пород территории	X — коэффициент потенциала кислотообразования	pH фильтрата менее 6, общее содержание растворенных твердых веществ (TDS — Total Dissolved Solids) более 1000 мг/л, сульфидной серы более 1%; и/или коэффициент чистого потенциала (NPR — Net Potential Ratio) < 1 — высокий потенциал кислотообразования	$X = 1$
		pH варьируется, общее содержание растворенных твердых веществ варьируется, сульфидной серы около 0,3—1%; и/или 1 ⩽ NPR < 2 — средний потенциал кислотообразования	$X = 0{,}6$
		pH фильтрата более 6, общее содержание растворенных твердых веществ менее 1000 мг/л, сульфидной серы более 0,3—1%; и/или NPR ⩾ 2 — низкий потенциал кислотообразования	$X = 0{,}3$
Масса/объем потенциально сбрасываемых отходов	Y — коэффициент массы/объема сбрасываемых при потенциальной аварии отходов	Объемом ⩾ 1 000 000 м^3; Массой ⩾ 2 000 000 т. Крайне высокий потенциальный ущерб	$Y = 1$
		Объемом ⩾ 100 000 м^3; Массой ⩾ 200 000 т. Средний / высокий потенциальный ущерб	$Y = 0{,}7$
		Объемом < 100 000 м^3; Массой < 200 000 т. Низкий / средний потенциальный ущерб	$Y = 0{,}3$
Наличие рядом с объектом поверхностных водоемов	Z — коэффициент наличия поверхностных водоемов вблизи объекта	Наличие множества (2 и более) поверхностных водоемов в радиусе до 1 км, среди которых есть минимум одна крупная река (от 50 км) и/или водоем особого значения — крайне высокий потенциальный ущерб качеству поверхностных вод и ихтиофауне	$Z = 1$
		Наличие множества (2 и более) поверхностных водоемов в радиусе до 1 км, но без крупных рек (от 50 км) и/или водоемов особого значения — высокий потенциальный ущерб качеству поверхностных вод и ихтиофауне	$Z = 0{,}7$
		Поверхностные водоемы присутствуют в радиусе от 1 до 2 км — средний потенциальный ущерб качеству поверхностных вод и ихтиофауне, воздействие более контролируемое	$Z = 0{,}3$
		Поверхностные водоемы в радиусе 2 км отсутствуют — низкий потенциальный ущерб качеству поверхностных вод и ихтиофауне, воздействие в значительной степени контролируемое	$Z = 0{,}2$

ную основу подхода. Следующее выражение служит для расчета показателя геоэкологической опасности хвостохранилищ (XX):

$$GD_{XX1} = (K_{ks} + Q + D + N + K_H + W + R + K_I + K_{kf} + W + F + C + X + Y + Z)/(15\times100), \quad (1)$$

где GD_{XX1} — показатель геоэкологической опасности хвостохранилища (XX) № 1; K_{ks} — коэффициент запаса устойчивости; Q — коэффициент фактора сейсмичности региона; D — коэффициент показателя деформации; N — коэффициент способа наращивания дамбы XX; K_H — коэффициент запаса гребня по высоте; W — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем; R — коэффициент интенсивности осадков; K_I — коэффициент внутренней эрозии; K_{kf} — коэффициент показателя фильтрации; F — коэффициент состояния противофильтрационных мер; C — коэффициент концентрации загрязняющих веществ; X — коэффициент потенциала кислотообразования; Y — коэффициент массы/объема сбрасываемых при потенциальной аварии отходов; Z — коэффициент наличия поверхностных водоемов вблизи объекта.

В упрощенном виде данную формулу можно представить следующим образом:

$$GD_{XX1} = (Pb_{XX1} + Dm_{XX1})/(2\times100), \quad (2)$$

где GD_{XX1} — показатель геоэкологической опасности хвостохранилища (XX) № 1; Pb — показатель степени вероятности аварии; Dm — показатель степени ущерба.

Соответственно, показатель степени вероятности аварии имеет следующий вид:

$$Pb_{XX1} = (K_{ks} + Q + D + N + K_H + W + R + K_I + K_{kf} + W + F)/11, \quad (3)$$

где Pb — показатель степени вероятности аварии; K_{ks} — коэффициент запаса устойчивости; Q — коэффициент фактора сейсмичности региона; D — коэффициент показателя деформации; N — коэффициент способа наращивания дамбы XX; K_H — коэффициент запаса гребня по высоте; W — коэффициент состояния дренажных и водоотводящих систем; R — коэффициент интенсивности осадков; K_I — коэффициент внутренней эрозии; K_{kf} — коэффициент показателя фильтрации; F — коэффициент состояния противофильтрационных мер.

Формула по расчету показателя степени ущерба от аварии на объекте имеет следующий вид:

$$Dm_{XX1} = (C + X + Y + Z)/4, \quad (4)$$

где Dm — показатель степени ущерба; C — коэффициент концентрации загрязняющих веществ; X — коэффициент потенциала кислотообразования; Y — коэффициент массы/объема сбрасываемых при потенциальной аварии отходов; Z — коэффициент наличия поверхностных водоемов вблизи объекта.

Также нами была получена унифицированная зависимость для расчета показателя общей средней геоэкологической опасности для объектов любого типа на любом золотодобывающем предприятии из выборки. Согласно, возможен расчет показателя общей средней геоэкологической опасности ($GD_{j,k(средн)}$) для объектов типа k на предприятии j:

$$GD_{j,k(средн)} = \frac{1}{n_{j,k}} \times \sum_{i=1}^{n_{j,k}} GD_{i,j,k}, \quad (5)$$

где $GD_{j,k(средн)}$ — показатель общей средней геоэкологической опасности по всей выборке объектов типа k на предприятии j; n — количество объектов заданного типа на предприятии в выборке.

При нашем подходе риск оценивается по 100-балльной системе. Итоговая оценка риска делится на 3 уровня: низкий, средний и высокий. Финальная оценка риска по всему предприятию

Таблица 5

Критерии оценки геоэкологического риска/опасности для различных групп объектов заданного типа или целого предприятия
Criteria for assessing geoecological risk / hazard for various groups of objects of a given type or an entire enterprise

Выборка объектов	Обозначение показателя в расчетах	Значение показателя и уровень риска
Хвостохранилища (ХХ)	$GD_{j,XX(средн)}$	$0 \leqslant GD < 34$ — низкий риск; $34 \leqslant GD < 66$ — средний риск; $66 \leqslant GD \leqslant 100$ — высокий риск.
Отвалы (Отв)	$GD_{j,Отв(средн)}$	
Участки кучного выщелачивания (КВ)	$GD_{j,КВ(средн)}$	
Подземное выщелачивание (ПВ)	$GD_{j,ПВ(средн)}$	
По всем ключевым группам объектов, по всему предприятию (общ)	$GD_{j(общ)}$	

подразумевает учет среднего риска по всем группам ключевых объектов, которые присутствуют на анализируемом предприятии. Выборки таких объектов, их обозначения и диапазоны уровней риска представлены в табл. 5.

Расчет показателя общей геоэкологической опасности (риска) по всем ключевым группам объектов предприятия *j* (по всему предприятию $j(GD_{j(общ)})$) проводится по следующей формуле:

$$GD_{j(общ)} = (\sum_{s \in S} GD_{j,s(средн)})/G, \quad (6)$$

где $GD_{j(общ)}$ — показатель общей геоэкологической опасности (риска) по всем ключевым группам объектов предприятия *j* (по всему предприятию *j*); *S* — множество ключевых групп объектов предприятия *j* (состав множества *S* может меняться в зависимости от количества рассматриваемых групп: *S* = = {ХХ,Отв,КВ,ПВ}, *S* = {ХХ,Отв} и др.); $\sum_{s \in S} GD_{j,s(средн)}$ — сумма по всем ключевым группам *s*, входящим в множество *S* (выражение $GD_{j,s(средн)}$ вычисляется для каждой группы); *s* — переменная суммирования, которая поочередно принимает значение каждой группы из множества *S*; $GD_{j,s(средн)}$ — усредненный показатель опасности для группы *s* на предприятии *j* (соответствует слагаемым $GD_{j,XX(средн)}$, $GD_{j,Отв(средн)}$ и др.); *G* — количество ключевых групп, включенных в расчет (мощность множества *S*, т.е. *G* = = |*S*|, обозначает количество выборок по группам объектов, которые фактически присутствуют на выбранном предприятии *j*).

При наличии на предприятии *j* всех выборок объектов (ХХ, Отв, КВ, ПВ) формула принимает следующий вид:

$$GD_{j(общ)} = (GD_{j,XX(средн)} + GD_{j,Отв(средн)} + GD_{j,КВ(средн)} + GD_{j,ПВ(средн)}) / G, \quad (7)$$

где $GD_{j(общ)}$ — показатель общей геоэкологической опасности (риска) по всем ключевым группам объектов предприятия *j* (по всему предприятию *j*); $GD_{j,XX(средн)}$ — показатель общей средней геоэкологической опасности (риска) по всем хвостохранилищам на предприятии *j*; $GD_{j,Отв(средн)}$ — показатель общей средней геоэкологической опасности (риска) по всем отвалам на предприятии *j*; $GD_{j,КВ(средн)}$ — показатель общей средней геоэкологической опасности (риска) по всем участкам кучного выщелачивания на предприятии *j*; $GD_{j,ПВ(средн)}$ — показатель общей средней геоэкологической опасности (риска) по всем участкам подземного выщелачивания на предприятии *j*; *G* — количество ключевых групп, включенных в расчет (мощность множества *S*, т.е. *G* = |*S*|, обозначает коли-

чество выборок по группам объектов, которые фактически присутствуют на выбранном предприятии *j*).

Вышеприведенные зависимости (6) и (7) можно также представить в более детализированном виде, где индексы выборок ключевых объектов заменены на нейтральные для отображения общей математической логики расчета:

$$GD_{j(\text{общ})} = \frac{\frac{1}{n_{j,k}} \times \sum_{i=1}^{n_{j,k}} GD_{i,j,k} + \frac{1}{n_{j,l}} \times \sum_{i=1}^{n_{j,l}} GD_{i,j,l} + \frac{1}{n_{j,k}} \times \sum_{i=1}^{n_{j,m}} GD_{i,j,m} + \frac{1}{n_{j,p}} \times \sum_{i=1}^{n_{j,p}} GD_{i,j,p}}{G}, \quad (8)$$

где $GD_{j(\text{общ})}$ — показатель общей геоэкологической опасности (риска) по всем ключевым группам объектов предприятия *j* (по всему предприятию *j*); *n* — количество объектов заданного типа (*k*,*l*,*m*,*p* — ХХ,Отв,КВ,ПВ) на выбранном предприятии *j* в выборке; $GD_{j,k(\text{средн})}$ — усредненный показатель опасности для группы заданного

Таблица 6

Критические показатели безопасности и пороговые значения их коэффициентов для хвостохранилищ
Critical safety indicators and threshold values of their coefficients for tailings ponds

Критерий (показатель) безопасности	**Значения показателей и их описание**	**Значение соответствующего коэффициента**	**Итоговая степень вероятности аварии Pb_{xx} (если расчетная ниже)**
k_s (коэффициент запаса устойчивости)	< 1,0 — аварийное состояние	$K_{ks} = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$
	1,0 ⩽ k_s < 1,2 — низкая устойчивость	$K_{ks} = 0,7$	Высокая: $Pb_{xx} = 0,7$
I_{result} — сравнительное отношение I_{cr} (критический градиент напора) и I_{est} (действующий градиент)	$I_{est} \geqslant I_{cr}$ — критическое состояние	$K_I = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$
Модуль деформации	E ⩽ 10 МПа — сильнодеформируемый грунт	$D = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$
Сейсмичность региона (MSK-64)	> 9 баллов — очень высокая сейсмичность	$Q = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$
	8—9 баллов — высокая сейсмичность	$Q = 0,7$	Высокая: $Pb_{xx} = 0,7$
Состояние дренажных и водоотводящих систем	Дренаж не работает, водоотведение не предусмотрено или не работает — аварийное состояние	$W = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$
	Дренаж частично забит, водоотведение не предусмотрено или работает частично — высокая опасность	$W = 0,8$	Высокая: $Pb_{xx} = 0,8$
Наличие и состояние противофильтрационных решений	Отсутствие или полное разрушение противофильтрационных мер — высокий или аварийный риск	$F = 1$	Крайне высокая: $Pb_{xx} = 1$

типа (*k*,*l*,*m*,*p* — ХХ,Отв,КВ,ПВ); *G* — количество ключевых групп, включенных в расчет (мощность множества *S*, т.е. *G* = |*S*|, обозначает количество выборок по группам объектов, которые фактически присутствуют на выбранном предприятии *j*).

Для повышения точности оценки риска вышеприведенным расчетным методом было учтено наличие критических условий и особых сочетаний нескольких факторов, для чего были установлены правила повышения итоговой категории риска независимо от его среднего расчетного балла при наличии таких условий или сочетаний. Правила повышения уровня риска привязаны к конкретным значениям коэффициентов, соответствующим данным условиям и факторам (их повышенным и критическим уровням). При достижении или превышении установленных пороговых значений по выбранным коэффициентам устанавливается соответствующая им степень вероятности аварии (или итоговый уровень риска при особом сочетании факторов), но только в том случае, если ее (его) не превышает расчетное значение. При одновременном достижении повышенных порогов по выделенным критическим показателям итоговый уровень риска принимается высоким. Так, дополнительные условия могут повысить категорию, но не могут снизить уровень, полученный расчетом.

Таким образом, наш методический подход исключает «растворение» ключевых факторов при расчетах и не позволяет искусственно занизить уровень риска в условиях участия значительного количества переменных при его оценке. Критические показатели безопасности и пороговые значения их коэффициентов для хвостохранилищ представлены в табл. 6.

Установленные правила оценки особых сочетаний факторов безопасности для хвостохранилищ представлены в табл. 7.

Далее, согласно разработанному риск-ориентированному подходу, схожим образом, с применением логически близких расчетов, проводится оценка риска для отвалов и других ранее перечисленных объектов золотодобывающих предприятий (при их наличии, в зависимости от структуры предприятия). В итоге риск оценивается как по группам объектов, так и для всего предприятия в целом. Этап 2 настоящего риск-ориентированного подхода считается завершенным по итогам успешного проведения оценки общей геоэкологической опасности (риска) по всем ключевым группам объектов рассматриваемого предприятия.

Следующими ключевыми этапами в нашем подходе являются п.п. 3—7, реализуемые в представленном ранее по тексту порядке для более целостной демонстрации нашего подхода и его оставшихся ключевых этапов, которые будут более детально разбираться в наших будущих работах. Ниже представ-

Таблица 7

Установленные правила оценки особых сочетаний факторов безопасности для хвостохранилищ
The established rules for assessing special combinations of safety factors for tailings ponds

Коэффициент факторов степени вероятности	**Коэффициент факторов степени ущерба**	**Итоговый уровень риска $GD_{j,xx}$ (если расчетный ниже)**
$K_{ks} \geqslant 0{,}7$	$Y \geqslant 0{,}7$ и $\max(C, X, Z) \geqslant 0{,}6$	Высокий: $GD_{j,XX} = 66$
$Q \geqslant 0{,}7$		
$W \geqslant 0{,}8$		

лено описание ключевых преимуществ и основных задач каждого из этапов 3 — 7:

• идентификация опасных зон и объектов, их визуальная локализация и картографирование основываются на результатах оценки опасности (риска) для каждого из выбранных объектов на предприятии. Этот шаг позволяет руководству предприятия эффективнее принимать управленческие решения [14 — 16], моделировать зоны негативного влияния, упрощает визуальное восприятие опасных зон, а также позволяет в будущем визуально отображать изменения ситуации;

• Прогнозное моделирование потенциальных геоэкологических происшествий на основе проведенных расчетов и оценок включает в себя моделирование и анализ наиболее вероятного аварийного сценария с учетом потенциального ущерба, который основан на сочетании вероятной причины (факторов вероятности) и факторов степени ущерба [17 — 19]. Позволяет перейти к оценке финансового ущерба;

• проведение анализа чувствительности позволяет проанализировать зависимости параметров друг от друга, определить ключевые векторы принятия решений и более детально вести прогнозы;

• разработка предложений и рекомендаций по снижению рисков, повторное моделирование с учетом потенциальных улучшений, прогнозное подтверждение эффективности предлагаемых решений. Экономическое обоснование предлагаемых решений. Перечисленные решения позволяют предложить меры по снижению опасности и рисков, а затем спрогнозировать и оценить их рациональность и эффективность;

• реализация предложений и рекомендаций для эффективного повышения геоэкологической безопасности, исходя из ранее полученных оценок, расчетов и моделирования (внесение корректив по принципу обратной связи, при необходимости) позволяет в дальнейшем фиксировать фактический результат, проводить обновленные прогнозы и моделирование, а также вносить необходимые корректировки. Данный шаг замыкает цикл в нашем подходе, он имеет особое значение для принятия дальнейших управленческих решений.

По итогам проведенной работы удалось частично заполнить существующие пробелы, связанные с отсутствием отраслевых критериев и методов геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях.

Обсуждение результатов

Было установлено, что комплексные критерии и методы, основанные на оценке рисков, учитывающие критические диапазоны показателей и коэффициентов, являются наиболее предпочтительными для обеспечения геоэкологической безопасности. Это позволяет сосредоточиться в первую очередь на решении ключевых проблем и контроле над ними. Ранее риски не исследовали по ключевым параметрам и не привязывали показатели риска к ущербу окружающей среде и финансовому ущербу. Соответственно, наше исследование имеет большие перспективы для устранения этих пробелов.

Приведенный в настоящей научной статье подход к оценке геоэкологических рисков на золотодобывающих предприятиях может быть использован как основа для формирования аналогичных подходов в других отраслях, но с учетом в расчетах иных уникальных параметров и факторов. Также стоит отметить, что для других отраслей и типов предприятий при расчете общего риска должны будут учитываться другие объекты (которые будут формировать иное

множество рассматриваемых групп: $S = \{k,l,\ldots,p\}$).

Проработанный и комплексный метод по оценке рисков, включающий в себя учет ключевых риск-ориентированных критериев, позволяет в дальнейшем вести анализ безопасности как для отдельных объектов различного типа, так и для их групп.

Заключение

Таким образом, цель по разработке риск-ориентированных критериев и подхода к обеспечению геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях была успешно достигнута. В основу данного подхода лег разработанный нами метод расчета и оценки уровня геоэкологической опасности (риска). Разработанный риск-ориентированный подход к обеспечению геоэкологической безопасности, в котором при оценке рисков учитываются основные критерии безопасности, позволяет наиболее комплексно подойти к оценке и решению актуальных отраслевых проблем, связанных с аварийностью.

Результаты настоящей работы являются важным шагом для дальнейшей разработки полноценного обоснованного и апробированного комплекса критериев и методов обеспечения геоэкологической безопасности на золотодобывающих предприятиях Дальнейшее развитие результатов данной работы будет способствовать эффективному внедрению риск-ориентированного подхода на реальных золотодобывающих предприятиях.

Автор выражает благодарность доктору технических наук Куликовой Елене Юрьевне за экспертную консультацию по части методических подходов к оценке геоэкологических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

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

3. *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.

4. *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.

5. *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.

6. *Leonard L. Tampushi, John M. Onyari, Nzioka J. Muthama* 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 no. AJEE.73853. DOI: 10.9734/AJEE/2021/v16i430253.

7. *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.

8. *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.

9. *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.

10. *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.

11. *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.

12. *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.

13. *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.

14. *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.

15. *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.

16. *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.

17. *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.

18. *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.

19. *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. ГИАБ

REFERENCES

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Leonard L. Tampushi, John M. Onyari, Nzioka J. Muthama 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 no. AJEE.73853. DOI: 10.9734/AJEE/2021/v16i430253.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

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

17. 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.

18. 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.

19. 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.

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 13.09.2026; получена после рецензии 14.10.2026; принята к печати 10.11.2026.
Received by the editors 13.09.2026; received after the review 14.10.2026; accepted for printing 10.11.2026.