

УДК 504.06:622:669

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

Оригинальная статья

## Геоэкологическая оценка воздействия золотоизвлекающих фабрик на компоненты природной среды

Р.В. Ключев 

Московский политехнический университет, Россия, 107023, г. Москва,  
ул. Б. Семеновская, 38, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Статья поступила: 23.01.2026, доработана: 23.03.2026, принята к публикации: 25.03.2026

**Резюме: Актуальность работы.** Функционирование золотоизвлекающих фабрик (ЗИФ), использующих цианидное выщелачивание, создаёт значительную техногенную нагрузку на компоненты природной среды. Наибольшую опасность представляют эмиссии токсичных веществ в атмосферу и долговременное воздействие хвостохранилищ, что требует совершенствования методов геоэкологической оценки и защитных мероприятий. **Цель исследования.** Комплексная оценка воздействия технологических процессов ЗИФ на окружающую среду и обоснование инженерно-технических решений для минимизации негативных последствий. **Методы исследования.** Применены аналитический обзор и систематизация источников эмиссий, инструментальные замеры, расчётно-аналитический метод определения выделений вредных веществ, математическое моделирование пылеобразования, а также геоэкологическое прогнозирование поведения техногенных массивов. **Результаты.** Установлено, что основными загрязнителями являются циановодород (HCN), щелочные аэрозоли, хлор, оксиды азота и пыль, содержащая тяжёлые металлы. Представлена методика расчёта пылевых выбросов. Показано, что наибольшие геоэкологические риски смещаются в пострекультивационный период из-за активизации микробиологических процессов в хвостохранилищах. Обоснована необходимость перехода к сгущённым хвостам и долгосрочному геохимическому мониторингу. Предложен комплекс природоохранных мер, включающий герметизацию обогатительного оборудования, хемосорбционную очистку газов и применение геосинтетических экранов. Главные выводы подтверждают, что обеспечение экологической безопасности ЗИФ достижимо лишь при сквозном проектировании защитных барьеров на всех этапах жизненного цикла предприятия. В качестве перспектив обозначены направления исследований по биорекультивации, цифровому мониторингу и снижению содержания оборотных вод.

**Ключевые слова:** геоэкология, золотоизвлекающая фабрика (ЗИФ), цианидное выщелачивание, хвостохранилища, загрязнение атмосферы, пылевые выбросы, циановодород (HCN), оборотное водоснабжение, геохимическая миграция, рекультивация.

**Для цитирования:** Ключев Р.В. Геоэкологическая оценка воздействия золотоизвлекающих фабрик на компоненты природной среды. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 189-203. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

Original paper

# Geoecological assessment of the impact of gold extraction plants on the components of the natural environment

R.V. Klyuev 

Moscow Polytechnic University, 38 B. Semenovskaya, Moscow 107023,  
Russian Federation, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Received: 23.01.2026, revised: 23.03.2026, accepted: 25.03.2026

**Abstract: Relevance.** The operation of gold recovery plants (GRP) using cyanide leaching creates a significant technogenic load on the components of the natural environment. The greatest danger comes from toxic emissions into the atmosphere and the long-term impact of tailings ponds, which requires improved methods of geoecological assessment and protective measures. **Aim.** Comprehensive assessment of the impact of technological processes at the GRP on the environment and the justification of engineering and technical solutions to minimize the negative consequences. **Methods.** An analytical review and systematization of emission sources, instrumental measurements, a calculation and analytical method for determining the emissions of harmful substances, mathematical modeling of dust formation, and geoecological forecasting of the behavior of technogenic massifs were used. **Results.** It was established that the main pollutants are hydrogen cyanide (HCN), alkaline aerosols, chlorine, nitrogen oxides, and dust containing heavy metals. A methodology for calculating dust emissions is presented. It is shown that the greatest geoecological risks shift to the post-reclamation period due to the activation of microbiological processes in tailings storage facilities. The need for a transition to thickened tailings and long-term geochemical monitoring is substantiated. A set of environmental protection measures is proposed, including equipment sealing, chemisorption gas purification, and the use of geosynthetic screens. The key findings confirm that ensuring the environmental safety of the processing plant is achievable only through the comprehensive design of protective barriers at all stages of the plant's life cycle. Research areas such as bioreclamation, digital monitoring, and reducing the salinity of recycled water are identified as promising areas of research.

**Keywords:** geoecology, gold recovery plant (GRP), cyanide leaching, tailings, air pollution, dust emissions, hydrogen cyanide (HCN), water recycling, geochemical migration, reclamation.

**For citation:** Klyuev R.V. Geoecological assessment of the impact of gold extraction plants on the components of the natural environment. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 189-203. DOI: 10.46698/VNC.2026.66.75.002

## Введение

Функционирование золотодобывающих комплексов, использующих цианидное выщелачивание руд, неизбежно создает техногенную нагрузку на гидросферу и приземный слой атмосферы в зоне влияния производства [Валиев и др., 2025].

Минимизация загрязнения водных объектов достигается комплексом мер: глубокая детоксикация отходов перед утилизацией, создание хвостохранилищ с изолирующими основаниями, предотвращающими инфильтрацию токсичных растворов в грунты, а также внедрение замкнутых систем водопользования с последующей очисткой оборотных вод [Голик, 2025; Конгар-Сюрюн, 2024].

Наибольшую опасность представляет постреабилитационная стадия. С течением времени защитные конструкции теряют герметичность, а токсичные компоненты, депонированные в лежалых хвостах, активизируются под действием гравитации и атмосферной влаги, формируя устойчивое вторичное загрязнение [Голик и др., 2025; Храпай и др., 2025]. В связи с этим геоэкологическое сопровождение горных проектов требует превентивного заложения бюджетов на консервацию объектов еще на этапе бизнес-планирования.

Ключевыми этапами ликвидационных работ являются химическая иммобилизация остаточных реагентов, перекрытие техногенных массивов изолирующими толщами, восстановление почвенного слоя и организация режимных геохимических наблюдений в течение длительного периода [Шабанов и др., 2023; Фоменко и др., 2024].

Резюмируя, минимизация геоэкологических последствий горного производства достижима лишь при сквозном анализе всех фаз существования комбината в контексте текущего состояния и буферной емкости литосферы [Маковозова и др., 2023].

Современная геоэкологическая ситуация смещает фокус внимания с локальной санации техногенных объектов на прогноз трансформации геохимического фона регионального масштаба. Критическим аспектом, не учтенным в традиционных проектах консервации, является активизация микробиологических сообществ в теле хвостохранилищ в постэксплуатационный период. Результаты натурных наблюдений показывают, что сульфатредуцирующие и тионовые бактерии способны катализировать перевод труднорастворимых форм металлов в мобильные состояния даже в условиях защелачивания среды, генерируя «кислотный дренаж» спустя десятилетия после рекультивации [Banerjee et al., 2020; Malyukova et al., 2023].

Кроме того, геоэкологическая оценка воздействия должна учитывать синергетический эффект наложения ореолов рассеяния от нескольких горнопромышленных центров в пределах одной металлогенической провинции. Кумулятивная эмиссия загрязнителей приводит к необратимой деградации геологической среды – истощению защитных свойств грунтовых толщ и потере ими сорбционных характеристик [Клюев и др., 2025; Скопинцева и др., 2025].

## Методы

*В работе применены следующие методы:*

1. Аналитический обзор и систематизация технологических процессов ЗИФ для идентификации узлов эмиссии загрязняющих веществ [Зиновьева и др., 2022].

2. Инструментальные замеры и расчётно-аналитический метод для определения удельных выделений вредных веществ (HCN, NaOH, HCl, CO, NO<sub>2</sub>, пыли) от оборудования [Босиков и др., 2025].

3. Математическое моделирование пылеобразования: расчёт массовых выбросов при пересыпке сыпучих материалов (с учётом коэффициентов дисперсности, влажности, ветровой нагрузки) и при аэрогенном уносе с открытых конвейеров [Kongar-Suryun et al., 2025].

4. Геоэкологическое прогнозирование поведения техногенных массивов (хвостохранилищ) на основе оценки физико-химических и микробиологических процессов в лежалых хвостах [Nguyen et al., 2019; Куликова и др., 2024].

5. Сравнительный анализ технологических решений по складированию отходов (наливное, пастообразное, сгущённое) с оценкой их эффективности в различных климатических зонах [Клюев, 2024; Капанский, 2019].

## Результаты

### *Характеристика загрязнителей атмосферы*

При функционировании золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) формируются устойчивые очаги загрязнения воздушной среды. Генераторами взвешенных веществ являются технологические переделы, задействованные в рудоподготовке. К их числу относятся зона разгрузки и хранения сырья, дробильное отделение, вибропитатели, системы ленточных транспортеров и норий. Ключевыми точками рассеивания пылевых частиц служат стыковочные узлы оборудования: участки приема/сброса материала на дробилках и пересыпные желоба конвейерно-транспортной цепи [Offenberg, Ilias, 2019; Pochechun, Semyachkov, 2024].

В качестве примера на рисунке 1 приведены значения выбросов вредных веществ при работе агитатора с механическим перемешиванием.

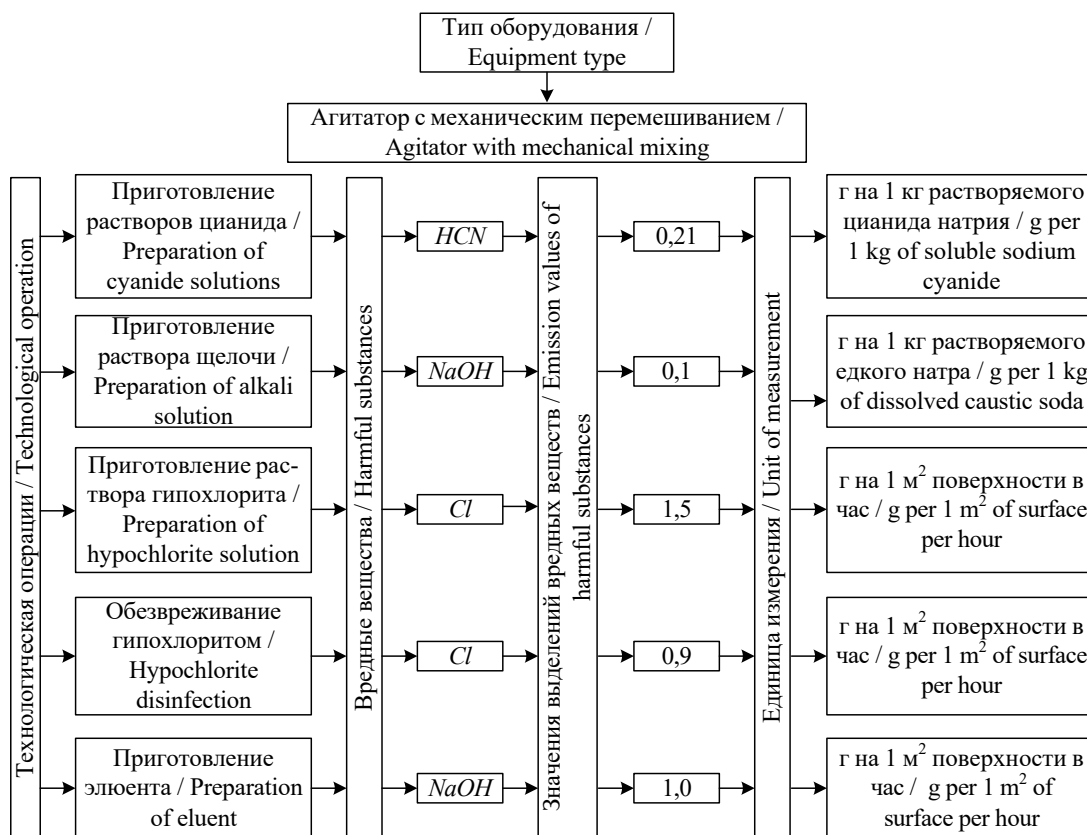


Рис. 1. Значения выбросов вредных веществ при работе агитатора с механическим перемешиванием /

Fig. 1. The Values of harmful emissions during operation of an agitator with mechanical mixing

Специфика пылевых выбросов ЗИФ заключается не только в механическом воздействии на прилегающие территории (изменение альбедо почв, угнетение растительности), но и в химическом составе аэрозолей. Пыль рудосодержащих пород часто обогащена сульфидами и сопутствующими элементами (мышьяк, сурьма, ртуть), что придает ей токсичные свойства. Ветровой перенос мелкодисперсных фракций способствует загрязнению почвенного покрова и поверхностных вод в радиусе до нескольких километров от промышленной площадки.

В связи с высокой миграционной способностью тонкодисперсной пыли особую значимость приобретает пылеподавление не только в камерах дробления, но и на открытых пересыпных станциях. Для снижения геоэкологической нагрузки

рекомендуется внедрение аспирационных систем с рукавными фильтрами на узлах перегрузки, а также применение систем сухого тумана в зонах открытого складирования руды. Комплексный подход к локализации источников пыления является приоритетным направлением минимизации техногенного воздействия предприятий горнорудной отрасли на компоненты природной среды [Tuomela et al., 2021; Wang et al., 2021].

Формирование газозвушных выбросов на золотоизвлекательной фабрике дифференцировано по технологическим переделам. На участке дробления и классификации руды доминирующим поллютантом выступает взвешенная пыль, представленная частицами вмещающих пород и технологической извести. При переходе к измельчению в газовую среду начинают поступать летучие токсичные соединения, в частности циановодород, образующийся в условиях влажной механообработки. Дополнительным кратковременным источником залповых выбросов служит операция дозирования флокулянта в приемные бункеры флотационного отделения. На завершающей стадии цианирования непрерывное выделение синильной кислоты происходит с поверхности технологических емкостей, содержащих цианосодержащие пульпы и растворы.

С точки зрения геоэкологии важна не просто констатация факта выделения веществ, а **оценка их миграции, трансформации и воздействия на сопредельные среды.**

Особую геоэкологическую опасность представляет комбинированный характер эмиссий. Твердые частицы рудной пыли, оседая вблизи промплощадки, обогащают почвы тяжелыми металлами, тогда как газообразный циановодород способен к дальнему атмосферному переносу. В приземном слое атмосферы HCN относительно быстро фотолизируется, однако при абсорбции атмосферной влагой возможно формирование локальных зон подкисления осадков и вторичного загрязнения почв цианидами.

Учитывая, что открытые поверхности цианистых растворов являются постоянным источником выделения синильной кислоты (особенно в теплый период года при снижении рН среды), необходимо ранжирование мероприятий по снижению эмиссий.

**На этапе рудоподготовки:** герметизация укрытий дробилок и применение орошения с поверхностно-активными веществами ПАВ для связывания тонкодисперсных фракций известковой пыли.

**На этапе реагентной обработки:** замена пылящих порошковых флокулянтов на гранулированные формы или эмульсии, исключающие пыление при загрузке.

**В отделении цианирования:** внедрение укрытий «пловучих» типов над чанами сорбции и организация локальных отсосов воздуха с последующей очисткой от цианистого водорода методом хемосорбции.

Таким образом, снижение геоэкологической нагрузки ЗИФ возможно только при комплексном подходе к подавлению как твердых, так и газообразных поллютантов на всех стадиях переработки золотосодержащего сырья.

Технологическая линия десорбционно-электролитического узла характеризуется поликомпонентным составом газозвушных эмиссий. На стадии приготовления десорбирующего раствора регистрируется поступление тонкодисперсного аэрозоля гидроксида натрия, генерируемого с открытой поверхности реакторной емкости. В процессе десорбции благородных металлов из насыщенного сорбента термическая и химическая активация среды способствует переходу в паровую фазу как щелочного аэрозоля, так и циановодорода. Аналогичный спектр загрязнителей (едкий натр и HCN) фиксируется на электролизных ваннах в ходе катодного восстановления золо-

та. Заключительный передел – узел детоксикации технологических стоков и газов – генерирует эмиссии свободного хлора, а также пылевые частицы гипохлорита кальция и негашеной извести, поступающие в воздушную среду при загрузке реагентов.

С позиций геоэкологии особую значимость представляет **оценка суммарного риска** для приземного слоя атмосферы и трансграничного переноса высокотоксичных компонентов.

Высокая реакционная способность хлора и цианистого водорода определяет их активное участие в фотохимических превращениях атмосферных примесей. Присутствие HCN в выбросах даже в следовых концентрациях требует контроля, поскольку в условиях влажного воздуха и инсоляции возможны вторичные реакции с образованием стабильных токсикантов. Щелочные аэрозоли (NaOH), оседая вблизи промплощадки, изменяют pH почвенного покрова, вызывая подщелачивание и нарушая буферную емкость земель.

Эмиссии хлора, генерируемые в узле обезвреживания, отличаются высокой коррозионной активностью и биоцидным действием, что при неорганизованных выбросах ведет к подавлению микробоценозов в зоне влияния предприятия.

Для минимизации геоэкологической нагрузки на данном переделе рекомендуется:

– перевод процессов десорбции и электролиза на герметичное оборудование с организацией отсоса газов непосредственно от колонн и ванн;

– внедрение систем сухой или мокрой газоочистки с улавливанием HCN и щелочных аэрозолей методом абсорбции;

– на узле обезвреживания – замена пылящего гипохлорита кальция на жидкие формы реагентов, исключая пылевой фактор, либо оснащение мест загрузки аспирацией с двухступенчатой фильтрацией.

Таким образом, десорбционно-электролитический цикл и сопряженные с ним системы обезвреживания формируют устойчивый ореол загрязнения, сочетающий кислотные, щелочные и цианосодержащие компоненты, что обосновывает необходимость внедрения замкнутых газоотводящих систем на данных участках.

Удельные выделения вредных веществ в атмосферу от технологических аппаратов и переделов для предложенной схемы переработки золотосодержащего сырья приведены в таблице 1.

*Таблица 1 / Table 1*

**Выделения вредных веществ от технологических аппаратов /  
Emissions of harmful substances from technological equipment**

Технологическая операция / Technological operation	Тип оборудования / Equipment type	Единица измерения / Unit of measurement	Вредное вещество / Harmful substance	Значение / Meaning
Приготовление растворов цианида / Preparation of cyanide solutions	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 кг растворимого цианида натрия / g per 1 kg of soluble sodium cyanide	HCN	0,21
Приготовление раствора щелочи / Preparation of alkali solution	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 кг растворимого едкого натра / g per 1 kg of dissolved caustic soda	NaOH	0,1
Цианирование / Cyanidation	Агитатор / Agitator	мг на 1 м <sup>3</sup> воздуха / mg per 1 m <sup>3</sup> of air	HCN	23,0

Контрольное грохочение цианидсодержащей пульпы / Control screening of cyanide-containing pulp	Сито барабанное / Drum sieve	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	HCN	0,9
Перекачка пульп при цианировании / Pumping pulps during cyanidation	Емкости, зумпфы / Tanks, sumps	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	HCN	0,3
Приготовление элюента / Preparation of eluent	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	NaOH	1,0
Десорбция золота / Gold desorption	Емкость сброса давления / Pressure relief tank	г на 1 м <sup>3</sup> угля / g per 1 m <sup>3</sup> of coal	NaOH	21
Кислотная обработка / Acid treatment	Емкость раствора соляной кислоты / Capacity of hydrochloric acid solution	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	HCl	3,0
	Колонна кислотной обработки / Acid treatment column	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	HCl	1,1
Нейтрализация угля / Coal neutralization	Емкость раствора / Solution capacity	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	NaOH	1,0
Реактивация угля / Coal reactivation	Печь реактивации угля / Coal reactivation furnace	г на 1 м <sup>3</sup> угля / g per 1 m <sup>3</sup> of coal	CO	112
			NO <sub>2</sub>	219,6
Обжиг некондиционного угля / Roasting of substandard coal	Обжигочная печь / Kiln	г на 1 м <sup>3</sup> угля / g per 1 m <sup>3</sup> of coal	CO <sub>2</sub>	1800
			NO <sub>2</sub>	0,22
Электролиз / Electrolysis	Электролизер / Electrolyzer	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	HCN	1,0
		г на 1 м <sup>3</sup> раствора в час / g per 1 m <sup>3</sup> of solution per hour	NaOH	0,2
Приготовление раствора гипохлорита / Preparation of hypochlorite solution	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	Cl	1,5
Обезвреживание гипохлоритом / Hypochlorite disinfection	Агитатор с механическим перемешиванием / Agitator with mechanical mixing	г на 1 м <sup>2</sup> поверхности в час / g per 1 m <sup>2</sup> of surface per hour	Cl	0,9
Загрузка извести / Loading lime	Приемный бункер / Receiving bin	г на кг извести / g per kg of lime	CaO (пыль) / CaO (dust)	1,1
Загрузка гипохлорита / Loading hypochlorite	Приемный бункер / Receiving bin	г на кг гипохлорита / g per kg hypochlorite	Гипохлорит (пыль) / Hypochlorite (dust)	0,8

При плавке электролизных осадков в газовую фазу выделяются пыль, кварц, бура, известь, сода, соединения меди (цинка) и свинца (табл. 2).

*Таблица 2 / Table 2*

**Выделения вредных веществ при плавке электролизных осадков /  
Emissions of harmful substances during the smelting of electrolytic deposits**

Наименование вредных веществ / Name of harmful substances	Выделения в газовую фазу на 1 кг катодных осадков, г / Releases into the gas phase per 1 kg of cathode deposits, g
Окислы азота (в пересчете на NO <sub>2</sub> ) / Nitrogen oxides (as NO <sub>2</sub> )	6,9
Меди оксид (в пересчете на медь) / Copper oxide (in terms of copper)	0,4
Цинка оксид (в пересчете на цинк) / Zinc oxide (in terms of zinc)	1,3
Сода кальцинированная / Soda ash	10,0
Бура (в пересчете на бор) / Borax (in terms of boron)	2,7

*Параметры пылевого загрязнения*

С геоэкологической точки зрения, эффективность всей системы защиты атмосферы напрямую зависит от корректности инженерных расчетов. Габаритные размеры и производительность газоочистных аппаратов определяются в первую очередь объемом подлежащей очистке газозооной смеси. Следовательно, обоснованный выбор конкретной модели оборудования возможен только после тщательного расчета объема и характеристик вентиляционных выбросов, что позволяет точно спроектировать локальный экологический барьер и прогнозировать остаточное воздействие на окружающую среду.

Таким образом, инженерно-технические решения по газоочистке, принимаемые на стадии проектирования, становятся фундаментальным элементом геоэкологической безопасности территории, обеспечивая сбалансированность между промышленным освоением недр и сохранением качества атмосферного воздуха как общепланетарного ресурса.

Представленный расчет пылевыделений базируется на важном геоэкологическом допущении: в рассматриваемых процессах механического дробления и транспортировки не задействованы химические реакции или высокотемпературные воздействия. Следовательно, в атмосферу не поступают специфические газообразные или парообразные токсиканты. Основным и практически единственным загрязняющим веществом в дробильно-транспортном контуре обогатительной фабрики является неорганическая пыль (взвешенные вещества), образующаяся в результате физического диспергирования горной массы в точках ее загрузки, разгрузки и перемещения.

Расчет интенсивности пылеобразования осуществляется на основе следующей математической модели:

1. Объем пылевых выбросов в процессе перегрузки сыпучего материала определяется по формуле:

$$Q = \frac{(10^6 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot G \cdot B_1)}{3600}, \text{ г/с}, \quad (1)$$

где  $G$  – производительность технологического узла, где происходит пересыпка (т/ч);

$k_1$  – доля мелкодисперсной фракции (пылевой составляющей) в общей массе материала;

$k_2$  – коэффициент, отражающий долю пылевой фракции, которая способна перейти во взвешенное состояние;

$k_3$  – поправка на влияние локальных метеорологических условий (скорость ветра, турбулентность);

$k_4$  – коэффициент, учитывающий степень защиты места пересыпки от внешних воздействий (укрытие, ограждение);

$k_5$  – поправочный показатель, зависящий от влажности исходного материала;

$k_6$  – коэффициент, учитывающий гранулометрический состав и среднюю крупность частиц материала;

$B_1$  – безразмерный параметр, характеризующий влияние высоты свободного падения материала при пересыпке.

Данная формула позволяет количественно оценить пылевую эмиссию как ключевой параметр для проектирования природоохранных мероприятий.

2. Для оценки вторичного пылеобразования, связанного с воздействием ветра на движущиеся потоки сырья, используется следующая зависимость:

Интенсивность аэрогенного пылеуноса с открытой поверхностью ленточного конвейера определяется по формуле:

$$Q = q \cdot B \cdot L \cdot k_1 \cdot k_2, \text{ г/с}, \quad (2)$$

где  $B$  – конструктивный параметр, ширина транспортерной ленты (м);

$L$  – общая протяженность открытого участка конвейерной трассы, подверженного ветровому воздействию (м);

$k_1$  – коэффициент, корректирующий влияние фактической скорости ветра в районе размещения оборудования (м/с);

$k_2$  – поправочный коэффициент, учитывающий влагосодержание транспортируемого материала, влияющее на силу сцепления частиц.

Данная модель позволяет количественно оценить пылевой поток, формирующийся не за счет технологических перегрузок, а в результате эрозионного воздействия атмосферных явлений на открытые технологические линии, что является критически важным для проектирования мер по снижению фонового пылевого загрязнения территории.

#### *Основы безопасности хвостохранилищ*

Практика наливного складирования хвостов стала промышленным стандартом для большинства действующих золотодобывающих предприятий. При грамотном проектировании, строительстве и эксплуатации таких объектов в рамках комплексного природоохранного подхода их влияние на состояние окружающих геосистем может быть сведено к приемлемо низкому уровню.

Ключевой принцип геоэкологической безопасности данного метода заключается в создании замкнутого цикла обращения технологических вод. Организация хранения, при которой жидкая фаза хвостовой пульпы практически полностью вовлекается в систему оборотного водоснабжения фабрики, а строго контролируемый и подго-

товленный сброс возникает лишь при возникновении дебаланса объемов, формирует надежный гидрологический барьер [Панфилова и др., 2025]. Эта система эффективно изолирует потенциально загрязненные потоки, предотвращая их проникновение в поверхностные водотоки и грунтовые воды, и тем самым обеспечивает защиту гидросферы при штатной работе предприятия.

Детальное проектирование технологии размещения отходов обогащения должно быть выполнено в рамках стадии рабочего проектирования. Это требует проведения комплексных технико-экономических и экологических обоснований, базирующихся на всестороннем анализе исходных данных [Парада, 2024]. Критически важными для принятия решений являются сведения о текущем экологическом статусе территории, гидрологических режимах, климатических особенностях, а также прогноз возможных аварийных ситуаций с детализацией методов ликвидации их негативных последствий.

Однако даже при безаварийной эксплуатации наливное хвостохранилище остается потенциальным источником долговременного геоэкологического воздействия. Основные риски смещаются из фазы активной эксплуатации в пострекультивационный период. Формирование техногенных залежей тонкодисперсных минеральных осадков сопровождается процессами вторичного минералообразования, сорбции тяжелых металлов и их последующей мобилизации при изменении окислительно-восстановительных условий. Длительная консолидация илов, фильтрационная неоднородность лежалых хвостов, а также диффузионный массоперенос загрязнителей в грунтовые воды требуют включения в проектные решения мер долгосрочного пассивного контроля, не зависящих от наличия энергоснабжения и постоянного присутствия персонала.

К числу таких мер относится устройство противофильтрационных экранов из геосинтетических материалов с прогнозируемым сроком службы, сопоставимым со временем полного затухания геохимической активности складированных отходов. Дополнительно обосновано создание сети режимных наблюдательных скважин, закладываемых не только по периметру ограждающих дамб, но и по направлению вероятной миграции подземного потока. Мониторинг гидрогеохимических показателей должен осуществляться в непрерывном режиме с применением автоматизированных датчиков и дистанционной передачей данных в центры экологического контроля.

В последнее десятилетие наметился устойчивый тренд перехода от «пассивного» наливного складирования к частично-сухому и пастообразному укладыванию хвостов. Данная технология, интегрируемая на этапе реконструкции или нового строительства, позволяет сократить объемы складированной жидкой фазы на 30–50 %, снизить риски гидродинамических аварий и уменьшить площадь изымаемых земель. С позиций геоэкологии перевод хвостового хозяйства в режим сгущения и фильтрационного обезвоживания обеспечивает снижение фильтрационной нагрузки на грунты основания и сокращает эмиссию сероводорода и меркаптанов с водной поверхности хвостохранилища.

Вместе с тем практическая реализация таких решений требует учета региональной специфики. Для криолитозоны определяющее значение приобретает сохранение многолетнемерзлого состояния грунтов основания. Использование сезонно-охлаждающих устройств, проветриваемых насыпей и термостабилизаторов позволяет предотвратить термокарстовые просадки и деградацию мерзлоты. В аридных зонах, напротив, приоритетной задачей становится пылеподавление: закрепление пляжных зон и сухих карт полимерными составами, фитомелиорация с подбором солеустойчивых видов галофитов, а также применение ветрозащитных экранов и лесополос.

Наконец, современная парадигма геоэкологической безопасности предполагает переход от концепции «изоляции и захоронения» к концепции «хвосты как техноген-

ное месторождение». Комплексная переработка лежалых хвостов с доизвлечением ценных компонентов и переводом остаточной массы в инертное состояние – наиболее радикальный путь снижения накопленного экологического ущерба. Апробированные технологии кучного и чанового выщелачивания, магнитной и флотационной доводки уже сегодня позволяют вовлекать в оборот техногенные отходы прошлых лет, последовательно сокращая площадь геохимического загрязнения и снижая нагрузку на водные объекты.

Таким образом, обеспечение геоэкологической надежности хвостового хозяйства золотоизвлекательных фабрик достигается не единовременным проектным решением, а формированием адаптивной системы управления, охватывающей все этапы жизненного цикла – от выбора площадки до пострекультивационного мониторинга. Императивом выступает переход от формального соблюдения нормативов к научно-обоснованному прогнозированию поведения геотехнической системы в условиях многолетней динамики природных и техногенных факторов.

### Обсуждение результатов

Полученные результаты полностью подтверждают исходную гипотезу о том, что золотоизвлекательные фабрики формируют устойчивое поликомпонентное загрязнение, при этом наибольшая геоэкологическая опасность связана не столько с текущей эксплуатацией, сколько с долговременными последствиями функционирования хвостохранилищ. Вопреки традиционному подходу, рассматривающему постэксплуатационную стадию как период затухания активности, исследование доказывает, что именно в этот период происходит активизация сульфатредуцирующих бактерий, способствующая переводу тяжёлых металлов в мобильные формы. Это требует пересмотра нормативных сроков мониторинга и включения в проекты биогеохимических барьеров.

Количественные значения эмиссий, систематизированные в таблицах, наглядно демонстрируют, что узлы десорбции, электролиза и реактивации угля генерируют наиболее широкий спектр токсикантов, включая синильную кислоту и свободный хлор. Выявленное несоответствие: при высоких значениях выделений HCN с поверхности чанов (до 23 мг/м<sup>3</sup>) проектные решения зачастую ограничиваются локальными укрытиями без химической очистки. Это указывает на необходимость внедрения абсорбционных систем как обязательного элемента.

Предложенная методика расчёта пылевых выбросов, основанная на многофакторной модели (крупность, влажность, высота пересыпки, скорость ветра), позволяет более точно прогнозировать зоны рассеивания пыли. Её применение на стадии проектирования даёт возможность оптимизировать размещение аспирационных установок и минимизировать санитарно-защитную зону.

Интерпретация данных по хвостохранилищам подтверждает гипотезу о необходимости перехода от концепции «захоронения» к концепции «техногенного месторождения». Доизвлечение золота из лежалых хвостов не только экономически целесообразно, но и снижает объём токсичной массы, подлежащей изоляции. Однако данный подход требует дифференциации: в криолитозоне приоритетом остаётся термостабилизация грунтов, в аридных зонах – пылеподавление и фитомелиорация.

Таким образом, соответствие полученных результатов гипотезе полное, при этом выявлены новые факторы риска (микробиологическая активизация, синергизм ореолов рассеяния), ранее не учитываемые в типовых проектах. Полученные данные формируют основу для перехода к адаптивному управлению геотехническими системами.

### *Предложения по продолжению исследований*

1. Разработка методов повышения качества очистки сбросных вод.
2. Модернизация составов реагентов для детоксикации цианидов.
3. Повышение работоспособности геомембран в агрессивной среде.
4. Детализация процессов миграции загрязняющих веществ.
5. Разработка технологий биологической рекультивации хвостохранилищ.
6. Оптимизация систем мониторинга и прогнозирования аварий.

### Выводы

Функционирование золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ), использующих цианидное выщелачивание, формирует устойчивую поликомпонентную геоэкологическую нагрузку на атмосферу, гидросферу и почвы. Основными загрязнителями являются циановодород (HCN), щелочные аэрозоли, хлор, оксиды азота и пыль, содержащая тяжелые металлы.

Установлено, что узлы десорбции, электролиза и реактивации угля генерируют наиболее широкий спектр токсикантов. При высоких значениях выделений HCN с поверхности технологических емкостей (до 23 мг/м<sup>3</sup>) проектные решения часто ограничиваются локальными укрытиями без химической очистки, что обосновывает необходимость внедрения абсорбционных систем как обязательного элемента.

Обоснована необходимость перехода от концепции «пассивного захоронения» хвостов к их переработке как техногенных месторождений с доизвлечением ценных компонентов и переводом остаточной массы в инертное состояние. Это наиболее радикальный путь снижения накопленного экологического ущерба, требующий дифференцированного подхода: в криолитозоне приоритетом является термостабилизация грунтов, в аридных зонах – пылеподавление и фитомелиорация.

Обеспечение геоэкологической безопасности золотоизвлекательных фабрик достижимо лишь при сквозном проектировании защитных барьеров на всех этапах жизненного цикла предприятия – от выбора площадки до пострекультивационного мониторинга – с переходом от формального соблюдения нормативов к научно-обоснованному прогнозированию поведения геотехнических систем.

### Литература

1. Босиков И.И., Силаев И.В., Кузина А.В., Мишедченко А.А. Комплексный анализ свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах. // Уголь. – 2025. – № 5. – С. 128–131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.
2. Валиев Н.Г., Голик В.И., Лебзин М.С. Инертность влияния стоков Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 1-1. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_11\_0\_5.
3. Голик В.И. Снижение риска загрязнения экосистем при добыче руд в горных регионах // Экология и промышленность России. – 2025. – Т. 29. – № 9. – С. 36–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39.
4. Голик В.И., Лукьянов В.Г., Хашева З.М. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. № 5. – С. 6–14.
5. 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.
6. Капанский А.А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. № 2(42). – С. 103–115.

7. Ключев Р.В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров. // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9. № 2. – С. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254.
8. Ключев Р.В., Заалишвили В.Б., Музаев И.Д., Гаврилова А.А. Режим работы в бассейне выдержки Билибинской атомной электростанции при реализации различных неблагоприятных сценариев. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 1. – С. 194–207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016.
9. Конгар-Сюрюн Ч.Б. Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов. // Уголь. – 2024. – № 12. – С. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78.
10. 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.
11. Маковозова З.Э., Соколов А.А., Фоменко В.А., Сарбаева М.Т. Влияние гидрогеологических особенностей Унальского хвостохранилища на загрязнение экосистемы тяжелыми металлами. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 126–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_126.
12. Панфилова Т.А., Кукарцев В.В., Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Красовская Л.В. Геофизическая оценка эффективности цеолитсодержащих барьеров для защиты вод от загрязнения на горнопромышленных территориях. // Геология и геофизика Юга России. – 2025. – Т. 15. № 3. – С. 211–225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001.
13. Парада С.Г. Геолого-экономическая оценка золотоносных руд черносланцевого типа на примере Малка-Муштинского рудного узла (Кабардино-Балкарская республика). // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 142–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012.
14. Скопинцева О.В., Пернебек Б.П., Федоткин И.О. Повышение эффективности пылеподавления тонкодисперсных фракций в пылевом аэрозоле цехов углеподготовки. // Безопасность труда в промышленности. – 2025. – № 12. – С. 61–66. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-12-61-66.
15. Фоменко В.А., Лолаев А.Б., Соколов А.А., Кузь О.В., Плахотин Д.А. Отдельные результаты геоэкологического мониторинга рельефа поверхности Унальского хвостохранилища. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 38–50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_38.
16. Храпай Е.С., Колесников С.И., Кузина А.А. Оценка загрязнения почвы тяжелыми металлами в зоне влияния хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината с использованием широкого спектра экологических индексов. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. № 1. – С. 338–349. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-338-349.
17. Шабанов М.В., Маричев М.С., Манджиева С.С., Соколов А.А. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината. // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. № 3. – С. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.
18. Banerjee B.P., Raval S., Maslin T.J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2020. – No. 34(6). – pp. 385 – 396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.
19. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia. // Resources. – 2025. – No. 14(3). – Art. No. 51. DOI: 10.3390/resources14030051.
20. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Yu., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V.S. Circular mining wastes management for sustainable production of camellia sinensis (L.) o. kuntze. // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. No. 15. – Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
21. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietna. // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2019. – No. 231. – pp. 35–45. DOI: 10.2495/WM180041.
22. Offenbergl I., Ilias N. Geoecological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits. // International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying

*Geology and Mining Ecology Management Sgem.* – 2019. – Vol. 19(5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050.

23. Pochechun V.A., Semyachkov A.I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals. // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* – 2024. – Part F3514. – pp. 171 – 181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8\_15.

24. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P.M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds – a review and a framework for design guideline. // *Geosciences (Switzerland).* – 2021. – No. 11(2). – pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.

25. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. // *Energies.* – 2021. – Vol. 14. – Art. No. 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

## References

1. Bosikov I.I., Silaev I.V., Kuzina A.V., Mishedchenko A.A. Comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion for the synthesis of technical air supply systems for coal mines. *Ugol'.* 2025. No. 5. pp. 128–131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131. (In Russ.)

2. Valiev N.G., Golik V.I., Lebzin M.S. Inertness of influence exerted by effluents of Tyrnyauz Tungsten–Molybdenum Plant on hydrological systems of the North Caucasus. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2025. No. 1-1. pp. 5–16. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_11\_0\_5. (In Russ.)

3. Golik V.I. Reducing the risk of ecosystem pollution from mining in mountainous regions. *Ecology and Industry of Russia.* 2025. Vol. 29. No. 9. pp. 36–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-9-36-39. (In Russ.)

4. Golik V.I., Lukyanov V.G., Khasheva Z.M. Substantiation of the possibility and expediency of using ore dressing tailings for the manufacture of hardening mixtures. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering.* 2015. Vol. 326. No. 5. pp. 6–14. (In Russ.)

5. 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. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-76-80. (In Russ.)

6. Kapansky A.A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency. *Kazan State Power Engineering University Bulletin.* 2019. Vol. 11. No. 2(42). pp. 103–115. (In Russ.)

7. Klyuev R.V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia).* 2024. Vol. 9. No. 2. pp. 183–194. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-03-254. (In Russ.)

8. Klyuev R.V., Zaalishvili V.B., Muzaev I.D., GavriloVA A.A. Operation mode in the spent fuel pool of the Bilibino nuclear power plant under the implementation of various unfavorable scenarios. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2025. Vol. 15. No. 1. pp. 194–207. DOI: 10.46698/VNC.2025.80.31.016. (In Russ.)

9. Kongar-Syuryun Ch.B. Influence of mine water on the strength of artificial mass based on industrial waste. *Ugol'.* 2024. No. 12. pp. 75–78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78. (In Russ.)

10. 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. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-580-588. (In Russ.)

11. Makovozova Z.E., Sokolov A.A., Fomenko V.A., Sarbaeva M.T. Influence of hydrogeology at Unal tailings pond on ecosystem pollution with heavy metals. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023. No. 6. pp. 126–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_6\_0\_126. (In Russ.)

12. Panfilova T.A., Kukartsev V.V., Khudyakova E.V., Stepansevich M.N., Krasovskaya L.V. Geophysical assessment of the efficiency of zeolite-containing barriers for water protection in mining areas. *Geology and Geophysics of Russian South.* 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 211–225. DOI: 10.46698/VNC.2025.44.49.001. (In Russ.)

13. Parada S.G. Geological and economic assessment of gold-bearing ores of the black shale type on the example of the Malka-Mushtinsky ore node (Kabardino-Balkarian republic).

Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 142–151. DOI: 10.46698/VNC.2024.92.56.012. (In Russ.)

14. Skopintseva O.V., Pernebek B.P., Fedotkin I.O. Improving the efficiency of dust suppression of fine fractures in dust aerosols of coal preparation shops. *Occupational Safety in Industry*. 2025. No. 12. pp. 61–66. DOI: 10.24000/04092961-2025-12-61-66. (In Russ.)

15. Fomenko V.A., Lolaev A.B., Sokolov A.A., Kuz O.V., Plakhotin D.A. Selected results of geocological monitoring of Unal tailings dump topography. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024. No. 8. pp. 38–50. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_8\_0\_38. (In Russ.)

16. Khrapai E.S., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A. Assessment of soil pollution with heavy metals in the area of tailings dump influence of the Urup mining and processing plant using a wide range of environmental indices. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025. Vol. 17. No. 1. pp. 338–349. DOI: 10.21177/1998-4502-2025-17-1-338-349. (In Russ.)

17. Shabanov M.V., Marichev M.S., Mangiyeva S.S., Sokolov A.A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023. Vol. 15. No. 3. pp. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740. (In Russ.)

18. Banerjee B.P., Raval S., Maslin T.J., Timms W. Development of a UAV-mounted system for remotely collecting mine water samples. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020. No. 34(6). pp. 385–396. DOI: 10.1080/17480930.2018.1549526.

19. Kongar-Syuryun C., Babyr N., Klyuev R., Khayrutdinov M., Zaalishvili V., Agafonov V. Model for assessing efficiency of processing geo-resources, providing full cycle for development-case study in Russia. *Resources*. 2025. No. 14(3). Art. No. 51. DOI: 10.3390/resources14030051.

20. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V., Kondratiev V.V., Bukhtoyarov V.V., Konyukhov V.Yu., Bashmur K.A., Panfilova T.A., Brigida V.S. Circular mining wastes management for sustainable production of *camellia sinensis* (L.) o. Kuntze. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 15. Art. No. 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

21. Nguyen Q., Kitchener R., Bradshaw C. Investigation, monitoring and management of downstream groundwater in the tailings storage facilities of Nui Phao mine, Vietna. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2019. No. 231. pp. 35–45. DOI: 10.2495/WM180041.

22. Offenberg I., Ilias N. Geoecological monitoring in extraction process of soluble minerals from underground deposits. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management Sgem*. 2019. Vol. 19(5.2). DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.050.

23. Pochechun V.A., Semyachkov A.I. Practical application of groundwater regime monitoring at middle Ural deposits the practice of application of the results of regulatory observations for groundwater at the fields of the middle Urals. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2024. Part F3514. pp. 171–181. DOI: 10.1007/978-3-031-64423-8\_15.

24. Tuomela A., Ronkanen A.-K., Rossi P.M., Rauhala A., Haapasalo H., Kujala K. Using geomembrane liners to reduce seepage through the base of tailings ponds—a review and a framework for design guideline. *Geosciences (Switzerland)*. 2021. No. 11(2). pp. 1–23. DOI: 10.3390/geosciences11020093.

25. Wang Y., Zhang N., Chen, X. A short-term residential load forecasting model based on lstm recurrent neural network considering weather features. *Energies*. 2021. Vol. 14. Art. No. 2737. DOI: 10.3390/en14102737.