

EDN: <https://elibrary.ru/osjkuk>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-5-347-352>

УДК 614.71

© Коллектив авторов, 2024

Огудов А.С.¹, Новикова И.И.¹, Чуенко Н.Ф.¹, Козырева Ф.У.², Бокарева Н.А.²**Гигиеническая оценка атмосферной миграции серы, содержащейся в отходах переработки руд цветных и благородных металлов**¹ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора, ул. Пархоменко, 7, Новосибирск, 630108;²ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, ул. Островитянова, 1, Москва, 117997**Введение.** Развитие методических подходов к гигиенической оценке объектов размещения отходов переработки руд цветных и благородных металлов как источников загрязнения атмосферного воздуха представляет несомненный интерес для профилактической токсикологии и гигиены окружающей среды.**Цель исследования** — развитие методических подходов к гигиенической оценке объектов размещения отходов переработки руд цветных и благородных металлов как источников загрязнения атмосферного воздуха.**Материалы и методы.** Натурное моделирование атмосферной эмиссии соединений серы из сульфидсодержащих отходов осуществлялось с использованием образцов отходов весом 1,0 кг, нагреваемых до температуры 25, 33 и 40°C. Концентрации загрязнителей определялись с помощью газоанализатора ГАНК-4. При исследовании загрязнения атмосферы использовался метод подфакельных наблюдений. Объект исследования — Комсомольское хвостохранилище, Кемеровская область. Статистический анализ осуществлялся с помощью прикладных программ *Statistica 10.0*.**Результаты.** Ведущими компонентами эмиссий и загрязнения атмосферы в районе сульфидсодержащего хвостохранилища являются диметилсульфид и диметилсульфоксид, максимальные концентрации которых на расстоянии 300 м от источника в 7,1–6,4% проб превышали гигиенические нормативы и достигали 0,567 мг/м³ и 0,638 мг/м³ соответственно.**Ограничения исследования.** Ограничения исследования связаны с моделированием эмиссии и оценкой накопления в приземном слое атмосферы смесей соединений серы в районе размещения хвостохранилища золотоизвлекательного завода в летний период, что ограничивает возможности получения обобщенных представлений об опасности для среды обитания всех возможных типов объектов хранения сульфидсодержащих отходов в различные сезоны года.**Выводы.** Исследование позволило идентифицировать соединения серы, подлежащие контролю; оценить мощность источника и специфику зонального загрязнения атмосферы; установить факторы, способствующие распределению и накоплению в приземном слое атмосферы паровых смесей; сформулировать перспективные пути снижения объемов накопления сульфидсодержащих отходов и предотвращения их негативного влияния на среду обитания и здоровье населения.**Этика.** Проведение данного исследования не требовало заключения этического комитета.**Ключевые слова:** сульфидсодержащие отходы; атмосферная эмиссия соединений серы; натурное моделирование; подфакельные наблюдения**Для цитирования:** Огудов А.С., Новикова И.И., Чуенко Н.Ф., Козырева Ф.У., Бокарева Н.А. Гигиеническая оценка атмосферной миграции серы, содержащейся в отходах переработки руд цветных и благородных металлов. *Мед. труда и пром. экол.* 2024; 64(5): 347–352. <https://elibrary.ru/osjkuk> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-5-347-352>**Для корреспонденции:** Огудов Александр Степанович, e-mail: ogudov.tox@yandex.ru**Участие авторов:**

Огудов А.С. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста, подготовка рукописи;

Новикова И.И. — концепция и дизайн исследования, редактирование, подготовка рукописи;

Чуенко Н.Ф. — сбор и обработка данных, написание текста;

Козырева Ф.У. — концепция и дизайн исследования, редактирование, подготовка рукописи;

Бокарева Н.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование, подготовка рукописи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 09.04.2024 / Дата принятия к печати: 03.05.2024 / Дата публикации: 20.06.2024

Aleksandr S. Ogudov¹, Irina I. Novikova¹, Natalia F. Chuenko¹, Fatima U. Kozyreva², Natalia A. Bokareva²**Hygienic assessment of atmospheric migration of sulfur contained in waste from processing of ores of non-ferrous and precious metals**¹Novosibirsk Research Institute of Hygiene, 7, Parkhomenko St., Novosibirsk, 630108;²N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, 1, Ostrovityanova St., Moscow, 117997**Introduction.** The development of methodological approaches to the hygienic assessment of waste disposal facilities for processing non-ferrous and precious metals ores as sources of atmospheric air pollution is of undoubted interest for preventive toxicology and environmental hygiene.**The study aims** to develop methodological approaches to the hygienic assessment of waste disposal facilities for processing non-ferrous and precious metals ores as sources of atmospheric air pollution.**Materials and methods.** The article describes the conduct of a full-scale simulation of emissions of sulfur compounds from sulfide-containing waste into the atmosphere using waste samples weighing 1.0 kg, heated to temperatures of 25, 33 and 40°C. The scientists determined the concentrations of pollutants using the GANK-4 gas analyzer. When studying atmospheric pollution, the researchers used the method of subfactual observations. The object of the study was the Komsomolsk tailings dump, Kemerovo region. The statistical analysis was carried out using *Statistica 10.0* application programs.**Results.** The leading components of atmospheric emissions and pollution in the area of a sulfide-containing tailings pond are dimethyl sulfide and dimethyl sulfoxide, the maximum concentrations of which at a distance of 300 m from the source in 7.1–6.4% of samples exceeded hygienic standards and reached 0.567 mg/m³ and 0.638 mg/m³, respectively.

Limitations. The limitations of the study are related to the modeling of emissions and the assessment of the accumulation in the surface layer of the atmosphere of mixtures of sulfur compounds in the area of the tailings of the gold recovery plant in the summer, which limits the possibility of obtaining generalized ideas about the environmental hazards of all possible types of sulfide-containing waste storage facilities at different times of the year.

Conclusion. The conducted research made it possible to identify sulfur compounds subject to control; assess the power of the source and the specifics of zonal atmospheric pollution; identify factors contributing to the spread and accumulation of vapor-gas mixtures in the surface layer of the atmosphere; formulate promising ways to reduce the accumulation of sulfide-containing waste and prevent their negative impact on the environment and public health.

Ethics. The conduct of this study did not require the conclusion of the Ethics Committee.

Keywords: sulfide-containing waste; atmospheric emission of sulfur compounds; field modeling; subfactual observations

For citation: Ogudov A.S., Novikova I.I., Chuenko N.F., Kozyreva F.U., Bokareva N.A. Hygienic assessment of atmospheric migration of sulfur contained in waste from processing of ores of non-ferrous and precious metals. *Med. truda i prom. ecol.* 2024; 64(5): 347–352. <https://elibrary.ru/osjkuk> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2024-64-5-347-352> (in Russian)

For correspondence: Alexander S. Ogudov, e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

Contribution:

Ogudov A.S. — research concept and design, data collection and processing, text writing, manuscript preparation;

Novikova I.I. — concept and design of the study, editing, preparation of the manuscript;

Chuenko N.F. — data collection and processing, writing the text;

Kozyreva F.U. — concept and design of the study, editing, preparation of the manuscript;

Bokareva N.A. — concept and design of the study, editing, preparation of the manuscript;

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 09.04.2024 / Accepted: 03.05.2024 / Published: 20.06.2024

Введение. Комбинирование методов натурного моделирования эмиссии соединений серы из вещества горных отходов и исследований зонального загрязнения атмосферного воздуха для оценки мощности источников и параметров атмохимических аномалий в горнодобывающих регионах, идентификации опасности и прогнозирования риска для здоровья населения несомненно представляет научный и практический интерес. Газовый состав воздуха над объектами хранения сульфидсодержащих отходов определяется неорганическими и биотическими процессами, протекающими в отвалных породах, поровых водах верхних уровней и вторичных сульфатах [1–4]. Подтверждено выделение серосодержащих газов в воздушную среду вследствие процессов окисления материала отходов атмосферным кислородом, жизнедеятельности сообществ микроорганизмов, населяющих техногенно-изменённую среду и преобразования серы в поровых растворах [5–6]. Приоритетное влияние на атмосферную миграцию серы в составе сложных летучих парогозовых комплексов оказывает температурный фактор [7].

Цель исследования — развитие методических подходов к гигиенической оценке объектов размещения отходов переработки руд цветных и благородных металлов как источников загрязнения атмосферного воздуха.

К основным задачам исследования относились моделирование условий эмиссии летучих соединений серы из сульфидсодержащего хвостохранилища в летний период, определение качественного и количественного состава парогозовых смесей, оценка зональности их распространения и влияния на санитарное состояние атмосферного воздуха.

Материалы и методы. Объектом исследования являлось Комсомольское хвостохранилище, расположенное на территории бывшего золотоизвлекательного завода в п.г.т. Комсомольск Кемеровской области [8]. Его площадь составляет 146 тыс. м², объём — около 810 тыс. м³, количество накопленного материала — 1,1 млн м³, высота около 28 м [9–11]. Натурное моделирование эмиссии соединений серы из вещества сульфидсодержащих отходов золоторудного производства осуществляли следующим образом: в лабораторных условиях в герметичную камеру (объёмом 200 л) помещали плитку, на которой

образец отходов весом 1,0 кг последовательно нагревали до температуры 25, 33 и 40°C. Количественные характеристики эмиссии диметилсульфида, диметилсульфоксида, диоксида серы, сероуглерода и сероводорода определяли по их концентрациям в воздухе камеры с помощью газоанализатора ГАНК-4 (НПО «ГАНК», Москва) по методике измерений массовой концентрации серосодержащих органических соединений в атмосферном воздухе газоанализатором ГАНК-4 (№ 1-22-2013). Для определения дальности распространения соединений серы от источника использовали метод подфакельных наблюдений¹. Отбор не менее 50 проб по каждому компоненту идентифицированных смесей проводили по направлению ветра, на расстояниях от неорганизованного источника 75, 150, 300 и 600 метров, разрыв между которыми соответствует арифметической прогрессии. Также осуществлён отбор проб атмосферного воздуха в жилой зоне п.г.т. Комсомольск в 6 точках вблизи жилых домов, находящихся на ближайших расстояниях от границ хвостохранилища (273–938 м), по 6 компасным направлениям. Всего отобрано 15–22 проб по каждому компоненту образующихся смесей на каждом маршрутном посту.

Полученные цифровые данные подвергнуты математическому анализу по стандартным прикладным программам *Statistica 10.0*. В таблицах данные представлены в виде $M \pm m$, где M — среднее арифметическое, m — ошибка среднего арифметического. Достоверным считали различия при $p < 0,05$, когда вероятность различий составляет 95% и более.

Результаты. Процедура моделирования подтвердила интенсификацию миграции из сульфидсодержащих отходов в воздушную среду под влиянием температурного фактора 4-х соединений серы (*табл. 1*).

Видно, что содержание диметилсульфоксида, диметилсульфида, сероуглерода и диоксида серы в воздухе камеры возрастает по мере увеличения температуры нагрева вещества отходов. При нагреве образца до 40°C моделирующим действие солнечной радиации на поверхность

¹ Чурагулова З.С. Почвы лесных питомников Южного Урала и оптимизация их лесорастительных свойств: Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора биологических наук: 03.00. 27. Томск, 2004.

Таблица 1 / Table 1

Концентрации летучих соединений серы в воздухе камеры при температуре нагрева вещества отходов от 25°C до 40°C
Concentrations of volatile sulfur compounds in the chamber air at the heating temperature of the waste substance from 25°C to 40°C

Наименование вещества (химическая формула)	ПДК _{мр} или ОБУВ (мг/м³)			Концентрация в камере, мг/м³			Кратность превышения ПДК		
	Концентрации летучих соединений серы в воздухе затравочной камеры при температуре нагрева вещества отходов от 25°С до 40°С								
	25°С	33°С	40°С	25°С	33°С	40°С	25°С	33°С	40°С
Сероуглерод (CS ₂)	0,03	0,03	0,03	0,029	0,072	1,5	0	2,4	50
Диметилсульфид (C ₂ H ₆ S)	0,08	0,08	0,08	0,24	0,9	25	3,0 раза	11,2	312
Диметилсульфоксид ((CH ₃) ₂ SO)	0,1	0,1	0,1	0,07	0,6	10	0	6,0	100
Диоксид серы (SO ₂)	0,5	0,5	0,5	0,0	0,004	0,01	0	0	0
Сероводород (H ₂ S)	0,008	0,008	0,008	0,0	0,0012	0,002	0	0	0

объекта размещения отходов в летний период, кратность превышения нормативных уровней концентрациями сероуглерода, диметилсульфоксида и диметилсульфида достигала соответственно 50, 100 и 312 раз² [12-14].

Полученные в условиях натурного моделирования качественные и количественные характеристики атмосферной эмиссии летучих соединений серы во многом коррелировали с фактическими концентрациями компонентов парогазовых смесей в атмосферном воздухе по результатам подфакельных наблюдений (табл. 2).

Представленные данные свидетельствуют о том, что диметилсульфид и диметилсульфоксид, которые в стандартных условиях находятся в жидком состоянии, способны накапливаться в приземном слое атмосферы в концентрациях, в несколько раз выше нормативных уровней. В то же время максимальные концентрации диоксида серы и сероуглерода, которые в стандартных условиях находятся в газообразном состоянии, во всех точках отбора проб регистрировались в пределах гигиенических нормативов. Закономерно, что осреднённые концентрации поллютантов достигали своих максимумов на расстоянии 300 м, равном 10 высотам неорганизованного источника. Для источника, характеризующегося относительно малым объёмом и низкой температурой выделений, опасная скорость ветра, благоприятствующая накоплению в атмосфере указанных соединений серы, равняется 1–2 м/с. С учётом сложных форм рельефа прилегающих к источнику территорий максимальные уровни загрязнения приземного слоя атмосферы объяснимо создаются на подветренных склонах возвышенностей и котловин. В дневные часы, при высоких температурах воздуха, темпы атмосферной миграции диметилсульфида, диметилсульфоксида, сероуглерода и диоксида серы закономерно возрастают [15, 16].

Для прогнозирования риска здоровью населения при воздействии соединений серы, загрязняющих атмосферу горнодобывающих регионов, дополнительно к подфакельным наблюдениям, осуществлён отбор проб атмосферно-

го воздуха в жилой зоне п.г.т. Комсомольск. Анализ полученных данных показал, что, по отношению к величинам ПДК_{мр}, осреднённая максимально-разовая концентрация сероуглерода на всех маршрутных постах составляет не более 0,02 ПДК, диметилсульфида — не более 0,1, диоксида серы — не более 0,05, сероводорода — не более 0,16. Превышение величины ориентировочного безопасного уровня воздействия (ОБУВ) концентрациями диметилсульфоксида отмечалось на одном маршрутном посту, расположенном на 273 м от границы источника в юго-западном направлении, при температуре воздуха +32°C. Здесь в 7 пробах из 20 отмечались превышения величины ОБУВ, кратность превышения достигала 2,1 раза.

В стадии эксплуатации рудных месторождений, техногенные потоки рассеяния химических элементов, состав которых для каждого рудного месторождения специфичен, являются следствием производственных процессов добычи (бурение, взрывание, погрузка, транспортировка и др.) и обогащения (дробление, измельчение, классификация, флотация, обезвоживание и др.) руд цветных и благородных металлов [12]. В условиях перехода многих горнодобывающих регионов к постиндустриальным экономическим практикам снижение и даже полная остановка хозяйственной деятельности предприятий не приводят к прекращению техногенных процессов миграции. Основную гигиеническую значимость приобретают природно-техногенные процессы, генетически связанные с формированием на данной стадии горнорудного техногенеза природно-технических систем [1]. Результатом запуска природно-техногенных процессов является образование в накопленных отходах переработки сульфидных руд токсичных продуктов, способных вовлекаться в локальные циклы круговорота веществ. Особенно актуальной проблемой для районов размещения объектов хранения отходов переработки руд цветных и благородных металлов в настоящее время и на перспективу является возрастание техногенной миграции серы, поступающей в атмосферный воздух в составе летучих парогазовых комплексов [13].

Подфакельные наблюдения свидетельствуют о различиях в фактических уровнях загрязнения атмосферы на передвижных постах наблюдений, которые связаны с погодноклиматическими условиями, высотой источника, характером подстилающей поверхности и агрегатным состоянием летучих соединений серы, детерминирующих процессы

² Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2. <https://docs.cntd.ru/document/573500115#656010> (дата обращения 16.05.2022).

Таблица 2 / Table 2

Осреднённые концентрации летучих соединений серы в атмосферном воздухе на различных расстояниях от источника, в мг/м³

Average concentrations of volatile sulfur compounds in atmospheric air at various distances from the source, in mg/m³

Наименование вещества	Расстояние от источника выделения			
	75 м	150 м	300 м	600 м
Сероуглерод	0,0004±0,00001	0,002±0,0002	0,002±0,0002	0,001±0,0001
Диметилсульфид	0,01±0,001	0,006±0,0002	0,087±0,02	0,007±0,0002
Диметилсульфоксид	0,009±0,001	0,005±0,0001	0,105±0,02	0,007±0,0001
Диоксид серы	0,002±0,0003	0,007±0,0002	0,012±0,001	0,001±0,0001
Сероводород	0,002±0,0001	0,002±0,0003	0,002±0,0001	0,002±0,0002

выделения, переноса, накопления и рассеивания парогазовых комплексов. Первоочередному контролю в районах размещения объектов хранения отходов переработки сульфидных руд подвергались диметилсульфид и диметилсульфоксид, концентрации которых на расстоянии 300 м от источника в 7,1–6,4% проб превышали гигиенические нормативы и достигали своих максимумов — 0,567 мг/м³ и 0,638 мг/м³ соответственно. Концентрации сероуглерода и диоксида серы, мигрирующие из вещества отходов в значительно меньших количествах (по результатам натурного моделирования), в приземных слоях атмосферы подвергаются рассеиванию и гигиенической значимости не представляют. Низкие темпы атмосферной миграции сероводорода и отсутствие зональности в загрязнении атмосферного воздуха указанной вредной примесью объясняются окислительными свойствами вещества сульфидных отходов.

Подфакельные наблюдения обнаружили значительную вариабельность концентраций в атмосферном воздухе летучих соединений серы в течение дня, что подтверждает ключевое влияние температурного фактора на протекание процесса эмиссии в веществе сульфидсодержащих отходов. К негативным факторам, способствующим существенному накоплению в приземном слое атмосферы 2-х соединений серы, относятся интенсивная инсоляция и тихая погода со слабым ветром. Кроме выявления специфичных для объекта исследования закономерностей, подфакельные наблюдения подтвердили уже известные в практике закономерности, постулирующие, что максимальные концентрации вредных примесей в приземных слоях атмосферы наблюдаются на расстоянии, равном приблизительно 10 высотам источника, особенно на подветренных склонах возвышенностей и котловин [17].

Исследование позволило идентифицировать соединения серы, подлежащие контролю; оценить мощность источника и специфику зонального загрязнения атмосферы; установить факторы, способствующие распределению

и накоплению в приземном слое атмосферы летучих парогазовых смесей; сформулировать перспективные пути снижения объёмов накоплений отходов добычи и переработки сульфидных руд и предотвращения их негативного влияния на среду обитания и здоровье человека [15, 18–20].

Заключение. Таким образом, актуальной гигиенической проблемой для горнопромышленных регионов России на постэксплуатационной стадии горнорудного техногенеза является формирование атмохимических ореолов загрязнения. В районе размещения хранилища сульфидсодержащих отходов золоторудного производства ведущими компонентами загрязнения атмосферного воздуха являются диметилсульфид и диметилсульфоксид, гигиенически значимые уровни концентраций которых формируются в условиях отрицательных форм рельефа, интенсивной инсоляции и опасных скоростей ветра на расстоянии, равном приблизительно 10 высотам неорганизованного источника.

Перспективными путями снижения накоплений сульфидсодержащих отходов добычи и переработки руд цветных и благородных металлов и предотвращения их негативного влияния на среду обитания являются: качественная консервация или рекультивация объектов хранения отходов добычи и переработки сульфидных руд и загрязнённых территорий; внедрение современных технологий нейтрализации отходов добычи и переработки сульфидных руд; использование объектов хранения отходов переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов в качестве техногенных месторождений, из которых содержащиеся полезные компоненты могут доизвлекаться в промышленных масштабах; соблюдение режима санитарно-защитных зон для объектов хранения отходов переработки сульфидных руд, в том числе и при прекращении хозяйственной деятельности рудоперерабатывающих производств; проведение мониторинга концентраций летучих соединений серы в атмосферном воздухе горнорудных районов в целях санитарного надзора и проведение работ по оценке риска для здоровья населения.

Список литературы

1. Рафиков С.Ш., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К., Рахматуллин Н.Р., Бактыбаева З.Б., Рахматулина Л.Р. Влияние предприятий горнорудной промышленности на состояние окружающей среды и здоровье населения (обзор литературы). *Медицина труда и экология человека*. 2021; 3: 62–75. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10305>

2. Хусаинова А.Ш., Калинин Ю.А., Гаськова О.Л., Бортникова С.Б. Типоморфная характеристика золота из хвостохранилищ колчеданно-полиметаллических месторождений Сибири. *Георесурсы*. 2021; 23(3): 149–163. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.18>

3. Маслобоев В.А., Селезнев С.Г., Макаров Д.В., Светлов А.В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2014; 3: 138–153. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-165-176>

4. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*. 2019; 647: 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.024>

5. Bortnikova S., Abrosimova N., Yurkevich N., Zvereva V., Devyatova A., Gaskova O. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent sulfates from the belovo plant sulfide slag, Russia. *Minerals*. 2019; 9(6): 344. <https://doi.org/10.3390/min9060344>
6. Кузнецова И.В., Сафронов П.П., Моисеенко Н.В. (2019). Вещественно-минеральная характеристика техногенных россыпей — потенциальных источников благородного металла (на примере Нижнеселемджинского золотоносного узла Приамурья, Россия). *Георесурсы*. 2019; 21(1): 2–14. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.2-14>
7. Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu., Yurkevich N.V., Grakhova S.P. et al. Gas Anomalies in the Air Above the Sulfide Tailings and Adjacent Soils in Komsomolsk Settlement (Kemerovo Region, Russia). *Water, Air, & Soil Pollution*. 2021; 232(10): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05290-1>
8. Khusainova A.S., Gaskova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. A Physicochemical Model of Gold Transformation in the Wastes of Processed Pyrite–Polymetallic Ores (Salair Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2020; 61(9): 964–975. <https://doi.org/10.15372/RGG2020120>
9. Бортникова С.Б., Десяткова А.Ю., Шевко Е.П., Гаскова О.Л., Еделева А.В., Огудов А.С. Перенос элементов в газоаэрозольной фазе из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская обл.). *Химия в интересах устойчивого развития*. 2016; 24(1): 11–22. <https://doi.org/10.15372/KhUR20160102>
10. Хусаинова А.Ш., Гаскова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский край, Россия). *Геология и геофизика*. 2020; 61(9): 1181–1193. <https://doi.org/10.15372/GiG2020120>
11. Боcharов В.А., Игнаткина В.А., Лапшина Г.А., Хачатрян Л.С. Развитие технологии комплексной переработки упорных пиритных полиметаллических руд цветных металлов. *Цветные металлы*. 2018; 4: 27–34. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.04.03>
12. Павленко Ю.В., Мязин В.П., Сергеев Е.Н. О проблемах экологической безопасности при переработке руд цветных, редких и благородных металлов. *Горный журнал*. 2010; 5: 57–59.
13. Стёпкин Ю.И., Гайдукова Е.П. Оценка и управление риском при обращении с отходами. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(8): 693–698. <https://elibrary.ru/vmybxd>
14. Бакиров А.Б., Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Рахматуллин Н.Р., Бактыбаева З.Б. Проблемы эндогенных пожаров при разработках рудных месторождений и опыт гигиенической оценки аварийной ситуации, связанной с выбросами серосодержащих соединений. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(9): 917–922. <https://elibrary.ru/ahyubs>
15. Lèbre É., Corder G.D., Golev A. Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*. 2017; 107: 34–42.
16. Бакиров А.Б., Валеев Т.К., Сулейманов Р.А., Бактыбаева З.Б., Рахматуллин Н.Р., Аллаярова Г.Р. и др. Санитарно-гигиеническая характеристика горнорудных территорий и оценка риска здоровью населения от воздействия неблагоприятных факторов окружающей среды. *Медицина труда и экология человека*. 2018; 1(13): 5–12.
17. Амосов П.В., Баканов А.А., Маслобоев В.А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трёхмерного моделирования). *Известия вузов. Горный журнал*. 2017; 6: 87.
18. Nevskaya M.A., Seleznev S.G., Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M., Makarov D.V. Environmental and Business Challenges Presented by Mining and Mineral Processing Waste in the Russian Federation. *Minerals*. 2019; 9(7): 445. <https://doi.org/10.3390/min9070445>
19. Пахомова Н.В. Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития. *Вестник СПбГУ. Экономика*. 2017; 33(2): 244–268.
20. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты: Кольский научный центр РАН; 2005.

References

1. Rafikov S.Sh., Suleymanov R.A., Valeev T.K., Rakhmatullin N.R., Baktybayeva Z.B., Rakhmatullina L.R. Influence of mining enterprises on the state of the environment and public health (literature review). *Meditina truda i ekologiya cheloveka*. 2021; 3: 62–75. <https://doi.org/10.24412/2411-3794-2021-10305> (in Russian).
2. Husainova A.Sh., Kalinin Yu.A., Husainova A.SH, Gas'kova O.L., Bortnikova S.B. Typomorphic characteristics of gold from tailings of pyrite-polymetallic deposits in Siberia. *Georesursy*. 2021; 23(3): 149–163. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.18>
3. Masloboev V.A., Seleznev S.G., Makarov V.A., Masloboev D.V., Svetlov A.V. Assessment of the environmental hazard of storage of waste from the mining and processing of copper-nickel ores. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014; 3: 138–153. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-165-176> (in Russian).
4. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste. *Science of the Total Environment*. 2019; 647: 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.024>
5. Bortnikova S., Abrosimova N., Yurkevich N., Zvereva V., Devyatova A., Gaskova O., Saeva O., Korneeva T., Shuvaeva O., Pal'chik N., Chernukhin V., Reutsky A. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent sulfates from the belovo plant sulfide slag, Russia. *Minerals*. 2019; 9(6): 344. <https://doi.org/10.3390/min9060344>
6. Kuznetsova I.V., Safronov P.P., Moiseenko N.V. Matter-mineral characteristics of technogene placers-potential sources of precious metals (on the example of the Nizhnesелемджинский gold-bearing node of Priamurye, Russia). *Georesursy*. 2019; 21(1): 2–14. <https://doi.org/10.18599/grs.2019.1.2-14>
7. Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu., Yurkevich N.V., Grakhova S.P., Edelev A.V., Volynkis S.S., Ogudov A.S., Zubtsovskaya N.A. Gas Anomalies in the Air Above the Sulfide Tailings and Adjacent Soils in Komsomolsk Settlement (Kemerovo Region, Russia). *Water, Air, & Soil Pollution*. 2021; 232(10): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05290-1>
8. Khusainova A.S., Gaskova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. A Physicochemical Model of Gold Transformation in the Wastes of Processed Pyrite–Polymetallic Ores (Salair Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 2020; 61(9): 964–975. <https://doi.org/10.15372/RGG2020120>
9. Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu., Shevko E.P., Gas'kova O.L., Edelev A.V., Ogudov A.S. Transfer of elements in the gas-aerosol phase from the dumps of the Komsomolsk gold recovery plant (Kemerovo region). *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*. 2016; 24(1): 11–22. <https://doi.org/10.15372/KhUR20160102> (in Russian).
10. Khusainova A.S., Gaskova O.L., Kalinin Yu.A., Bortnikova S.B. A Fiziko-khimicheskaya model' preobrazovaniya zolota v produktakh pererabotki rud kolchedanno-polimetallicheskih mestorozhdeniy (Salairskiy kryazh, Rossiya). *Geologiya i geofizika*. 2020; 61(9): 1181–1193. <https://doi.org/10.15372/GiG2020120> (in Russian).
11. Bocharov V.A., Ignatkina V.A., Lapshina G.A., Khachatryan L.S. Development of technology for complex processing of refractory pyrite polymetallic ores of non-ferrous metals. *Tsvetnyye metally*. 2018; 4: 27–34. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.04.03> (in Russian).

12. Pavlenko Yu.V., Myazin V.P., Sergeenko E.N. On the problems of environmental safety in the processing of non-ferrous, rare and noble metal ores. *Gornyy zhurnal*. 2010; 5: 57–59 (in Russian).
13. Stepkin Yu.I., Gaidukova E.P. Assessment and risk management in waste management. *Gigiyena i sanitariya*. 2018; 97(8): 693–698. <https://elibrary.ru/vmybxd> (in Russian).
14. Bakirov A.B., Valeev T.K., Suleimanov R.A., Rakhmatullin N.R., Baktybaeva Z.B. Problems of endogenous fires in the development of ore deposits and the experience of hygienic assessment of an emergency situation associated with emissions of sulfur-containing compounds. *Gigiyena i sanitariya*. 2019; 98(9): 917–922. <https://elibrary.ru/ahyub> (in Russian).
15. Lèbre É., Corder G.D., Golev A. Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource. *Minerals Engineering*. 2017; 107: 34–42.
16. Bakirov A.B., Valeev T.K., Suleimanov R.A., Baktybaeva Z.B., Rakhmatullin N.R., Allayarova G.R. Sanitary and hygienic characteristics of mining territories and assessment of the risk to public health from the impact of adverse environmental factors. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka*. 2018; 1(13): 5–12 (in Russian).
17. Amosov P.V., Baklanov A.A., Masloboev V.A. The results of the assessment of air pollution during dusting of the tailings (based on three-dimensional modeling). *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2017; 6: 87 (in Russian).
18. Nevskaya M.A., Seleznev S.G., Masloboev V.A., Klyuchnikova E.M., Makarov D.V. Environmental and Business Challenges Presented by Mining and Mineral Processing Waste in the Russian Federation. *Minerals*. 2019; 9(7): 445. <https://doi.org/10.3390/min9070445>
19. Pahomova N.V. Transition to a circular economy and closed supply chains as a factor of sustainable development. *Vestnik SPbGU. Ekonomika*. 2017; 33(2): 244–268 (in Russian).
20. Chanturiya V.A., Makarov V.N., Makarov D.V. *Ecological and technological problems of processing technogenic sulfide-containing raw materials*. Apatity: Kol'skij nauchnyj centr RAN, 2005 (in Russian).

Информация об авторах:

- Огудов Александр Степанович заведующий отделом токсикологии с санитарно-химической лабораторией ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора, канд. мед. наук.
E-mail: ogudov.tox@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8242-0321>
- Новикова Ирина Игоревна директор, ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора, д-р мед. наук, профессор.
E-mail: novikova_ii@niig.su
<https://orcid.org/0000-0003-1105-471X>
- Чуенко Наталья Федоровна научный сотрудник, отдел токсикологии с санитарно-химической лабораторией ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора.
E-mail: natali26.01.1983@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1961-3486>
- Козырева Фатима Увжиковна профессор кафедры гигиены ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, д-р мед. наук, доцент.
E-mail: prof.kf61@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4041-9549>
- Бокарева Наталия Андреевна д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры гигиены ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России.
E-mail: nabokareva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6685-1946>

Information about the authors:

- Aleksandr S. Ogudov Head of the Department of Toxicology with a Sanitary and Chemical Laboratory, Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Cand. of Sci. (Med.).
E-mail: ogudov.tox@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8242-0321>
- Irina I. Novikova Director of Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Dr. of Sci. (Med.), Professor.
E-mail: novikova_ii@niig.su
<https://orcid.org/0000-0003-1105-471X>
- Natalya F. Chuenko Researcher, Department of Toxicology with a Sanitary and Chemical Laboratory, Novosibirsk Research Institute of Hygiene.
E-mail: natali26.01.1983@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1961-3486>
- Fatima U. Kozyreva Professor of the Department of Hygiene, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor.
E-mail: prof.kf61@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4041-9549>
- Natalia A. Bokareva Professor of the Department of Hygiene, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Dr. of Sci. (Med.), Associate Professor.
E-mail: nabokareva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6685-1946>