

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНЫХ РУД НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЗДОРОВЬЕ НАСЕЛЕНИЯ

© 2023

Новикова И.И.<sup>1</sup>, Огудов А.С.<sup>1</sup>, Семёнова Е.В.<sup>2</sup>, Чуенко Н.Ф.<sup>1</sup>, Бессонова М.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены (г. Новосибирск, Российская Федерация)

<sup>2</sup>Центр гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области (г. Новосибирск, Российская Федерация)

**Аннотация.** После завершения эксплуатации рудных месторождений актуальной эколого-гигиенической проблемой остается атмосферная миграция соединений серы. Целью исследования являлось получение научно обоснованных представлений об опасности накопленных в горнодобывающих регионах отходов добычи и переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов для окружающей среды и здоровья населения на основе методологии комплексного моделирования. Эмиссию соединений серы исследовали на натурной модели Урского отвала барит-пиритовой сыпучки (п. Урск Кемеровской области), характер их комбинированного действия – в модельном эксперименте на крысах линии Вистар. По результатам моделирования, к основным компонентам вредных эмиссий Урского отвала относятся диметилсульфид (ДМС), диметилсульфоксид (ДМСО) и диоксид серы (SO<sub>2</sub>), концентрации в воздухе которых превышали нормативные в 129–170, 119–127 и 1,7 раза. При экспозиции подопытных животных двухкомпонентной смесью ДМС и ДМСО отмечена частичная суммация нейро- и гепатотоксического эффектов компонентов, трехкомпонентной смесью ДМС, ДМСО и SO<sub>2</sub> – потенцирование раздражающего эффекта. Исследованы зависимости качественных и количественных характеристик биологических эффектов выделенных смесей от сумм концентраций их компонентов и времени. Апробированный алгоритм моделирования последствий воздействия сульфидсодержащего отвала на окружающую среду и здоровье населения позволяет расширить возможности экологической экспертизы средоохранительных мероприятий и оценки рисков для здоровья населения в горнодобывающих регионах.

**Ключевые слова:** Урской отвал; Кемеровская область; натурное моделирование эмиссии смесей соединений серы; крысы-самцы линии Вистар; эффекты воздействия двухкомпонентной смеси; эффекты воздействия трехкомпонентной смеси; зависимость «концентрация – эффект»; зависимость «время – эффект».

## MODELING THE IMPACT OF SULFIDE ORE PROCESSING WASTE DISPOSAL FACILITIES ON THE ENVIRONMENT AND HUMAN HEALTH

© 2023

Novikova I.I.<sup>1</sup>, Ogudov A.S.<sup>1</sup>, Semenova E.V.<sup>2</sup>, Chuenko N.F.<sup>1</sup>, Bessonova M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk Research Institute of Hygiene (Novosibirsk, Russian Federation)

<sup>2</sup>Center of Hygiene and Epidemiology in the Novosibirsk Region (Novosibirsk, Russian Federation)

**Abstract.** After the completion of the exploitation of ore deposits, atmospheric migration of sulfur compounds remains an urgent ecological and hygienic problem. The aim of the study was to obtain scientifically sound ideas about the danger of waste from the extraction and processing of sulfide ores of non-ferrous and precious metals accumulated in mining regions for the environment and public health based on the methodology of integrated modeling. The emission of sulfur compounds was studied on a full-scale model of the Ursky dump of barite-pyrite bulk (Ursk settlement, Kemerovo Region), the nature of their combined action was studied in a model experiment on Wistar rats. According to the simulation results, the main components of harmful emissions from the Ursky dump include dimethyl sulfide, dimethyl sulfoxide and sulfur dioxide, the concentrations of which in the air exceeded the normative ones by 129–170, 119–127 and 1.7 times. When exposing experimental animals with a two-component mixture of dimethyl sulfide and dimethyl sulfoxide, a partial summation of the neuro- and hepatotoxic effects of the components was noted, while a three-component mixture of dimethyl sulfide, dimethyl sulfoxide and sulfur dioxide potentiated the irritating effect. The dependences of the qualitative and quantitative characteristics of the biological effects of the isolated mixtures on the sum of the concentrations of their components and time are investigated. The proven algorithm for modeling the effects of the impact of a sulfide-containing dump on the environment and public health makes it possible to expand the possibilities of environmental expertise of environmental protection measures and assessment of risks to public health in mining regions.

**Keywords:** Ursky dump; Kemerovo Region; full-scale modeling of the emission of mixtures of sulfur compounds; male rats of the Wistar line; effects of exposure to a two-component mixture; effects of exposure to a three-component mixture; dependence «concentration-effect»; dependence «time-effect».

### Введение

В структуру территориальных систем, складывающихся в период индустриализации горнодобывающих регионов, входили градообразующие объекты I категории и населенные пункты, селитебные зоны ко-

торых в определенных случаях вовлекались в ореолы загрязнения [1, с. 63]. Процессы рассеяния в окружающей среде соединений металлов, металлоидов и серы в этот период являлись следствием технологических процессов добычи и обогащения полиметал-

лических руд [2, с. 6]. После завершения эксплуатации рудных месторождений насущным вопросом остается выделение в атмосферный воздух газо-аэрозольных смесей законсервированными и выведенными из эксплуатации объектами производственной инфраструктуры [3, с. 21; 4, с. 87]. Динамические изменения параметров эмиссии в результате взаимодействий технических, природных и природно-техногенных объектов определяют актуальность разработки гигиенического прогноза, позволяющего получить вероятностные данные об их опасности для окружающей среды и здоровья населения [5, с. 132]. Особенно актуальной эколого-гигиенической проблемой в настоящее время и на перспективу является нарастание эмиссии летучих соединений серы, поступающих в атмосферный воздух в составе сложных парогазовых смесей. В качестве механизмов генезиса такой эмиссии, приобретающей природно-техногенный характер, выступают неорганические и биотические процессы, протекающие в рассеянной и складированной минеральной массе, интенсивность которых во многом определяется температурным фактором [6, р. 415; 7; 8, р. 168; 9, с. 1062; 10]. Основной прогнозных решений, в условиях сложности механизмов эмиссии и неопределенности эффектов комбинированного действия выделяющихся смесей, является комплексное моделирование, к объектам которого относятся источник эмиссий, токсикогенные патологические состояния, возникающие в результате экспозиции сложных парогазовых комплексов соединений серы, и причинно-следственные связи, складывающиеся между показателями загрязнения воздуха и жизнедеятельности организма [11; 12, с. 122]. Целесообразность включения этапа комплексного моделирования в методологию эколого-гигиенической диагностики объектов размещения сульфидсодержащих отходов определяется потребностью в научно обоснованном планировании природоохранных и надзорных мероприятий в условиях перехода горнодобывающих регионов к постиндустриальным экономическим практикам. Непосредственная оценка состояния атмосферного воздуха, здоровья населения и связей между ними в районах размещения сульфидсодержащих отвалов и хвостохранилищ является последующим этапом методологии, по результатам которой предстоит реализация мероприятий по мелиорации объектов окружающей среды и устранению аэрогенных рисков для здоровья населения.

Целью исследования являлось получение научно обоснованных представлений об опасности накопленных в горнодобывающих регионах отходов добычи и переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов для окружающей среды и здоровья населения на основе методологии комплексного моделирования.

#### Материалы и методы

В качестве объекта моделирования выступал Урской отвал, сформированный в 30-х годах XX века из отходов переработки руд Ново-Урского месторождения (Кемеровская область) [13, с. 1188]. В рудах месторождения преобладали сульфиды – пирит, халькопирит, сфалерит, блеклые руды, арсенопирит, галенит, борнит, ковеллин и халькозин, отличающиеся высоким содержанием серы. Образующиеся после извлечения золота сульфидсодержащие отходы раз-

мещались вблизи от выработок в два насыпных отвала высотой 10–12 метров. Пробы отходов, отобранные из Урского отвала в летний период, служили натурной моделью. Процедура моделирования состояла в следующем: в герметичную затравочную камеру объемом 200 л помещали плитку, на которой вещество отходов весом 1,0 кг нагревали до температур +25°C и +33°C, имитирующих различную интенсивность солнечной радиации в летний период. Параметры эмиссии диметилсульфоксида, диметилсульфида, диоксида серы, сероуглерода и сероводорода определяли по динамике их концентраций в воздухе с использованием газоанализатора ГАНК-4 (НПО «ГАНК», Москва). После достижения стабильности параметров эмиссии воздух, содержащий соединения серы, подавали по трубке во вторую аналогичную камеру, в которой находились подопытные животные. Отбор проб воздуха проводили из зоны их дыхания с помощью пробоотборного зонда. Характер комбинированного действия соединений серы в условиях их совместного присутствия в воздухе изучали в острых опытах на белых крысах-самцах линии Вистар, распределенных на три группы (1-я опытная, 2-я опытная и контрольная) по 12 особей в каждой. При ингаляционных затравках животных 1-й и 2-й групп скорость воздушного потока варьировали в зависимости от моделируемого уровня воздействия, колебания которого в течение 4-часового опыта не превышали 10% [14]. Обследования животных осуществляли на 2-й и 4-й дни после экспозиции с помощью общепринятых и унифицированных методов [15; 16]. По результатам 1-го и 2-го обследования выполняли анализ зависимостей характера и выраженности эффектов от суммы концентраций и времени. Опыты на животных проводили согласно директиве 2010/63/EU Европейского парламента и совета ЕС по охране животных, используемых в научных целях и разрешения локального этического комитета ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора (протокол № 1 от 27.01.2022). Полученные цифровые данные подвергали статистической обработке и 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

В рамках заданных условий моделирования параметры эмиссии диметилсульфида, диметилсульфоксида, диоксида серы, сероуглерода и сероводорода определялись в процессе поэтапного нагрева образцов сульфидсодержащих отходов до температур +25°C и +33°C. Апробирование модели показало, что нагрев вещества отходов до +25°C сопровождается эмиссией диметилсульфида и диметилсульфоксида, уровни концентраций которых в воздухе затравочной камеры превышают нормативные величины для атмосферного воздуха, соответственно, в 128,7 и 119 раз (табл. 1).

При нагреве вещества отходов до температуры +33°C к прогнозным загрязнителям приземного слоя атмосферы над объектом моделирования относятся диметилсульфид, диметилсульфоксид и диоксид серы, концентрации которых в воздухе затравочной камеры регистрировались выше нормативных уровней, соответственно, в 170, 127 и 1,7 раза (табл. 2).

Второй этап алгоритма комплексного моделирования заключался в постановке экспериментальных исследований по изучению характера комбинированного действия выделяющихся смесей, разрыв между суммами концентраций которых составляет 1,2 раза ( $p < 0,05$ ). Обследование животных показало, что на 2-й день после ингаляционных затравок в 1-й и 2-й опытных группах наблюдается достоверное, по отношению к значению в контрольной группе, ослабление (соответственно в 2,1 и 3,1 раза,  $p < 0,001$ ) горизонтальной двигательной активности (ГДА) (табл. 3).

Одновременно достоверно снижаются (соответственно в 4,6 и 12,3 раза,  $p < 0,001$ ) величины вертикальной двигательной активности (ВДА). Во 2-й срок обследования величины ГДА и ВДА в опытных группах приближаются к значениям в контроле (табл. 4).

Дополнительным следствием воздействия трехкомпонентной смеси является стойкое повышение груминга реакции, величина которой на 4-й день по-

сле затравок во 2-й опытной группе определялась достоверно выше уровня контроля (в 3,1 раза,  $p < 0,05$ ) – табл. 4. В 1-й опытной группе, подвергшейся менее выраженному ингаляционному воздействию, изменений груминга реакции не происходило.

На 2-й день после ингаляционных затравок у животных 1-й и 2-й опытных групп обнаружено достоверное увеличение содержания в сыворотке крови АСТ (соответственно, в 1,2 раза,  $p < 0,01$  и в 1,3 раза,  $p < 0,001$ ) и мочевины (соответственно, в 1,3 раза и 1,4 раза,  $p < 0,05$ ) (табл. 5).

Кроме того, у животных 2-й опытной группы наблюдалось снижение количества лейкоцитов в крови, достоверное по отношению к уровню контроля (в 1,4 раза,  $p < 0,05$ ). Экспозиции двухкомпонентной смеси значимых сдвигов в содержании лейкоцитов в крови крыс 1-й опытной группы не вызывала.

Обследование 1-й опытной группы на 4-й день после затравок выявило тенденцию к нормализации содержания в крови мочевины (табл. 6).

**Таблица 1** – Концентрации летучих соединений серы в воздухе затравочной камеры при температуре нагрева вещества отходов до +25°C

Наименование вещества	Химическая формула	ПДК <sub>мр</sub> или ОБУВ, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация в камере, мг/м <sup>3</sup>	Кратность превышения ПДК
Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	0,03	0,002 ± 0,0006	0
Диметилсульфид	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	0,08	10,3 ± 2,3	128,7 раза
Диметилсульфоксид	(SH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO	0,1	11,9 ± 2,4	119,0 раза
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0,5	0,0 ± 0,0	0
Сероводород	H <sub>2</sub> S	0,008	0,001 ± 0,0003	0

**Таблица 2** – Концентрации летучих соединений серы в воздухе затравочной камеры при температуре нагрева вещества отходов до +33°C

Наименование вещества	Химическая формула	ПДК <sub>мр</sub> или ОБУВ, мг/м <sup>3</sup>	Концентрация в камере, мг/м <sup>3</sup>	Кратность превышения ПДК
Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	0,03	0,002 ± 0,0007	0
Диметилсульфид	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	0,08	13,6 ± 2,2	170,0 раз
Диметилсульфоксид	(SH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> SO	0,1	12,7 ± 3,1	127,0 раз
Диоксид серы	SO <sub>2</sub>	0,5	0,852 ± 0,06	1,7 раз
Сероводород	H <sub>2</sub> S	0,008	0,002 ± 0,0001	0

**Таблица 3** – Влияние модельных смесей соединений серы на эмоционально-поведенческие реакции подопытных животных на 2-й день эксперимента

Контрольные точки исследования в период экспозиции	Величины эмоционально-поведенческих реакций в контрольных точках исследования (M ± m), у.е.		
	ГДА	ВДА	груминг
Контроль	37,9 ± 2,4	7,4 ± 1,1	4,6 ± 1,7
1 группа	18,0 ± 4,6***	1,6 ± 0,4***	5,2 ± 3,0
2 группа	12,0 ± 2,5***	0,6 ± 0,2***	10,7 ± 3,1

*Примечание* (здесь и в табл. 4). \* – отличия от данных контрольной группы достоверны,  $p < 0,001$ . ГДА – горизонтальная двигательная активность, ВДА – вертикальная двигательная активность, груминг – груминг реакция.

**Таблица 4** – Влияние модельных смесей соединений серы на эмоционально-поведенческие реакции подопытных животных на 4-й день эксперимента

Контрольные точки исследования в период экспозиции	Величины эмоционально-поведенческих реакций в контрольных точках исследования (M ± m), у.е.		
	ГДА	ВДА	груминг
Контроль	25,4 ± 1,3	1,9 ± 0,7	2,6 ± 1,2
1 группа	22,2 ± 2,2	3,0 ± 0,4	2,5 ± 0,6
2 группа	18,5 ± 3,7	2,3 ± 0,5	8,0 ± 2,1*

**Таблица 5** – Влияние модельных смесей соединений серы на биохимические показатели крови ( $M \pm m$ ) подопытных животных на 2-й день эксперимента

Величины биохимических показателей	Группы животных		
	контроль	1 группа	2 группа
АЛТ, Е/л	$67,6 \pm 4,5$	$65,8 \pm 3,4$	$72,6 \pm 2,5$
АСТ, Е/л	$81,2 \pm 13,2$	$96,5 \pm 2,0^{**}$	$103,0 \pm 3,9^{***}$
КР, мкмоль/л	$16,9 \pm 2,4$	$14,3 \pm 1,4$	$15,6 \pm 0,6$
МН, ммоль/л	$5,9 \pm 0,3$	$7,7 \pm 0,6^*$	$8,2 \pm 0,9^*$

*Примечание* (здесь и в табл. 6): АЛТ – активность в крови аланинаминотрансферазы, АСТ – активность в крови аспаратаминотрансферазы, МН – концентрация мочевины в крови, КР – концентрация креатинина в крови; \* – отличия от данных контрольной группы достоверны,  $p < 0,05$ ; \*\* – отличия от данных контрольной группы достоверны,  $p < 0,01$ ; \*\*\* – отличие от данных контрольной группы достоверно,  $p < 0,001$ .

**Таблица 6** – Влияние модельных смесей соединений серы на биохимические показатели крови ( $M \pm m$ ) подопытных животных на 4-й день эксперимента

Величины биохимических показателей	Группы животных		
	контроль	1 группа	2 группа
АЛТ, Е/л	$67,6 \pm 4,9$	$78,2 \pm 2,3$	$77,6 \pm 4,1$
АСТ, Е/л	$81,2 \pm 4,3$	$99,8 \pm 4,1^{**}$	$98,6 \pm 5,2^*$
КР, мкмоль/л	$16,9 \pm 2,4$	$13,7 \pm 2,3$	$14,7 \pm 0,5$
МН, ммоль/л	$5,9 \pm 0,3$	$6,8 \pm 0,7$	$8,3 \pm 0,4^{***}$

Однако в 1-й и 2-й опытных группах сохранялась повышенная по отношению к уровню контроля активность в сыворотке крови АСТ (соответственно, в 1,2 раза,  $p < 0,01$  и в 1,2 раза,  $p < 0,05$ ). Количество лейкоцитов в крови животных 2-й опытной группы на 2-й срок обследования нормализовалось, содержание мочевины по-прежнему достоверно (в 1,4 раза,  $p < 0,001$ ) превышало уровень контроля (табл. 6).

Результаты изучения характера влияния трехкомпонентной смеси на показатели красной крови крыс 2-й опытной группы на 2-й день после затравки обнаружили достоверное, по отношению к уровню контроля, повышение содержание гемоглобина (в 1,1 раза,  $p < 0,05$ ) и тенденцию к повышению содержания эритроцитов и величины гематокрита. В то же время, в 1-й опытной группе происходило достоверное, по отношению к значениям во 2-й опытной группе, снижение величин гемоглобина и гематокрита (соответственно, в 1,1 раза,  $p < 0,05$  и 1,2 раза,  $p < 0,01$ ). На 4-й день после ингаляционного воздействия статистически значимых различий в уровнях гемоглобина и гематокрита в опытных группах не наблюдалось. Проведенные по завершении периода наблюдения расчеты величин весовых коэффициентов внутренних органов подопытных крыс показали, что в 1-й и 2-й опытных группах относительная масса печени достоверно превышает значение в контрольной группе (соответственно, в 1,1,  $p < 0,01$  и 1,2 раза,  $p < 0,05$ ). Одновременно у крыс 2-й опытной группы регистрируется достоверное увеличение относительной массы легких (в 1,1 раза,  $p < 0,05$ ).

#### Обсуждение

Задачей первого этапа алгоритма комплексного моделирования являлось получение вероятностных характеристик эмиссии летучих соединений серы на натурной модели отвала сульфидсодержащих отходов. По результатам моделирования, в летний период, в условиях нагрева под действием солнечной радиации веществ сульфидсодержащих отходов до температур  $+25...+33^{\circ}\text{C}$ , прогнозируемая кратность

превышения величин гигиенических нормативов концентрациями диметилсульфида, диметилсульфоксида и диоксида серы в приземном слое атмосферы над отвалом достигает 129–170, 119–127 и 0–1,7 раза. На втором этапе алгоритма комплексного моделирования воздух, содержащий гигиенически значимые количества соединений серы, направляется по трубке в расположенную выше вторую затравочную камеру. Основной задачей 4-х часовых ингаляционных затравок подопытных животных, которые осуществляются после достижения стабильности концентраций, является изучение характера комбинированного действия выделяющихся смесей. При этом обследование подопытных животных проводили в течение 4-х дней с момента завершения затравок, в период максимального напряжения ответных реакций организма [17]. Оценка вредных эффектов воздействия осуществляется по достоверным изменениям в величинах исследуемых показателей по сравнению с контрольной группой. Методы оценки вероятностных эффектов воздействия модельных смесей выбирали, исходя из особенностей токсикодинамики их компонентов. По литературным данным, местное действие летучих соединений серы заключается в раздражении дыхательных путей, резорбтивное действие – в нарушениях белкового и углеводного обменов, угнетении окислительных процессов в головном мозге и внутренних органах [18; 19; 20, с. 99]. При высоких уровнях острого ингаляционного воздействия диагностируются поражения органов дыхания, центральной нервной системы и печени. В условиях совместного присутствия в воздухе нескольких соединений серы, описаны различные типы комбинированного действия (суммация, потенцирование, антагонизм, независимое действие), которые объясняются физическими, химическими и физиологическими взаимодействиями компонентов смесей [21, с. 72; 22]. В этой связи изучение в острых опытах на крысах линии Вистар характера комбинированного действия вредных эмиссий является важной предпосылкой прогнозирования опасности для здоровья насе-

ления, проживающего в атмосферических ореолах загрязнения.

В качестве рабочей гипотезы принято, что летучие соединения серы, к одинаковым биологическим свойствам которых относится нейротоксический, раздражающий и гепатотоксический эффекты, при совместном присутствии в воздухе обладают частичной суммацией действия. Исходя из рабочей гипотезы, сумма концентраций в воздухе при расчете по формуле не должна превышать 1,6 [23]:

$$C1/ПДК1 + C2/ПДК2 + \dots + Cn/ПДКn \leq 1,6,$$

где:  $C1, C2, \dots, Cn$  – фактические концентрации отдельных компонентов модельной смеси в воздухе;  $ПДК1, ПДК2, \dots, ПДКn$  – нормативные величины в атмосферном воздухе тех же компонентов смеси.

Выполненные расчеты показали, что сумма концентраций паров диметилсульфида и диметилсульфоксида в двухкомпонентной смеси, выделяющейся в воздух затравочной камеры при нагреве образца сульфидсодержащих отходов до +25°C, составляет 247,7 ед. При нагреве образца сульфидсодержащих отходов до температуры +33°C, наблюдается эмиссия трехкомпонентной парогазовой смеси, содержащей гигиенически значимые уровни диметилсульфида, диметилсульфоксида и диоксида серы, сумма концентраций которых в воздухе достигает 298,7 ед.

По данным научной литературы, к проявлениям начальных, адаптивных сдвигов в жизнедеятельности организма, возникающих в ответ на действие химического фактора, относятся изменения двигательной активности [22]. Выявленная в 1-й срок обследования в опытных группах тенденция к снижению величин ГДА и ВДА, обратно пропорциональная уровням ингаляционного воздействия, подтверждает частичную суммацию нейротоксического действия компонентов смеси. Существенное ослабление нейротоксического эффекта в опытных группах на 4-й день после ингаляционных затравок отражает нормализация величин ГДА и ВДА. Трехкомпонентная смесь диметилсульфида, диметилсульфоксида и диоксида серы вызывает напряжение механизмов срочной защиты организма, что проявляется стойким повышением у животных груминга реакции [22; 24, с. 555]. Обнаружение эффекта комбинированного действия выше аддитивного, с учетом отсутствия отклонений в уровнях груминга после воздействия двухкомпонентной смеси диметилсульфида и диметилсульфоксида, ассоциируется с токсическими свойствами диоксида серы. Вероятность развития эффекта потенцирования раздражающего действия смеси, обусловленного присутствием в ее составе диоксида серы, подтверждает достоверное снижение числа лейкоцитов в крови подопытных животных на 2-й день после экспозиции трехкомпонентной смеси. Воспалительный ответ, развивающийся в организме крыс, подвергнутых экспозиции смеси диметилсульфида, диметилсульфоксида и диоксида серы, доказывает увеличение относительной массы легких, достоверное по отношению к величине контроля. Отсутствие значимых изменений в содержании лейкоцитов в крови и величине относительной массы легких в группе подопытных животных, экспонируемых двухкомпонентной смесью диметилсульфида и диметилсульфоксида, свидетельствует об отсутствии

выраженного повреждения ткани легких и воспалительного ответа [25, с. 14]. Нарастание концентраций АСТ и мочевины в крови животных 1-й и 2-й опытных групп (соответственно в 1,2–1,3 и 1,3–1,4 раза), прямо пропорциональное уровням экспозиции, подтверждают гипотезу о частичной суммации действия компонентов на процессы белкового обмена в печени [17]. Об усилении процессов катаболизма при повышении уровня экспозиции свидетельствует темп увеличения соотношения АСТ/АЛТ в 1-й и 2-й опытных группах [25, с. 14; 26, с. 78]. В 1-й группе животных, подвергнутых ингаляционному воздействию двухкомпонентной смеси, нормализация содержания в крови мочевины происходит на 4-й день. Вместе с тем, сохранение повышенной активности в сыворотке крови АСТ служит диагностическим признаком повреждения органоидных мембран гепатоцитов [27]. Развитие гепатотоксического эффекта в опытных группах также подтверждает увеличение относительной массы печени, достоверное по отношению к величине контроля. Повышенный уровень в крови животных мочевины на 4-й день после экспозиции трехкомпонентной смеси отражает преобладание катаболических процессов над анаболическими [17]. В совокупности с повышенной активностью в сыворотке крови АСТ, это предполагает вероятность накопления повреждающего эффекта [27; 28; 29, с. 48]. Нормализация количества лейкоцитов в крови во 2-й срок обследования подтверждает динамику воспалительной реакции. Неспецифическая реакция организма животных на воздействие трехкомпонентной смеси в 1-й срок обследования проявляется дегидратацией, к признакам которой относятся увеличение содержания в крови гемоглобина, эритроцитов и величины гематокрита. Экспозиция двухкомпонентной смеси сопровождается противоположной тенденцией – к гемодилюции, обеспечивающей разведение токсикантов в крови. Отсутствие признаков сгущения крови и гемодилюции в опытных группах во 2-й срок обследования указывает на ослабление напряжения неспецифического ответа организма на острое ингаляционное воздействие.

#### Заключение

Таким образом, получены научно обоснованные представления об опасности накопленных в горнодобывающих регионах отходов добычи и переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов для среды обитания и здоровья населения. Применительно к постиндустриальному периоду развития горнорудных ТПК сформулирован методологический подход к комплексному моделированию последствий воздействия объектов размещения отходов переработки сульфидных руд на среду обитания и здоровье населения, позволяющий расширить возможности оценки распространения экологических обусловленной патологии в горнодобывающих регионах и осуществления экологической экспертизы эффективности светозащитных мероприятий, с учетом разрешенного вида землепользования (Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ в ред. от 29.12.2022, статьи: 4, 35, 48.1, 49). Научно обоснован и апробирован алгоритм комплексного моделирования, предусматривающий получение вероятностных суждений о параметрах атмосферной эмиссии летучих соединений серы из объектов размещения отходов переработки сульфидных руд цветных и благо-

родных металлов, типе комбинированного действия выделяющихся смесей различного физико-химического состава и причинно-следственных связях, складывающихся между уровнями загрязнения воздушной среды и показателями жизнедеятельности организма. На основе натурной модели Урского отвала барит-пиритовой сыпучки апробирован метод прогнозирования природно-техногенной эмиссии смесей соединений серы выведенными из эксплуатации объектами размещения отходов переработки сульфидных руд в летний период. Оценена вероятность изменения параметров атмосферной эмиссии диметилсульфида, диметилсульфоксида, диоксида серы, сероуглерода и сероводорода под влиянием температурного фактора, определен перечень прогнозных загрязнителей приземного слоя атмосферы над неорганизованным источником в условиях различной интенсивности солнечной радиации. По результатам эксперимента на крысах-самцах линии Вистар, характер комбинированного действия смесей соединений серы, выделяющихся в атмосферный воздух из объекта размещения сульфидсодержащих отходов, изменяется в зависимости от состава парогазовых смесей и концентраций их компонентов. Экспериментально подтверждено, что высокие риски токсического поражения органов дыхания в экспонируемых группах населения горнодобывающих регионов в условиях воздействия трехкомпонентной парогазовой смеси диметилсульфида, диметилсульфоксида и диоксида серы, определяются высокой индивидуальной токсичностью и способностью диоксида серы к потенцированию раздражающего эффекта жидких компонентов. Экспозиция смеси диметилсульфоксида и диметилсульфида сопровождается частичной суммацией нейротоксического и гепатотоксического действия компонентов, определяющей риск поражения центральной нервной системы и печени. Одновременно к маркерам ответа организма на воздействие выделенных двух- и трехкомпонентных смесей соединений серы относятся нарушения белкового и водно-электролитного обменов. Полученные по результатам исследования научные сведения предназначены для информационного обеспечения системы медико-профилактических технологий и расширения возможностей экологической экспертизы эффективности светозащитных мероприятий горнодобывающих регионах.

### Список литературы:

1. Рафиков С.Ш., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К., Рахматуллин Н.Р., Бактыбаева З.Б., Рахматуллина Л.Р. Влияние предприятий горнорудной промышленности на состояние окружающей среды и здоровье населения (обзор литературы) // Медицина труда и экология человека. 2021. № 3. С. 62–75. DOI: 10.24412/2411-3794-2021-10305.
2. Огулов А.С. Гигиеническая оценка состояния окружающей среды и здоровья детского населения в районах размещения предприятий по добыче и обогащению полиметаллических руд: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.00.07. М., 1991. 25 с.
3. Бортникова С.Б., Девятова А.Ю., Шевко Е.П., Гаськова О.Л., Еделев А.В., Огулов А.С. Перенос элементов в газоаэрозольной фазе из отвалов Комсомольского золотоизвлекательного завода (Кемеровская обл.) // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24, № 1. С. 11–22. DOI: 10.15372/khur20160102.
4. Амосов П.В., Бакланов А.А., Маслобоев В.А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении

хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования) // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 6. С. 87–94.

5. Зенкевич М.Ю., Прокофьев В.Е., Янович К.В. Управляемая природно-техническая система как основа альтернативной стратегии охраны окружающей среды // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2021. № 2 (14). С. 131–139.

6. Bortnikova S., Yurkevich N., Devyatova A., Saeva O., Shuvaeva O., Makas A., Troshkov M., Abrosimova N., Kirillov M., Korneeva T., Kremleva T., Fefilov N., Shigabaeva G. Mechanisms of low-temperature vapor-gas streams formation from sulfide mine waste // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 647. P. 411–419. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.024.

7. 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. Vol. 9 (6). DOI: 10.3390/min9060344.

8. Fortin D., Ferris F.G., Beveridge T.J. Surface-mediated mineral development by bacteria // Geomicrobiology: Interactions between Microbes and Minerals / ed. by J.F. Banfield, K.H. Nealson. Berlin; Boston: De Gruyter, 1997. P. 161–180. DOI: 10.1515/9781501509247-007.

9. Плюснин А.М., Хажеева З.И., Санжанова С.С., Перязева Е.Г., Ангахаева Н.А. Сульфатные минеральные озера Западного Забайкалья: условия образования, химический состав воды и донных отложений // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 8. С. 1055–1073. DOI: 10.15372/gig2019154.

10. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1951. 332 с.

11. Сидоренко Г.И., Захарченко М.П., Маймулов В.Г., Кутепов Е.Н. Проблемы гигиенической диагностики на современном этапе. М., 1995. 195 с.

12. Даукаев Р.А., Ларионова Т.К., Аллаярова Г.Р., Адиева Г.Ф., Афонькина С.Р., Зеленковская Е.Е., Фазлыева А.С. Биологическая индикация внешнесредовой экспозиции тяжелых металлов // Медицина труда и экология человека. 2020. № 4 (24). С. 118–127. DOI: 10.24412/2411-3794-2020-10417.

13. Хусаинова А.Ш., Гаськова О.Л., Калинин Ю.А., Бортникова С.Б. Физико-химическая модель преобразования золота в продуктах переработки руд колчеданно-полиметаллических месторождений (Салаирский кряж, Россия) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 9. С. 1181–1193. DOI: 10.15372/gig2020120.

14. Саноцкий И.В. Методы определения опасности химических веществ (токсикометрия). М.: Медицина, 1970. 342 с.

15. Сперанский С.В. Определение суммационно-порогового показателя (СПП) при различных формах токсикологического эксперимента: методические рекомендации. Новосибирск, 1975. 27 с.

16. Новикова И.А. Клиническая лабораторная диагностика. М., 2022. 207 с.

17. Копанев В.А., Гинзбург Э.Х., Семенова В.Н. Метод вероятностной оценки токсического эффекта. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 122 с.

18. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд. 7-е, пер. и доп. Т. III. Неорганические и элементоорганические соединения / под ред. Н.В. Лазарева, И.Д. Гадаскиной. Л.: Химия, 1977. 608 с.

19. Манаган С. Химия окружающей среды. СПб.: Профессия, 2018. 1024 с.

20. Долوماتов С.И., Новиков Н.Ю., Клименко П.М., Касич И.Н., Мышко И.В. Влияние продолжительного введения 6-пропил-2-тиоурацила на динамику показателей функционального состояния почек у крыс // Нефрология. 2016. Т. 20, № 4. С. 98–102.

21. Борзенко С.В., Фёдоров И.А. Закономерности поведения некоторых микроэлементов в минеральных озерах Восточного Забайкалья // Успехи современного естествознания. 2019. № 1. С. 69–74.

22. Бальмина Е.С. Применение метода «открытого поля» в токсикологическом эксперименте // Гигиена труда и профессиональные заболевания. 1978. № 11. С. 56.

23. Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений»: постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22.12.2017 № 165 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. <https://docs.cntd.ru/document/556185926>.

24. Черемисина В.Ф. Изменения функциональной активности тромбоцитов у крыс при экспериментальном нарушении состояния соединительной ткани пародонта // Запорожский медицинский журнал. 2018. Т. 20, № 4. С. 553–556. DOI: 10.14739/2310-1210.2018.4.135325.

25. Абумуслимов С.С., Ташаева К.Р., Темирсултанова М.Х., Дешнеева З.Р. Показатели активности фермен-

тов АЛТ и АСТ с возрастом по данным автоматизированного анализа // Современные проблемы биологии и химии: мат-лы всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых (Грозный, 27 мая 2021 г.). Грозный: Изд-во ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет». 2021. С. 10–16.

26. Огудов А.С., Ивлева Г.П., Коротаева Г.А., Резанова Е.В., Зубцовская Н.А. Диагностические профили вредных эффектов длительного ингаляционного воздействия тетрабромэтана // Сибирский научный медицинский журнал. 2019. Т. 39, № 2. С. 75–80. DOI: 10.15372/ssmj20190210.

27. Камышников В.С. Клинико-биохимическая лабораторная диагностика: справочник. 2-е изд. Т. 1. Минск: Интерпрессервис, 2003. 495 с.

28. Николаев Ю.А., Севостьянова Е.В., Поляков В.Я., Митрофанов И.М., Ус А.А. Особенности некоторых клинико-лабораторных показателей у больных неалкогольной жировой болезнью печени, ассоциированной с артериальной гипертензией, избыточной массой тела и ожирением // Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний. 2021. Т. 10, № S2. С. 153.

29. Кролевец Т.С., Ливзан М.А. Клинико-лабораторные маркеры прогнозирования фиброза печени у лиц с неалкогольной жировой болезнью печени // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2018. № 7 (155). С. 43–51.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
<b>Новикова Ирина Игоревна</b> , доктор медицинских наук, профессор, директор; Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены (г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: <a href="mailto:novikova_ii@niig.su">novikova_ii@niig.su</a> .	<b>Novikova Irina Igorevna</b> , doctor of medical sciences, professor, director; Novosibirsk Research Institute of Hygiene (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: <a href="mailto:novikova_ii@niig.su">novikova_ii@niig.su</a> .
<b>Огудов Александр Степанович</b> , кандидат медицинских наук, заведующий отделом токсикологии с санитарно-химической лабораторией; Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены (г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: <a href="mailto:ogudov.tox@yandex.ru">ogudov.tox@yandex.ru</a> .	<b>Ogudov Alexander Stepanovich</b> , candidate of medical sciences, head of Toxicological Department with Sanitary-Chemical Laboratory; Novosibirsk Research Institute of Hygiene (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: <a href="mailto:ogudov.tox@yandex.ru">ogudov.tox@yandex.ru</a> .
<b>Семёнова Елена Викторовна</b> , главный врач; Центр гигиены и эпидемиологии в Новосибирской области (г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: <a href="mailto:elena26120@mail.ru">elena26120@mail.ru</a> .	<b>Semenova Elena Viktorovna</b> , chief physician; Center of Hygiene and Epidemiology in the Novosibirsk Region (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: <a href="mailto:elena26120@mail.ru">elena26120@mail.ru</a> .
<b>Чуенко Наталья Фёдоровна</b> , научный сотрудник отдела токсикологии с санитарно-химической лабораторией; Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены (г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: <a href="mailto:natali26.01.1983@yandex.ru">natali26.01.1983@yandex.ru</a> .	<b>Chuenko Natalya Fedorovna</b> , researcher of Toxicological Department with Sanitary-Chemical Laboratory; Novosibirsk Research Institute of Hygiene (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: <a href="mailto:natali26.01.1983@yandex.ru">natali26.01.1983@yandex.ru</a> .
<b>Бессонова Мария Викторовна</b> , инженер-химик отдела токсикологии с санитарно-химической лабораторией; Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены (г. Новосибирск, Российская Федерация). E-mail: <a href="mailto:bessonova_mv@niig.su">bessonova_mv@niig.su</a> .	<b>Bessonova Maria Viktorovna</b> , chemical engineer of Toxicological Department with Sanitary-Chemical Laboratory; Novosibirsk Research Institute of Hygiene (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: <a href="mailto:bessonova_mv@niig.su">bessonova_mv@niig.su</a> .

#### Для цитирования:

Новикова И.И., Огудов А.С., Семёнова Е.В., Чуенко Н.Ф., Бессонова М.В. Моделирование последствий воздействия объектов размещения отходов переработки сульфидных руд на окружающую среду и здоровье населения // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 3. С. 98–104. DOI: 10.55355/snv2023123113.