

УДК 614.71

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОГЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ К ПОСТИНДУСТРИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭКОНОМИКИ

Огудов А.С.¹, Девятова А.Ю.^{1,2}, Новикова И.И.¹, Ивлева Г.П.¹

¹ ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора, Новосибирск, Россия

² ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука» СО
РАН, Новосибирск, Россия

В постиндустриальный период актуальной гигиенической проблемой для горнопромышленных районов остается загрязнение атмосферного воздуха смесями соединений серы, выделяющимися из объектов размещения отходов переработки сульфидных руд.

Цель исследования. Разработка технологии системного моделирования аэрогенного химического фактора для информационного обеспечения стратегий управления техногенезом и рисками здоровью населения при переходе горнопромышленных районов к постиндустриальной модели экономики.

Материалы и методы. В качестве эмпирической базы моделирования использовали совокупность данных, полученных в результате газовой съемки сульфидсодержащего отвала и эпидемиологического анализа заболеваемости детского населения, проживающего в зоне воздействия источника. На этапе моделирования применяли методы математического моделирования зон загрязнения атмосферного воздуха, пространственного распределения патологий риска, натурного моделирования атмосферной миграции примесей и токсикологический эксперимент. Статистическую обработку материалов производили с помощью стандартных прикладных программ Statistica 10.0.

Результаты. По результатам системного моделирования, визуализировано пространственное распределение концентрации компонентов смеси ДМС, ДМСО и CS₂, индексов опасности развития неканцерогенных эффектов и патологий риска в пределах селитебной территории, идентифицированы зоны загрязнения воздушной среды сстораживающим и высоким уровнями риска, кластеры детей и подростков с патологиями риска, их связи и отношения с маршрутами и механизмом воздействия смеси соединений серы. Это позволяет обосновать опережающий подход в принятии действенных управленческих решений при

диагностике аэрогенного химического фактора и реализации риск-ориентированного санитарно-гигиенического мониторинга.

Ограничения исследования. Основными ограничениями исследования являются возникающие при вероятностной оценке аэрогенного химического фактора неопределенности, которые могут быть вызваны погрешностью методик измерения, методов системного прогнозирования и влиянием комплекса неконтролируемых в исследовании факторов.

Заключение. Сформированный по результатам системного моделирования аэрогенного химического фактора информационный пакет предназначен для выработки прогнозной гипотезы релевантной гигиенической ситуации, проектирования стратегий управления техногенезом и рисками для здоровья детского населения при реализации постиндустриальной модели экономики горнопромышленного района.

Ключевые слова: сульфидсодержащий отвал; атмосферная миграция смесей соединений серы; диметилсульфид (ДМС); диметилсульфоксид (ДМСО); сероуглерод (CS_2); математическое моделирование; патологии риска и группы риска; крысы-самцы линии Wistar; порог подострого действия

Соблюдение этических стандартов. Эксперимент на животных проведен согласно требованиям Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS №123), директивы Европейского парламента и Совета ЕС 2010/63/ЕС от 22.09.2010 о защите животных, использующихся для научных целей, после одобрения локальным этическим комитетом Новосибирского НИИ гигиены Роспотребнадзора (протокол № 3 от 01.03.2024).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование инструментов искусственного интеллекта. Авторы заявляют, что при подготовке настоящей рукописи системы искусственного интеллекта не применялись.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Огудов А.С., Девятова А.Ю., Новикова И.И., Ивлева Г.П. Системное моделирование аэрогенного химического фактора при переходе

горнопромышленных районов к постиндустриальной модели экономики. Медицина труда и экология человека. 2026;2:212-233.

doi:<http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10209>

Для корреспонденции: Александр Степанович Огудов, e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

SYSTEM MODELING OF THE AEROGENIC CHEMICAL FACTOR DURING THE TRANSITION OF MINING REGIONS TO A POST-INDUSTRIAL ECONOMIC MODEL

Ogudov A.S.¹, Devyatova A. Yu.^{1,2}, Novikova I.I.¹, Ivleva G.P.¹

¹Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Novosibirsk, Russia

²A. A. Trofimuk Institute of Oil and Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

In the post-industrial period, air pollution with sulfur compound mixtures emitted from sulfide ore processing waste disposal sites remains a pressing hygiene issue for mining regions.

The purpose of the study to develop a technology for systemic modeling of airborne chemical factors to inform strategies for managing technogenesis and public health risks during the transition of mining regions to a post-industrial economic model.

Materials and methods. The empirical basis for the modeling was a combination of data obtained from gas surveys of a sulfide-containing waste dump and an epidemiological analysis of childhood morbidity in the affected area. The modeling stage employed methods of mathematical modeling of air pollution zones, spatial distribution of risk pathologies, natural modeling of atmospheric migration of impurities, and a toxicological experiment. Statistical processing of the materials was performed using standard Statistica 10.0 software.

Results. Based on the results of system modeling, the spatial distribution of the concentration of the target mixture components, the danger of developing non-carcinogenic effects and risk pathologies within the residential area were visualized. Air pollution zones with alarming and high risk levels, clusters of children and adolescents with risk pathologies and their relationships with the routes and mechanism of exposure to a mixture of sulfur compounds were identified. This allows us to justify a proactive approach in making effective management decisions when diagnosing the aerogenic chemical factor and implementing risk-oriented sanitary and hygienic monitoring.

Study limitations. The main limitations of the study are the uncertainties arising during the probabilistic assessment of the airborne chemical factor, which can be caused by the error of measurement methods, system forecasting methods, and the influence of a complex of uncontrolled factors in the study.

Conclusions. The information package generated based on the results of system modeling of the airborne chemical factor is intended for developing a predictive hypothesis for the relevant hygienic situation, designing strategies for managing technogenesis and risks to the health of the child population during the implementation of a post-industrial economic model of a mining region.

Keywords: sulfide-containing waste; atmospheric migration of sulfur compound mixtures; dimethyl sulfide (DMS); dimethyl sulfoxide (DMSO); carbon disulfide (CS₂); mathematical modeling; risk pathologies and risk groups; male Wistar rats; subacute action threshold

Compliance with ethical standards: The animal experiment was conducted in accordance with the requirements of the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and Other Scientific Purposes (ETS No. 123), Directive 2010/63/EC of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the Protection of Animals Used for Scientific Purposes, and after approval by the local ethics committee of the Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor (Protocol No. 3 dated 01 March 2024).

Use of AI tools: The authors declare that no AI systems were used in the preparation of this manuscript.

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

Funding. The study had no funding.

For citation: Ogudov A.S., Devyatova A.Yu., Novikova I.I., Ivleva G.P. System Modeling of the Aerogenic Chemical Factor in the Transition of Mining Regions to a Post-Industrial Economy. *Occupational health and human ecology*. 2026;2:212-233.

doi:<http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2026-10209>

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

Приостановка деятельности горных предприятий в контексте постиндустриальных трендов не приводит к прекращению выделения и концентрирования в приземном слое атмосферы загрязняющих веществ [1]. К отличительным признакам

постиндустриального техногенеза в зонах объектов размещения отходов переработки сульфидных руд, содержащих значительные количества сульфидов, относится образование соединений серы, поступающих в атмосферный воздух в составе сложных парогазовых смесей [2,3,4]. В проведенных ранее исследованиях показано, что качественный и количественный состав смесей, отходящих от таких объектов, варьирует в зависимости от структурных особенностей источника, рельефа местности, скорости и направления ветра, температуры воздуха [5]. Особую значимость приобретает атмосферная миграция ДМС, ДМСО и CS_2 , к одинаковым токсическим свойствам которых относятся нейротоксические эффекты [6,7,8,9]. Согласно литературным данным, взаимодействия компонентов сложных смесей при совместном присутствии в воздушной среде и аэрогенном воздействии обуславливают изменения их химического профиля и токсического действия на организм [10]. В этой связи определение комбинированного действия смесей ДМС, ДМСО и CS_2 является необходимым этапом процесса выбора поллютантов, подлежащих контролю, при переходе горнопромышленных районов к постиндустриальной модели экономики.

В настоящее время в субъектах Российской Федерации в качестве информационной основы стратегии применения медико-профилактических технологий выступают федеральный и региональные информационные фонды социально-гигиенического мониторинга [11,12]. Однако информация о приоритетных факторах загрязнения атмосферы, уровнях и характере экспозиции, вероятностных ответных популяционных реакциях в отношении малых городов и поселков горнопромышленных районов, селитебные зоны которых вовлекаются в структуру атмохимических аномалий, в большинстве случаев отсутствует.

Преимуществом разработанной технологии системного моделирования аэрогенного химического фактора, к объектам которого относятся источники выделения парогазовых смесей, зоны загрязнения атмосферного воздуха, индикаторная патология экспонируемых групп населения и возникающие между ними связи и отношения, является прогностическое исследование гигиенической ситуации, позволяющее обосновать опережающий подход в принятии действенных управленческих решений. На этапе создания эмпирической базы, программа исследования предполагает применение комплекса современных методов, обеспечивающих получение всесторонних сведений о континууме объектов моделирования.

Целью исследований являлась разработка технологии системного моделирования аэрогенного химического фактора для информационного обеспечения стратегий управления техногенезом и рисками здоровью населения при переходе горнопромышленных районов к постиндустриальной модели экономики.

Объекты, материалы и методы. Объектами исследования являлись Урской отвал, расположенный в п. Урск Кемеровской области, атмосферный воздух в районе размещения отвала, смеси ДМС, ДМСО, CS_2 , патологии риска, крысы-самцы линии Wistar. В комплекс методов предварительного этапа исследования входили атмохимическая съемка района размещения отвала и эпидемиологический анализ заболеваемости детей, с момента рождения проживающих на территории риска. Регистрируемой реакцией детского населения на воздействие аэрогенного химического фактора служила исчерпанная заболеваемость, источниками информации о которой являлись данные обращаемости за медицинской помощью и медицинских осмотров за пятилетний период (2018-2022 гг.) с общим охватом 267 детей от 0 до 14 лет. Для оценки характера и выраженности популяционной реакции на территориях с различной степенью техногенной опасности проведен сплошной анализ учтенной заболеваемости 2 однородных по возрасту и полу групп детей, проживающих в радиусе до 1000 м (132 человека) и более 1000 м (135 человек) от границ отвала. На этапе моделирования применяли методы математического моделирования пространственного распределения ДМС, ДМСО и CS_2 , опасности развития неканцерогенных эффектов и патологий риска, натурального моделирования атмосферной миграции смесей ДМС, ДМСО, CS_2 и токсикологический эксперимент. Концентрации ДМС, ДМСО и CS_2 в воздухе затравочных камер и приземном слое атмосферы определяли с помощью газоанализатора ГАНК-4 (НПО «ГАНК», Москва) по Методике измерений массовой концентрации серо- и азотсодержащих органических соединений в атмосферном воздухе газоанализатором ГАНК-4, №1-22-2013. В качестве экспериментальных моделей в подостром эксперименте использовали крыс-самцов линии Wistar массой 250-290 г, распределенных методом случайных чисел на 4 группы (1-3-я опытные и контрольная) по 10 особей в каждой, однородных по возрасту и весу. Животных опытных групп на протяжении 45 дней подвергали ежедневным 4-часовым ингаляционным затравкам. Для создания стабильных концентраций компонентов смесей в стандартных 200-литровых затравочных камерах осуществляли нагревание образцов отходов или проветривание камер. Скорость воздушного потока варьировали в зависимости от моделируемого уровня воздействия, колебания которого в течение 4-часовой экспозиции не превышали

10%¹⁷. Всего испытано три достоверно различающихся между собой уровня концентраций смесей ДМС, ДМСО и CS₂, интервалы между которыми приближались к геометрической прогрессии (табл. 1). Концентрации ДМС, ДМСО и CS₂ в камере параллельного контроля (соответственно 0,034±0,009 мг/м³, 0,028±0,005 мг/м³ и 0,002±0,0001 мг/м³) определялись в пределах гигиенических нормативов.

Таблица 1. Концентрации компонентов смесей ДМС, ДМСО и CS₂ в затравочных камерах (в мг/м³) при ингаляционных затравках животных 1-й, 2-й и 3-й опытных групп (M±m)

Table 1. Concentrations of DMS, DMSO and CS₂ mixtures in the seeding chambers (in mg/m³) during inhalation seeding of animals in the 1st, 2nd and 3rd experimental groups (M±m)

Компоненты смесей	Концентрации в воздухе затравочных камер, в мг/м ³ / Concentrations in the air of seed chambers, in mg/m ³		
	1-я группа / 1-st group	2-я группа / 2-nd group	3 группа / 3-d group
ДМС / DMS	0,379±0,04	3,108±0,24	21,415±0,75
ДМСО / DMSO	0,359±0,05	2,614±0,15	13,718±0,77
CS ₂	0,058±0,01	0,317±0,04	2,016±0,14

За величину порога подострого действия принимали минимальную суммарную концентрацию компонентов смеси, вызывающую статистически значимые изменения функционального состояния центральной нервной системы (ЦНС) по наиболее информативным показателям в сравнении с контролем [13]. Обследования подопытных животных проводили на 14, 28 и 45-й дни эксперимента с помощью общепринятых и унифицированных методов¹⁸. Для

¹⁷ Временные методические указания по обоснованию предельной допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. № 4681-88 от 15.07.1988

¹⁸ Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования, утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР 14 апреля 1980 г. № 2166-80.

оценки возбудимости ЦНС с помощью стимулятора импульсного электронного ИСЭ-01 (ММП, СССР) определяли изменения суммационно-порогового показателя (СПП) [14]. Эмоционально-поведенческие реакции – горизонтальную (ГДА) и вертикальную (ВДА) двигательные активности, эмоциональную активность (ЭА), реакции груминга оценивали на стандартной установке «Открытое поле» («НПК Открытая наука», Россия) [15]. Перед началом ингаляционных затравок определяли фоновые величины выбранных показателей для равномерного распределения крыс по группам. Эксперимент проведен согласно требованиям Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (ETS №123), директивы Европейского парламента и Совета ЕС 2010/63/ЕС от 22.09.2010 о защите животных, использующихся для научных целей, после одобрения локальным этическим комитетом Новосибирского НИИ гигиены Роспотребнадзора (протокол № 3 от 01.03.2024).

Моделирование пространственного распределения соединений серы и патологий риска осуществляли с помощью математической модели, разработанной В.Ф. Рапутой и А.Ю. Девятовой [16]. В качестве исходных данных служили измеренные концентрации соединений серы в приземном слое атмосферы, роза ветров, характеристики источника, локализация мест проживания детей и их расстояние от источника. Статистический анализ осуществляли с использованием пакета программ Statistica 10.0. На первом этапе проводилось определение нормальности распределения с использованием критериев Колмогорова-Смирнова и Шапиро-Уилка. При нормальных распределениях межгрупповые различия оценивали с помощью t-критерия Стьюдента, если распределение достоверно отличалось от нормального - использовали U-критерий Манна-Уитни. Для сравнения рисков развития заболеваний в сравниваемых группах детей проводили расчеты относительных рисков (RR) с помощью четырехпольных таблиц. Уровень значимости для проверки нулевых гипотез принимали равным 0,05. Кроме расчета статистических критериев, проводили анализ индивидуальных значений эффектов воздействия смесей соединений серы у подопытных животных, выходящих за пределы доверительных границ контроля. За вероятностный порог вредного действия (E_{16}) смеси ДМС, ДМСО и SO₂ принимали ответ, когда у 16% животных в опытной группе величина показателя выходила за пределы доверительных границ контроля ($M \pm 3\sigma$).

Результаты. Модели пространственного распределения соединений серы в составе ненаправленных паро-газо-воздушных потоков построены на основе

данных атмосферической съемки Урского отвала и прилегающей к нему селитебной территории (рис. 1).

Из рисунка 1 слева следует, что прогнозируемые максимальные уровни загрязнения приземного слоя атмосферы CS_2 , превышающие ПДКсс ($0,005 \text{ мг/м}^3$) в 12-28 раз, визуализируются над источником и вблизи от его границ. В юго-восточной части селитебной территории прогнозируемая концентрация CS_2 достигает 10 величин гигиенического норматива, в северо-восточном направлении даже на границе населенного пункта кратность превышения данного норматива составляет 2.0 (рис. 1).

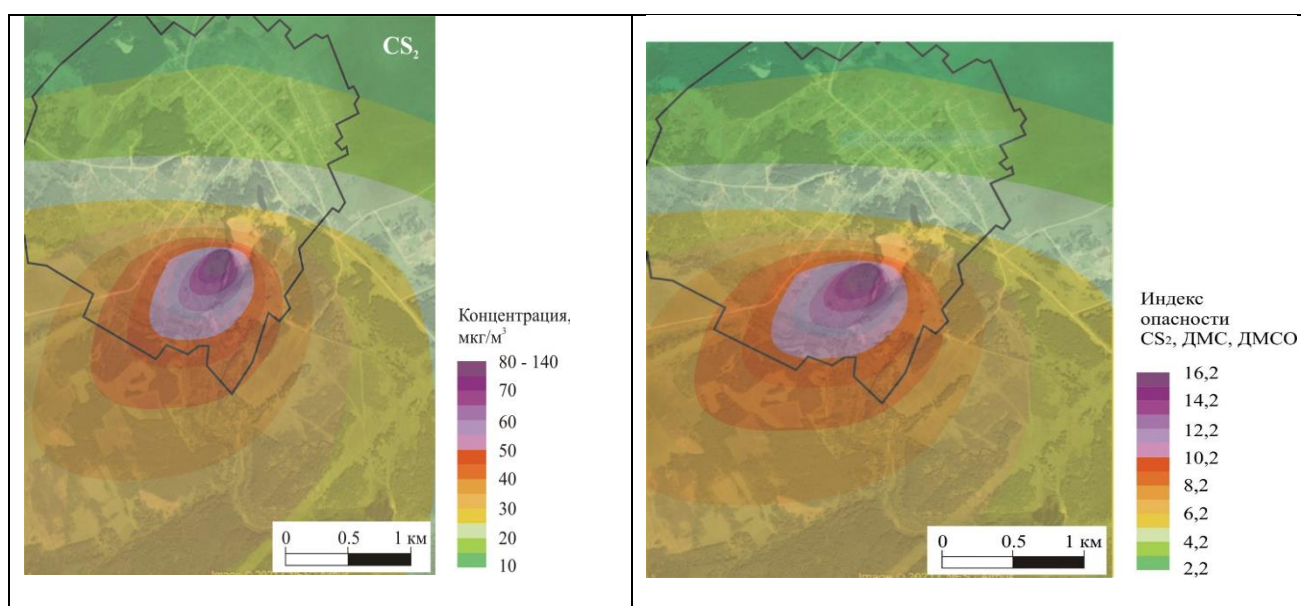


Рисунок 1. Модели пространственного распределения сероуглерода (слева) и опасности развития неканцерогенных эффектов в условиях длительного ингаляционного воздействия смеси ДМС, ДМСО и CS_2 на население (справа).

Черная черта – граница поселка

Figure 1. Models of spatial distribution of carbon disulfide (left) and the risk of developing non-carcinogenic effects under conditions of long-term inhalation exposure of the mixture of DMS, DMSO and CS_2 to the population (right). The black line is the boundary of the settlement

Прогнозируемые концентрации в атмосферном воздухе ДМС и ДМСО не превышали величин их гигиенических нормативов (соответственно $0,08$ и $0,1 \text{ мг/м}^3$). Значения коэффициентов опасности (HQ) составили $0,6$ и $0,75$, что при условии изолированного действия ДМС и ДМСО, соответствует допустимому

уровню риска¹⁹. В то же время значения HQ для прогнозируемых уровней загрязнения воздушной среды CS₂ указывали на риски в диапазоне от настораживающего до высокого уровней.

На рисунке 1 справа представлена модель пространственного распределения опасности развития вредных эффектов от воздействия смеси в пределах селитебной зоны, построенная на основе информации об индексах опасности (HI) при условии однонаправленного действия ее компонентов. Видно, что величины HI при комбинированном действии смеси ДМС, ДМСО и CS₂ в северной половине селитебной зоны составляют 2,2-4,2, что соответствует диапазонам допустимого и настораживающего уровней риска. В южной половине селитебной зоны величины HI достигают 6,2-8,2, что свидетельствует о высоком уровне риска развития неканцерогенных, прежде всего нейротоксических, эффектов.

Результаты моделирования патологических состояний, связанных с нарушением деятельности ЦНС и поведенческих функций при длительном ингаляционном воздействии смесей ДМС, ДМСО и CS₂ относительно постоянного состава на 14-й день ингаляционной затравки подопытных животных представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние смесей ДМС, ДМСО и CS₂ на возбудимость ЦНС и эмоционально-поведенческие реакции животных на 14-й день эксперимента

Table 2. Effect of DMS, DMSO and CS₂ mixtures on the excitability of the central nervous system and emotional-behavioral reactions of animals on the 14th day experiment

Наименование показателей / Naming of indicators	Величины показателей в опытных группах и контроле (M±m) / Values of indicators in experimental groups and controls (M±m)			
	1-я группа / 1-st group	2-я группа / 2-nd group	3-я группа / 3-d group	Контроль / Control
ГДА, у.е. / HDA, у.е.	31,9±1,2***	29,4±1,2***	25,6±1,3***	42,6±0,8
ВДА, у.е. / VDA, у.е.	6,1±0,4**	6,3±0,7*	4,9±0,5	4,4±0,3

¹⁹ Р 2.1.10.3968-23 «Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания» от 5 сентября 2023 г.

ЭА, у.е. / EA, u.u.	2,7±0,4	2,4±0,4	2,5±0,4	2,7±0,2
Грумминг, у.е. / Grooming, u.u.	2,9±1,1	3,0±1,3	4,3±1,9	2,0±0,9
СПП, вольт / STP, volts	8,0±0,2	9,6±0,4***	10,3±0,3***	7,8±0,1

Примечание 1: ГДА - горизонтальная двигательная активность (у.е.), ВДА - вертикальная двигательная активность (у.е.), ЭА - эмоциональная активность (у.е.), грумминг - реакции грумминга (у.е.), СПП - суммационно-пороговый показатель (вольт).

Примечание 2:

* - отличия от данных контрольной группы достоверны, $p < 0,05$;

** - отличия от данных контрольной группы достоверны, $p < 0,01$;

*** - отличия от данных контрольной группы достоверны, $p < 0,001$.

Note 1: HDA - horizontal motor activity (units), VDA - vertical motor activity (units), EA - emotional activity (units), Grooming - grooming reaction (units), STP - summation threshold parameter (volts).

Note 2: * - differences from the control group data are significant, $p < 0.05$;

** - differences from the control group data are significant, $p < 0.01$;

*** - differences from the control group data are significant, $p < 0.001$.

Видно, что во 2-й и 3-й группах отмечается достоверное увеличение значений СПП по отношению к уровню контроля (соответственно в 1,2 и 1,3 раза, $p < 0,001$), что подтверждает снижение возбудимости ЦНС. В 1-й группе изменений СПП, свидетельствующих в пользу влияния испытуемого уровня концентраций смеси на возбудимость ЦНС, не происходило. Одновременно у подопытных крыс наблюдалось дозозависимое ослабление ГДА (табл. 2).

При анализе влияния смесей ДМС, ДМСО и CS_2 на вертикальный компонент двигательной активности в 1-й и 2-й опытных группах выявлена противоположная тенденция - увеличение значений ВДА по отношению к уровню контроля (соответственно в 1,4, $p < 0,01$ и 1,4 раза, $p < 0,05$). В то же время в 3-й группе, подвергавшейся максимальной экспозиции компонентов смеси, достоверные различия с величиной ВДА в параллельном контроле отсутствовали. Статистически значимых различий между уровнями ЭА и реакции грумминга в опытных и контрольной группах на 14-й день затравок не выявлено (табл. 2).

По результатам анализа индивидуальных значений СПП, во 2-й и 3-й группах, животные которых испытывали воздействие смесей ДМС, ДМСО и CS_2 в суммарных концентрациях 6,039 и 37,149 мг/м³ соответственно, за верхний предел доверительных границ контроля ($M \pm 3\sigma$) выходили показатели соответственно 70% и 90% животных. В 1-й группе вероятность наступления вредного эффекта на ингаляционное воздействие смеси в суммарной концентрации 0,796 мг/м³ по

показателю СПП составила 20%, что близко к выбранному уровню порога вредного действия (E_{16}). Для более точной оценки вероятностного порога подострого действия целевой смеси построена прямая зависимости «концентрация-ответ» по показателю СПП, фактическая кривая зависимости которой поддавалась линеаризации. Это позволило определить вероятность наступления ответа (по изменениям величин СПП) в зависимости от суммарной концентрации ДМС, ДМСО и CS_2 во вдыхаемом воздухе (рис. 2).

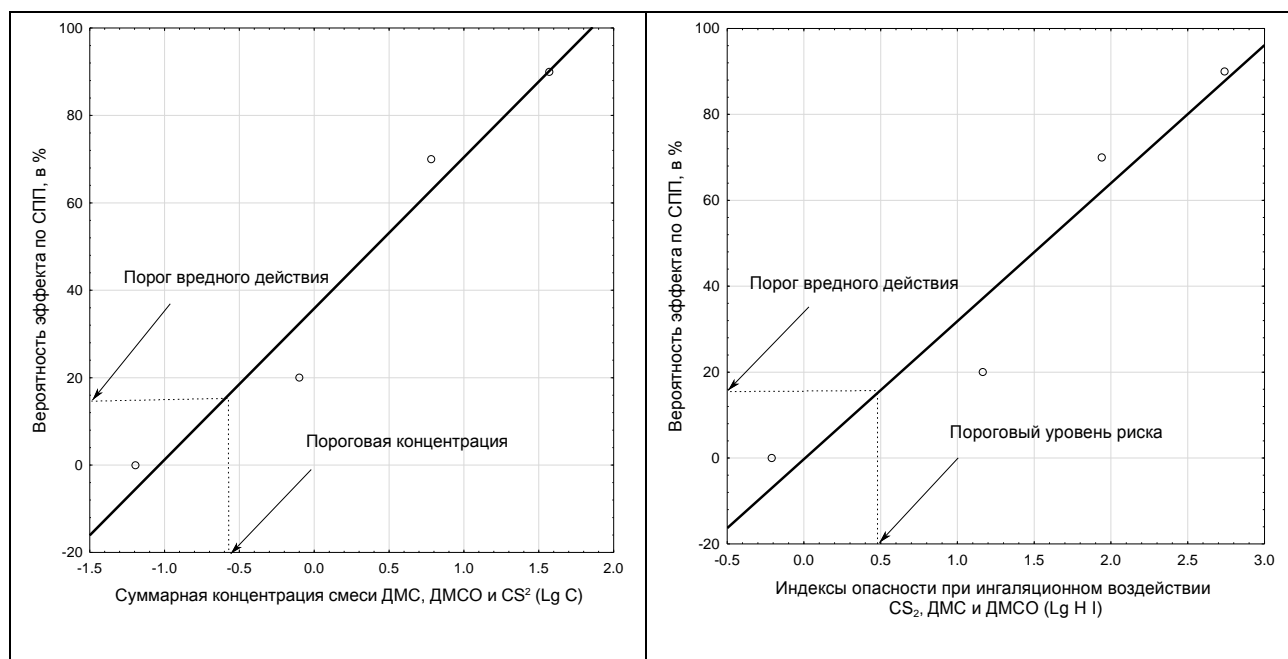


Рисунок 2. Определение вероятностной пороговой концентрации смеси ДМС, ДМСО и CS_2 (слева) и вероятностного порогового значения индекса опасности при ингаляционном воздействии смеси CS_2 , ДМС и ДМСО по показателю СПП (справа) у животных 1, 2 и 3-й опытных групп с помощью прямых зависимостей «концентрация-ответ» и «индекс опасности-ответ». На оси ординат обозначена вероятность наступления вредного эффекта по показателю СПП в %, на оси абсцисс слева - суммарная концентрация смеси ДМСО, ДМС и CS_2 в mg/m^3 ($lg C$), справа - значения индекса опасности ($lg HI$)

Figure 2. Determination of the probabilistic threshold concentration of the DMS, DMSO, and CS_2 mixture (left) and the probabilistic threshold value of the hazard index for inhalation exposure to the CS_2 , DMS, and DMSO mixture based on the CPP (right) in animals from the 1st, 2nd, and 3rd experimental groups using direct concentration-response and hazard index-response relationships. The ordinate axis shows the probability of a harmful effect based on the STP index, in %, and the abscissa axis shows

the total concentration of the mixture of DMSO, DMS, and CS₂, in mg/m³ (lg C), on the left, and the hazard index values (lg HI), on the right.

На рисунке 2 слева видно, что значение lg C целевой смеси на оси абсцисс составляет -0,62. Из этого следует, что вероятностная пороговая концентрация смеси ДМС, ДМСО и CS₂ по показателю СПП составляет 0,242 мг/м³.

Аналогичным способом установлен вероятностный порог вредного действия смеси по прямой зависимости «индекс опасности - ответ». Из рисунка 2 справа следует, что значение lg HI при ингаляционном воздействии целевой смеси, соотносимое с порогом вредного действия, на оси абсцисс составляет 0,49. Вероятностное пороговое значение индекса опасности смеси ДМС, ДМСО и CS₂ по показателю СПП равняется 3,1, что соответствует нижнему пределу диапазона настораживающего уровня риска³.

Результаты изучения влияния 3 испытываемых уровней смесей ДМС, ДМСО и CS₂ относительно постоянного состава на возбудимость ЦНС и эмоционально-поведенческие реакции подопытных крыс на 30-й и 45-й дни ингаляционных затравок показали, что кинетика нейротоксического эффекта при воздействии среднего (6,039 мг/м³) и высокого (37,149 мг/м³) уровней концентраций ДМСО, ДМС и CS₂ отображается в виде двухфазного процесса, характеризующегося минимумами показателя возбудимости ЦНС на 14 и 45-й дни и максимумом на 30-й день. Вместе с тем при ингаляционном воздействии более низкого уровня смеси (0,796 мг/м³) достоверное снижение возбудимости ЦНС происходит только на 45-й день затравок. Сравнительная оценка данных исследования ГДА показала, что по ходу эксперимента в 1-й группе ее величины снижались в 1,2-1,3 раза ($p < 0,01$ - $p < 0,001$), во 2-й группе - в 1,3-1,9 раза ($p < 0,001$), в 3-й группе - в 1,3-2,8 раза ($p < 0,01$ - $p < 0,001$). При этом на 14-й и 30-й дни экспозиции величины ГДА в опытных группах достоверно различались между собой, однако на 45-й день - статистически значимые различия были утрачены. На 30-й день экспозиции смесей ДМС, ДМСО и CS₂ превышение величинами ВДА контрольных значений отмечалось во 2-й и 3-й группах (соответственно в 2,7, $p < 0,005$ и 3,3 раза, $p < 0,001$). В 1-й группе в этот срок эксперимента наблюдалась нормализация вертикального компонента двигательной активности. На 45-й день эксперимента средние величины ВДА у животных 1-й и 2-й опытных групп приблизились к значению в контрольной группе. В 3-й опытной группе, после достижения максимума на 30-й день экспозиции, на 45-й день отмечалась тенденция к нормализации ВДА. Статистически значимых различий между уровнями реакции

груминга и ЭА в опытных группах и контроле на 30-й и 45-й дни затравок не выявлено.

Для подтверждения сформулированной по результатам эксперимента на животных гипотезы о вероятности возникновения в экспонируемых группах населения патологических состояний, связанных с нарушениями деятельности ЦНС, исследована исчерпанная заболеваемость 2 групп детей и подростков, однородных по возрасту и полу, с момента рождения проживающих на различных расстояниях от источника загрязнения атмосферы.

По результатам сравнительной оценки полученных данных средний уровень (за 5 лет) исчерпанной заболеваемости психическими расстройствами и расстройствами поведения у детей 0 - 14 лет, проживающих на расстоянии менее 1000 м от границ сульфидсодержащего отвала (78,9), определялся выше показателя по Кемеровской области в 2018-2022 гг. (34,5-41,1, в среднем 40,1 на 1000 детей) в 2,0 раза, проживающих на расстоянии более 1000 м (62,5) - в 1,6 раза. Средний уровень исчерпанной заболеваемости (за 5 лет) болезнями нервной системы у детей 0-14 лет, проживающих на расстоянии менее 1000 м (131,6) от границ источника, превышал областной показатель в 2018-2022 гг. в 1,2 раза (91,8-121,1, в среднем 104,9 на 1000 детей), проживающих на расстоянии более 1000 м (104,2) – был равным уровню по области в целом.

Визуальный анализ картографического отображения результатов эпидемиологического анализа демонстрирует кластерное распределение детей и подростков с установленными болезнями нервной системы, психическими расстройствами и расстройствами поведения в пределах селитебной территории (рис. 3).

Видно, что в северо-восточном и северо-западном направлениях от границ источника в радиусах соответственно 300 м и 600 м на участках одинаковой площади в 13,4 га отображаются два кластера из девяти больных. В северном направлении в радиусе 900 м на участке площадью в 14,1 га фиксируется третий кластер из 12 больных, в северо-северо-восточном направлении в радиусе 950 м - четвертый кластер на площади в 5,2 га из 6 больных, в юго-юго-западном направлении в радиусе 1200 м - пятый кластер из 5 больных на площади в 5 га (рис. 3 слева).

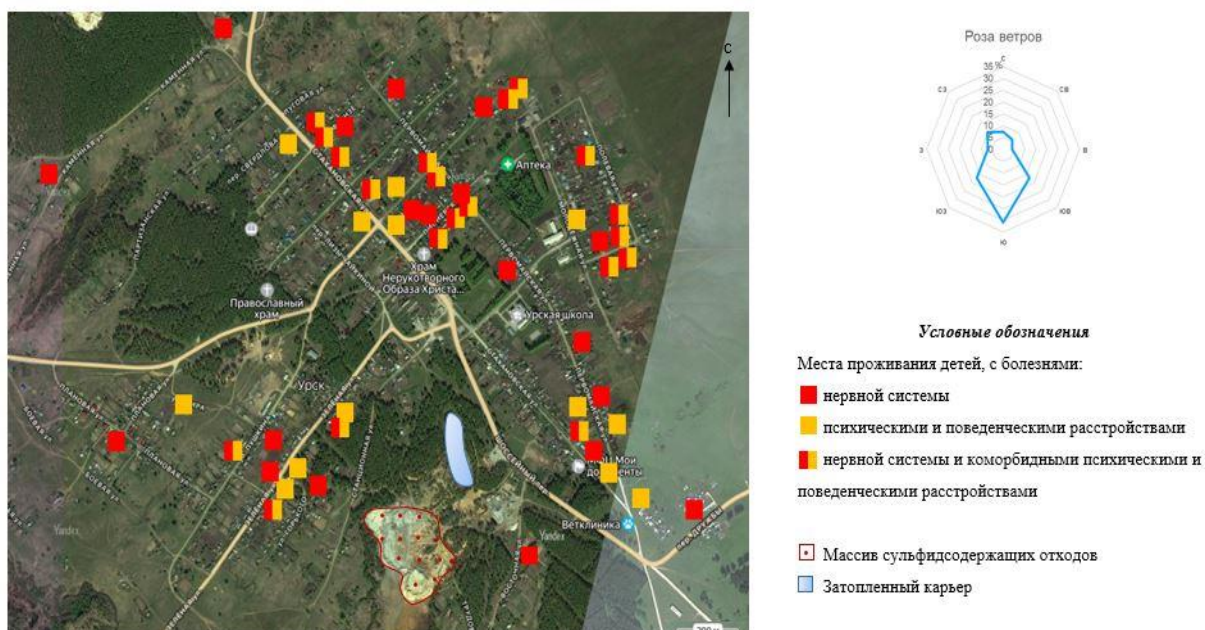


Рисунок 3. Модель пространственного распределения детей с заболеваниями нервной системы, психическими расстройствами и расстройствами поведения в пределах селитебной зоны населенного пункта

Figure 3. Model of the spatial distribution of children with nervous system diseases, mental disorders, and behavioral disorders within the residential area of a settlement.

По мере удаления от источника распределение детей и подростков с выделенными патологиями риска в пределах селитебной территории постепенно утрачивало кластерный характер. Одновременно визуальный анализ построенной карты свидетельствует, что места проживания групп риска преимущественно сосредоточены в северном, северо-восточном и северо-западном направлении от источника, что ассоциируется с розой ветров, показывающей преобладание в исследуемом районе южных, юго-западных и юго-восточных ветров (рис. 3 справа).

Обсуждение. В последние десятилетия к результативным инструментам выбора приоритетов в различных сферах деятельности относятся форсайт-проекты, сочетающие методы прогнозирования и стратегического планирования [17,18]. В контексте гигиенического обеспечения оптимального перехода горнопромышленных районов к новой модели экономики, создание прогностических моделей зон загрязнения атмосферного воздуха и пространственного распределения патологий риска для последующего проектирования стратегий оздоровления территорий и оптимизации здоровья

населения, системное моделирование аэрогенного химического фактора демонстрирует признаки форсайт-исследования.

Прогнозная карта пространственного распределения индексов опасности при длительном ингаляционном воздействии смеси ДМС, ДМСО и CS_2 , к одинаковым токсическим свойствам которых относятся нейротоксические эффекты, демонстрирует настораживающий и высокий уровни риска развития неканцерогенных эффектов на большей части селитебной зоны поселка.

Моделирование патологических состояний, связанных с нарушением деятельности ЦНС и поведенческих функций, проведено в комплексе с натурным моделированием атмосферной миграции ДМС, ДМСО и CS_2 , выделяющихся из образцов сульфидсодержащих отходов в воздух затравочных камер в составе смесей относительно постоянного состава. По результатам подострого эксперимента описана кинетика нейротоксического эффекта от воздействия испытуемых уровней концентраций ДМС, ДМСО и CS_2 в целевых смесях, отражающая последовательную смену фаз первичной декомпенсации, компенсации и вторичной декомпенсации токсического процесса [19]. Переход исследуемого процесса в стадию декомпенсации на 45-й день в 1-й группе, подвергавшейся минимальной экспозиции компонентов смеси, после продолжительного скрытого периода, свидетельствует о накоплении структурно-функциональных отклонений.

Обобщение результатов количественной оценки манифестированных эффектов подтверждает положение токсикологии о том, что зависимости «концентрация-ответ» выявляются в стадии первичной декомпенсации, которая соответствует первому сроку обследования животных [20]. В этой связи установленные на 14-й день экспозиции ДМС, ДМСО и CS_2 в суммарной концентрации $0,796 \text{ мг/м}^3$ изменения величин ГДА и ВДА, статистически значимо отличающиеся от величин в контроле, и выход за нижний предел доверительных границ контроля индивидуальных значений СПП у 20 % крыс оправданно принимать за критериальные при оценке порога нейротоксического действия исследуемой смеси [13]. Вместе с тем при анализе зависимости «концентрация-ответ» вероятностный порог подострого действия (по изменениям СПП) определялся в 3,3 раза ниже и равнялся $0,242 \text{ мг/м}^3$. Вероятностное пороговое значение НИ с учетом однонаправленного действия компонентов смеси по показателю СПП, установленное на прямой зависимости «индекс опасности - ответ», составило 3,1, что соответствует нижнему пределу диапазона настораживающего уровня риска.

Эпидемиологический анализ позволил сформулировать рабочую гипотезу о том, что патологиями риска в группе детей, проживающих в радиусе до 1000 м от источника, являются болезни нервной системы, психические расстройства и расстройства поведения. В группе детей, проживающих в радиусе более 1000 м от границ источника, к предполагаемым болезням риска относятся только психические расстройства и расстройства поведения, что может служить доказательством снижения интенсивности воздействия аэрогенного химического фактора. Для диагностики связей и отношений между объектами исследования в контексте расстояний от источника выделения смеси ДМС, ДМСО и CS_2 , направлений ее переноса воздушными потоками со стороны преобладающего ветра и местами проживания групп риска построена модель пространственного распределения детей и подростков с предполагаемыми патологиями риска в пределах селитебной зоны населенного пункта.

Анализ пространственных характеристик воспроизведенных кластеров (местоположение, размеры, плотность) позволяет прогнозировать возможные маршруты воздействия смесей соединений серы, направляющихся в составе парогазо-воздушных потоков от источника до подвергающихся воздействию групп риска. Отмечено совпадение с фундаментальными обобщениями и закономерностями, известными в гигиене и токсикологии, согласно которым эффект воздействия химического фактора является функцией интенсивности и времени экспозиции в определенных для данного фактора и эффекта границах [20]. Подтверждением прямо пропорциональных отношений между уровнями болезней риска и экспозиции смеси является формирование двух кластеров больных одинаковой плотности и площади в радиусе 300-600 м от источника на участках селитебной территории с высоким риском развития неканцерогенных эффектов.

Это согласуется с результатами исследования зонального загрязнения атмосферного воздуха в местах локализации объектов размещения отходов переработки сульфидных руд, максимальные уровни которого определяются на расстояниях от 300 до 600 м от источника [5]. Индикация в северном направлении в радиусе 900 м от источника 3-го кластера, отличающегося наибольшими размерами и плотностью, позволяет предположить влияние длительности контакта детей с поллютантами из-за преобладания южных ветров, повторяемость которых превышает 30%. В контексте меньшей повторяемости юго-западных и юго-восточных ветров (около 17%) 4-й кластер в северо-северо-восточном направлении в радиусе 950 м и пятый кластер в юго-юго-западном

направлении в радиусе 1200 м от источника имели существенно меньшие размеры. При большем удалении от отвала распределение детей с выделенными патологиями риска на местности утрачивало кластерный характер.

Заключение. Таким образом, по результатам исследования получены научно обоснованные представления о выведенных из эксплуатации объектах размещения отходов переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов как потенциальных источниках загрязнения атмосферного воздуха, создающих дополнительные риски для здоровья населения вследствие атмосферной миграции парогазовых смесей ДМС, ДМСО и CS_2 . Сформирован информационный пакет, предназначенный для выработки прогнозной гипотезы релевантной гигиенической ситуации, проектирования стратегий управления техногенезом и аэрогенными рисками для здоровья населения при реализации постиндустриальной модели экономики горнопромышленных районов. Установлен характер комбинированного действия смеси ДМС, ДМСО и CS_2 относительно постоянного состава, поступающей в атмосферный воздух из объектов размещения отходов переработки сульфидных руд, и вероятностное пороговое значение индекса ее опасности по изменениям величин СПП имеют практическую значимость для реализации риск-ориентированного санитарно-гигиенического мониторинга. Предварительная расчетная оценка порога подострого нейротоксического действия смеси ДМС, ДМСО и CS_2 по показателю СПП, с учетом экспериментально доказанного однонаправленного действия компонентов на функциональное состояние ЦНС, в методическом плане дополняет возможности анализа рисков для здоровья населения. Эпидемиологические данные согласуются с гипотезой о возможной связи пространственного распределения патологий риска с аэрогенной экспозицией. В этой связи картографическое отображение пространственного распределения патологий риска в пределах селитебной территории целесообразно учитывать при научном планировании углубленных медицинских осмотров групп риска и разработке системы медико-профилактических мероприятий.

Список литературы:

1. Бортникова С.Б., Грахова С.П., Юркевич Н.В. Волынкин С.С., Еделев А.В., Карин Ю.Г. и др. Гидрохимические и газовые аномалии на сульфидном хвостохранилище (Салаир, Кемеровская область). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021; 332(2): 26-35. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3040
2. Родионов В.А., Карпов Г.Н., Лейсле А.В. Методологический подход к оценке взрывопожароопасных свойств сульфидсодержащих полиметаллических руд. *Горный*

- информационно-аналитический бюллетень. 2022; 6 (1): 198-213. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_198.
3. Bortnikova S.B., Devyatova A.Yu., Yurkevich N.V., Grakhova S.P. 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. DOI: 10.1007/s11270-021-05290-1
4. Новикова И.И., Огудов А.С., Семенова 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; 12(3): 98-104. DOI: 10.55355/snvt2023123113
5. Огудов А.С., Новикова И.И., Семенова Е.В. Гигиеническое изучение и прогноз загрязнения атмосферного воздуха соединениями серы в районах размещения сульфидсодержащих хвостохранилищ. *Санитарный врач*. 2023; (12): 806-816. DOI: 10.33920/med-08-2312-05
6. Лазарев Н.В., Левина Э.Н. *Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей*. В 3 томах. Том II. Органические вещества. Л.: Химия; 1976
7. Другова Е. С. Влияние интоксикации сероуглеродом на биохимические показатели крови и их коррекция растительными фенольными соединениями в эксперименте. *Journal of Siberian Medical Sciences*. 2021; (2): 15-25. DOI: 10.31549/2542-1174-2021-2-15-25
8. Dimethyl sulfide. Haz-Map, Information on Hazardous Chemicals and Occupational Diseases [Электронный ресурс]. 2025; URL: <https://haz-map.com/Agents/1363> (дата обращения: 29.04.2026).
9. Ивкин Д.Ю., Оковитый С.В., Ивкина А.С., Анисимова Н.А. Диметилсульфоксид - вещество с плейотропными эффектами, актуальными при заболеваниях опорно-двигательного аппарата. *Лечащий врач*. 2019; (4): 19-23. EDN: NXUUVK
10. Пинигин М. А. Теория и практика оценки комбинированного действия химического загрязнения атмосферного воздуха. *Гигиена и санитария*. 2001;(1): 9-13.
11. Зайцева Н.В., Май И.В., Кирьянов Д.А., Горяев Д.В., Клейн С.В. Социально-гигиенический мониторинг на современном этапе: состояние и перспективы развития в сопряжении с риск-ориентированным надзором. *Анализ риска здоровью*. 2016; (4): 4-16. DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.01
12. Кузьмина Е.А. Гигиеническая диагностика – ключевой элемент в системе медико-профилактических технологий. *Гигиена и санитария*. 2015; 94 (2): 99-104. EDN: TPНJSL
13. Саноцкий И.В. *Методы определения токсичности и опасности химических веществ (токсикометрия)*. М.: Медицина; 1970.
14. Сперанский С.В. *Определение суммационно-порогового показателя (СПП) при различных формах токсикологического эксперимента*. Новосибирск: Советский воин; 1975.
15. Буреш Я. Бурешова О., Хьюстон Д.П. *Методики и основные эксперименты по изучению мозга и поведения*. М: Высшая школа; 1991.

16. Патент № 2532365 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/00 Способ мониторинга загрязнения природных сред техногенным источником: №2012121866/15 : заявл. 25.05.2012 : опубл. . 10.11.2014, бюл. 12 / Рапута В.Ф., Девятова А.Ю.
17. Kishita Y. Foresight and Roadmapping Methodology: Trends and Outlook. *Foresight and STI Governance*. 2021; 15(2): 5-11. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.2.5.11
18. Переслегин С.Б., Переслегина Е.Б. *Дикие карты будущего. Форс-мажор для человечества*. М.: Алгоритм; 2015.
19. *Общая токсикология* / Под ред. Курляндского Б.А., Филова В. А. М.: Медицина; 2002.
20. Копанев В.А., Гинзбург Э.Х., Семенова В.Н. *Метод вероятностной оценки токсического эффекта*. Новосибирск: Наука; 1998.

References:

1. Bortnikova S.B., Grakhova S.P., Yurkevich N.V., Volynkin S.S., Edelev A.V., Karin Yu.G., et al. Hydrochemical and gaseous anomalies on sulfide tailings (Salair, Kemerovo region) *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(2):26-35. DOI: 10.18799/24131830/2021/2/3040 (in Russian).
2. Rodionov V.A., Karpov G.N., Leisle A.V. Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;6(1):198-213. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_198 (in Russian).
3. Bortnikova S.B., Devyatova A. Yu., Yurkevich N.V., Grakhova S.P. 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. DOI: 10.1007/s11270-021-05290-1 (in Russian).
4. Novikova I.I., Ogudov A.S., Semenova E.V., Chuenko N.F., Bessonova M.V. Modeling the impact of sulfide ore processing waste disposal facilities on the environment and human health. *Samara Scientific Bulletin*. 2023;12(3):98-104. DOI: 10.55355/snv2023123113 (in Russian).
5. Ogudov A.S., Novikova I.I., Semenova E.V. Hygienic study and forecast of atmospheric air pollution with sulfur compounds in the areas of sulfide-containing tailings. *Sanitary Doctor*. 2023;(12):806-816. DOI: 10.33920/med-08-2312-05 (in Russian).
6. Lazarev N.V., Levina E.N. *Hazardous substances in industry. Handbook for chemists, engineers and physicians*. In 3 vols. Vol. II. Organic substances. Leningrad: Khimiya; 1976. (In Russian)
7. Drugova E.S. Influence of carbon disulfide intoxication on blood biochemical parameters and their correction by plant phenolic compounds in experiment *Journal of Siberian Medical Sciences*. 2021;(2):15-25. DOI: 10.31549/2542-1174-2021-2-15-25 (In Russian)

8. Dimethyl sulfide. Haz-Map, Information on Hazardous Chemicals and Occupational Diseases [Internet]. 2025 Available from: <https://haz-map.com/Agents/1363> (date accessed: 29.04.2026).
9. Ivkin D.Yu., Okovity S.V., Ivkina A.S., Anisimova N.A. Dimethyl sulfoxide – a substance with pleiotropic effects relevant in musculoskeletal diseases. *Attending Doctor*. 2019;(4):19-23 EDN: NXUUVK (In Russian)
10. Pinigin M.A. Theory and practice of assessing the combined action of chemical air pollution. *Hygiene and Sanitation*. 2001;(1):9-13. (In Russian)
11. Zaitseva N.V., May I.V., Kiryanov D.A., Goryaev D.V., Kleyn S.V. Social and hygienic monitoring today: state and prospects in conjunction with the risk-based supervision. *Health Risk Analysis*. 2016;(4):4-16. DOI: 10.21668/health.risk/2016.4.01 (In Russian).
12. Kuzmina E.A. Hygienic diagnosis - a key element in the health prevention technologies for the population residing in conditions of higher chemical load. *Hygiene and Sanitation*. 2015;94(2):99-104. EDN: TPHJSL (In Russian).
13. Sanotsky I.V. *Methods for determining toxicity and hazard of chemicals (toxicometry)*. Moscow: Meditsina; 1970. (In Russian).
14. Speransky S.V. *Determination of the summation-threshold indicator (SPP) in various forms of toxicological experiment*. Novosibirsk: Sovetsky voin; 1975. (In Russian).
15. Buresh J. Bureshova O., Houston D.P. *Methods and basic experiments for studying the brain and behavior*. Moscow: Vysshaya shkola; 1991. (In Russian).
16. Raputa V.F., Devyatova A.Yu. *Method for monitoring environmental pollution by a technogenic source*. Russian Federation Patent No. 2532365, IPC G01N33/00. Applied May 25, 2012; published November 10, 2014, Bull. 12. (In Russian).
17. Kishita Y. Foresight and roadmapping methodology: trends and outlook. *Foresight and STI Governance*. 2021;15(2):5-11. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.2.5.11
18. Pereslegin S.B., Pereslegina E.B. *Wild cards of the future. Force majeure for humanity*. Moscow: Algoritm; 2015. (In Russian)
19. General toxicology / Edited by Kurlyandskiy B.A., Filov V.A. Moscow: Medicine; 2002. (In Russian)
20. Kopanev V.A., Ginzburg E. Kh., Semenova V.N. *Method of probabilistic assessment of toxic effect*. Novosibirsk: Nauka; 1998. (In Russian).

Сведения об авторах:

Александр Степанович Огудов - кандидат медицинских наук, заведующий отделом токсикологии ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8242-0321>; e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

Анна Юрьевна Девятова - кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэлектрости ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука» СО РАН; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-0101>; e-mail: devyatovaay@ipgg.sbras.ru

Ирина Игоревна Новикова - доктор медицинских наук, профессор, директор ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1105-471X>; e-mail: novikova_ii@niig.su

Галина Петровна Ивлева – кандидат медицинских наук, старший научный сотрудник организационно-методического отдела ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9011-1000>; e-mail: ivlevagp@niig.su

About the authors:

Alexander S. Ogudov - Cand. Sci. Med; Head of the Department of Toxicology; Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8242-0321>; e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

Anna Yu. Devyatova - Cand. Sci. Geology and Mineralogy; Research Fellow at the Laboratory of Geo-Electricity, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1597-0101>; e-mail: devyatovaay@ipgg.sbras.ru

Irina I. Novikova - Dr. Sci. (Med.); professor, director; Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1105-471X>; e-mail: novikova_ii@niig.su

Galina P. Ivleva - Cand. Sci. Med, Senior Researcher, Organizational and Methodological Department, Department; Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9011-1000>; e-mail: ivlevagp@niig.su

Поступила/Received: 21.05.2026

Принята в печать/Accepted: 09.06.2026