

A. S. Ogudov^{1}, M. A. Kreimer^{1,2}*

Системный анализ и моделирование атмогеохимических ореолов загрязнения в горнодобывающих регионах

¹ ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены» Роспотребнадзора, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время и на перспективу актуальной проблемой для горнодобывающих регионов является природно-техногенная эмиссия в атмосферу летучих соединений серы, выделяющихся из объектов размещения отходов переработки руд цветных и благородных металлов. Проведен анализ представленной в научной литературе информации о физико-химических и токсических свойствах смесей соединений серы, загрязняющих атмосферный воздух в горнодобывающих регионах. По результатам системного анализа материалов подфакельных наблюдений загрязнения атмосферного воздуха в районе размещения хвостохранилища бывшего золоторудного производства, выделен перечень приоритетных соединений серы, подлежащих контролю, описаны отличительные черты зонального загрязнения атмосферы под факелом неорганизованного источника, построены модели распределения концентраций приоритетных загрязнителей в приземном слое атмосферы. Полученная информация позволяет дополнить существующие подходы к эколого-гигиенической диагностике воздушного фактора в горнодобывающих регионах.

Ключевые слова: хвостохранилище, эмиссия соединений серы, подфакельные наблюдения загрязнения атмосферы, системный анализ и моделирование

A. S. Ogudov^{1}, M. A. Kramer^{1,2}*

System analysis and modeling of atmogeochemical pollution halos in mining regions

¹ Siberian Novosibirsk Research Institute of Hygiene of Rospotrebnadzor, Novosibirsk,
Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,
Russian Federation

* e-mail: ogudov.tox@yandex.ru

Abstract. Currently and in the future, an urgent problem for mining regions is the natural and man-made emission into the atmosphere of volatile sulfur compounds released from waste disposal facilities for processing ores of non-ferrous and noble metals. The analysis of the information presented in the scientific literature on the physico-chemical and toxic properties of mixtures of sulfur compounds polluting the atmospheric air in mining regions is carried out. Based on the results of a systematic analysis of the materials of flare observations of atmospheric air pollution in the area of the tailings of the former gold mine, a list of priority sulfur compounds subject to control is identified, the distinctive features of the zonal pollution of the atmosphere under the flare of an unorganized source are described, models of the distribution of concentrations of priority pollutants in the surface layer of the atmosphere are constructed. The information obtained makes it possible to supplement existing approaches to the ecological and hygienic diagnosis of air pollution.

Keywords: tailings storage, emission of sulfur compounds, subfactual observations of atmospheric pollution, system analysis and modeling

Введение

В структуру территориальных систем, складывающихся в период индустриализации горнодобывающих регионов, входили инфраструктурные объекты и населенные пункты, селитебные зоны которых в определенных случаях становились составной частью ореолов загрязнения [1]. Процессы рассеяния в окружающей среде соединений тяжелых металлов и серы в этот период являлись следствием операций производственных процессов добычи и обогащения сульфидных руд [2, 3]. После завершения эксплуатации рудных месторождений, актуальной проблемой становится эмиссия газо-аэрозольных смесей законсервированными объектами производственной инфраструктуры и загрязненным почвенным покровом [4, 5]. Динамические изменения параметров эмиссии в результате взаимодействий техногенных и природных объектов определяют актуальность системного анализа и моделирования атмогеохимических ореолов загрязнения [6, 7]. Особенно актуальной проблемой в настоящее время и на перспективу является эмиссия соединений серы, поступающих в атмосферный воздух в составе сложных летучих парогазовых смесей [8-11]. Местное действие на организм человека летучих соединений серы заключается в раздражении дыхательных путей, резорбтивное действие – в нарушениях углеводного и белкового обменов, угнетении окислительных процессов в головном мозге и внутренних органах [12]. В условиях длительной экспозиции, развиваются гонадотоксические и эмбриотоксические эффекты [13]. Изолированное ингаляционное воздействие наиболее распространенных соединений серы сопровождается поражением органов дыхания, центральной нервной системы и печени [14]. При совместном присутствии в атмосфере нескольких соединений серы наблюдаются различные типы комбинированного действия, которые обусловлены физическими, химическими и физиологическими взаимодействиями компонентов смесей [15, 16].

Однако вопросы атмосферной миграции соединений серы из материала хвостохранилищ в литературе практически не отражены, что затрудняет гигиеническую оценку данных объектов как источников загрязнения атмосферного воздуха и научное обоснование мероприятий по мелиорации и оздоровлению окружающей среды. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий поселений, состоянию атмосферного воздуха, почвы, водных объектов и питьевого водоснабжения сформулированы в СанПиН 2.1.3684-21 [17].

Целью исследований являлась гигиеническая оценка объектов хранения отходов переработки сульфидных руд цветных и благородных металлов как источников загрязнения атмосферного воздуха летучими соединениями серы. К основным задачам относились обеспечение возможности использования результатов исследования при экологической экспертизе эффективности средозащитных мероприятий и проведении работ по оценке риска здоровью населения, 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).

Методы и материалы

Объектом исследования являлось выведенное из эксплуатации хвостохранилище бывшего Салаирского ГОКа «Дюков лог», расположенное г. Салаире Кемеровской области. Зона размещения хвостохранилища представляет собой широкий, значительной длины овраг с отлогими склонами, примыкающий к селитебной территории. В 1950-х годах сюда складировали отходы золотообогатительной фабрики, перерабатывающей руды зоны окисления рудного поля, состоящие из сильноизмененных пород и минералов [18]. Всего за период эксплуатации в хвостохранилище было размещено около 1,5 млн. тонн отходов, среди которых доля сульфидных минералов - пирита, галенита, сфалерита и халькопирита, составляет около 5 % [19, 20]. Для определения дальности распространения смесей соединений серы от хвостохранилища использовали метод подфакельных наблюдений [21]. Отбор не менее 50-ти проб по каждому компоненту выделяющихся смесей проводили по направлению ветра, на расстояниях от его границ 75, 150, 300 и 600 метров. Содержание в пробах воздуха диметилсульфида, диметилсульфоксида, диоксида серы, сероуглерода и сероводорода 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».

Полученные цифровые данные подвергнуты системному анализу и представлены в таблице в виде $M \pm m$, где M - среднее арифметическое, m - ошибка среднего арифметического. Построение графиков и редакцию материала с формированием базы данных и последующее выведение информации производили с помощью ПК по стандартным прикладным программам Statistica 10.0.

Результаты

Полученные по результатам подфакельных наблюдений суммарные показатели загрязнения атмосферного воздуха на различных расстояниях от источника эмиссий зависели от агрегатного состояния соединений серы (табл. 1).

Таблица 1

Осреднённые концентрации летучих соединений серы ($M \pm m$) в атмосферном воздухе на различных расстояниях от хвостохранилища, в mg/m^3

Наименование вещества	Расстояние до источника, в метрах			
	75	150	300	600
Сероуглерод	0,0005±0,00001	0,0006±0,0002	0,0005±0,00001	0,0005±0,0001
Диметилсульфид	0,015±0,0007	0,012±0,0002	0,007±0,0002	0,007±0,0003
Диметилсульфоксид	0,020±0,004	0,019±0,0001	0,016±0,009	0,069±0,018
Диоксид серы	0,004±0,0004	0,002±0,0002	0,005±0,0002	0,005±0,0001
Сероводород	0,001±0,0001	0,001±0,0003	0,001±0,00004	0,001±0,0001

Видно, что четко выраженная зональность загрязнения приземного слоя атмосферы диметилсульфоксидом и диметилсульфидом, которые в стандартных условиях находятся в жидком состоянии, отмечалась в диапазоне от 75 до 300 м от источника, на протяжении которого их концентрации последовательно снижаются. На расстоянии 600 м от источника осреднённая концентрация диметилсульфида становится стабильной, диметилсульфоксида - достоверно (в 4,3 раза) возрастает. При этом максимальные разовые концентрации диметилсульфоксида в 9,1 % проб превышают величину ОБУВ, регламентированную на уровне 0,1 мг/м³. В то же время, динамика концентраций в атмосферном воздухе диоксида серы, сероуглерода и сероводорода, которые в стандартных условиях находятся в газообразном состоянии, зонального характера не демонстрирует. Если максимум концентраций сероуглерода регистрируется на расстоянии 150 метров, то диоксида серы - в диапазоне от 300 до 600 м от границ хвостохранилища.

Корреляционный анализ структуры атмогеохимического ореола загрязнения показал, что на расстоянии 75 м от источника в прямых корреляционных связях находятся концентрации диметилсульфоксида, диметилсульфида, диоксида серы и сероуглерода ($r_s=0,4-0,8$, $p<0,05$). Это соответствует исходному химическому составу эмиссий хвостохранилища и, одновременно, характеризует зону неорганизованного загрязнения. По мере удаления от источника, происходит постепенное упрощение структуры парогазового потока: на удалении 150 м, сохранялись прямые связи между концентрациями диметилсульфоксида, диметилсульфида и сероуглерода ($r_s=0,3-0,8$, $p<0,05$), 300 м - диметилсульфоксида и сероуглерода ($r_s=0,4$, $p<0,05$), 600 м – диметилсульфоксида и диметилсульфида ($r_s=0,7$, $p<0,05$). С учетом многочисленных тесных корреляционных связей и уровней концентраций диметилсульфоксида и диметилсульфида в атмосферном воздухе, данные поллютанты рассматривались в качестве базовых элементов в структуре складывающегося атмогеохимического ореола загрязнения.

Для выяснения влияния на процесс распространения парогазовых потоков сложной формы рельефа местности, прилегающей к объекту размещения сульфидсодержащих отходов, построены модели распределения концентраций диметилсульфоксида и диметилсульфида в приземном слое атмосферы, аппроксимирующие зависимости уровней осреднённых концентраций (в мг/м³) от расстояния до источника (в метрах).

Видно, что графическое изображение распределения концентраций паров диметилсульфоксида и диметилсульфида в приземном слое атмосферы под парогазовым факелом хвостохранилища адекватно описывается уравнениями полиномов второго порядка (рис. 1, рис. 2).

При этом, распределения концентраций сероуглерода и диоксида серы, которые в стандартных условиях находятся в газообразном состоянии, адекватно описывались уравнениями полиномов третьего порядка.

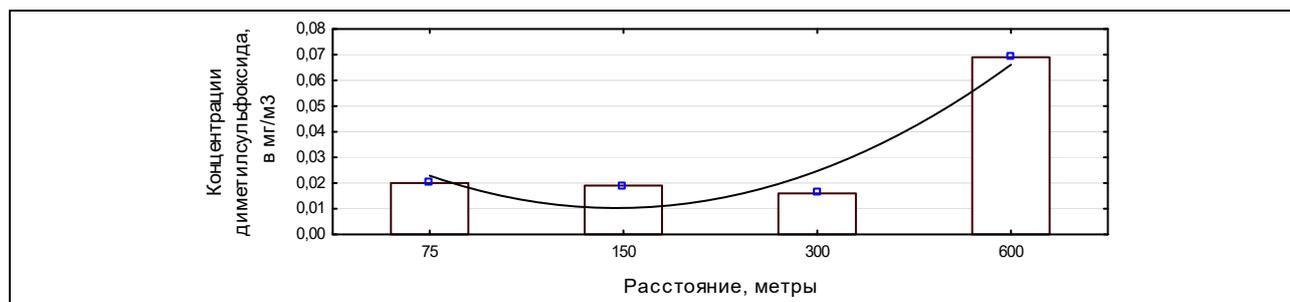


Рис. 1. Модель распределений концентраций диметилсульфоксида в приземном слое атмосферы под парогазовым факелом хвостохранилища на расстояниях от 75 до 600 м от источника эмиссии ($y = 0,0306 - 0,0002x + 0,0000003x^2$; $R^2 = 0,99$)

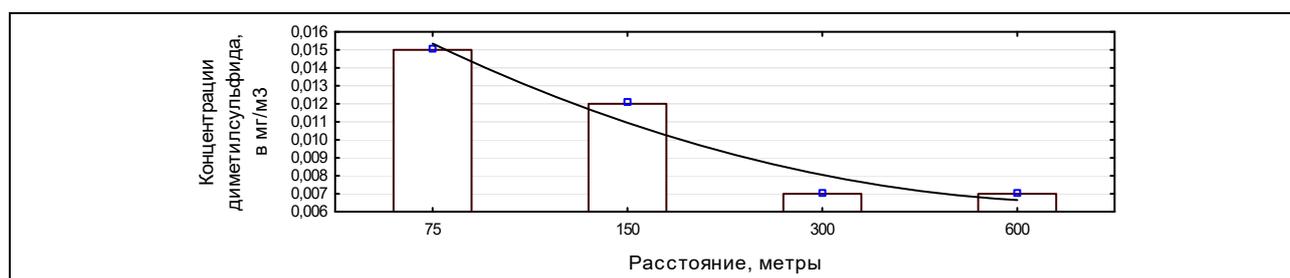


Рис. 2. Модель распределений концентраций диметилсульфида в приземном слое атмосферы под парогазовым факелом хвостохранилища на расстояниях от 75 до 600 м от источника эмиссии ($y = 0,0196 - 0,00006x + 0,00000007x^2$; $R^2 = 1,0$)

Обсуждение

Теоретический анализ литературы позволил выделить ряд концепций, представляющих интерес в плане дополнения методологических подходов к оценке воздействия объектов размещения сульфидсодержащих отходов на окружающую среду и здоровье населения. К наиболее значимым относится концепция природно-технических систем (ПТС) [16]. Элементами ПТС на постэксплуатационной стадии горнорудного техногенеза становятся технические, природные и природно-техногенные объекты. В рамках представленной структуры ПТС, парогазовые потоки соединений серы выступают в качестве одного из субстратов внутрисистемного взаимодействия. С учетом типа структурообразующего противоречия, являющегося основой структуры и источником динамики возникающей «триады», прогнозируемое поведение рассматриваемой ПТС заключается в накоплении потенциала для будущего спонтанного развития (С.Б. Переслегин, 2013). Тем не менее, в процессе постепенного возврата техногенной среды обитания («второй природы») к естественному состоянию («первой природы»), природно-техногенные объекты могут приобретать значение источников загрязнения среды обитания и рисков здоровью населения. Геохимическая концепция парогазового выноса токсикантов из вещества сульфидсодержащих отходов (С.Б. Бортникова и соавт., 2016) объясняет механизм негативного воздействия ПТС неорганическими и биотическими процессами, непрерывно протекающими в отвальных породах, поровых водах верхних уровней и неустойчивых вторичных сульфатах. Газовая съёмка объектов размещения отхо-

дов переработки сульфидных руд показывает, что значительные объёмы серосодержащих смесей выделяются в атмосферу в результате процессов выветривания сульфидов, перемещенных на земную поверхность, окисления материала флотационных хвостов в процессе жизнедеятельности сообществ микроорганизмов, населяющих техногенно-изменённую среду, преобразования серы в поровых растворах с образованием диоксида серы в газовой фазе.

Не вызывает сомнений, что применение комплексной методологии, опирающейся на сочетание современных гигиенических, экологических и геохимических подходов, позволяет получить детальную информацию об опасности накопленных в горнодобывающих регионах отходов добычи и переработки руд цветных и благородных металлов для среды обитания и здоровья населения. В рамках комплексной методологии, осуществлён системный анализ и моделирование атмогеохимических ореолов загрязнения для разработки мероприятий по предотвращению загрязнения среды обитания и рисков здоровью населения в горнодобывающих регионах.

По результатам системного анализа данных подфакельных наблюдений, распределение паров диметилсульфоксида и диметилсульфида в приземном слое атмосферы в зонах, образующихся при обтекании парогазовым потоком склонов лога, в котором размещено хвостохранилище, существенно отличается от типичного для широко освещённой в литературе модели «факела». Это с высокой вероятностью указывает на вовлечение парогазовых смесей в циркуляционные движения воздуха, которые образуются в результате воздействия ветра на склон лога.

Проведенные исследования подтвердили, что хвостохранилища являются гигиенически значимыми источниками эмиссии летучих соединений серы, поступающих в атмосферный воздух в составе сложных парогазовых комплексов. Ведущим компонентом загрязнения атмосферного воздуха в районе размещения объекта настоящего исследования, является диметилсульфоксид, повышенные уровни концентраций которого регистрируются в понижениях рельефа подветренного склона территории. Риски комбинированного воздействия создаются в зоне максимального загрязнения хвостохранилища в условиях интенсивной инсоляции и опасных скоростей ветра, главным образом при контактах групп населения с парогазовыми потоками диметилсульфоксида и диметилсульфида.

Для улучшения эколого-гигиенической ситуации, складывающейся после вывода из эксплуатации объектов хранения сульфидсодержащих отходов, требуется проведение технологических мероприятий, направленных на снижение атмосферной миграции соединений серы из вещества накопленных отходов, архитектурно-планировочных мероприятий, обеспечивающих рациональное и безопасное функциональное использование загрязнённой территории. Организационные же мероприятия должны предусматривать мониторинг концентраций соединений серы в атмосферном воздухе и оценку риска для здоровья населения.

Заключение

Таким образом, на основе системного анализа и моделирования данных подфакельных наблюдений, построены модели распределения концентраций диме-

тилсульфоксида и диметилсульфида в приземном слое атмосферы в районе размещения законсервированного хвостохранилища бывшей золотообогатительной фабрики, аппроксимирующие зависимости уровней их концентраций (в мг/м³) от расстояния до источника (в метрах). С использованием метода полиномиальной регрессии, отображены локальные тренды распределения в приземном слое атмосфере концентраций диметилсульфоксида и диметилсульфида под парогазовыми потоками эмиссий на расстояниях от хвостохранилища 75, 150, 300 и 600 метров. Модели трендов строились с использованием полиномов второй степени, имеющих вид: $y = a + bx + cx^2$, величины коэффициентов аппроксимации (R^2) приближалась к 1.0. Технический результат построенных моделей заключается в повышении эффективности эколого-гигиенической диагностики воздушного фактора в районах размещения объектов хранения отходов переработки руд цветных и благородных металлов, получении научно обоснованных представлений об опасности накопленных сульфидсодержащих отходов для среды обитания и здоровья населения и экологической экспертизы эффективности средоохранительных мероприятий с учетом разрешенного вида землепользования, информационном обеспечении планирования и реализации мероприятий по мелиорации и оздоровлению окружающей среды в горнодобывающих регионах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добринский А.А., Косибород Н.Р., Пивкин В.М., Трофимович Е.М. Гигиенические основы решения территориальных проблем (на примере КАТЭЖа). – Новосибирск: Наука, 1987. - 256 с.
2. Огудов 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. Москва, 1991. - 25 с.
3. 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; 3:62-75.
4. Бортникова С.Б., Девятова А.Ю., Шевко Е.П., Гаськова О.Л., Еделев 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) с. 11-22.
5. Амосов П.В., Бакланов А.А., Маслобоев В.А. Результаты оценки загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилища (на базе трехмерного моделирования). *Известия вузов. Горный журнал*. 2017; 6: 87.
6. Суздалева А.Л. Управляемые природно-технические системы энергетических и иных объектов как основа обеспечения техногенной безопасности и охраны окружающей среды. - М.: «ИД ЭНЕРГИЯ», 2015. - 160 с.
7. 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: 131-139.
8. 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; 647: 411-419.
9. Bortnikova S., Abrosimova N., Yurkevich N., Zvereva V., Devyatova A., Reutsky A. Gas transfer of metals during the destruction of efflorescent sulfates from the belovo plant sulfide slag, russia. *Minerals*. 2019; 9:6.

10. Фортин Д., Феррис Ф.Г., Беверидж Т.Дж. Поверхностно-опосредованное развитие минералов бактериями. Геомикробиология. Де Грюйтер. 2018:161-180.
11. 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; 61(8):1055-1073.
12. Елоева Д.В., Неёлова О.В. Биологическая роль серы и применение ее соединений в медицине. Успехи современного естествознания. – 2014. – № 8. – С. 166-166.
13. Вредные вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей. Изд. 7-е, пер. и доп. В трех томах. Том III. Неорганические и элементарноорганические соединения. Под ред. Н.В. Лазарева., И.Д. Гадаскиной. Л., Химия, 1977. 608 с.
14. Уждавини Э.Р. Токсикология органических соединений серы. Рига: Изд-во «Зинатне», 1986. 196 с.
15. Айтбаев Т.Х. и соавт. Морфологические изменения во внутренних органах белых крыс при комбинированном воздействии сероводорода и сернистого ангидрида. Вопросы гигиены труда и профзаболеваний. Алма-Ата: НИИ краевой патологии, 1976. - Т. 29. – С. 15-18.
16. Челиканов К.Н. О характере комбинированного действия сероуглерода, сероводорода и сернистого газа при совместном присутствии в атмосферном воздухе. Науч. тр. Рязан. мед. ин-та. 1978. - Т. 63. – С. 45-47.
17. СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 3
18. Lazareva E.V. Peculiarities of mineral association in oxidized zone of polystage Salair deposit (Pb-Zn-Cu-Au-Ag) (West Siberia) // Abstracts I CAM'96. – Warsaw, Poland, 1996. – P. 162.
19. Mineralogical forms of precious metals in oxidized ores of the Salair mine, West Siberia, and their importance in the metallurgical treatment / S.B. Bortnikova, A.A. Airijants, E.V. Lasareva, S.B. Karlova // Process Mineralogy XIII: Applications to Beneficiation Problems, Pyrometallurgical Products, Advanced Mineralogical Techniques and Other Industrial Problems. – Rolla: Missouri, 1995. – P. 213–223.
20. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянец А.А. Техногенные озера. – Новосибирск: Академ. Изд-во «Гео», 2003. – 120 с.
21. «Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89» (утв. Госкомгидрометом СССР 01.06.1989, Главным государственным санитарным врачом СССР 16.05.1989).

© А. С. Озудов, М. А. Креймер, 2023