

А. Ю. Девятова^{1✉}, С. Б. Бортникова¹

Атмосферная эмиссия микроэлементов от хранилищ отходов горнорудных производств

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сульфидные отходы обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва представляют собой постоянный источник загрязнения. Объектом исследования был геогаз, выделяющийся с поверхности хранилищ, собранный для оценки уровня концентрации микроэлементов (в том числе и тяжелых металлов) в атмосферном воздухе в окрестностях отвалов. Отбор геогаса производился методом коденсации, с помощью прибора на основе элемента Пельтье. Полученный конденсат анализировался методом АЭС-ИСП на спектрометре iCap 6000 Duo. Сравнение состава конденсатов с составом растворенной частью снегового покрова показало, что коденсация в разработанном устройстве происходит тем же образом, что и коденсация в атмосфере. Результаты исследований показали, что содержание тяжелых металлов над поверхностью хвостохранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва превышает фоновые значения во всех наблюдаемых точках в среднем в 1000 раз.

Ключевые слова: сульфидные отвалы, загрязнение атмосферы, тяжелые металлы

A. Y. Devyatova^{1✉}, S. B. Bortnikova¹

Atmospheric emission of trace elements from mining waste storage

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: DevyatovaAY@ipgg.sbras.ru

Abstract. Sulfide ore processing waste in the Kemerovo region and in the Republic of Tuva is a constant source of pollution. The object of the study was geogas released from the surface of storage facilities, collected to assess the concentration of trace elements (including heavy metals) in the atmospheric air in the vicinity of landfills. Geogas was selected by the codensation method using a device based on a Peltier element. The resulting condensate was analyzed by the NPP-ICP method on an iCap 6000 Duo spectrometer. A comparison of the composition of the condensates with the composition of the dissolved part of the snow cover showed that condensation in the developed device occurs in the same way as condensation in the atmosphere. The research results showed that the content of heavy metals above the surface of the tailing dumps of sulfide ore processing waste in the Kemerovo region and in the Republic of Tuva exceeds the background values at all observed points by an average of 1000 times.

Keywords: sulfide dumps, atmospheric pollution, heavy metals

Введение

Формирование циклов круговорота летучих соединений серы, поступающих в атмосферный воздух, является актуальной проблемой для горнорудных районов на постэксплуатационной стадии.

Сульфидные отвалы – это мощные источники загрязнения компонентов окружающей среды. Хорошо изучено их влияние на гидросферу [1-8], литосферу [9-13], растительность [14-17]. Однако проблема загрязнения атмосферы изучена слабо [18-21].

Известно, что от объектов, находящихся на поверхности или в глубине земной коры, вверх восходит поток подвижных частиц, несущих информацию об объекте. Например, у ряда авторов этот поток называется геогазом, или земным газом, а также – струйной субвертикальной миграцией химических элементов [22-25]. Выделение геогаза из сульфидных хвостов и последующее его рассеивание являются непрерывно происходящими процессами. Таким образом, оценить состав воздуха над этими хвостохранилищами очень сложно.

Целью исследования было определить уровень концентрации микроэлементов в атмосферном воздухе в окрестностях отвалов горнорудных производств.

Тяжелые металлы – это металлы или металлоиды, которые имеют плотность выше 5 г/см³, не поддаются разложению или разрушению [26].

В зависимости от степени токсикологического воздействия химические вещества в соответствии с ГОСТ 17.4.1.0283 и ГОСТ Р 53381-2009 подразделяют на три класса:

- I класс (высоко опасные) – As, Cd, Hg, Be, Se, Pb, Zn;
- II класс (умеренно опасные) – B, Co, Ni, Mo, Cu, Sb, Cr;
- III класс (мало опасные) – Ba, V, W, Mn, Sr [27].

Результаты данного исследования позволяют по-новому взглянуть на проблему токсического воздействия сульфидных хвостохранилищ на окружающую среду и человека.

Методы и материалы

Полевой отбор образцов осуществлялся методом конденсирования, с помощью специально сконструированного устройства, на поверхности хранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва: Ново-Берикульское, Талмовские Пески, Урской отвал, Хову-Аксы (траншеи Тувакобальт). Помимо этого, была отобрана фоновая проба в лесополосе Кемеровской области вдали от источников загрязнения. Считаем выбор фоновой точки обоснованным, поскольку 75% объектов расположены в Кемеровской области и ее состав может быть взят для сравнения по всем объектам.

Содержания металлов и металлоидов определялось методом АЭС-ИСП на спектрометре iCap 6000 Duo (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA) в стандартной конфигурации (аналитик Нечепуренко С.Ф.).

Результаты

Состав парогазовых эманаций был оценен по составу собранного конденсата. Различия в составах конденсатов связаны с исходным составом отвального вещества и показаны на рис. 1. Конденсат геогаза является ультрапресным слабощелочным раствором (рН=8,00), в соответствии с классификацией природных вод, сульфатно-гидрокарбонатного класса, кальций-натриевой группы. Ле-

тучие формы, отделяющиеся от вещества отходов с потоками геогаза, образуют многие элементы, ведущие из которых – катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) и цинк, концентрации которого (700-1400 мкг/л) сопоставимы с содержанием катионов (рис.1). Mn, Cu, Ni, As и Ba определены в конденсатах в меньшем количестве.

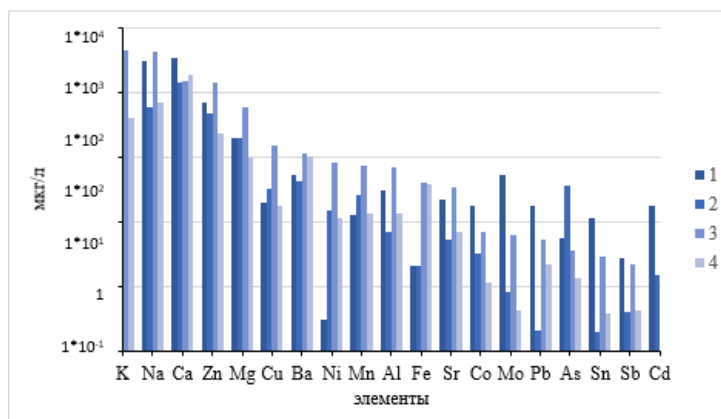


Рис. 1. Химический состав конденсатов. 1 – Урской отвал, 2 – старые траншеи Тувакобальт, 3 – Талмовские Пески, 4 – Ново-Берикульское хвостохранилище.

Обсуждение

Поскольку нормативных документов по индексам опасности и ПДК для микроэлементов в конденсатах геогаза не разработано, авторы провели сравнение с фоновыми значениями.

$$K = \frac{C(\text{конд})}{C(\text{фон})}, \quad (1)$$

где K – коэффициент превышения; $C(\text{конд})$ – средняя концентрация, мкг/л; $C(\text{фон})$ – фоновая концентрация, мкг/л.

Превышение фоновых значений в конденсатах показаны на рис. 2.

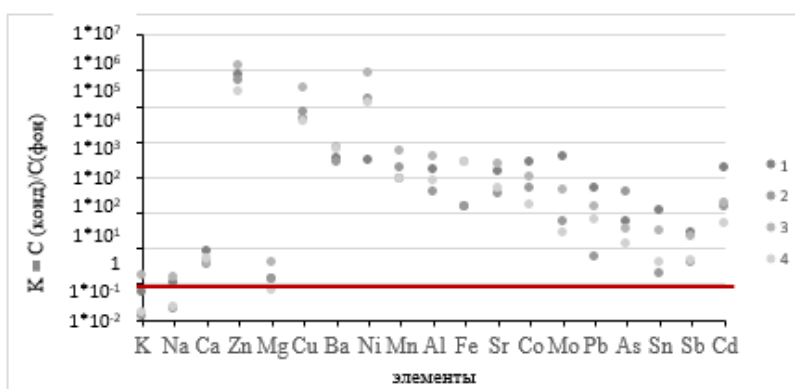


Рис. 2. Превышение фоновых значений в конденсатах. 1 – Урской отвал; 2 – старые траншеи Тувакобальт; 3 – Талмовские Пески; 4 – Ново-Берикульское хвостохранилище, — фоновые значения.

Содержание тяжелых металлов над поверхностью хвостохранилищ сульфидных отходов обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва превышает фоновые значения во всех наблюдаемых точках в среднем в 1000 раз.

Особенно выделяется загрязнение опасными металлами 1 класса: содержание мышьяка (As) превышает фон в 15-400 раз, кадмия (Cd) – в 50-2000 раз, свинца (Pb) – в 6-500 раз, а цинка (Zn) – в колоссальные 1000-1000000 раз.

Заключение

Как показали полевые наблюдения, сульфидные отходы обогащения руд в Кемеровской области и в Республике Тыва представляют собой постоянный источник загрязнения приземного слоя атмосферы. Исследования показали, что концентрация тяжелых металлов в атмосферном воздухе над поверхностью этих хранилищ превышает естественный, фоновый уровень в среднем в 1000 раз.

Особую тревогу вызывает значительное превышение концентрации тяжелых металлов 1 класса опасности, которые оказывают наиболее негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. В частности, содержание мышьяка (As) превышает фоновые значения в 15-400 раз, кадмия (Cd) – в 50-2000 раз, свинца (Pb) – в 6-500 раз. Наиболее критичная ситуация наблюдается с цинком (Zn), концентрация которого превышает норму в диапазоне от 1000 (урской отвал) до 1000000 (Талмовские пески) раз.

Такое масштабное загрязнение представляет серьезную угрозу для экосистемы региона, в том числе для почв, водных ресурсов и растительности. Кроме того, высокое содержание тяжелых металлов может негативно сказаться на здоровье населения, проживающего вблизи хвостохранилищ, увеличивая риск развития различных заболеваний. Необходимы срочные меры по комплексному исследованию масштабов загрязнения, разработке и внедрению эффективных технологий рекультивации хвостохранилищ и минимизации негативного воздействия на окружающую среду и здоровье людей.

Благодарности

Работа выполнена по государственному заданию ИНГГ СО РАН (проект 0266-2022-0028).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // Applied Geochemistry. – 2011. – №26 (11). – P. 1777-1791.
2. Lottermoser B., Lottermoser B.G. Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts. – Springer Berlin Heidelberg, 2010. – 335 p.
3. Bortnikova S., Bessonova E., Gaskova O. Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia // Applied Geochemistry. – 2012. – №27 (11). – P. 2238-2250.
4. Bortnikova S., Manstein Y., Saeva O., Yurkevich N., Gaskova O., Bessonova E., Romanov R., Ermolaeva N., Chernuhin V., Retsky A. Acid Mine Drainage Migration of Belovo Zinc Plant (South Siberia, Russia) // Water Security in the Mediterranean Region : An International Evaluation of Management, Control, and Governance Approaches. – Dordrecht : Springer, 2011. – P. 191-208.

5. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // *Applied Geochemistry*. – 2015. – №57. – P. 157-177.
6. Minnaar A. Water pollution and contamination from gold mines: acid mine drainage in Gauteng Province, South Africa. // *Water, Governance, and Crime Issues*. – Cham, Springer, 2020. – P. 193-219.
7. Sun J., Strosnider W.H.J., Nairn R.W., LaBar J.A. Water quality impacts of in-stream mine tailings on a headwater tributary of the Rio Pilcomayo, Potosí, Bolivia // *Applied Geochemistry*. – 2019. – Vol. 113. – P.104464.
8. Bodenan F., Baranger P., Piantone P., Lassin A., Azaroual M., Gaucher E., Braibant G. Arsenic behaviour in gold-ore mill tailings, Massif Central, France: hydrogeochemical study and investigation of in situ redox signatures // *Applied Geochemistry*. – 2004. – №19 (11). – P. 1785-1800.
9. Gaskova O. L., Bortnikova S.B. On the quantitative evaluation of the neutralizing potential of host rocks // *Geochemistry International*. – 2007. – № 45 (4). – P. 409-412.
10. Hiller E, Lalinská B, Chovan M, Jurkovič Ľ, Klimko T, Jankulár M, Hovorič R, Šottník P, Fláková R, Ženišová Z, Ondrejková I. Arsenic and antimony contamination of waters, stream sediments and soils in the vicinity of abandoned antimony mines in the Western Carpathians, Slovakia // *Applied Geochemistry*. – 2012. – №27 (3). – P. 598-614.
11. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода - взвешенное вещество - донные отложения речных экосистем. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН; ИВЭП СО РАН, 2001. – 58 с.
12. Батоян В.В., Касимов Н.С. Геохимические исследования донных осадков внутренних водоемов // *Круговорот вещества и энергии в водоемах: Материалы докл. VI Всесоюз. лимнол. совещ.* – Иркутск, 1985. – Вып. V. – С. 80.
13. Mukherjee A.B., Kabata-Pendias A. Trace elements from soil to human. – Springer, 2007. – P. 368-378.
14. Голубев Д. А., Крупская Л. Т., Морин В. А. Состояние лесной растительности в условиях техногенного загрязнения в границах влияния хвостохранилища // *Лесохозяйственная информация*. – 2015. – № 4. – С. 87-93.
15. Гудкова О. В., Юргенсон Г. А. Содержание тяжелых металлов в полыни Гмелина на территории Шерловогорского горнорудного района // *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование : материалы II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана*. – Чита: Забайкальский государственный гуманитарно-педагогический университет им. Н.Г. Чернышевского, 2008. – С. 56-58.
16. Тамахина А. Я., Локьяева Ж. Р. Мониторинг состояния растительного покрова хвостохранилища Тырнаузского вольфрамо-молибденового комбината // *Инновационные технологии в растениеводстве и экологии : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения ученого-микробиолога-агроэколога, заслуженного работника высшей школы России, заслуженного деятеля науки Северной Осетии, доктора сельскохозяйственных наук, профессора Александра Тимофеевича Фарниева*. – Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2017
17. Артамонова В. С., Танасиенко А. А., Бортникова С. Б. Современные аспекты ремедиации биологических свойств городских почв // *Сибирский экологический журнал*. – 2005. – Т. 12. – № 5. – С. 855-864.
18. Nriagu J.O. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere // *Nature*. – 1979. – Vol. 279. – P. 409-411.
19. Csavina J., Field J., Taylor M.P., Gao S., Landázuri A., Betterton E.A., Sáez A.E. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. // *Science of the Total Environment*. – 2012. – Vol. 433. – P. 58-73.

20. 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.
21. Wang Q., Wang X., Cheng Zh. [et al.] Geogas-Carried Metal Prospecting for Concealed Ore Deposits: A Review of Case Studies in China // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13. – № 12. – P. 1553.
22. Zhou Z., Tao S., Xu F., Dawson R. A physical-mathematical model for the transport of heavy metals and toxic matter from point sources by geogas microbubbles // *Ecological Modelling*. – 2003. – Vol. 161. – № 1-2. – P. 139-149.
23. Новиков Л. В., Кузьмин А. Г., Титов Ю. А. Анализ многомерных данных по составу газов, выделяемых из разломов земной поверхности // *Научное приборостроение*. – 2023. – Т. 33. – № 1. – С. 86-94.
24. Алехин Ю. В., Дроздова О. Ю., Завгородняя Ю. А., Мотузова Г. В. Миграция элементов в подзолистой почве Владимирской Мещёры: лабораторный эксперимент // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. – 2013. – № 6. – С. 53-60.
25. Вредные химические вещества. Неорганические соединения элементов I-IV групп: Справ. изд. / под ред. В. А. Филатова и др. – Л.: Химия, 1988. – 512 с.
26. ГОСТ Р 53381-2009. Почвы и грунты. Грунты питательные. Технические условия.
27. ГОСТ 17.4.1.0283. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.

© А. Ю. Девятова, С. Б. Бортникова, 2025