

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ АU И АG МЕЖДУ ОТХОДАМИ ОБОГАЩЕНИЯ РУД НОВО-УРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ТОРФОМ В СИСТЕМЕ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

И.Н. Мягкая¹, Е.В. Лазарева¹, М.А. Густайтис¹, Б.Л. Щербов¹, С.М. Жмодик^{1,2}

*1 – Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т. Коптюга, 3,
Россия;*

2 – Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2, Россия

Представлены данные о накоплении Au и Ag в торфах, контактирующих с сульфидсодержащими отходами горно-обогатительного производства, на примере потока рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область). Установлено, что содержания Au в торфе в среднем в 10 раз выше, чем в самих отходах. Средние содержания Ag в обоих типах вещества близки, но в торфе установлены локальные участки накопления элемента, где его содержание может превышать 500 г/т.

золото, серебро, сульфидсодержащие отходы обогащения, торф

AU AND AG REDISTRIBUTION BETWEEN REFUSE ORE OF THE NEW URSK DEPOSIT AND PEAT IN THE SYSTEM OF TAILINGS STORAGE

I.N. Myagkaya, E.V. Lazareva, M.A. Gustaitis, B.L. Shcherbov, S.M. Zhmodik

The paper presents data on Au and Ag accumulation in peats contacting with sulphide-bearing refuse ore of mining-processing industry on the example of dispersion trains of the Ursk tailings storage (Kemerovo region). It is established that the Au contents in peat are on the average 10 times higher than in the refuse ores themselves. Ag average contents in both substance types are close but local sites of the element accumulation were found in the peat where its content can exceed 500 ppm.

gold, silver, sulphide-bearing refuse ore, peat

Складированные отходы обогащения оказывают неблагоприятное влияние на окружающие территории. Поэтому большинство работ по этой теме посвящено изучению окислительных процессов и воздействию кислых дренажных растворов на компоненты окружающей среды [2, 4, 14]. Однако накопленные в мире к настоящему времени материалы отходов обогатительного производства, содержащие недоизвлеченные полезные компоненты, может стать базой для формирования техногенных месторождений. Поведение Au в условиях хвостохранилищ изучено недостаточно, хотя известны его высокая подвижность в гипергенных условиях [6, 10, 15] и случаи образования «нового», переотложенного, хемогенного Au⁰ в природных и техногенных системах [7, 9]. Авторами ранее установлено накопление золота в торфе, который в течение длительного времени (более 50 лет) контактирует с сульфидсодержащими отходами обогащения [8].

Торфяное вещество представляет собой геохимический барьер для различных элементов, включая благородные металлы (БМ) [1, 3]. В современных природных торфяниках юго-восточной части Западно-Сибирской платформы выявлены аномально высокие содержания Au (0,6–16 мг/т, максимальное 160 мг/т) [13]. В данной работе

рассматриваются особенности распределения Au и Ag в различном веществе потока рассеяния Урского хвостохранилища, включая природный органический барьер.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Урское хвостохранилище отходов обогащения золотополиметаллических серноколчеданных руд и руд зоны окисления Ново-Урского месторождения расположено на территории Урского рудного поля (северная часть Салаирского кряжа). Отходы складированы в два отвала высотой 10–12 м; первый сложен отходами первичных руд и содержит не менее 40 % пирита, второй – отходами руд зоны окисления (рис. 1). Содержания элементов в отходах приведены в табл. 1. Выше отвалов расположены затопленный карьер и породные отвалы. Воды природного ручья, дренируя отвалы, превращаются в кислые растворы и через 0,7 км впадают в р. Ур [8].

Таблица 1. Содержание элементов в отходах, складированных в отвалы

Тип вещества	Na	Mg	Al	K	Ca	Fe	Ba	Mn	Cu	Zn	Ag	Au	Hg	Pb
	%								г/т					
Отходы первичных руд	2	1,3	0,2	1,5	3	25	16	25	122	174	15	0,6	59	1540
Отходы руд зоны окисления	0,5	0,1	2	0,5	0,3	7	4	45	100	134	11	0,47	65	1690

Незакрепленные отвалы с 1940-х гг. размывались сезонными осадками и сносились в заболоченный лог. В потоке рассеяния выделены три зоны: ближняя (60 м от отвалов), средняя (в 130 м), удаленная (600 м) [5]. Из-за неровности рельефа средней зоны происходит разделение на две изолированные области (см. рис. 1), западная заполнена преимущественно отходами первичных руд, восточная – отходами руд зоны окисления. Торфяник заболоченного участка выжжен кислыми дренажными растворами и покрыт снесенными отходами, над которыми сохранились остатки болотных кочек и пней деревьев. Восточная часть торфяника постоянно обводнена дренажными растворами.

На территории потока рассеяния опробованы снесенные отходы и торф в закопушках (глубина до 20 см; через 15–20 м; см. рис. 1). Выделено пять групп веществ: 1) отходы; 2) смесь отходов (преобладают) с небольшим количеством торфа и новообразованными охрами; 3) торф; 4) торф (преобладает) с отходами; 5) смесь торфа и отходов, заросшая мхом (расположена в нижней части восточной области средней зоны потока рассеяния).

Содержание Au и Ag определялось в аккредитованном аналитическом центре ИГМ СО РАН методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием спектрометра 3030 В (фирма Perkin-Elmer) и фотометра Solar М6 (фирма Thermo Electron).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Воды дренажного ручья соленые (TDS до 5 г/л), сильнокислые (рН 2–2,7, Eh 665–720 мВ), сульфатные, алюминий-железистые [12]. Концентрации Au в дренажном ручье у отвалов варьируют в зависимости от сезона от 0,2 до 1,2 мкг/л; Ag – от 0,01 до 0,3 мкг/л. С удалением от отвалов в дренажном ручье увеличивается рН, а концентрации Au снижаются до 0,003 мкг/л, Ag – до 0,008 мкг/л [8].



Рис. 1. Схема хвостохранилища и отбора проб.

1 – лесная зона; 2 – жилые кварталы; 3 – карьер; 4 – породный отвал; 5 – отходы первичных руд; 6 – отходы руд зоны окисления; 7–8 – ближняя зона, представленная веществом отходов: 7 – первичных руд, 8 – руд зоны окисления; 9–12 – средняя зона представленная веществом отходов: 9 – первичных руд, 10 – руд зоны окисления, 11 – смесью отходов первичных руд и руд зоны окисления, 12 – руд зоны окисления; 13 – главный дренажный ручей; 14 – техногенный пруд; 15 – удаленная зона; 16 – переслаивание отходов двух типов; 17 – условная граница, делящая поток рассеяния на зоны; 18 – точки опробования.

Содержания БМ в веществе потока рассеяния варьируют как в пределах выборки, так и между разными типами материала (табл. 2). Наиболее однородные содержания золота и серебра характерны для снесенных отходов, отмечены отдельные высокие содержания Au и низкие Ag, сильно оторванные от общей массы значений. Среднее и медиана по выборке, описывающей снесенные отходы, близки. Закон распределения логнормальный (для Ag) и близкий к нему (для Au). В отходах с небольшой долей торфа распределение Au и Ag очень близкое, но доля образцов с содержанием Au, превышающим 1 г/т больше, за счет чего выше среднее содержание и медиана по выборке; чуть более высокие значения характерны и для Ag.

Во всех трех типах торфяного вещества содержания Au резко превышают его содержания в отходах, демонстрируя накопление элемента на биогеохимическом барьере [1, 3, 13]. При этом содержания варьируют в широких пределах, среднее и медиана по выборке значительно разнятся: средние арифметические значения для Ag в трех типах торфяного вещества составляют 30, 14 и 7 г/т, Au – 6,4; 12 и 7 г/т (см. табл. 2). Закон распределения для всех этих типов материала стремится к логнормальному.

Рассмотрение корреляционно-регрессионных закономерностей между Ag и Au (рис. 2) показывает следующее. В снесенных отходах содержания Au варьируют не столь сильно, как Ag (см. рис. 2, а–в). Коэффициенты корреляции Ag–Au в отходах (0,52) и в отходах, смешанных с органическими остатками и охрами (0,43), свидетельствуют о слабой

положительной зависимости между содержаниями БМ. Скорректированный коэффициент детерминации дает основание предположить отсутствие удовлетворительной аппроксимации (см. табл. 2). Так, бóльшая часть данных о содержаниях БМ непосредственно в отходах формирует довольно плотное облако рассеяния (см. рис. 2, б). Для отходов, смешанных с торфом и охрами, распределение не столь плотное (см. рис. 2, в). В обоих случаях «выбросы» связаны с частичным обогащением/обеднением вещества, которые установлены в западной и восточной частях средней зоны потока рассеяния.

Таблица 2. Статистические данные по перераспределению Ag и Au в веществе потока рассеяния

Характеристики	Отходы, n = 65		Отходы +торф + охры, n = 26		Торф, n = 25		Торф + отходы, n = 86		Торф + отходы + охры + мох, n = 38	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Содержание, г/т										
минимальное	0,1	0,4	0,14	1,8	0,19	0,28	0,18	0,57	0,1	0,47
максимальное	3,5	28	3,5	34,5	80	564	155	60	10	21
среднее	0,49	13	0,9	12,5	6,4	30	12	14	1,9	7
медиана	0,39	13	0,5	11	0,83	6,8	6	10,5	1	4,9
Коэффициент корреляции	0,52		0,43		0,85		0,03		0,67	
Скорректированный коэффициент детерминации	0,26		0,15		0,9		-0,01		0,55	

Примечание. n – число проб.

Обеднение БМ характерно для отходов, не содержащих в большом количестве гидроксидов Fe(III), тогда как при их обилии содержания Ag увеличиваются в связи с тем, что Ag является изоморфной примесью минералов группы алунит-ярозит [16]. Также повышенные содержания Ag в отходах объясняются присутствием в них первичных пирита и барита, содержащих в качестве включений сохранившиеся исходные минералы серебра – жеффруаит ((Ag,Cu,Fe)₉(Se,S)₈) и науманнит (Ag₂Se). Если отходы смешаны с торфом и охрами, растет концентрация и Ag и Au (см. рис. 2).

В веществе торфяника содержания Au и Ag варьируют сильнее, чем в отходах, особенно широко – Au (три порядка). Максимальные содержания близки или выше 100 г/т. Разброс содержаний Ag – два порядка, лишь в одной пробе достигает 564 г/т (см. рис. 2, г, д). Это сказывается и на форме облака распределения. В торфах, не смешанных с отходами, вариация данных менее сильная (см. рис. 2, г), чем в неоднородном торфосодержащем веществе (см. рис. 2, д). «Выбросы», связанные с невысокими содержаниями БМ, относятся к торфам, контактирующим с отходами первичных руд, а связанные с обогащением БМ зафиксированы в восточной части средней зоне потока рассеяния, которая находится в обстановке постоянного обводнения дренажными водами и покрыта отходами руд зоны окисления. Кроме того, в этих обогащенных пробах установлены новообразованные

минералы, которые непосредственно влияют на содержания БМ. Высокие содержания Ag в торфе связаны с формированием селенсодержащих сульфидов ртути с примесью Ag и иодида серебра. Повышенные концентрации золота обусловлены наличием аутигенного наноразмерного высокопробного Au⁰. Все они обнаружены в восточной части обводненной средней зоны [8].

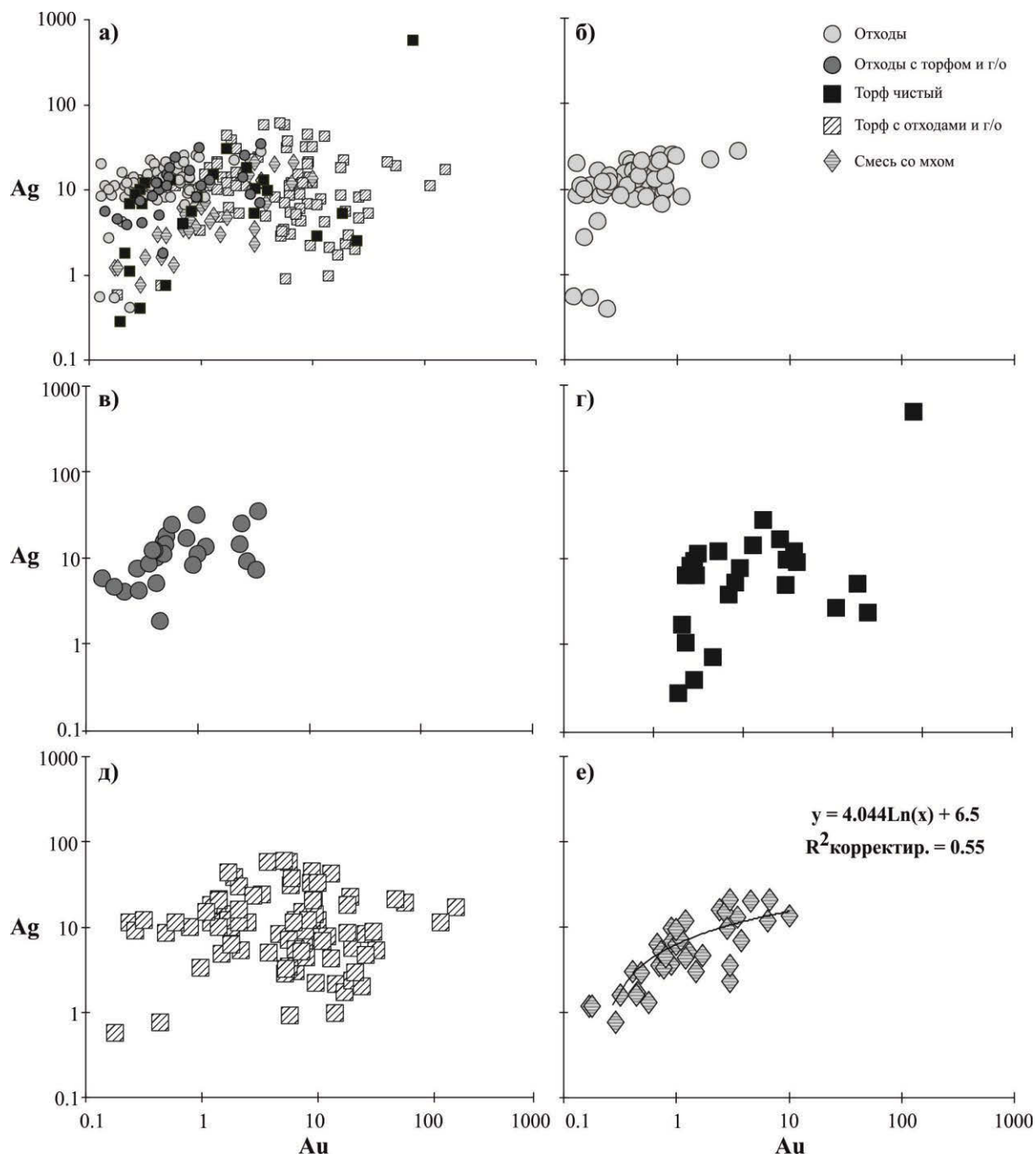


Рис. 2. Корреляционная зависимость содержаний (г/т) Ag от Au в твердом веществе потока рассеяния (г/о – гидроксиды Fe(III); R²корр. – скорректированный коэффициент детерминации).

В резко отличающемся типе вещества (торф с отходами руд зоны окисления и охрами, поросший мхом) корреляционно-регрессионным анализом установлена прямая

положительная логарифмическая корреляционная зависимость между содержаниями Ag и Au (см. рис. 2, е, табл. 2).

Итак, на территории Урского хвостохранилища установлено концентрирование БМ, особенно золота в торфе, контактирующем с отходами обогащения и дренажными растворами. Серебро в торфе распределено относительно равномерно, тогда как золото – крайне неравномерно. Для обоих элементов отмечаются частично совпадающие участки, где происходит их наиболее активная аккумуляция. Эти участки расположены в области постоянного обводнения дренажными водами и покрыты отходами руд зоны окисления. Концентрирование сопровождается формированием Au⁰ и серебросодержащих минеральных фаз. Прямая корреляционная зависимость Ag от Au установлена только в одном случае, на участке, где вещество торфа и отходов частично поросло свежим мхом; однако содержания благородных металлов здесь не самые высокие. Это можно объяснить тем, что определенная часть Au и Ag переносится в виде микро- и наночастиц первичных минералов БМ и осаждается на «моховом фильтре», существование которого установлено ранее [11]. Содержания Au и Ag в торфяном веществе значительно превышают таковые в первичных рудах, достигая ураганных значений, что позволяет рассматривать систему хвостохранилища в качестве модели, формирующей техногенные месторождения.

Авторы благодарят В. Н. Ильину (ИГМ СО РАН) за высококачественные аналитические работы. Исследования поддержаны РФФИ № 14-05-00668, ИП СО РАН № 94 и МинОиН РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко В.А., Братская С.Ю., Якушевич А.С. и др. Гуминовые кислоты бурых углей юга Дальнего Востока России: Общая характеристика и особенности взаимодействия с благородными металлами // Геохимия, 2012. № 5. С. 483–493.
2. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал "Гео", 2003, 120 с.
3. Варшал Г.М., Велюханова Т.К., Чхетия Д.Н. и др. Сорбция на гуминовых кислотах как основа механизма первичного накопления золота и элементов группы платины в черных сланцах // Литология и полезные ископаемые, 2000. № 6. С. 605–612.
4. Гаськова О.Л., Бортникова С.Б., Кабанник В.Г. и др. Особенности загрязнения почв в районе хранилища отходов пиromеталлургического извлечения цинка на Беловском цинковом заводе // Химия в интересах устойчивого развития, 2012. Т. 20(4). С. 419–428.
5. Густайтис М.А., Лазарева Е.В., Богущ А.А. и др. Распределение ртути и её химических форм в зоне сульфидного хвостохранилища // ДАН, 2010. Т. 432(5). С. 655–659.
6. Дутова Е.М., Букаты М.Б., Неволько А.И. и др. Гидрогенное концентрирование золота в аллювиальных россыпях Егорьевского района (Салаир) // Геология и геофизика, 2006. Т. 47(3). С. 364–376.

7. Жмодик С.М., Калинин Ю.А., Росляков Н.А. и др. Наночастицы благородных металлов в зоне гипергенеза // Геология рудных месторождений, 2012. Т. 54. №2. С. 168–183.
8. Мягкая И.Н., Лазарева Е.В., Густайтис М.А. и др. Золото в системе сульфидные отходы и торфяник как модель поведения в геологических процессах // Доклады АН, 2013. Т. 453. № 2. С. 201–206.
9. Осовецкий Б.М. Наноскульптура поверхности золота. Пермь, Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2012. 232 с.
10. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза. Новосибирск, Наука, 1981, 239 с.
11. Тайсаев Т.Т. Биогенная концентрация золота в ландшафтах золоторудных полей гольцовой зоны // Доклады АН СССР, 1988. Т. 301. № 4. С. 871–976.
12. Щербакова И.Н., Густайтис М.А., Лазарева Е.В. и др. Миграция тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) в ореоле рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) // Химия в интересах устойчивого развития, 2010. Т. 18. № 5. С. 621–633.
13. Arbuzov S.I., Rikhvanov L.P., Maslov S.G. et al. Anomalous gold contents in brown coals and peat in the south-eastern region of the Western-Siberian platform // Of Coal Geol., 2006. V. 68. P. 127–134.
14. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L. et al. The Geochemistry of Acid Mine Drainage // Treatise on Geochemistry, 2003. V. 9. P. 149–204.
15. Bowell R.J. Supergene gold mineralogy at Ashanti, Ghana: implications for the supergene behavior of gold // Miner. Mag., 1992. V. 56. P. 545–560
16. Dill H.G. The geology of aluminium phosphates and sulphates of the alunite group minerals: a review // Earth-Sci. Rev., 2001. V. 53. N 1-2. P. 35–93.