

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ НА ГОРНО-РУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ГОРНОГО И РУДНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев, О. И. Гусева

Алтайская государственная академия образования им. В. М. Шукшина, г. Бийск

Поступила в редакцию 24 февраля 2012 г.

Аннотация. Техногенное загрязнение экосистем, вызванное деятельностью горно-рудных предприятий Рудного и Горного Алтая, оценено на основе биогеохимических индикаторов загрязнения. Содержание тяжелых металлов проанализировано в различных растениях вблизи горных предприятий. Тяжелые металлы поглощаются растениями селективно из почв и воздушной среды. Состав тяжелых металлов в растениях определяется составом руд на месторождениях. Аномальные содержания ртути в растениях Синюхинского рудного поля связаны с процессами цианирования золота на золотоизвлекающей фабрике.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биогеохимические индикаторы, растения, экосистемы, загрязнение.

Abstract. Technogenic pollution of ecosystems causing by activity mining enterprises of Rudny and Mountain Altay revealed on basis biogeochemical indicators. Content of heavy metals analyzed in different plants in mining enterprises. The heavy metals absorb selectively from soil and air environment. Composition of heavy metals in plants determine by composition of ores on the deposits. Anomalous content of Hg in the plant of Sinukhinskoe ore district related with process of cyanidation for selection of gold on the gold-extraction factory.

Key words: heavy metals, biogeochemical indicators, plants, ecosystems, pollution

Введение

Биогеохимические индикаторы загрязнения окружающей среды в последнее время привлекают всё большее внимание экологов, так как тяжёлые металлы в технократический век входят в цепи питания растения – животные – человек. Это приводит к значительным проблемам экологического состояния экосистем и здоровья человечества. Огромный вклад в загрязнение окружающей среды вносят горнорудные предприятия, в особенности, если эксплуатация различных месторождений длилась несколько сотен лет. Большую долю в загрязнение окружающей среды вносят горнорудные предприятия, где извлечение металлов связано с применением вредных химических веществ, как это имеет место на золото – извлекательных фабриках, использующих цианирование для извлечения золота. Многолетний стресс, который испытывали почвы, воздушная среда, поверхностные водотоки привели к тому, что растительность в таких аномальных ареалах произрастания накапливает значительные концентрации вредных веществ.

На Алтае известны различные горнорудные предприятия, оказывающие значительное техногенное влияние на природные экосистемы: в Рудном Алтае – Золотушинское, Змеингорское, Корбалихинское и другие золото-колчеданные барит-полиметаллические; в Горном Алтае – Синюхинское золото-медно-скарновое, Калгутинское молибден-вольфрамовое кварцево-грейзеновое, Акташское, Чаган-Узунское ртутнорудные и другие. Некоторые из них существуют и действуют ещё с XVIII века (Золотушинское, Змеиногорское). Вокруг них были созданы посёлки, и техногенное воздействие на экосистемы в процессе отработки и обогащения руд создали весьма напряжённую обстановку со значительным загрязнением почв, донных отложений малых рек. Загрязнение тяжёлыми металлами природных систем привело к тому, что опасные концентрации металлов в районе некоторых горнорудных предприятий вошли в цепь питания: растения – животные – человек [1].

Методика эксперимента

На Синюхинском золото-медно-скарновом месторождении опробованы новые методические приёмы для оценки экологического состояния ок-

ружающей среды. В процессе проведения биогеохимических поисков рудных тел с участием авторов (1992–1999 гг.) проведены исследования и по выявлению масштабов захвата, и биологическому накоплению тяжелых металлов различными видами растений над участками рудных тел. Поиски рудных тел проводились по диффузионным геохимическим ореолам восходящей миграции. Известно, что в потоке диффундирующего вещества присутствуют все те элементы первичного ионного геохимического поля, для которых отмечается разность концентраций в рудных телах и перекрывающих их породах. Движение ионов в пристеночном слое жидких плёнок способствует сохранению элементарных парагенезисов, которые существуют в материнских первичных рудах. Последнее позволило разработать объективные критерии интерпретации вторичных ореолов диффузионной природы с позиций парагенетического анализа.

Ранее биогеохимические поиски осуществлялись на основе анализа золы растений после их сжигания. Такая методика определения концентраций элементов в растениях приводила к искажению истинных содержаний элементов в растениях, так как при озолении проб происходит потеря некоторой части летучих элементов (Mo, V, U, Zn, B, Au, As, Sb, Bi, Se, Te, Pb, Cd, Tl, Hg), которая имеет наибольшую величину (от 50 до 90 %) в не измельченных пробах ветвей, корней, коры и древесины для Cd, Pb, Tl, Zn, B, As, Bi, а для ртути она составляет даже 90–97 % [2].

На Синюхинском месторождении апробирована методика определения химических элементов в растениях без озоления материала, а выявление и интерпретация ореолов диффузионной природы, пригодных для биогеохимических целей, выполнена с использованием высокочувствительной съёмки с рентген-радиометрическим анализом (РРА) на аппаратуре типа NOKKIA (Лаборатория Санкт-Петербургского университета). Вторичные ореолы диффузионной природы представляют собой вертикальную проекцию погребённых рудных тел и фиксируются при мощности перекрывающих отложений до 600 м. При РРА анализируемый слой в листьях, ветвях, коре растений составляет первые микроны поверхности, где концентрируется большая часть тяжелых металлов, накопленных растениями за их жизнь.

Интерпретация выделенных при таких съёмках аномалий проводится с позиций парагенетического анализа. Сонахождение элементов в объекте исследований не является критерием их парагенетическо-

сти. Для выделения природных парагенетических ассоциаций элементов, обусловленных тем или иным компонентом ландшафта, применяют методы многомерной статистики. Наиболее эффективен для этих целей метод главных компонент (МГК) факторного анализа, позволяющий выявлять взаимосвязи элементов в отдельных процессах [3].

Перед проведением биогеохимической съёмки были выполнены опытно-методические работы по выявлению элементов-индикаторов руд Синюхинского месторождения на той же самой аппаратуре РРА. Изучены рентгеновские спектры руд месторождения с анализом проб (более 120) на широкий круг элементов: Fe, Cu, Zn, Pb, As, Zr, Nb, Y, Sr, Rb, Ba, Se, Tl, Ag, Bi, Sb, Co. К числу элементов-индикаторов отнесены: Fe, Cu, Zn, Pb, As, Zr, Sr, Ag, Bi, Sb, Co.

Результаты исследований

При биогеохимической съёмке на Синюхинском месторождении было отобрано 4000 биогеохимических проб по профилям (расстояние между профилями – 200 м, шаг опробования по профилю – 10 м) из наиболее распространённых растений в рудном поле (мхов, папоротников, осоки, мать-и-мачехи). В дальнейшем анализ проводился по всем предварительно высушенным растениям только на элементы-индикаторы. Следует отметить, что концентрации таких элементов как Cu, Ag, Bi, Sb в некоторых растениях в районе рудных тел на порядок и более превышали таковые на участках безрудного пространства. Другим важным свидетельством аномально высоких концентраций тяжелых металлов в надрудном пространстве является отсутствие лишайников в этих местах, которые чутко реагируют на повышенные концентрации металлов и в почве, и в диффузионных геохимических ореолах.

Результаты анализа проб, отобранных в районе медно-золоторудных тел сведены в табл. 1.

Анализ закономерностей концентраций элементов в растениях показывает, что наибольшие концентрации тяжелых металлов обнаруживаются во мхах, а наименьшие – в мать-и-мачехе. Обращает на себя внимание очень высокий коэффициент концентрации висмута почти во всех растениях Синюхинского рудного поля, что намного превышает приводимые оценки по литературным данным [4]. Вероятно, это объясняется тем, что в анализируемом районе наряду с высокими концентрациями висмута в рудах имеют место и благоприятные факторы гипергенного перевода этого металла в

легкорастворимые формы, что способствует его повышенной миграционной способности в диффузионных ореолах с последующей фиксацией в растениях в аномально высоких концентрациях.

Преимущество использования МГК при выявлении парагенетических ассоциаций элементов в

природных объектах заключается в том, что выявляется структурное единство модели, описывающей поведение химических элементов системы при изменении внешних условий, и модели метода главных компонент [3].

Таблица 1

Содержания элементов-индикаторов (%) и значения коэффициентов концентрации в растениях Синюхинского рудного поля в районе рудных тел

Элементы	Мох, n = 155		Папоротник, n = 163		Осока, n = 95		Мать-и-мачеха, n = 44		Средний состав золы наземных растений
	С	K _к	С	K _к	С	K _к	С	K _к	
Fe	3,3	4,1	2,1	2,6	2,0	2,5	2,2	2,75	0,8
Cu	0,015	7,5	0,013	6,5	0,013	6,5	0,014	7,0	0,002
Zn	0,009	3,0	0,0005	1,67	0,004	1,33	0,006	2,0	0,003
Pb	0,0011	2,75	0,009	2,2	0,008	2,0	0,001	2,5	0,0004
As	0,0007	2,33	0,0005	1,67	0,0005	1,67	0,0006	2,0	0,0003
Zr	0,0006	1,5	0,0005	1,25	0,0005	1,25	0,0004	1,0	0,0004
Sr	0,05	1,67	0,04	1,33	0,03	1,0	0,03	1,0	0,03
Ag	0,0002	10,0	0,00007	3,5	0,00007	3,5	0,00008	4,0	0,00002
Bi	0,0007	17,5	0,0005	12,5	0,0004	10,0	0,00032	8,0	0,00004
Sb	0,0012	3,0	0,001	2,5	0,0011	2,75	0,0011	2,75	0,0004
Cd	0,00014	2,8	0,0001	2,0	0,00011	2,2	0,0001	2,0	0,00005
Co	0,0019	4,75	0,0014	3,5	0,0012	3,0	0,0013	3,25	0,0004

Примечание. Коэффициент концентрации K_к есть отношение содержаний элемента в пробах растений Синюхинского рудного поля к среднему содержанию в золе наземных растений по А.И. Перельману [4]; n – количество проанализированных проб по каждому виду растений.

Расчёт факторных нагрузок для наших данных по выборкам анализов для наиболее представительных по объёму выборок мха (n = 155) и папоротника (n = 163) выглядит следующим образом:

$$\Phi \text{ I мха, } D = 61 \%, \text{ Bi}_{0,96} \text{ Ag}_{0,88} \text{ Cu}_{0,61} \text{ Co}_{0,53} \text{ Fe}_{0,42}$$

$$\Phi \text{ I папоротника, } D = 49,8 \%, \text{ Bi}_{0,78} \text{ Cu}_{0,63} \text{ Ag}_{0,51} \text{ Co}_{0,51} \text{ Fe}_{0,34}$$

где $\Phi \text{ I}$ – факторные нагрузки первого порядка, D – вклад факторных нагрузок в процентах; значения факторных нагрузок конкретных элементов даны рядом с элементом при значениях вероятности 0,95 %.

Полученные результаты в сопоставлении с данными табл. 1 показывают, что выявленные парагенетические ассоциации отражают комплексы химических элементов, имеющих природную дисперсию содержаний тяжелых металлов в диффузионных геохимических ореолах, а конкретные значения факторов ранжированы по степени увеличения коэффициентов концентрации или биологического накопления (или аномальности в

опробованных растениях). Парагенные ассоциации химических элементов во мхе и папоротнике имеют черты сходства и различий. У них имеются общие ассоциации элементов (Bi, Ag, Cu, Co, Fe), однако вклад факторных нагрузок и величины их в анализируемых растениях различны. Особенно контрастное различие в фиксации тяжелых металлов намечается для мха и папоротника по таким элементам как Cu и Ag. Если в папоротнике больше концентрируется меди, то во мхе – серебра, что подтверждается их различным положением в иерархическом ряду факторных нагрузок.

Вблизи карьеров участков Рудная Сопка, Западный, Файфановский Синюхинского рудного поля у хвой сосны часто наблюдается заболевание – ауксобилия, проявляющаяся в резко укороченной длине хвоинок и укороченных веточках. Проведено сравнение состава тяжелых металлов в поражённой болезнью хвое и хвое сосны за пределами Синюхинского рудного поля (район селения Чои, табл. 2).

Таблица 2

Содержания элементов-индикаторов (%) и значения коэффициентов концентрации в хвое фонового участка и хвое, поражённой ауксобилией

Элементы	Хвоя, поражённая ауксобилией, n = 15		Хвоя фонового участка (район селения Чоя), n = 11		Средний состав золы наземных растений
	C	K _к	C	K _к	
Fe	3,8	4,75	1,3	1,6	0,8
Cu	0,03	15,0	0,001	0,5	0,002
Zn	0,011	3,7	0,004	1,3	0,003
Pb	0,0018	4,5	0,0003	0,75	0,0004
As	0,0011	3,7	0,0002	0,67	0,0003
Zr	0,0009	2,2	0,0003	0,75	0,0004
Sr	0,08	2,7	0,01	0,33	0,03
Ag	0,0009	50,0	0,00002	1,0	0,00002
Bi	0,0010	25,0	0,00002	0,5	0,00004
Sb	0,0019	4,75	0,00003	0,075	0,0004
Cd	0,00017	3,4	0,00003	0,6	0,00005
Co	0,0020	5,0	0,0003	0,75	0,0004
Hg	0,00003	15,0	0,00002	1,0	0,00002

Полученные данные указывают на то, что в сравнении с концентрациями тяжелых металлов с фонового участка в хвое, поражённой ауксобилией, наблюдается значительное накопление таких элементов, как Fe, Cu, Zn, Pb, As, Zr, Sr, Ag, Bi, Sb, Cd, Co, Hg. При этом повышенные концентрации элементов в хвое, поражённой ауксобилией, в основном, отражают повышенные концентрации их в рудах. Аномально высокое накопление ртути в поражённой хвое, вероятно, связано с рассеянием ртути в результате процессов цианирования при извлечении золота.

Ртутные месторождения Горного Алтая также представляют большую угрозу для здоровья населения, проживающего вблизи этих месторождений (месторождения Акташ, Чага-Узун, Красногорское и другие находятся вблизи посёлков). В Горном Алтае ртутные месторождения образуют несколько зон: Сарасинскую, Сбирячихинскую и Курайскую.

Наибольшую опасность представляют линейные зоны, к которым приурочены месторождения ртути, мышьяка, урана, фтора, свинца, цинка. При этом две такие подзоны (Сарасинская и Курайская) характеризуются повышенной плотностью населения.

Для этих наиболее опасных подзон (Сарасинской и Курайской) вдали от известных месторождений проведено определение не только валовых значений всех элементов в почвах, но и подвижных кислоторастворимых форм тяжелых металлов, доступных растениям. В обеих зонах отобраны

образцы почв в июле 2005 года с глубины 15–20 см. Они проанализированы на содержание подвижных форм U, Hg, Pb, Cu, Zn, Cd, извлекаемых однонормальной азотной кислотой и ацетатно-аммонийным буфером с pH 5,0. Ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8–5,0 (примерно соответствует реакции клеточного сока корневых волосков) извлекает из почвы водорастворимые, обменные карбонатные, не прочно сорбированные почвенно-поглощающие комплексы форм химических элементов, представляющие собой непосредственный источник питания растений – «актуальные запасы». Вытяжка однонормальной азотной кислоты, являющаяся более агрессивным раствором, извлекает, кроме вышеперечисленных, ещё и более прочно сорбированные соединения: поглощённые аморфными гидроксидами железа, марганца, стабильными компонентами почвенного гумуса, а также труднорастворимые соли («потенциальные», или «резервные», запасы).

В районе Сарасинского месторождения (окраина одноименного посёлка) опробованы листья тополя и трава пырея, которые показали значительное накопление многих тяжелых металлов.

Факторные нагрузки для Сарасинского полигона выглядят следующим образом:

Ф I тополя, D = 53,9 %, U_{0,94} Hg_{0,93} Zn_{0,90} Pb_{0,87} Cu_{0,85} Ag_{0,80} Cd_{0,62} Mo_{0,46} Tl_{0,39} Fe_{0,24}.

Ф I пырея, D = 51,9%, U_{0,98} Hg_{0,96} Cu_{0,86} Pb_{0,84} Zn_{0,77} Cd_{0,61} Mo_{0,40} Tl_{0,38} Fe_{0,21} Mn_{0,19}.

Наиболее опасные загрязнения в этих районах (U и Hg) влияют на состояние здоровья населения,

где в цепь питания растения – животные – человек попадают указанные элементы. В Сарасинском посёлке отмечен высокий уровень онкологических заболеваний и болезни крови.

Аналогичные исследования проведены и в районе месторождений золото-колчеданной барит-полиметаллической формации Рудного Алтая в 2005–2009 годах [5]. Для этого типа экосистем (район Змеиногорска) парагенные ассоциации выявлены для листьев тополя и полыни (наиболее распространённых растений в городе). Они целиком определяются составом добываемых полиметаллических руд из золото-колчеданных барит-полиметаллических месторождений, расположенных в черте и вблизи города (Змеиногорское, Корбалихинское, Среднее, Зареченское, Петровское и другие).

Факторные нагрузки представляются в следующем виде:

Ф I тополя, $D = 52,4 \%$, $Ba_{0,97} Cu_{0,93} Zn_{0,91} Pb_{0,89}$
 $Sr_{0,88} Ag_{0,81} Cd_{0,60} Mo_{0,46} Tl_{0,39}$

Ф I полыни, $D = 44,5 \%$, $Ba_{0,92} Ag_{0,91} Cd_{0,85} Zn_{0,81}$
 $Pb_{0,69} Cu_{0,53} Sr_{0,48} Mo_{0,42} Tl_{0,29}$

Значительную роль в парагенетических ассоциациях тяжелых металлов в обоих растениях получили Ba, Cu, Ag, Cd, Tl. Последние два элемента являются примесями в рудах; тем не менее, они оказались важными поллютантами, поглощаемыми растениями.

Для г. Горняк (известное Золотушинское барит-полиметаллическое месторождение и рядом расположенное на территории Казахстана аналогичное по составу месторождение Джискен), где отмечено рождение «жёлтых детей», факторные нагрузки и парагенные ассоциации тяжелых металлов представлены в следующем виде:

Ф I тополя, $D = 59,9 \%$, $Hg_{0,98} Pb_{0,96} Ba_{0,95} Ag_{0,92}$
 $Cu_{0,90} Ti_{0,87} Zn_{0,86} Mo_{0,60} Cd_{0,41} Tl_{0,39}$

Ф I полыни, $D = 48,8 \%$, $Pb_{0,99} Ba_{0,92} Hg_{0,90} Ag_{0,88}$
 $Cu_{0,73} Cd_{0,71} Zn_{0,61} Mo_{0,42} Tl_{0,29} Ti_{0,25}$

Степное барит-полиметаллическое золото-колчеданное месторождение, расположенное в Рубцовском рудном районе, в настоящее время разведывается. Оно расположено в 4 км от посёлка Таловка (в Таловке находится одноименное месторождение, но оно находится на большой глубине и ранее разведывалось скважинами колонкового бурения). На Степном месторождении пройден карьер с отвалами, занимающими значительную площадь (более 2 км²). Месторождение находится в степи и в его районе деревья отсутствуют. Нами опробованы полынь и пырей ползучий (по 15 проб

каждой из трав). Для указанных растений факторные нагрузки представлены в следующем виде:

Ф I полыни, $D = 43,4 \%$, $Ba_{0,90} Ag_{0,87} Cd_{0,81} Zn_{0,81}$
 $Pb_{0,69} Cu_{0,53} Sr_{0,41} Tl_{0,21}$

Ф I пырея, $D = 41,5 \%$, $Ba_{0,92} Ag_{0,90} Cd_{0,82} Zn_{0,80}$
 $Pb_{0,69} Cu_{0,56} Sr_{0,48} Tl_{0,25}$

Характерной особенностью факторных нагрузок на Степном месторождении является значительно меньшие их величины, чем на Змеиногорском и Золотушинском месторождениях. Кроме того, в обоих видах растений отсутствует Mo, что также отличает это месторождение от ранее рассмотренных колчеданных объектов Рудного Алтая.

Обсуждение результатов

Таким образом, на основе полученных результатов установлены биогеохимические индикаторы биологического накопления тяжелых металлов во мхе, папоротнике, осоке и мать-и-мачехе при диффузионном процессе восходящей миграции плёночных вод над рудными залежами Синюхинского месторождения. Из большого числа проанализированных элементов к числу индикаторов биологического накопления можно отнести Bi, Cu, Ag, Co, Fe. Обращает на себя внимание резко аномальные концентрации всех элементов в хвое сосен, поражённых ауксобилией: Fe, Cu, Zn, Pb, As, Zr, Sr, Ag, Bi, Sb, Cd, Co, Hg.

На ртутных объектах Горного Алтая особую тревогу вызывают участки, где помимо ртути имеются месторождения урановых и флюоритовых руд. К таким аномальным зонам относится Сарасинский кластер месторождений, где биогеохимическими индикаторами загрязнения растений являются U, Hg, Pb, Zn, Cu, F и другие элементы. В районе Сарасы поражает резкое снижение биоразнообразия в растительном и животном мире, что, вероятно, обусловлено заражением территории подвижными формами опасных элементов – Hg, U, Pb, Zn, Cd, Bi и других элементов.

На колчеданных барит-полиметаллических месторождениях Рудного Алтая поллютанты в листьях тополя и полыни также отражают состав основных рудных компонентов (Cu, Pb, Zn, Mo, In, Bi, Hg и другие) и некоторых примесных металлов (Tl, Cd). При этом для колчеданных месторождений наблюдается весьма схожий набор поллютантов, отражающий состав руд месторождений.

Заключение

На основе приведенных материалов по накоплению тяжелых металлов в растениях, произрас-

тающих вблизи горнорудных предприятий можно отметить следующее:

– биогеохимическими индикаторами накопления растениями в районе горнорудных предприятий являются комплексные ассоциации металлов, участвующих в составе руд конкретных месторождений;

– растения накапливают в значительных количествах элементы первого и второго классов опасности;

– наиболее опасными являются комплексные рудные поля и месторождения полиметаллов в Рудном Алтае, ртутные, флюоритовые и урановые в Горном Алтае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев А. И. Биогеохимические индикаторы биологического накопления растениями тяжелых металлов

*Алтайская государственная академия образования им. В. М. Шукшина, г. Бийск
А. И. Гусев, доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры географии
anzerg@mail.ru*

*О. И. Гусева, преподаватель кафедры географии
anzerg@mail.ru*

на некоторых месторождениях Алтая / А. И. Гусев, О. И. Гусева // Природные ресурсы Горного Алтая. – Горно-Алтайск, 2010. – № 1. – С. 114–118.

2. Григорян С. В. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений / С. В. Григорян, А. П. Соловов, М. Ф. Кузин. – М. : Недра, 1983. – 191 с.

3. Бугаец А. Н. Математические методы при прогнозировании месторождений полезных ископаемых / А. Н. Бугаец, Л. Н. Дуденко – Л. : Недра, 1976. – 270 с.

4. Перельман А. И. Геохимия ландшафта / А. И. Перельман. – М. : Высшая школа, 1975. – 234 с.

5. Гусев А. И. Биогеохимическая индикация антропогенного загрязнения растительности Алтайских гор / А. И. Гусев, О. И. Гусева // Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – № 7. – С. 17–19.

*The Shukshin Altai State Academy of Education
A. I. Gusev, Doctor of Geology-Mineralogical Sciences,
Professor of Chair Geography, c. Biysk
anzerg@mail.ru*

*O. I. Guseva, The teacher of Chair Geography
anzerg@mail.ru*