

В. И. РАДОМСКАЯ\*, С. М. РАДОМСКИЙ\*, Е. Н. КУЛИК\*\*, Л. М. ПАВЛОВА\*

\*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск

\*\*ОАО ГК «Петропавловск», г. Благовещенск

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ-ТОКСИКАНТОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ НА АЛЫНСКОМ ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (АМУРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

*Проведена оценка содержания элементов-токсикантов, имеющих различный класс опасности, в почвах и надземной части растений в естественных природных ландшафтах и на территории добычи золота открытым способом (Алынское золоторудное месторождение, Амурская область). Установлено, что за три года работы рудника в почве возросли валовые концентрации Pb, V, Zn и As относительно фонового уровня за счет увеличения содержания группы непрочных соединений этих элементов. Деятельность рудника и большая пылевая нагрузка приводят к трансформациям в рядах накопления элементов и выраженному изменению их соотношений в сухом веществе растительности. В растительной биомассе территории выявлены отдельные химические элементы, концентрации которых отражают аккумуляцию токсикантов: содержания As, Mo, Cd, Sb превышают фоновые значения в 3–3,6 раза, а V, Co, Ni — в 2–2,4 раза. Об ухудшении состояния растительности с ростом антропогенной нагрузки свидетельствует изменение отношений Fe/Mn и Pb/Mn. Показатель Pb/Mn в растительности превышает фоновое значение в 3–5 раз, а для клевера — в 32 раза. Анализ биогеохимических параметров почв и растений (расчеты параметров аномальности, содержания мобильных форм элементов в почвах, показателей накопления, а также величины соотношения элементов в растениях) показал, что окружающая среда на территории рудника испытывает экологическую напряженность в связи с открытыми горными работами.*

Ключевые слова: загрязнение почвы, фракционный состав почв, подвижные формы, элементный состав растительности, коэффициенты накопления, биогеохимические параметры.

*We assessed the content levels of toxicant elements that have a different hazard class, in soils and in the aerial part of plants in natural landscapes and on the territory of open-cast gold mining (Albyskoe gold ore deposit, Amurskaya oblast). It is established that during three years of operation of the mine there occurred in the soil an increase in total concentrations of Pb, V, Zn and As with respect to the background level through an increase in content of the group of unstably bound compounds of these elements. The activity of the mine, coupled with a considerable dust load, leads to transformations in the series of accumulation of elements, and to clearly pronounced changes in their relationships in dry mass of vegetation. The vegetation biomass on the mine showed separate chemical elements whose concentrations reflect an accumulation of toxicants: the content levels of As, Mo, Cd and Sb exceed the background values by factors of 3 to 3,6, and V, Co and Ni by factors of 2 to 2,4. A deterioration of the state of vegetation is evidenced by a change of the Fe/Mn and Pb/Mn ratios. The indicator of the Pb/Mn ratio in vegetation exceeds the background value by factors of 3 to 5, and for clover by a factor of 32. Analysis of biogeochemical parameters of soils and plants (calculations of anomaly parameters and content levels of mobile forms of elements in the soil, the accumulation indicators as well as the values of the ratio of elements in plants) showed that the environment on the territory of the mine is experiencing an ecological stress in connection with open-cast mining operations.*

Keywords: soil pollution, fractional composition of soils, mobile forms, elemental composition of vegetation, accumulation coefficients, biogeochemical parameters.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной геохимической чертой горнопромышленных ландшафтов считается слабо контролируемое рассеяние больших масс веществ с аномально высоким содержанием элементов [1]. Техногенные потоки вещества часто на порядки превышают их естественные уровни [2]. Тревожным сигналом должно быть не достижение таких уровней содержания химических веществ в почвах, которые могут вызвать специфические и неспецифические нарушения в состоянии живых организмов, а любые значимые изменения в экосистеме в целом, в сбалансированном потоке химических веществ под влиянием антропогенной нагрузки. Особенно активно процессы горнопромышленного техногенеза с образованием масштабных ореолов рассеяния элементов протекают в районах открытой отработки месторождений.

Уровень влияния на экосистемы золотодобывающих комплексов определяется природными условиями, масштабностью конкретного месторождения и методами его разработки. При карьерной добы-

че руды на природный фон микроэлементов в горных породах, почвах и растительности накладывается техногенная компонента, обусловленная атмосферным переносом тонкодисперсного материала от буровзрывных работ, с мест расположения отвалов. Перечень загрязняющих веществ зафиксирован в отечественных и международных нормативных документах [3–6]. В Программе исследований SCOPE [7] наиболее опасными элементами названы Pb, Cd, Hg, в рекомендациях UNEP [5] — Cd, F, As; в программах США по охране окружающей среды в природных объектах [8] рекомендуется контролировать содержание Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Zn, Pb, Hg, Ni, Ag. Согласно действующему в России ГОСТ «Классификация химических веществ для контроля загрязнения» [6], выделено три класса химических веществ по степени их опасности. К высокоопасным отнесены As, Cd, Hg, Se, Pb, Zn, к умеренно опасным — В, Со, Ni, Мо, Cu, Sb, Cr, к малоопасным — Ва, V, W, Mn, Sr.

В Амурской области, занимающей третье место в России по добыче золота, открытым карьерным способом разрабатывается Албынское золоторудное месторождение. В ноябре 2011 г. была запущена первая очередь горно-гидрометаллургического комбината мощностью 2 млн т руды в год. С момента приобретения лицензии на разведку рудной зоны до запуска производства прошло шесть лет. В 2012 г. производственные мощности рудника были увеличены до 3,6–4 млн т руды в год [9].

Цель данной работы — изучение особенностей распределения, миграции и накопления химических элементов-токсикантов в почвах и растениях на Албынском золоторудном месторождении при открытом способе добычи руды.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Албынское золоторудное месторождение расположено на северо-северо-западе Харгинского рудного узла в пределах Верхнеселемджинского золотоносного района Амуро-Охотского звена Монголо-Охотской складчатой системы.

Важнейшим депо, где накапливаются загрязняющие вещества, являются верхние гумусированные горизонты почв. Здесь для химических веществ создаются геохимические барьеры [10]. Поэтому объектами исследования были верхние горизонты (0–10 см) почвы мониторинговых площадок, расположенных по периметру карьера Албынского рудника на расстоянии 500–800 м (точки 1П, 2П, 3П, 4П) и на фоновой территории (точка 7П) в 30 км от рудного поля; почвогрунты с бортов хвостохранилища (точки 5П, 6П); образцы растительности с мест отбора почв. Пробы растительности с точек 1П, 2П, 3П представляли собой усредненные образцы укосов трав и включали надземные части спиреи дубравколистной (*Spiraea chamaedrifolia* L.), злаков (*Calamagrostis* sp.), лабазника дланевидного (*Filipendula palmata* (Pall.) Maxim.), василистника малого (*Thalictrum minus* L.), латука сибирского (*Lactuca sibirica* (L.) Benth. ex Maxim.). В точке 4П произрастали в основном клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) и осока вздутоносая (*Carex rhynchophysa* C. A. Mey.), а около хвостохранилища — полынь венечная (*Artemisia scoparia* Waldst. et Kit.), иван-чай узколистный (*Chamerion angustifolium* (L.) Holub) и осока вздутоносая. Фоновая площадка также характеризовалась скудной растительностью, здесь были отобраны образцы багульника наибольшего (*Ledum maximum* (Nakai) Khokhr. et Maz.) и осоки Ван-Хьюрка (*Carex vanheurskii* Muell. Arg.). Отбор проб проводили в июле и августе 2013–2014 гг., в период максимального развития вегетативной части растений.

Запас в почве химических элементов, способных переходить в ткани растений, характеризует группа их непрочно связанных соединений, которая включает обменные, комплексные и специфически сорбированные формы [11]. Для выделения вышеперечисленных подвижных форм тяжелых металлов и металлоидов в почвах проведено параллельное экстрагирование растворами: 1 М аммонийноацетатным буфером (NH<sub>4</sub>Ac) с pH 4,8; 1 % ЭДТА в 1 М NH<sub>4</sub>Ac; 1 М HCl и рассчитано их содержание по методике, приведенной в [12].

Содержание элементов в пробах почв, почвенных вытяжках и растительности определяли масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) и атомно-эмиссионным (ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США) методами анализа в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

Оценку степени загрязнения почв проводили методом сравнения с ПДК [3], фоновыми концентрациями элементов в регионе и средними содержаниями элементов в почвах мира [13]. Анализ степени накопления элементов растениями осуществляли в сравнении со среднемировыми значениями [14, 15]. Были рассчитаны коэффициенты накопления (КН) как отношение содержания элемента в сухой массе растений к содержанию его подвижных форм в почве. Если концентрации элементов были меньше предела обнаружения, при расчете использовали значения, равные половине предела обнаружения [16].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рудное поле Албынского золоторудного месторождения сформировано метаморфизованными вулканогенно-осадочными и эффузивными породами основного и кислого состава предположительно палеозойского возраста (афанасьевская и тальминская свиты), прорванными поздне меловыми дайками кислого и основного состава. Основные породы представлены кристаллическими сланцами разного состава с незначительной примесью органического вещества, претерпевшими неоднократное гидротермально-метасоматическое преобразование. Из рудных минералов широко, но весьма неравномерно распространены сульфиды (арсенопирит, пирит, пирротин, халькопирит, галенит, сфалерит, лёллингит, арсенолит); среди вторичных минералов встречаются скородит, мансфельдит, гётит, гидрогётит, лепидокрокит и гематит, реже — сульфосоли свинца, сурьмы, кобальта [17, 18].

Месторождение расположено в физико-географическом районе Горный Север, который представлен природными горно-таежными и гольцовыми ландшафтами на многолетнемерзлых породах. По данным управления Амурской области по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [19], климат района резко континентальный, с суровой продолжительной зимой (средняя температура января  $-33^{\circ}\text{C}$ , при минимуме  $-52^{\circ}\text{C}$ ) и жарким коротким летом (средняя температура июля  $13^{\circ}\text{C}$ , при максимуме  $35^{\circ}\text{C}$ ). Среднегодовое количество осадков 743,5 мм, из которых 185–200 мм выпадает в июле. Почвы на участке Албынского золоторудного месторождения горные буро-таежные иллювиально-гумусовые, по сложению маломощные, с большим количеством щебня во всех горизонтах. По механическому составу они относятся к хрящевато-каменистым суглинкам с очень небольшим содержанием илистой фракции. Основной причиной каменистости почв следует считать медленное выветривание горных пород.

Согласно данным по общему содержанию элементов и их непрочно связанных соединений (табл. 1), концентрации As, Co в почвах всех исследуемых точек, а V, Mn, Zn, Cd, Pb в почвах некоторых превышали и санитарно-гигиенические нормативы, и фоновые показатели. Рассчитанные коэффициенты аномальности [20], отражающие увеличение среднего содержания элемента в технозем в сравнении с фоном, показали, что уровень аномальности As и Cd заметно выше, чем для остальных изучаемых элементов (см. табл. 1). Отношения концентраций металлов в почвах Албынского рудника к усредненному содержанию в почвах мира [13] образуют последовательность с максимальными значениями превышений по As в среднем в 62,5 раза:  $\text{Mn}(0,8) < \text{Ni}(0,9) < \text{Fe}(1,1) < \text{M}(1,2) < \text{V}(1,3) < \text{Cu}(1,4) < \text{Zn}(1,8) < \text{Co}(2,0) < \text{Pb}(2,7) < \text{As}(62,5)$ .

Таким образом, почвы Албынского рудника характеризуются превышением ПДК по Pb и V в некоторых точках до 2 раз и по As для всех обследованных образцов почв — в 6–880 раз. Для остальных элементов разброс содержаний аналогичен характерному для почв Зейско-Бурейской равнины [21]. Повышенная концентрация мышьяка в почве на фоновой площадке свидетельствует, скорее всего, о природных металлогенических особенностях территории.

В почве одновременно присутствуют несколько форм элемента, различающихся своей подвижностью и, соответственно, доступностью для растений [22–24]. На фоновой территории на долю подвижных форм элементов-токсикантов приходятся следующие значения (% от валового содержания):  $\text{Cd}(68,9) > \text{Pb}(66,25) > \text{Mn}(46,59) > \text{Co}(23,72) > \text{Cu}(20,2) > \text{Sb}(19,42) > \text{Zn}(15,95) > \text{Ni}(7,43) > \text{Fe}(6,35) > \text{Sn}(3,02) > \text{As}(2,62) > \text{V}(2,25) > \text{Mo}(0,47)$ . Эти соединения в основном представлены специфически сорбированными формами.

В почвах территории рудника доля подвижных форм элементов-токсикантов увеличивается, по-видимому вследствие аэрогенного загрязнения, связанного с проведением буровзрывных работ, транспортировкой руды, складированием пустой породы, и составляет (% от валового содержания):  $\text{Pb}(79,86) > \text{Cd}(62,4) > \text{Mn}(56,44) > \text{As}(34,95) > \text{Co}(30,28) > \text{Cu}(29,29) > \text{Sb}(26,54) > \text{Fe}(18,84) > \text{Zn}(13,85) > \text{Ni}(11,74) > \text{Mo}(6,39) > \text{Sn}(3,5) > \text{V}(3,35)$ . Но абсолютное содержание подвижных форм этих элементов (мг/кг) не превышает нормативно определяемых ПДК [3]. При этом наибольшие концентрации исследуемых веществ также отмечаются во фракции, представленной специфически сорбированными формами, которую рассматривают как промежуточную, переходную к прочно связанным [11]. Для анализа роли разных форм непрочно связанных соединений элементов было рассчитано их относительное содержание внутри группы. При техногенном воздействии наблюдается изменение соотношений между мобильными формами и увеличение доли обменной, наиболее мобильной формы для всех элементов, что, вероятно, связано с различными физико-химическими свойствами и элементов, и почвы.

Таблица 1

Среднее содержание элементов в почвах поля Албынского золоторудного месторождения, мг/кг

Точка отбора	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Sb	Pb
<i>Валовое содержание</i>													
1П	133,0	1038	41 966	17,2	37,8	39,7	130,0	12,5	4,2	0,40	2,0	2,0	64,3
2П	85,2	480	34 972	12,2	24,0	20,1	64,8	1776,0	2,0	0,13	2,1	3,7	33,5
3П	108,0	573	49 000	16,2	45,2	33,2	110,0	24,0	3,0	0,12	2,4	1,1	<0,06
4П	291,0	1162	68 544	31,1	52,6	37,6	103,0	11,7	2,0	0,30	1,6	2,5	41,9
5П	105,0	581	35 671	11,8	23,6	17,9	75,1	24,2	1,3	0,064	2,3	2,1	14,6
6П	83,4	604	31 474	9,4	21,0	16,2	68,7	29,0	2,1	0,054	2,0	3,9	13,2
7П	104,0	333	32 873	6,0	17,7	14,7	72,1	16,7	3,8	0,04	3,1	1,2	17,3
ПДК [3]	150,0	1500	—	—	—	—	—	2,0	—	—	—	4,5	32,0
Среднее содержание в почвах мира [13]	100,0	850	38 000	8,0	40,0	20,0	50,0	5,0	2,0	0,5	10,0	Нет данных	10,0
Коэффициент аномальности	1,3 0,8–2,8	2,2 1,7–3,5	1,3 1–2,1	2,7 1,6–5,2	1,9 1,2–3	1,9 1,1–2,7	1,3 0,9–1,8	18,7 0,7–106	0,6 0,3–1,1	4,45 1,4–10	0,7 0,5–0,8	2,1 0,9–3,1	1,6 0–3,7
<i>Обменные формы</i>													
1П	0,39	163	430	1,72	2,70	0,93	3,14	0,095	<0,005	0,047	0,001	0,015	1,60
2П	0,41	42	886	2,10	2,06	0,73	2,35	27,88	<0,005	0,038	0,004	0,062	1,40
4П	0,63	27	567	0,91	1,83	2,05	1,40	0,15	<0,005	0,020	0,001	0,015	0,35
5П	0,31	42	148	0,43	0,67	1,16	1,96	0,12	0,007	0,016	0,003	0,015	1,68
6П	0,52	188	903	1,25	0,96	1,62	2,55	0,92	<0,005	0,019	0,004	0,14	2,64
7П	0,35	105	309	0,71	0,51	0,28	5,80	0,14	<0,005	0,015	0,001	0,015	3,55
ПДК [3]	—	700	—	5,0	4,0	3,0	23,0	—	—	—	—	—	6,0
<i>Комплексные соединения</i>													
1П	1,53	200,0	1420	2,65	3,68	4,11	0,72	0,47	0,09	0,012	0,015	0,02	3,90
2П	3,47	42,19	5323	1,60	3,35	7,97	0,90	449,0	0,11	0,011	0,030	0,18	6,05
4П	5,28	14,23	1415	0,57	1,59	7,42	0,56	3,90	0,03	0,0038	0,011	0	0,97
5П	0,40	91,05	454	1,40	0,72	1,47	0,81	0,69	0,04	0,0036	0,007	0,04	2,57
6П	1,26	72,99	2601	0,79	0,75	1,73	2,64	3,86	0,09	0,0029	0,023	0,45	3,67
7П	0,34	21,75	768	0,33	0,40	1,44	1,21	0	0,02	0,0018	0,032	0	2,75
<i>Специфически сорбированные формы</i>													
1П	4,95	217	3489	3,25	4,17	5,07	5,16	3,41	0,055	0,030	0,054	0,49	6,87
2П	6,72	135	9081	1,93	3,32	8,10	4,00	1224,0	0,11	0,024	0,069	0,77	8,04
4П	11,12	23,3	3176	1,07	2,07	9,14	4,90	3,79	0,016	0,022	0,035	0,35	1,82
5П	0,87	80,8	1204	1,30	0,84	1,74	3,61	2,59	0,026	0,015	0,034	0,43	4,51
6П	1,02	79,7	2425	0,81	0,75	1,39	4,33	5,38	0,037	0,012	0,042	0,44	4,23
7П	1,67	28,3	1009	0,40	0,41	1,25	4,49	0,30	0	0,011	0,061	0,22	5,14

Примечание. Коэффициент аномальности: в числителе — среднее, в знаменателе — min-мах. Проверк — не нормируется.

Таблица 2  
Среднее содержание элементов в надземной воздушно-сухой массе растений, мг/кг

Точка отбора	Растение	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Sb	Pb
1П	Трава укоса	0,30	211	187	0,60	4,50	9,6	32,2	0,80	0,29	0,040	13,8	0,056	0,54
2П	То же	0,37	236	219	0,49	3,90	10,6	34,3	0,55	0,34	0,053	10,5	0,033	0,47
3П	»	0,33	254	188	0,55	3,40	34,1	39,5	0,37	0,28	0,056	21,9	0,033	0,44
4П	Клевер	1,20	39	637	0,35	5,40	42,1	15,7	1,30	2,10	0,018	20,1	0,062	0,63
4П	Осока	1,50	498	990	0,57	8,20	26,9	45,3	1,10	0,54	0,079	39,2	0,040	0,99
5П	Польнь	0,37	667	231	0,62	15,40	19,8	35,9	0,94	1,20	0,310	2,4	0,054	0,51
6П	Осока	0,56	564	522	0,59	1,20	5,7	36,9	1,10	3,36	0,034	7,4	0,113	0,50
6П	Иван-чай	0,58	671	304	0,37	3,30	6,1	30,1	0,69	0,23	0,150	3,2	0,070	1,40
7П	Багульник	0,23	820	103	0,05	0,74	5,4	15,4	0,34	0,07	0,010	7,7	0,021	0,44
7П	Осока	0,37	1320	193	0,38	5,30	38,2	50,2	0,17	0,63	0,041	40,4	0,011	0,71
	По [14]	~1	17-334	18-1000	0,03-0,27	0,1-1,7	1-20	12-47	0,009-1,5	0,33-1,5	0,07-0,27	0,2-1,9	0,06	0,1-10
	По [15]	1,6	630	140	0,5	3	14	100	0,2	0,9	0,6	0,3	0,06	2,7

Таблица 3  
Коэффициенты накопления элементов-токсикантов в растительности Албьнского золоторудного месторождения

Зона	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Sb	Pb
Рудник	0,03 - 0,23	0,36 - 63,7	0,01 - 315	0,08 - 0,22	0,43 - 6,9	0,63 - 4,5	2,29 - 6,6	0,0003 - 0,28	1,52 - 42,9	0,39 - 8,9	46 - 834	0,03 - 0,17	0,03 - 0,32
	0,12	11,17	47,26	0,15	1,73	1,76	4,27	0,14	14,49	2,52	253	0,10	0,12
Фон	0,1 - 0,16	5,3 - 8,5	0,05 - 0,09	0,03 - 0,26	0,56 - 4,02	1,82 - 12,9	1,34 - 4,4	0,39 - 0,77	3,04 - 27,4	0,36 - 1,47	82 - 430	0,05 - 0,09	0,04 - 0,06
	0,13	6,9	0,07	0,15	2,29	7,34	2,86	0,58	15,22	0,92	256	0,07	0,05

Примечание. В числителе — пределы колебаний, в знаменателе — среднее значение.



Повышенное содержание токсикантов в природной среде неизбежно приводит к увеличению их концентраций в биоте. Накопление металлов растениями осуществляется в основном путем адсорбции доступных ионов корнями из почвы и частично — вегетативными органами из атмосферного воздуха. Поэтому количество данных элементов в растениях — комплексный показатель, отражающий загрязнение и почвы, и воздуха.

По градиенту содержания в растениях (табл. 2) элементы можно расположить в следующем порядке:  $Mn > Fe > Zn > Cu > Sn > Ni > Mo > V > Pb > As > Co > Cd > Sb$ , из которого видно, что Cd и Sb аккумулируются растениями незначительно, в большей степени накапливаются Mn, Fe и Zn, что согласуется с физиологическим значением этих элементов [25]. В растениях, произрастающих на территории Албынского рудника, содержание некоторых веществ несколько выше, чем концентрации этих элементов в растительности с фоновой территории: As, Mo, Cd, Sb — в 3–3,6 раза, V, Co, Ni — в 2–2,4 раза, тогда как для Mn, наоборот, отмечается снижение концентрации. По сравнению со среднемировыми значениями наблюдаются незначительные превышения Mn, Ni, Cu, Sn, Sb, Mo и Co в отдельных образцах растительной массы как с фоновой территории, так и с территории рудника.

Величины соотношений Fe/Mn и Pb/Mn также могут свидетельствовать о состоянии растительности. При этом Fe/Mn представляет собой информативный показатель процессов фотосинтеза, а Pb/Mn характеризует пропорцию техногенных и биофильных элементов [26]. В растительной массе с фоновой территории Fe/Mn составляет 0,13–0,15, что ниже среднемирового значения. В техногенной среде в траве укоса отношение Fe/Mn возрастает и имеет разброс от 0,35 до 1,99. Наибольший показатель выявлен для клевера — 16,33. Максимальный техногенный пресс растения испытывают в зоне влияния карьера. Значение соотношения Pb/Mn в растительности с этого места превышает фоновое в 3–5 раз, а для клевера — в 32 раза. Изменение Fe/Mn и Pb/Mn в растительности в техногенных ландшафтах свидетельствует о нарушении сбалансированности в микроэлементном обеспечении процессов метаболизма в растениях.

Коэффициент накопления (КН), характеризующий степень использования растениями подвижных форм элементов из почвы, представляет собой более объективный критерий оценки количества металлов, перешедших из почвы в растения. С одной стороны, он характеризует изменения подвижности металлов при загрязнении почв, с другой — отклик на это растений [27]. При расчете КН предлагается использовать содержание всей группы подвижных соединений, включающей обменные, комплексные и специфически сорбированные формы [27]. В табл. 3 представлены результаты расчета коэффициентов накопления элементов в растительности как на фоновом участке, так и на территории Албынского рудника. Наиболее интенсивно поглощаются растениями Sn, коэффициенты его накопления изменяются от 46 до 834. Для Fe КН варьируют от 0,01 до 315, для Mn находятся в пределах 0,36–63,7, для Mo — в интервале от 1,52 до 42,9, а способность к депонированию остальных рассматриваемых элементов в данных условиях невелика. Интенсивность накопления элементов растениями на техногенно загрязненных почвах представляет следующий ранжированный ряд:  $Sn > Fe > Mo > Mn > Zn > Cd > Cu > Ni > Co > As > Pb > V > Sb$ . Коэффициенты накопления элементов-токсикантов в растительности на фоновой территории образуют несколько иной ряд:  $Sn > Mo > Cu > Mn > Zn > Ni > Cd > As > Co > V > Fe = Sb > Pb$  с существенным уменьшением коэффициента накопления железа. Физиологи установили, что избыточные количества Mn, а также Zn, Ni и Co в растениях снижают темпы поглощения Fe в клетках [14].

На территории рудника отмечается снижение интенсивности накопления Ni, Cu, As, Mo, что, вероятно, обусловлено защитной реакцией растений на избыток элементов в почве, и в то же время наблюдается увеличение в среднем коэффициента накопления Mn, Fe, Zn, Cd и Pb по сравнению с фоном.

Следует отметить, что нет четкой закономерности в изменении КН при техногенной нагрузке. Возможно, в накоплении элементов надземной частью растительности важную роль играют соединения металлов, адсорбированные из атмосферы. Однако четко разделить вклад корневого и фоллиарного поглощения в концентрацию тяжелых металлов в растительных тканях трудно, так как прямая зависимость между концентрацией металла в почве и растениях нарушается из-за избирательной способности растений к накоплению элементов в необходимом количестве. Анализ корреляционных связей между содержанием исследуемых элементов в растительности и содержанием их подвижных форм в верхних горизонтах почв (табл. 4) показал слабое влияние состава почв на растительность: только для V, Mn, Cu и Sb наблюдается значимая прямая зависимость от концентрации в почвах обменных форм ( $r = 0,88; 0,34; 0,59$  и  $0,68$  соответственно). Выявлена обратная зависимость количественных показателей в растительности As ( $-0,64$ ), Cd ( $-0,43$ ) и Sn ( $-0,72$ ) от концентрации в почве

Коэффициенты корреляции между содержанием элементов-токсикантов в почве и растениях

Формы элементов	V	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	Sn	Sb	Pb
Обменные	0,88	0,34	0,06	-0,08	-0,30	0,59	0,09	-0,64	0,02	-0,43	-0,72	0,68	0,15
Комплексные	0,83	0,01	-0,26	0,46	-0,25	0,56	0,07	-0,63	-0,16	-0,34	-0,35	0,68	-0,24
Специфически сорбированные	0,77	-0,21	-0,21	0,36	-0,20	0,66	-0,20	-0,63	-0,25	-0,46	-0,32	-0,34	-0,39
Непрочно связанные	0,80	-0,08	-0,22	0,31	-0,24	0,66	0,01	-0,63	-0,27	-0,44	-0,33	0,41	-0,26

их обменных форм. Установленная достоверная связь между суммарным содержанием в почве подвижных форм V, Cu, Sb и Co, отнесенных к группе непрочно связанных соединений, и количеством каждого из перечисленных веществ в растениях указывает на доступность растениям всех форм подвижных соединений этих элементов в почве: обменных, комплексных и специфически сорбированных.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение безопасной эксплуатации месторождения как в отношении экосистемы, так и в отношении людей, работающих и проживающих в данной местности, представляет собой обязательное требование для хозяйствующих субъектов и требует всестороннего учета воздействия опасных факторов с целью минимизации экологического ущерба, наносимого окружающей природной среде.

Анализ биогеохимических параметров почв и растений (расчеты параметров аномальности, содержания мобильных форм элементов в почвах, показателей накопления, а также величины соотношения элементов в растениях) показал, что окружающая среда на территории рудника испытывает экологическую напряженность в связи с открытыми горными работами. Полученные результаты представляют несомненный научный и практический интерес для обеспечения нормального функционирования техногенно нагруженной экологической системы. Изученное распределение потока миграции органо-минеральных, растворимых, адсорбированных форм соединений ТМ в биогеохимических компонентах природного ландшафта характеризует особенности отклика живой природы на антропогенное воздействие и позволяет прогнозировать отдаленные возможные последствия. Вследствие универсальности законов природы, общего характера воздействия обнаруженных закономерностей и с учетом разницы в действующих оценках уровней загрязнения в законодательстве различных стран мира, изучение отклика биологической среды на сверхнормативные техногенные воздействия тяжелых металлов может стать источником информации как для отечественных исследователей, так и для инженерно-технического персонала, ведущего разработку и эксплуатацию месторождений полезных ископаемых по всему миру.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. — М.: Астрей-2000, 1999. — 764 с.
2. Ковда В. А. Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. — М.: Наука, 1976. — С. 19–35.
3. ГН 2.1.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. — М.: Стандартинформ, 2006. — 15 с.
4. ГН 2.1.7.251109. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. — М.: Стандартинформ, 2009. — 2 с.
5. Состояние окружающей среды. Программа ООН по окружающей среде. — М.: ВИНТИ, 1980. — 162 с.
6. ГОСТ 17.4.1.02-83 «Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения». — М.: Стандартинформ, 2008. — 3 с.
7. Добровольский В. В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. — М.: Мысль, 1983. — 271 с.
8. Водяницкий Ю. Н. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. — М.: Изд-во Почв. ин-та РАСХН, 2008. — 164 с.
9. Рудник «Албын» [Электронный ресурс]. — <http://www.petrodavlovsk.net/ru/albyn.html> (дата обращения 15.10.2014).
10. Мотузова Г. В. Содержание, задачи и методы почвенно-экологического мониторинга // Почвенно-экологический мониторинг и охрана почв. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. — С. 80–104.

11. Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г., Крыщенко В. С., Манджиева С. С. Формы соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны // Почвоведение. — 2008. — № 7. — С. 810–818.
12. Манджиева С. С., Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Головатый С. Е., Мирошниченко Н. Н., Лукашенко Н. К., Фатеев А. И. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. — 2014. — № 5. — С. 632–640.
13. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 234 с.
14. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 439 с.
15. Войткевич Г. В., Кокин А. В., Мирошников А. Е., Прохоров В. Г. Справочник по геохимии. — М.: Недра, 1990. — 480 с.
16. Головин А. А., Москаленко Н. Н., Ачкасов А. И., Волочкович К. Л., Гуляева Н. Г., Гусев Г. С., Килипко В. А., Криночкин Л. В., Морозова И. А., Трефилова Н. Я., Гинзбург Л. Н., Бедер А. Б., Клюев О. С., Колотов Б. А. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000. — М.: Изд-во Ин-та минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 2002. — 92 с.
17. Мельников А. В., Степанов В. А. Рудно-россыпные узлы Приамурской золотоносной провинции. Ч. 2: Центральная часть провинции. — Благовещенск: Изд-во Амур. ун-та, 2014. — 300 с.
18. Радомская В. И., Радомский С. М. Анализ влияния предприятий золотодобычи на состояние водных ресурсов // Изв. Самар. науч. центра РАН. — 2014. — Т. 16, № 1–3. — С. 920–923.
19. Сайт правительства Амурской области [Электронный ресурс]. — <http://www.amurobl.ru/wps/portal/Main/gov/igov/ministry/prg/report/> (дата обращения 15.10.2014).
20. Саэт Ю. Е., Онищенко Т. Л., Янин Е. П. Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. — М.: Изд-во Ин-та минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 1986. — 99 с.
21. Радомская В. И., Радомский С. М., Куимова Н. Г., Гаврилова Г. А., Путинцев Д. В. Тяжелые металлы в компонентах ландшафта юга Зейско-Бурейской равнины // Сиб. экол. журн. — 2008. — Т. 15, № 6. — С. 841–849.
22. Кулик Е. Н., Радомская В. И. Изучение форм нахождения тяжелых металлов в бурой лесной почве при антропогенном воздействии // Аграр. науч. журн. — 2011. — № 7. — С. 12–15.
23. Радомская В. И., Моисеенко Н. В., Радомский С. М., Крылов А. В., Катола В. М., Моисеенко В. Г. Влияние осадков сточных вод на поведение тяжелых металлов в системе почва–растение // Агрохимия. — 2006. — № 1. — С. 77–84.
24. Кулик Е. Н., Радомская В. И. Особенности транслокации тяжелых металлов в бобовые культуры при антропогенном воздействии // Вестн. Краснояр. аграр. ун-та. — 2011. — № 8. — С. 83–88.
25. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. — Новосибирск: Наука, 1991. — 151 с.
26. Елпатьевский П. В., Аржанова В. С. Геохимия ландшафтов и техногенез. — М.: Наука, 1990. — 196 с.
27. Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Мирошниченко Н. Н., Фатеев А. И., Манджиева С. С., Чаплыгин В. А. Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза // Агрохимия. — 2013. — № 9. — С. 65–75.

*Поступила в редакцию 7 апреля 2015 г.*