

УДК 550.47

БИОАККУМУЛЯЦИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ РАСТЕНИЯМИ

© 2003 г. В. И. Радомская, С. М. Радомский, Д. В. Юсупов, академик В. Г. Моисеенко

Поступило 15.08.2002 г.

Определение количественных барьерных характеристик и выявление наиболее информативных на широкий круг химических элементов распространенных видов растений в различных природных и техногенных ландшафтах являются наиболее перспективными направлениями развития современной поисковой биогеохимии и эко-биогеохимических исследований [1]. Наименее изученными остаются биообъекты в отношении способности накапливать благородные металлы. Проведенные в России [2], а также в Канаде [3] и США [4] комплексные биогехимические поиски золота и платиноидов позволили выявить ряд видов растений, информативных на благородные металлы. На Российском Дальнем Востоке и, в частности, на территории Верхнего Приамурья подобные научно-исследовательские работы проводились только по биогеохимии золота, носившие главным образом опытно-методический характер [5].

Между тем этот регион Восточной Азии, уникальный своим структурно-тектоническим положением, находится в пределах Монголо-Охотской ветви Тихоокеанского рудного пояса. Такое положение определило своеобразие его металлогении, формирование различных генетических типов минерализации. Ведущим, “сквозным”, элементом для Приамурья является золото. Месторождения золота, золотоносные и платиноносные площади обособлены в 46 золотоносных и 7 потенциально платиноносных рудно-россыпных узла, занимающих 45% территории региона [6]. Не вызывает сомнения, что эта территория является одной из крупнейших потенциально благороднометалльных биогеохимических провинций, установление и районирование которой дело будущих исследований.

Тем временем возрастающая добыча благородных металлов определяет процесс интенсивного их вовлечения в техногенную миграцию, в

том числе с определенным участием в этом живого вещества. За более чем 130-летний период золотодобычи в Амурской области сформировались особые техногенные ландшафты (горнопромышленные отработанные полигоны, отвалы, хвостохранилища) с аномальными концентрациями различных химических элементов, в том числе благородных металлов. Такие территории представляют исключительный интерес при решении вопроса по установлению закономерностей и особенностей биологического поглощения благородных металлов растениями, выявлению наиболее информативных видов – концентраторов на благородные металлы, чему и посвящена настоящая работа.

Экспериментальные исследования проведены авторами в пределах Соловьевского золото-платиноносного рудно-россыпного узла, на территории хвостохранилища, прилегающей к действующей шлихо-обогажительной фабрике (ШОФ). Здесь, используя далеко не совершенные методы гравитационного обогащения, извлекают золото из концентрата тяжелых минералов (шлиха), который доставляется со всех дражных полигонов прииска. Тонкие фракции золота, минералов, содержащих элементы группы платины, в продукт обогащения не попадают, а уходят в хвосты (отходы). Минеральный состав хвостов представлен: магнетитом, мартитом, цирконом, ильменитом, хромитом, амфиболами, гранатом, вольфрамитом, киноварью, встречаются самородная платина и сперрилит. Черный шлик удаляют с места переработки в отвал, разравнивают и перемешивают с почвой и грунтом. Поверхностный горизонт отложений обогащен благородными металлами. Содержание золота варьирует от 19.8 до 42.2 г/т. По глубине вертикальных разрезов содержание золота падает до 0.50–4.00 г/т. Такую же тенденцию к снижению содержания вниз по разрезу техногенных отложений имеют платина, палладий, рутений. Средняя концентрация благородных металлов по литологическим горизонтам составила, г/т: золота 13.82, серебра 3.40, осмия 0.0080, платины 0.34, палладия 0.015, рутения 0.036. Таким образом, эта территория выступает своеобразным геолого-минералогическим “музеем” всего Соловьевского узла, экспериментальным полигоном с экстремальными для живых организмов

*Амурский комплексный научно-исследовательский институт
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
Благовещенск Амурской обл.*

Таблица 1. Содержание благородных металлов в золе растений, произрастающих на отвалах ШОУ прииска Соловьевский

Образец	Зольность, %	Доля, г/т					
		Ag	Au	Pt	Pd	Ru	Os
Скерда кровельная – <i>Crepis tectorum</i> L.	12.7	0.13	1.25	<0.50	0.084	0.42	0.28
Крапива – <i>Urtica angustifolia</i> Fish. ex Hornem.	9.70	0.052	0.49	<0.30	<0.020	0.43	0.097
Клевер ползучий – <i>Trifolium repens</i> L.	14.60	0.42	11.61	0.27	<0.020	1.28	0.076
Ива – <i>Salix</i> sp.	7.50	0.048	0.31	<0.40	0.034	0.60	0.064
Одуванчик обыкновенный – <i>Taraxacum vulgare</i> L.	10.90	0.12	3.05	0.21	0.034	0.69	0.067
Лебеда – <i>Atriplex patulum</i> L.	10.20	0.014	0.11	<0.20	0.028	0.44	0.062
Хвощ полевой – <i>Equisetum arvense</i> L.	18.50	0.032	0.13	<0.30	<0.020	0.18	0.20
Жабрей – <i>Galeopsis</i> sp.	14.12	0.10	0.29	<0.20	0.039	0.14	0.074
Зверобой утонченный – <i>Hypericum attenuatum</i> Choisy	4.10	0.25	1.32	<0.70	<0.060	1.76	0.20
Лапчатка гусиная – <i>Potentilla anserina</i> L.	10.01	0.19	4.40	<0.30	0.041	0.32	0.079
Полынь обыкновенная – <i>Artemisia vulgaris</i> L.	12.20	0.14	0.76	<0.20	0.020	0.47	0.071

геохимическими условиями среды. Растительный покров крайне разрежен и составляет не более 1% площади отвала. Здесь произрастают 11 видов, главным образом травянистых растений (табл.1).

Количественное определение содержания благородных металлов в почве и в озоленных при 450°C растениях проведено атомно-абсорбционным методом анализа с предварительной пробирной плавкой и концентрированием на никелевый штейн при 1000°C, разрушении и отделении никелевой основы штейна и последующей экстракцией благородных металлов алкиланилином в толуоле.

На основе данных анализов рассчитывали: коэффициент биологического поглощения КБП (Ax_1), как отношение содержания элемента в золе растения к кларку литосферы; растительно-почвенный коэффициент РПК (Ax_2), как отношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в субстрате, на котором оно растет; и биогеохимическую активность вида (БХА) – суммарную величину, получающуюся при сложении коэффициентов биологического поглощения (Ax_1 или Ax_2) отдельных элементов. На основе полученных значений коэффициентов Ax_1 и Ax_2 составлены ряды биологического поглощения.

Комбинации приведенных выше биогеохимических показателей можно свести к трем вариантам. Первый вариант, когда $Ax_1 > Ax_2$ (Au, Ag, Pt) имеет место, поскольку содержания Au, Ag, Pt в грунте ($13.82 \cdot 10^{-4}\%$, $3.40 \cdot 10^{-4}\%$, $0.34 \cdot 10^{-4}\%$ соответственно) на два–три порядка превышают

кларковый уровень. Это тот случай, когда действует правило: чем выше содержание элемента в породе при прочих равных условиях, тем меньше относительная величина поглощаемой части. Поэтому в ландшафтных условиях с резко повышенным фоном ряда элементов расчета одного лишь РПК будет недостаточно для выявления полной картины их биогенной миграции. Расчет по Ax_1 позволил установить два вида растений – коцентраторов золота (табл. 2): *Trifolium repens* L. и *Potentilla anserina* L. Золото – биологически доступный элемент. Из всей группы благородных металлов он единственный обладает столь сильными биофильными свойствами. Золото и платина в условиях местного техногенного ландшафта являются элементами энергичного и сильного накопления (по Ax_1). Растения избирательно концентрируют названные выше элементы. Так, если по отношению к золоту и платине они проявляют толерантность, то в отношении серебра среднюю и слабую способность накопления, переходящую в группу захвата. Это объяснимо с точки зрения биохимических свойств серебра. Как известно, серебро является сильным токсикантом для растений, и при высоких его концентрациях в почве у растений в определенный момент наступает порог поглощения из-за нарушения проницаемости клеточных мембран [7]. В общем по этой группе элементов следует вывод: значительная разница между коэффициентами ($Ax_1 > Ax_2$) устанавливается при исследовании ландшафтов, где местные кларки элементов значительно превышают их содержания в литосфере, что в при-

Таблица 2. Биогеохимические показатели поглощения благородных металлов растениями на отвалах ШОУ Соловьевского прииска

Образец	КБП (Ax_1) РПК (Ax_2)	Рассчитанный коэффициент						БХА ₁
		Ag	Au	Pt	Pd	Os	Ru	
Скерда кровельная – <i>Crepis tectorum</i> L.	Ax_1	1.86	290.70	–	8.40	5.60	84.00	390.56
	Ax_2	0.030	0.090	–	5.60	34.38	11.67	
Крапива – <i>Urtica angustifolia</i> Fish. ex Hornem.	Ax_1	0.74	113.95	–	–	1.94	86.00	202.63
	Ax_2	0.015	0.035	–	–	12.13	11.94	
Клевер ползучий – <i>Trifolium repens</i> L.	Ax_1	6.00	2700.00	54.00	–	1.52	256.00	3017.52
	Ax_2	0.12	0.84	0.79	–	9.50	35.56	
Ива – <i>Salix</i> sp.	Ax_1	0.69	72.09	–	3.40	1.28	120.00	197.46
	Ax_2	0.014	0.022	–	2.27	8.00	16.67	
Одуванчик обыкновенный – <i>Taraxacum vulgare</i> L.	Ax_1	1.71	709.30	42.00	3.40	1.34	138.00	895.75
	Ax_2	0.035	0.22	0.62	2.27	8.38	19.17	
Лебеда – <i>Atriplex patulum</i> L.	Ax_1	0.20	25.58	–	2.80	1.24	88.00	117.82
	Ax_2	0.0041	0.0080	–	1.87	7.75	12.22	
Хвощ полевой – <i>Equisetum arvense</i> L.	Ax_1	0.46	30.23	–	–	4.00	36.00	70.69
	Ax_2	0.0094	0.0094	–	–	25.00	5.00	
Жабрей – <i>Galeopsis</i> sp.	Ax_1	1.43	67.44	–	3.90	1.48	28.00	102.25
	Ax_2	0.029	0.021	–	2.60	9.25	3.89	
Зверобой утонченный – <i>Hypericum attenuatum</i> Choisy	Ax_1	3.57	306.98	–	–	4.00	352.00	666.55
	Ax_2	0.074	0.096	–	–	25.00	48.89	
Лапчатка гусиная – <i>Potentilla anserina</i> L.	Ax_1	2.71	1023.26	–	4.10	1.58	64.00	1095.64
	Ax_2	0.056	0.32	–	2.73	9.88	8.89	
Полынь обыкновенная – <i>Artemisia vulgaris</i> L.	Ax_1	2.00	176.74	–	2.00	1.42	94.00	276.16
	Ax_2	0.041	0.055	–	1.33	8.88	13.06	

родных условиях типично для рудных районов и месторождений.

Второй вариант: $Ax_2 > Ax_1$ (Os). Превышение величины Ax_2 над Ax_1 свидетельствует о том, что концентрация осмия в местных отложениях ниже, чем в литосфере ($0.8 \cdot 10^{-6}\%$ и $5 \cdot 10^{-6} \%$ соответственно). Растительно-почвенный коэффициент (Ax_2) для всех видов опробованных растений по величине превосходит Ax_1 . В рядах биологического поглощения растений, составленных по Ax_2 , Os наряду с Ru, занимает первое место и относится к сильно накапливаемым элементам (табл. 3). Максимальный растительно-почвенный коэффициент (Ax_2) осмия отмечен у *Crepis tectorum* L. – 34.48. Известно, что осмий является инертным металлом, однако к нетипичным его свойствам относятся активное взаимодействие с кислородом и разнообразие состояний окисления в соединениях. Следует отметить высокую миграционную активность тетраоксида осмия OsO_4 . Кроме того, осмий проявляет устойчивую в природных условиях наибольшую степень валентности среди благородных металлов: серебро (+1) – золото (+3) – платина, палладий (+4) – рутений (+5) – осмий (+6) [8].

Третий вариант, когда коэффициенты Ax_2 и Ax_1 имеют приблизительно один порядок значений (Ru, Pd). Для рутения и палладия это обусловлено тем, что их содержание в техногенных отложениях близко к кларковым концентрациям в литосфере. По полученным данным, рутений – элемент энергичного и сильного накопления, палладий – среднего накопления. О потребности растений в этих элементах также мало известно. Высокий уровень концентрации, вероятно, обусловлен в первую очередь геохимическими свойствами двух элементов. Рутений в кислых почвах подвижен и относительно доступен для растений. Растворимые формы палладия легко поглощаются растениями. Этот металл отличается слабой токсичностью и проявляет мобильность в круговороте органических веществ [7]. Биогеохимическими индикаторами на рутений, согласно результатам исследований, могут служить: *Hypericum attenuatum* Choisy, *Trifolium repens* L. и *Taraxacum vulgare* L.

Количественным выражением общей способности отдельных видов к концентрации благородных металлов служит показатель – биогеохими-

Таблица 3. Сравнительная оценка рядов биологического поглощения благородных металлов, составленных по Ax_1 и Ax_2

Показатель	Ряды биологического поглощения								
	1000 <i>n</i>	100 <i>n</i>	10 <i>n</i>	<i>n</i>	0. <i>n</i>	0.0 <i>n</i>		0.00 <i>n</i>	
КБП*		Au	Ag			Pd	Ru	Os	Pt
КБП (<i>Ax</i> ₁)	Au ₂ **	Au ₅	Au ₄	Ag ₇	Ag ₄				
			Pt ₂	Pd ₇					
		Ru ₄	Ru ₇	Os ₁₁					
РПК (<i>Ax</i> ₂)				Pd ₇	Au ₃	Au ₆		Au ₂	
				Os ₄	Os ₇	Ag ₁	Ag ₈		Ag ₂
				Ru ₈	Ru ₃	Pt ₂			

* КБП (Ср/Кл) – коэффициент биологического поглощения (отношение среднего содержания элемента в золе растений к его кларку в литосфере) по данным [9].

** Au_2 – индекс элемента с указанием количества видов растений, принадлежащих к данной группе биологического поглощения. Группа I (1000n) и группа II (100n) – элементы энергичного накопления; группа III (10n) – элементы сильного накопления; группа IV (n) – элементы среднего накопления; группа V (0.n) – элементы слабого накопления и среднего захвата; группа VI (0.0n) – элементы слабого захвата; группа VII (0.00n) – элементы очень слабого захвата.

ческая активность вида. Анализ БХА растений, произрастающих на техногенных отвалах, рассчитанный на основе Ax_1 , показал, что наибольшая биологическая активность в отношении благородных металлов характерна для клевера ползучего; повышенная – для лапчатки гусиной, одуванчика обыкновенного; средняя – для зверобоя утонченного и скерды кровельной. Пониженную активность к поглощению благородных металлов проявляют хвощ полевой и жабрей.

Таким образом, на основании проведенных исследований отмечено, что различные виды растений в одинаковых геохимических условиях обладают различными свойствами избирательного накопления благородных металлов. Установлена группа растений со специфически высокой биологической активностью к благородным металлам, что имеет важное биоиндикационное значение в связи с оценкой техногенного загрязнения окружающей среды и при геохимических поисках соответствующих месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалевский А.Л. В сб.: Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. Труды Биогеохимической лаборатории. М.: Наука, 1999. Т. 23. С. 68–80.
2. Ковалевский А.Л. // Отеч. геология. 1993. № 8. С. 27–35.
3. Dunn C.E. // J. Geochem. Expl. 1986. V. 25. № 1. P. 21–40.
4. Riese W.C. In: Mineral Exploration, Biological System and Organic Matter. Englewood Cliffs (N. J.): Prentice-Hall, 1986. P. 170–182.
5. Ивашов П.В. Теоретические основы биогеохимического метода поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1976. 272 с.
6. Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с.
7. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
8. Юшко-Захарова О.Е., Иванов В.В., Соболева Л.Н. и др. Минералы благородных металлов. М.: Недра, 1986. 272 с.
9. Алексеев В.А. Экологическая геохимия. М.: Логос, 2000. 627 с.