

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
ВСЕСОЮЗНОЕ БОТАНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ФИТОИНДИКАЦИИ

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
Ленинградское отделение
Ленинград 1971

Закономерности накопления редких элементов некоторыми высшими растениями и их значение для поисков рудных месторождений

П. Л. Горчаковский и Н. Н. Никонова

(Институт экологии растений и животных УФАН СССР)

Присутствие и концентрация редких элементов в растениях в какой-то степени зависит от содержания их в поверхностном слое горной породы и в почве, что дает возможность использовать растения в качестве индикаторов месторождений редких элементов при геологических изысканиях. Однако при этом возникает ряд трудностей. Даже в районе месторождений того или иного элемента, представляющих промышленную ценность, далеко не все виды растений накапливают этот элемент в концентрациях, достаточных для определения его присутствия методом спектрального анализа. Тот или иной элемент может содержаться в коре выветривания горной породы, но отсутствовать в самом поверхностном слое почвы, где располагаются корневые системы некоторых растений. Слабо разработана еще методика отбора проб растений для спектрального анализа (какие растения и какие их органы брать для анализа, в какое время и т. п.). В разных геохимических и ботанико-географических подразделениях территории набор концентраторов, или специфических накопителей того или иного элемента, неодинаков. Поэтому необходимо выяснить региональные особенности накопления редких элементов растениями, выявить растения — концентраторы тех или иных элементов применительно к определенным геохимическим и ботанико-географическим областям.

Мы ставим перед собой задачу на примере одного из районов западного склона Южного Урала сопоставить содержание редких элементов — бериллия, молибдена, иттрия, циркония, лития, ниобия и титана — в почве и растениях, выявить общие закономерности накопления редких элементов сосудистыми растениями и проследить сезонные изменения содержания редких элементов в горизонтах почвы и в органах растений.

Участок, где проводилось исследование, расположен на склоне увала высотой 780 м над ур. м., вытянутого с северо-запада на юго-восток. Размер участка — 0.7×1.8 км, абсолютная высота — 600—650 м.

В геологическом отношении участок расположен вблизи региональных структур Башкирского и Уральского антиклинориев. Рудопроявление связано с залежами туфов пироксен-амфиболовых порфиров, которые залегают среди филлитовидных сланцев бакальской свиты. Расположен участок в полосе горных сосновых лесов западного склона Южного Урала.

В растительном покрове преобладает лес из осины (*Populus tremula* L.) и березы бородавчатой (*Betula pendula* Roth.) с примесью сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.) и лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii* Dyl.). Древостой молодой (10—25 лет), вторичного происхождения, сформировавшийся в результате вырубки соснового леса с единичной примесью лиственницы. Местами преобладает осина высотой 8—10 м, диаметром 12 см, местами береза высотой 5—6 м, диаметром 4—6 см. Из кустарников встречается черемуха обыкновенная (*Padus racemosa* L.) и шиповник коричный (*Rosa cinnamomea* L.). Травяной покров довольно мощный, состоит из лесных и лугово-лесных злаков, некоторых видов папоротника и разнотравья; преобладают *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth., *Milium effusum* L., *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn., *Aconitum excelsum* Reichb., *Trollius europaeus* L., *Lathyrus vernus* Bernh., *Rubus saxatilis* L., *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., *Chamaene-*

rium angustifolium (L.) Scop., *Bupleurum aureum* Fisch., *Polygonum bistorta* L., *Galium boreale* L.

Исследование проводилось в два этапа.

1-й этап (1964 г.). На участке были заложены 3 профиля вкрест простирающихся предполагаемых (по данным геологической съемки) рудных зон. По профилям через каждые 20 м над рудными зонами и через 40 м вне этих зон отбирались образцы почв и по 45 видов сосудистых растений для последующего определения в лаборатории содержания в них вышеуказанных редких элементов. На основании обработки полученных данных были более точно очерчены рудные зоны и отобраны виды растений, накапливающие в больших концентрациях те или иные редкие элементы.

2-й этап (1965 г.). Непосредственно на рудных зонах были заложены три основных площадки размером 50×40 м, одна на северном склоне, а две — на южном. Кроме того, была выделена контрольная площадка вне зон. На площадках производился отбор растительных образцов через каждые 15 дней. Из древесных растений брались образцы осины, лиственницы Сукачева, а из травянистых — орляка [*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.], вейника тростниковидного [*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth.], бора развесистого (*Milium effusum* L.), чины Гмелина [*Lathyrus gmelinii* (Fisch.) Fritsch], первоцвета крупночашечного (*Primula macracalyx* Vge.) и скерды сибирской (*Crepis sibirica* L.). В период массового цветения упомянутых видов растений отбирались образцы по органам (листья, стебли, цветы, корни или корневища) для определения содержания в них редких элементов. Раз в месяц по горизонтам брались почвенные образцы на всех площадках. Образцы растений высушивались, а затем сжигались. Определение содержания редких элементов в почве и золе растений производилось спектральным методом.

В табл. 1 приведен перечень 45 видов сосудистых растений, в образцах которых методом спектрального анализа определялось содержание редких элементов. Оказалось, что из них бериллий накапливают 23 вида, молибден — 36, литий — 7, цирконий — 28, иттрий — 13, ниобий — 4, титан — 45.

Усредненные данные о содержании редких элементов в почве приведены в табл. 2. Как видно, по профилю почвы цирконий распределен равномерно, другие же элементы (бериллий, молибден, ниобий, иттрий, литий и титан) имеют более высокую концентрацию в нижних горизонтах почвы.

К концу лета наблюдается миграция бериллия из нижних горизонтов почвы в верхние:

	15 VI	15 VII	15 VIII
Гор. А	0.001%	0.002%	0.002%
Гор. В	0.003%	0.002%	0.001%

Содержание остальных изученных редких элементов в почве в течение вегетационного периода остается более или менее стабильным.

Представление о том, в какой степени накопление бериллия и молибдена некоторыми растениями зависит от концентрации этих элементов в почве, дает табл. 3.

Как видно, имеется прямая линейная зависимость между содержанием бериллия и молибдена в почве и накоплением их рядом видов растений.

Распределение накопленных редких элементов по органам растений неравномерно. Бериллий концентрируется в осине следующим образом (табл. 4).

Нахождение редких элементов в образцах растений

Семейства, виды	Всего проанализировано образцов	Количество образцов с элементами						
		Be	Mo	Zr	Y	Ti	Li	Nb
Сем. <i>Polypodiaceae</i>								
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn.	30	3	7	1	—	30	—	—
Сем. <i>Pinaceae</i>								
<i>Pinus silvestris</i> L.:								
древесина	16	6	4	6	—	16	2	—
кора	16	2	1	5	—	16	—	—
ветви и хвоя	11	4	5	3	—	11	—	—
<i>Larix sukaczewii</i> Dylics:								
древесина	17	9	4	8	2	17	—	—
кора	20	7	4	6	2	20	—	—
ветви и хвоя	11	6	3	11	5	11	—	—
<i>Abies sibirica</i> Ldb.:								
ветви и хвоя	2	1	1	1	—	2	—	—
Сем. <i>Gramineae</i>								
<i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) Beauv.								
	2	—	1	—	—	2	—	—
<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth								
	35	4	27	12	2	35	1	1
<i>Agrostis alba</i> L.	1	—	1	1	1	1	—	—
<i>Milium effusum</i> L.	3	—	3	—	—	3	—	—
<i>Dactylis glomerata</i> L.	10	—	6	4	—	10	—	—
Сем. <i>Liliaceae</i>								
<i>Veratrum Lobelianum</i> Bernh.	1	—	—	—	—	1	—	—
Сем. <i>Salicaceae</i>								
<i>Salix</i> sp.:								
листья	2	1	2	—	—	2	—	—
ветви	2	2	1	—	—	2	—	—
<i>Populus tremula</i> L.:								
древесина	15	11	4	2	—	15	1	1
кора	15	6	4	2	—	15	—	—
ветви	12	5	1	—	—	12	—	—
листья	12	4	1	—	1	12	—	—
Сем. <i>Betulaceae</i>								
<i>Betula pendula</i> Roth.:								
древесина	30	15	15	11	4	30	—	—
кора	30	7	6	9	4	30	—	—
ветви	25	9	4	4	3	25	—	—
листья	25	3	3	5	—	25	—	—
Сем. <i>Polygonaceae</i>								
<i>Polygonum alpinum</i> All.	4	2	1	—	—	4	—	—
Сем. <i>Ranunculaceae</i>								
<i>Pulsatilla patens</i> (L.) Mill.	1	1	—	1	—	1	—	—
<i>Delphinium elatum</i> L.	1	—	1	—	—	1	—	—
<i>Aconitum excelsum</i> Reichb.	39	8	13	2	—	39	1	1
<i>Trollius europaeus</i> L.	1	—	—	—	—	1	—	—

Таблица 1 (продолжение)

Семейства, виды	Всего проанализировано образцов	Количество образцов с элементами						
		Be	Mo	Zr	Y	Ti	Li	Nb
Сем. <i>Rosaceae</i>								
<i>Spirea crenata</i> L.	1	—	—	—	—	1	—	—
<i>Sorbus aucuparia</i> L.:								
листья	4	—	—	—	2	4	—	—
ветви	4	2	—	1	1	4	—	—
<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	6	1	2	3	1	6	2	—
<i>Sanguisorba officinalis</i> L. . . .	7	1	4	1	1	7	—	—
<i>Rubus idaeus</i> L.	1	—	1	1	—	1	—	—
Сем. <i>Leguminosae</i>								
<i>Cytisus ruthenicus</i> Fisch.	2	—	1	1	—	2	—	—
<i>Trifolium pratense</i> L.	2	1	1	—	—	2	—	—
<i>Vicia silvatica</i> L.	13	10	11	3	3	13	—	—
<i>Lathyrus gmelinii</i> (Fisch.) Fritsch.	3	2	2	1	1	3	1	—
<i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh. . . .	11	4	6	3	3	11	—	—
Сем. <i>Geraniaceae</i>								
<i>Geranium silvaticum</i> L.	5	1	2	1	—	5	—	—
Сем. <i>Onagraceae</i>								
<i>Chamaenerium angustifolium</i> (L.) Scop.	2	—	2	—	—	2	—	—
Сем. <i>Umbelliferae</i>								
<i>Bupleurum aureum</i> Fisch.	26	—	13	1	—	26	—	—
<i>Heracleum sibiricum</i> L.	17	1	13	1	—	17	—	—
<i>Angelica silvestris</i> L.	5	—	3	1	—	5	—	—
<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	2	—	1	—	—	2	—	—
<i>Aegopodium podagraria</i> L.	40	4	23	2	1	40	—	—
Сем. <i>Primulaceae</i>								
<i>Primula macrocalyx</i> Bge	1	1	1	1	—	1	1	—
Сем. <i>Boraginaceae</i>								
<i>Pulmonaria mollissima</i> A. Kerner	5	—	—	2	—	5	—	—
Сем. <i>Labiatae</i>								
<i>Origanum vulgare</i> L.	3	—	2	—	—	3	—	—
Сем. <i>Campanulaceae</i>								
<i>Adenophora liliifolia</i> (L.) Bess.	4	1	2	—	—	4	—	—
Сем. <i>Compositae</i>								
<i>Artemisia vulgaris</i> L.	1	—	—	—	—	1	—	—
<i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill.	2	—	1	—	—	2	—	—
<i>Tussilago farfara</i> L.	1	—	1	1	—	1	—	—
<i>Achillea millefolium</i> L.	2	—	—	1	1	2	—	—
<i>Crepis sibirica</i> L.	29	3	16	2	—	29	1	1
<i>Hieracium</i> sp.	2	—	—	—	—	2	—	—
Количество видов, содержащих отдельные элементы		23	36	28	13	45	8	4

Содержание редких элементов в почве, среднее арифметическое (в %)

Мощность горизонтов почвы (см)	Be	Mo	Zr	Nb	Y	Li	Ti
0—25	0.0034	0.00028	0.094	0.071	0.016	0.0042	0.383
25—40	0.002	0.00026	0.090	0.043	0.010	0.009	0.816
40—80	0.0052	0.00064	0.094	0.090	0.021	0.0073	0.863
80 и глубже	0.0098	0.001	Не определялось	0.096	0.029	0.0093	0.939

Таблица 3

Накопление растениями бериллия и молибдена в зависимости от содержания их в почве, в % от веса золы

Название растения	Бериллий		Молибден	
	в почве	в золе растений	в почве	в золе растений
Скерда сибирская (корневища)	0.002	> 0.0003	0.003	0.006
	> 0.0003	0.0001	След	0.001
	0.002	0.0002	—	< 0.001
	0.0001	След	—	0.0003
Первоцвет крупночашечный (корни)	0.003	0.0003	0.003	> 0.003
	0.0003	0.0002	След	< 0.001
	> 0.001	> 0.0001	—	0.001
	0.0001	След	—	0.001

Таблица 4

Изменение содержания бериллия в различных частях осины в период вегетации

Возраст осины	Части растений	Содержание бериллия в различные сроки (в % от веса золы)					
		15 VI	1 VII	15 VII	31 VII	16 VIII	25 VIII
Молодая (8—10 лет)	Листья . . .	< 0.0001	0.0001	< 0.0001	0.0002	> 0.0001	0.0002
	Ветви . . .	> 0.0001	0.0003	< 0.0001	0.0003	0.0002	0.0001
	Кора . . .	< 0.0001	< 0.0001	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001
	Древесина	0.0006	0.0003	0.0001	> 0.0003	0.0003	0.0003
Старая (30—40 лет)	Кора . . .	0.0002	> 0.0003	0.0002	0.0001	0.0003	0.0001
	Древесина	0.0006	> 0.0003	0.0002	0.0002	> 0.0003	0.0003 -0.0006

Из этих данных следует, что наиболее высокая концентрация бериллия обнаружена в древесине осины независимо от возраста дерева. Сезонные колебания содержания бериллия в органах осины незначительны (табл. 5). Травянистыми растениями бериллий (табл. 6) накапливается в большом количестве в подземных органах даже при невысоком содержании его в почве (0.0001 %).

Концентрация бериллия в корнях и корневищах скерды сибирской возрастает к концу периода вегетации до 0.003 %, наблюдается увеличение ее в подземных органах борца высокого, хотя и незначительное — до 0.002 %. В корнях и корневищах чины Гмелина и орляка содержание бериллия остается постоянным в течение лета. По всей вероятности, у растений с поверхностной корневой системой происходит возрастание концентрации бериллия к концу вегетационного периода в связи с се-

Сезонное изменение содержания бериллия в органах древесных растений
(в % от веса золы)

Названия растений и их частей	Даты наблюдений						
	15 VI	1 VII	15 VII	31 VII	16 VIII	25 VIII	
Осина молодая (6—8 лет)	древесина	< 0.001	0.006	0.003	0.001	0.001	> 0.001
		—	—	—	—	Следы	0.001
Осина старая (30—40 лет)	древесина	< 0.001	След	< 0.001	< 0.001	0.002	0.001
		0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	> 0.001
Листвен- ница Су- качева	ветви и хвоя	Следы	—	Следы	—	—	—
		Следы	След	0.0006	Следы	—	—
	древесина	—	0.006	0.001	Следы	—	—

Таблица 6

Накопление бериллия в органах травянистых растений за период
вегетации (в % от веса золы)

Название растения	Листья	Стебли	Цветы	Корни, корневища
Чина Гмелина	< 0.0001	Следы	Следы	> 0.0003
Борец высокий	0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.0001
Скерда сибирская	< 0.0001	< 0.0001	—	> 0.0003

зонной миграцией этого элемента в почве и увеличением его в поверхностном горизонте. Аналогичные данные получены о накоплении растениями других редких элементов.

В листьях и ветвях осины содержание молибдена незначительно (в виде следов или совсем не обнаружен). К концу вегетационного периода наблюдается увеличение концентрации молибдена в корневищах чины Гмелина до 0.03%. Концентрация элемента у других видов остается стабильной.

Иттрий содержится в почве обычно в концентрации 0.006%, при более низкой концентрации в почве (0.003% и ниже) в растениях он не обнаруживается. Растения накапливают иттрия в два раза меньше, чем его содержится в почве. Его часто накапливают осина (древесина), лиственница Сукачева (ветви и хвоя). К концу периода вегетации наблюдается незначительное увеличение содержания иттрия в чине Гмелина и корневищах скерды сибирской.

Среднее содержание циркония в почве 0.06%, максимальное — 0.3%. Этот элемент часто встречается в лиственнице Сукачева (ветви и хвоя, древесина), в березе (древесина), а в вейнике тростниковидном его концентрация равна 0.003%. Его содержание увеличивается в корневищах скерды сибирской к концу вегетации от 0.01% до 0.03%. В корнях и корневищах чины Гмелина, борца высокого, орляка, первоцвета крупночашечного цирконий найден в концентрации 0.003%, и это количество сохраняется без изменения в течение лета.

Литий в почве содержится обычно в концентрации 0.03%, максимум — до 0.1%. Даже при отсутствии лития в почве он обнаруживается в растениях. Наивысшая его концентрация (0.06—0.3%) отмечается в осине (древесина), лиственнице Сукачева (древесина), борце

высоком, скерде сибирской, лабазнике вязолистном, первоцвете крупночашечном (подземные органы), вейнике тростниковидном (соцветия).

Ниобий был обнаружен в почве в концентрации в среднем 0.03% (максимально до 0.06%). При концентрациях ниобия в почве ниже 0.03% он не фиксируется растениями и лишь в случае более высокой концентрации накапливается некоторыми видами: вейником тростниковидным — 0.006%, борцом высоким (подземные органы) — 0.003%, осиной (древесина) — 0.006%. В корневищах скерды сибирской концентрация ниобия увеличивается от 0.01 до 0.03% к концу лета.

В почве титан обнаружен во всех горизонтах с содержанием 0.3—1%. Он найден также во всех опробованных видах. Наивысшая концентрация (0.1—0.3%) отмечается у древесных: у березы бородавчатой (кора, древесина, ветви), сосны (древесина), осины (кора), лиственницы Сукачева (ветви и хвоя, древесина, кора). До 0.1% найден титан у травянистых: у скерды сибирской, вейника тростниковидного, орляка, лабазника вязолистного.

Итак, накопленные редкие элементы распределяются по органам растений неравномерно. У травянистых растений они обычно накапливаются в несколько большем количестве в корнях и корневищах, значительно реже — в соцветиях, а у древесных — в древесине.

Выявлены растения — специфические накопители (концентраторы) отдельных редких элементов; в их органах отмечается более высокая концентрация отдельных элементов, чем в почве, и эти элементы накапливаются растениями, даже если в почве они обнаруживаются лишь в виде следов или совсем не обнаруживаются спектральным анализом. Концентраторами молибдена являются чина Гмелина, скерда сибирская (корневища) и лиственница Сукачева (древесина), концентраторами лития — осина (древесина) и вейник тростниковидный (соцветия).

Установлена сезонность колебаний в накоплении отдельных элементов органами различных видов растений. Чаще всего происходит увеличение содержания редких элементов к концу периода вегетации в подземных органах растений.