

А. Л. КОВАЛЕВСКИЙ

**ОСОБЕННОСТИ  
ФОРМИРОВАНИЯ  
РУДНЫХ  
БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ  
ОРЕОЛОВ**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
БУРЯТСКИЙ ФИЛИАЛ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

553.061.15:550.8

А. Л. КОВАЛЕВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ  
ФОРМИРОВАНИЯ  
РУДНЫХ  
БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ  
ОРЕОЛОВ

1578  
Ответственный редактор  
д-р. геол.-мин. наук А. А. Беус



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
Новосибирск · 1975



В книге рассматриваются основные факторы формирования рудных биогеохимических ореолов в растениях: минеральные и химические формы рудных элементов в почвах, рыхлом покрове и рудах; характер контакта корней растений с рудными лито- и гидрохимическими ореолами; физиологические барьеры растений по отношению к высоким концентрациям элементов-индикаторов в питающей среде и масштаб оруденения, а также менее значимые факторы: ландшафтные и климатические условия, неравномерность распределения химических элементов в различных частях кроны деревьев, накопление элементов-индикаторов руд различными видами растений и время их опробования. Анализируются особенности формирования биогеохимических ореолов над рудными телами с открытыми, ослабленными и погребенными литохимическими, а также гидрохимическими ореолами. Даны практические рекомендации по количественной интерпретации биогеохимических аномалий.

Книга представляет интерес для геологов, геохимиков и геофизиков, занимающихся поисками рудных месторождений, а также для биологов, интересующихся биогеохимией и результатами биогеохимических исследований на рудных месторождениях.

## ВВЕДЕНИЕ

Принципиальная возможность использования химического состава растений для поисков рудных месторождений была известна еще в прошлом веке. Однако достаточно четко она была сформулирована и продемонстрирована на конкретных примерах только в 1938 г. С. М. Ткаlichem. По предложению академика В. И. Вернадского, поисковые методы, основанные на изучении химического состава живых организмов или их остатков, стали называться биогеохимическими.

Установленные длительными исследованиями высокая чувствительность на ряд элементов, экономичность при поисках неглубокопогребенных рудных месторождений, применимость в зимнее время, а также успехи в разработке теоретических и методических вопросов дали возможность перейти от рассмотрения теоретических возможностей и опытных работ на известных месторождениях к опытно-производственному применению этих методов.

В настоящее время наибольшее практическое значение имеет биогеохимический метод, основанный на изучении химического состава растений. Использование его началось в основном в последнее десятилетие. Этому в значительной степени способствовало издание первого методического руководства С. М. Ткалича (1959), включение биогеохимического метода в «Инструкцию по геохимическим методам поисков рудных месторождений» (1965) и выход в свет ряда книг (Грабовская, Астрахан, 1963; Малюга, 1963; Поликарпочкин, Поликарпочкина, 1964; Саппон, 1964; Грабовская, 1965; Талипов, 1966; Биогеохимические поиски в различных ландшафтах, 1968; Биогеохимические поиски рудных месторождений, 1969; Fortescue, Hornbrook, 1969; Ткалич, 1970; Brooks, 1972; и др.).

С помощью биогеохимического метода открыты крупные промышленные месторождения: Эндако (молибденовое) и Бетлехем (медно-молибденовое) в Канаде. Интересные объекты — средние и мелкие месторождения, рудопроявления, отдельные рудные тела и перспективные биогеохимические аномалии — были выявлены и в Советском Союзе (Малюга, 1963; Ковалевский, 1967). Известен ряд примеров, когда с помощью биогеохимических поисков были расширены перспективы золоторудных месторождений в Узбекистане и Якутии, кобальтового месторождения Тувинской АССР и др.

Вопросы формирования рудных биогеохимических ореолов являются важнейшим разделом теоретических основ биогеохимических методов поисков рудных месторождений. Однако до недавнего времени они были изучены недостаточно. Это связано в основном с тем, что закономерностям накопления живыми организмами элементов-индикаторов рудных

месторождений не уделялось достаточного внимания. Работами последних лет, посвященными изучению накопления растениями рудных элементов при больших концентрациях в питающей среде, было выявлено значительное влияние ряда факторов, которым ранее не придавалось значения. Анализ имеющихся данных позволяет разделить многочисленные одновременно действующие факторы на основные и второстепенные и сделать теоретический анализ особенностей формирования биогеохимических ореолов над рудами различных типов. Рассмотрению основных факторов и условий формирования рудных биогеохимических ореолов и аномалий, а также особенностям интерпретации биогеохимических аномалий и посвящена эта книга.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность ответственному редактору монографии профессору А. А. Беусу, а также С. А. Гурулеву и А. С. Паку, сделавшим критические замечания и предложения по рукописи. Автор также выражает благодарность О. М. Ковалевской, принимавшей участие в полевых работах и в камеральной обработке аналитических данных.

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ РУДНЫХ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ

Биогеохимическими ореолами или аномалиями называют статистически достоверные, в основном положительные, отклонения концентрации химических элементов от фоновых содержаний в стандартизированных пробах растений или других биологических объектов. Они могут быть рудными и безрудными. Для поисков рудных месторождений представляют интерес аномалии не любых химических элементов, а только индикаторов рудной минерализации, которые являются микроэлементами растений. Поэтому нами не рассматриваются хорошо изученные особенности формирования общего (макроэлементного) состава растений — величины сравнительно стабильной.

Биогеохимические аномалии элементов-индикаторов — основной источник информации о рудной минерализации. Однако в связи с многочисленностью факторов, влияющих на накопление химических элементов растениями, не все биогеохимические аномалии обусловлены рудной минерализацией. Это усложняет интерпретацию результатов биогеохимических съемок и делает необходимым изучение особенностей формирования как рудных, так и безрудных аномалий химического состава растений.

Нами выделяется четыре фактора, определяющих формирование рудных биогеохимических ореолов; 1) минеральные и химические формы рудных элементов в рудах и их литохимических ореолах; 2) характер контакта руд и их лито- и гидрохимических ореолов с корнями растений; 3) наличие у растений физиологических барьеров поглощения по отношению к большим концентрациям рудных элементов в почвах и корнеобитаемой зоне рыхлого покрова и 4) масштаб оруденения. Каждый из этих факторов в отдельности может обусловить наличие или отсутствие биогеохимической аномалии над рудным телом и сделать эффективным или бесполезным применение биогеохимии при поисках месторождений. Для понимания особенностей формирования рудных биогеохимических ореолов необходим учет и других рассматриваемых ниже факторов.

### МИНЕРАЛЬНЫЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЧВАХ, РЫХЛОМ ПОКРОВЕ И РУДАХ

По эффективности выявления биогеохимическим методом типы рудной минерализации могут быть разделены на благоприятные (элементы-индикаторы которых доступны растениям) и непригодные (элементы-индикаторы недоступны растениям). Влияние этого фактора лежит в основе выбора геологических объектов, которые могут выявляться и изучаться с помощью биогеохимии, и никакие методические приемы не позволяют обнаруживать рудные месторождения, если их минеральные формы, контактирующие с корнями, не поглощаются ими.

При анализе доступности растениям химических элементов внешней среды необходимо учитывать поглощение их из всех трех фаз — твердой, жидкой и газообразной — всеми органами растений. Наибольшее значение для понимания условий формирования рудных биогеохимических ореолов имеет корневое питание растений из твердой фазы почв и рыхлого покрова. В некоторых случаях существенным для расшифровки этих условий может быть корневое поглощение рудных элементов из почвенных и грунтовых вод, т. е. из жидкой фазы. Хотя растения улавливают некоторые химические элементы надземными частями из воздуха, пыли и атмосферных осадков, влияние некорневого питания на формирование рудных биогеохимических ореолов большинства элементов-индикаторов практически отсутствует. Это связано с тем, что поглощение газообразных соединений химических элементов не известно для большинства элементов-индикаторов рудных месторождений за исключением ртути, фтора, серы и селена. Поглощение пыли является одним из факторов, незначительно увеличивающих уровень помех при выделении рудных биогеохимических аномалий, а поглощение рудных элементов из атмосферных осадков до настоящего времени практически не изучалось.

Сравнение интенсивности накопления растениями химических элементов из твердой, жидкой и газообразной фаз внешней среды показывает, что наиболее интенсивно они поглощаются из газообразной, а наименее интенсивно — из твердой фазы. Это связано с наименьшей энергией связи химических элементов в газообразных соединениях и весьма значительной энергией связи химических элементов, находящихся в твердых и кристаллических соединениях. Для количественной оценки интенсивности поглощения и накопления растениями химических элементов из различных фаз внешней среды мы используем серию относительных биогеохимических параметров (коэффициентов): растительно-почвенный (РПК), растительно-водные (корневой и надземный) —  $РВК_K$  и  $РВК_H$  и растительно-газовые (надземный и корневой) —  $РГК_H$  и  $РГК_K$ .

Каждый из этих коэффициентов равен отношению концентрации химического элемента в золе растения ( $C_p$ ) и в соответствующей внешней среде: почве или рыхлых образованиях ( $C_n$ ), воде ( $C_b$ ) или газообразной фазе (воздухе) —  $C_r$ . Основные из этих коэффициентов определяются по формулам:  $РПК = \frac{C_p}{C_n}$ ;  $РВК_K = \frac{C_p}{C_b}$ ;  $РГК_H = \frac{C_p}{C_r}$  при условии, если рассматриваемый химический элемент поступает только из почвы, из водного раствора, в котором находятся корни, или из воздуха. Такие условия наиболее полно могут быть реализованы при использовании радиоактивных изотопов химических элементов («меченых атомов») или при выращивании растений в искусственных условиях в почвенных или водных культурах с соблюдением необходимых предосторожностей от поступления изучаемого элемента из «посторонней» среды. Можно считать, что растения имеют почвенное питание, если их корни не имеют контакта с водоносным горизонтом или его капиллярной каймой, и водное питание, если они выращиваются в водных питательных растворах. Растения, произрастающие в естественных условиях, имеют почвенно-водное питание, если их корни имеют контакт с водоносным горизонтом грунтовых вод или его капиллярной каймой.

Сопоставление РПК,  $РВК_K$  и  $РГК_H$  показывает, что средние величины их относятся как  $1 : 3 \cdot 10^3 : 3 \cdot 10^5$  (табл. 1), т. е. из водной среды растения поглощают химические элементы в 3000 раз более интенсивно, чем из твердой фазы почвы, а из воздуха в 100 раз интенсивнее, чем из водных растворов. Эти данные показывают, что при наличии заметных концентраций изучаемых химических элементов в водных растворах или в воздухе они могут вносить существенный, а иногда и основной вклад в наблюдаемые в растениях содержания этих элементов. Кроме основных

Пределы колебаний и средние значения РПК, РВК<sub>к</sub>, РГК<sub>н</sub> и РГК<sub>к</sub> химических элементов

Коэффициент	Значение коэффициентов		Примеры химических элементов
	lim	среднее	
Растительно-почвенный (РПК)	$10^{-3}-10^2$	1,0	Большинство элементов
Растительно-водный корневой (РВК <sub>к</sub> )	$10^2-10^5$	$3 \cdot 10^{-3}$	То же
Растительно-газовый надземный (РГК <sub>н</sub> )	$10^4-10^7$	$3 \cdot 10^5$	C(CO <sub>2</sub> ), S(SO <sub>2</sub> ), N(NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, NO), Hg, F, J
Растительно-газовый корневой (РГК <sub>к</sub> )	—	$\sim 3 \cdot 10^5$	N(NH <sub>3</sub> )

источников химических элементов в растениях, учитываемых с помощью РПК, РВК<sub>к</sub> и РГК<sub>н</sub>, возможны и другие источники их поступления в растения, для оценки интенсивности поглощения которых должны использоваться специальные параметры. Например, для поглощения химических элементов из жидких атмосферных осадков следовало бы использовать РВК<sub>н</sub> для поглощения их газообразных форм корнями — РГК<sub>к</sub> и т.д.

Значительные колебания отдельных значений РПК, РВК<sub>к</sub> и РГК<sub>н</sub> (см. табл. 1) говорят о том, что они весьма специфичны для различных соединений химических элементов, зависят от вида, органа и времени опробования растений и других факторов и требуют специального изучения. Анализ этих причин показывает, что изменения РПК химических элементов обусловлены в основном доступностью растениям, которая определяется их минеральными и химическими формами твердой фазы. Значительное влияние на значения РПК и РВК<sub>к</sub> оказывает наличие у растений барьеров поглощения по отношению к большим концентрациям химических элементов в питающей среде, которое будет рассмотрено ниже.

Понятие о доступности растениям элементов минерального питания является основным при анализе влияния минеральных и химических форм рудных элементов в почвах, рыхлом покрове и рудах на интенсивность их накопления растениями. Оно было разработано биологами и почвоведом еще в XIX в. Однако в теории и практике биогеохимических поисков рудных месторождений это понятие не было увязано с минеральными формами рудных элементов. Связь между особенностями поглощения растениями рудных элементов и их минеральными формами в почвах и рыхлом покрове отмечалась рядом авторов, проводивших биогеохимические исследования на рудных месторождениях (Ткалич, 1953, 1961, 1970; Ковалевский, 1963, 1966а, 1968а, 1969а, 1972; Ивашов, 1972а, 1972б; и др.). Наблюдается она не всегда, так как может быть искажена и затуманена влиянием других факторов. Главным из них является наличие у растений физиологических барьеров поглощения по отношению к большим концентрациям химических элементов в питающей среде (Ковалевский, 1971). Кроме него существенным может быть влияние неоднородности изучаемых биологических объектов, условий произрастания растений и времени их опробования. Поэтому при рассмотрении влияния форм нахождения элементов-индикаторов в почвах мы используем данные о содержании соответствующих химических элементов в однородных безбарьерных видах, органах и частях органов растений, произрастающих в сходных географических и геохимических ландшафтах.

Биогеохимическим параметром, характеризующим взаимосвязь между минеральными формами какого-либо химического элемента в почвах и корнеобитаемом рыхлом покрове и его содержанием в растении, является растительно-почвенный коэффициент (РПК). РПК, равный отношению концентрации изучаемого химического элемента в золе растения

к содержанию в почве, служит параметром, характеризующим интенсивность поглощения (или накопления) его растением из почвы. Этот количественный параметр, введенный в практику научных исследований Б. Б. Полюновым (1945) и названный А. И. Перельманом (1961) коэффициентом биологического поглощения ( $A_x$  или КБП), а некоторыми авторами (Михайлов и др., 1967) — коэффициентом биологического накопления (КБН), мы предлагаем именовать растительно-почвенным коэффициентом (РПК). Целесообразность изменения названия этого параметра обусловлена детализацией коэффициента биологического поглощения и введением параметров, характеризующих поглощение химических элементов растениями из водной и газообразной фаз среды, окружающей растения, — растительно-водного (РВК) и растительно-газового (РГК) коэффициентов.

Вычислить РПК нетрудно в условиях, когда содержание изучаемого химического элемента распределено в корнеобитаемой зоне сравнительно равномерно. В случаях, когда он концентрируется в какой-либо части почвенного разреза или корнеобитаемой зоны рыхлого покрова, необходимо сравнивать химический состав растения и специально определяемого почвенного «горизонта питания» (Ковалевский, 1967в). При вычислении РПК необходимо обращать внимание на то, чтобы его величины не были искажены барьерами поглощения, несоответствием используемого горизонта почв горизонту питания растения или поглощением изучаемого элемента из вод или воздуха (Ковалевский, 1969б).

Наиболее контрастное влияние минеральных форм на интенсивность поглощения растениями, произрастающими в пределах однородного участка, обнаружено для бора. Наибольшие величины РПК, равные 40—150 (в среднем 75), были установлены у хвой лиственниц, произрастающих над рудными телами водорастворимых боратов. Благодаря интенсивному поглощению над этими рудными телами в растениях наблюдаются контрастные

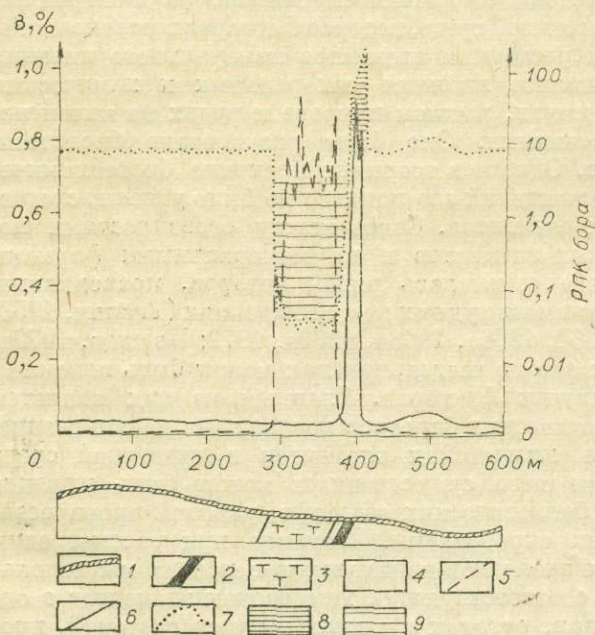


Рис. 1. Распределение бора в почвах и растениях на боратовом месторождении в мерзлотном ландшафте (по данным В. Л. Кожары, 1964).

1 — рыхлые образования; 2 — рудные тела боратов; 3 — зона турмалинизации; 4 — вмещающие метаморфические горные породы; 5—6 — содержание бора; 5 — в почвах, 6 — в золе хвой лиственницы (*Larix dahurica*); 7 — РПК бора; 8—9 — аномалии РПК: 8 — положительные, 9 — отрицательные.

блюдаются контрастные биогеохимические аномалии бора (рис. 1). В то же время из-за полного выноса бора из верхних почвенных горизонтов почвенно-геохимические аномалии над боратовыми рудными телами не зафиксированы. На этом же профиле контрастные почвенно-геохимические аномалии были выявлены над зоной турмалинизированных пород. Концентрации бора в верхних почвенных горизонтах здесь достигали 0,5—1,0% при фоновых содержаниях 0,003—0,005%. Однако вследствие нерастворимости турмалина даже в сильных кислотах бор этого минерала не доступен для растений. Поэтому зоны турмалинизации не отмечаются биогеохимическими аномалиями (см. рис. 1). Этот пример показывает, что бораты,

Примеры значений растительно-почвенного коэффициента (РПК) некоторых рудных элементов

Объект исследований	Элемент-индикатор	Растение и его органы	Среднее значение РПК		Минеральные формы элементов в рудах и их ореолах
			Фоновое (РПК <sub>ф</sub> )	аномальное — над рудными телами (РПК <sub>а</sub> )	
Редкометалльное месторождение	Mo	Ветви багульника болотного	4,0	1,6	Молибденит, молибдит, ферримолибдит
	W	Ветви кедрового сибирского	1,0	0,1	Вольфрамит, шешлит
	Zn	Ветви кедрового сибирского	9,0	23,0	Сфалерит
Колчеданно-полиметаллическое месторождение	Pb	Хвоя лиственницы даурской	0,2	0,4	Формы, сорбированные гидроокислами железа (Fe-формы)
	Zn	Ветви лиственницы	10,0	1,4	Fe-формы
	Cu	Ветви лиственницы	1,6	0,4	Fe-формы
Боратовая минерализация <sup>1</sup>	B	Хвоя лиственницы	8,0	75,0	Людвигит
Турмалиновая минерализация <sup>1</sup>	B	Хвоя лиственницы	8,0	0,03	Турмалин, джюмортерит
Урановое оруденение в зоне дробления гранитов	Ra	Ветви березы	2,0	2,2	Отенит, торбернит, прекингерит
Урановое оруденение в песчано-глинистых отложениях	Ra	Ветви лиственницы	2,2	6,8	Уран, сорбированный глинистым и углистым веществом
Урановое оруденение в бурых железняках <sup>2</sup>	Ra	Ветви березы	1,8	0,06	Fe-формы урана

<sup>1</sup> По данным В. Л. Кожары (1964).<sup>2</sup> По данным А. С. Вершинина (1969).

представленные, в частности, людвигитом, относятся к весьма благоприятному для выявления биогеохимией минеральному типу боратовой минерализации. Турмалин должен быть отнесен к минеральному типу борной минерализации, непригодной для выявления с помощью биогеохимического метода.

Аналогичное явление — увеличение интенсивности поглощения элементов-индикаторов рудных месторождений над зонами минерализации и рудными телами по сравнению с безрудными участками — отмечается для цинка, представленного сфалеритом; для радия — над рудами с сорбированным ураном; для меди — тетраэдритом, халькопиритом и ковеллитом; лития — лепидолитом; вольфрама — зейрегитом, и некоторых других типов рудной минерализации (табл. 2, 3). В этих условиях над рудными телами (аномалиями) растительно-почвенные коэффициенты (РПК<sub>а</sub>), существенно превышают фоновые значения этого параметра (РПК<sub>ф</sub>), а биогеохимические аномалии соответствующих элементов-индикато-

Значения растительно-почвенных коэффициентов (РПК) для различных минеральных форм некоторых рудных элементов (для безбарьерных видов и органов растений основных групп)

Элемент	Приближенные значения РПК					
	100	10	1,0	0,1	0,01	0,001
Zn (Cd)	Сфалерит, сульфаты	Сфалерит, безминеральные* формы (БМ-формы)	Сорбированные гидроокислами железа формы (Fe-формы)	—	—	—
Cu	Сульфаты	Халькопирит, тетраэдрит, ковеллин, БМ-формы при pH почв $\leq 5,5$	БМ- и Fe-формы при pH почв $\geq 6,5$	Fe-формы, крупнокристаллический малахит	—	—
Li	Водорастворимые соединения	Лепидолит, Li-мусковит	Лепидолит, амблигонит, монтебразит, БМ-формы	БМ-формы	—	—
B	Водорастворимые бораты	Улексит, датолит, БМ-формы	Ашарит, данбурит	Турмалин, дюмортьерит		—
Mo	Водорастворимые соединения	Иордзит, повеллит, вульфенит, зейрегит; Fe- и БМ-формы		Мелкокристаллический молибденит	Крупнокристаллический молибденит	—
Ra	—	Урановые черны, сорбированные формы в глинах, БМ-формы	Дисперсные урановые смолки и слюдки, БМ-формы	Fe-формы, урановая смолка	Уранинит, монацит, титанаты урана	—
Pb	—	Церуссит, англезит	БМ- и Fe-формы	Мелкокристаллический галенит	Крупнокристаллический галенит	—
W	—	Зейрегит	Зейрегит, вторичные минералы, БМ-формы	Вольфрамит, гюбнерит, шеелит		Крупнокристаллический вольфрамит
Sn	—	Дисперсный касситерит в сульфидах, БМ-формы	Кварц-сульфидная минерализация, БМ-формы	Кварц-касситеритовая минерализация	Крупнокристаллический	Касситерит в кварце
Au	—	Дисперсные формы в глинах и сульфидах, Fe- и БМ-формы		Мелкое самородное золото	Среднее золото	Крупное золото
Be	—	—	Гельвин, гентгельвин, БМ-формы	Фенацит, бертрандит, БМ-формы	Берилл, фенацит	Крупнокристаллический берилл

\* Т. е. не определяемые минералогически солевые и сорбированные формы химических элементов, а также их изоморфные вхождения в минералы.

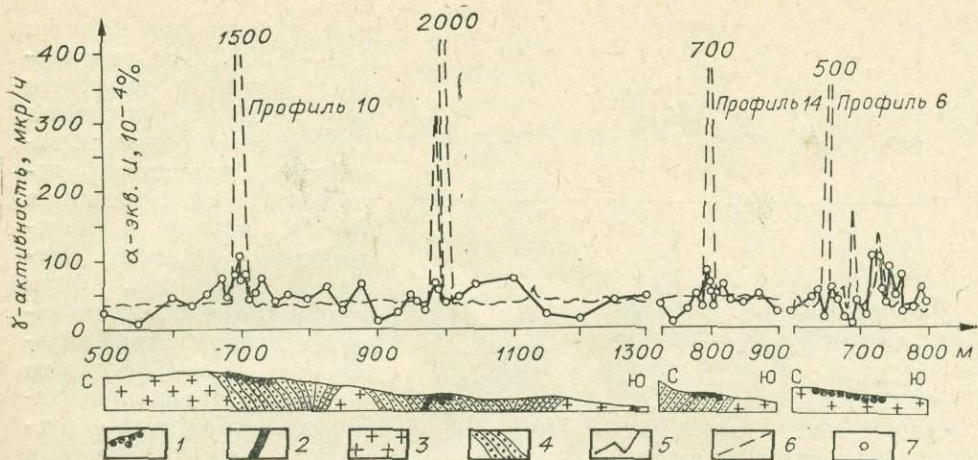


Рис. 2. Распределение  $\gamma$ -активности почв и радия в золе растений над глыбовыми ореолами урановых руд, представленных урановой смолкой, в высокогорном мерзлотном ландшафте Сибири.

1 — глыбовые ореолы рудных тел; 2 — известные рудные тела; 3 — граниты, гранодиориты; 4 — сланцы и гнейсы; 5 — радий ( $\alpha$ -активность) в золе; 6 —  $\gamma$ -активность на дневной поверхности; 7 — опробованные растения (ветви лиственницы).

Для расчета содержаний радия в % экв. Ц здесь и в последующих рисунках  $\alpha$ -активность в % экв. Ц умножается на 1,4 (Ковалевский, 1966а, 1967а);  $1 \cdot 10^{-4}$  % Ц эквивалентен  $3,4 \cdot 10^{-11}$  % Ra.

ров получают контрастнее литохимических или почвенно-геохимических. Такие минеральные типы руд относятся к весьма благоприятным для выявления биогеохимическим методом.

Примеры, приведенные в таблицах 2 и 3, показывают, что интенсивность поглощения растениями рудных элементов увеличивается во всех случаях, когда они представлены легкорастворимыми минералами. Эта интенсивность и соответственно значения РПК уменьшаются, когда минералы являются труднорастворимыми. Эти данные хорошо объясняются современными представлениями о доступности растениям различных химических форм элементов минерального питания в почвах. Согласно этим представлениям, растениям доступны соединения химических элементов, растворимые в растворах органических или минеральных кислот, имеющих кислую реакцию, близкую к реакции корневых выделений —  $\text{pH} = 2,0 - 5,0$  (Пейве, 1954, 1963; Круглова, 1962, 1968; Ринькис, 1963, 1968; Зырин, Стоилов, 1964; Васяев, 1968; Ковалевский, 1968б; Баркан и др., 1968; Ковальский, Гололобов, 1969; и др.).

На доступность растениям химических элементов влияет размер зерен минералов. Это влияние также весьма существенно, так как при достаточно большой крупности зерен или кристаллов химические элементы даже легкорастворимых в кислотах минералов оказываются недоступными для растений. Влияние дисперсности минералов на доступность растениям рудных элементов можно наблюдать как в естественных условиях произрастания растений над рудными телами и их литохимическими ореолами, так и в специальных опытах с добавлением в питающую среду минералов различной крупности.

Примерами влияния размера зерен минералов на доступность растениям рудных элементов являются наши данные об отсутствии биогеохимических аномалий над глыбовыми литохимическими ореолами, представленными таким легкорастворимым и легко выветриваемым минералом, как урановая смолка (рис. 2). Наблюдавшееся нами отсутствие биогеохимических аномалий над некоторыми рудными телами, представленными бериллом (рис. 3), также объясняется наличием в почвах крупнокристаллических форм этих минералов. Определение РПК рудных элементов над открытыми литохимическими ореолами перечисленных минералов

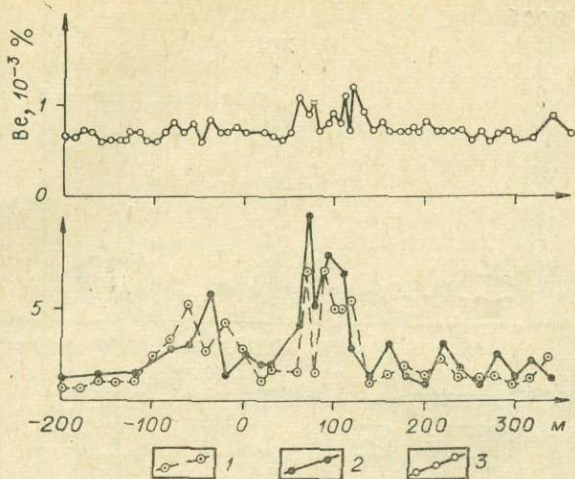


Рис. 3. Распределение бериллия в почвах и растениях редкометального месторождения.  
1, 2 — почвы (1 — гумусовый горизонт, 0,0—0,2 м; 2 — горизонт ВС/С, 0,3—0,8 м); 3 — ветви кедра.

больше величины частиц золота, тем меньше его содержания в растениях. Однако по сведениям, приведенным в его работе, величины РПК золота не могут быть вычислены. Можно только отметить, что в случаях, когда золото находилось в почве в дисперсном состоянии, его РПК были больше 1,0 и достигали 10—50 и более. В растениях же, произраставших на почвах с видимым золотом, оно обычно не обнаруживалось, и приближенные значения его РПК не превышали 0,01—0,1. Отсутствие биогеохимической аномалии свинца над массивной кварц-галенитовой жилой отмечал С. М. Ткалич (1961) в условиях, когда в золе растений, произрастающих над вмещающими ее сланцами с тонкой вкрапленностью галенита, наблюдались повышенные концентрации свинца до 0,01%. Здесь над кварц-галенитовой жилой была установлена отрицательная аномалия свинца:  $1 \cdot 10^{-4}\%$  на фоне  $1-10 \cdot 10^{-3}\%$  над сланцами. Эти примеры, так же как и наши данные для вольфрама и бериллия и рассмотренные выше результаты для бора, говорят о том, что над некоторыми минеральными типами руд и их литохимических ореолов биогеохимические аномалии безбарьерных элементов-индикаторов могут отсутствовать. Такие объекты должны быть отнесены в группу минеральных типов, непригодных для выявления биогеохимическим методом.

Результаты исследований, проведенных биологами в условиях вегетационных опытов с основными элементами минерального питания растений (фосфором, калием и кальцием), подтверждают данные о том, что при крупности зерен, превышающей некоторую критическую для каждого вида минералов величину, эти элементы могут быть недоступны растениям. Критическая величина зерен имеет наименьшую величину для труднорастворимых и наибольшую — для легкорастворимых минералов. Калий микроклина и нефелина практически недоступен растениям при крупности его зерен, превышающей 0,2 мм, а калий биотита — при  $\sim 1,0$  мм; фосфор труднорастворимых фосфоритов недоступен растениям при 0,6 мм, а легкорастворимых фосфоритов при 1,0 мм; кальций извести (окиси кальция) недоступен растениям при крупности зерен, превышающей 10 мм (рис. 4). Эти данные, полученные в условиях специальных опытов в контролируемых условиях, показывают, что даже легкорастворимые в кислотах соединения типа окиси кальция могут быть недоступны для растений, если из-за большой крупности зерен минерала корни имеют малую площадь контакта с ними. Площадь же зерен, как известно, увеличивается пропорционально квадрату их радиуса или размера грани крис-

дает их значения порядка 0,01—0,001. При этом следует иметь в виду, что вычисленные значения РПК в таких случаях завышены вследствие постоянного присутствия в почвах, наряду с минеральными формами изучаемых элементов, форм безминеральных, легко доступных растениям. Свидетельства о недоступности растениям крупнокристаллических форм рудных элементов были получены и другими исследователями для золота и свинца. В обстоятельной работе Н. Бабички (1954, с. 389) указывается на то, что чем

талла. Сопоставление результатов биогеохимических исследований на рудных месторождениях, имеющих различную крупность труднорастворимых минералов, с характеристиками доступности растениям калия микроклина и нефелина показывает, что они близки между собой. Иными словами, труднорастворимые рудные минералы — вольфрамит, гюбнерит, золото, касситерит, берилл и другие — становятся практически недоступными растениям при крупности их зерен, превышающей приблизительно 0,1—0,2 мм. Можно ожидать, что при крупности зерен, близкой к критической, проявится зависимость доступности растениям рудных элементов от того, что представляют собой зерна изучаемых минералов: отдельные кристаллы или измельченный материал с нарушенными кристаллическими решетками на поверхностях зерен. Это необходимо учитывать при проведении специальных вегетационных опытов по изучению доступности растениям рудных минералов с различной крупностью зерен.

Обобщение всех имеющихся в нашем распоряжении сведений о соотношениях между величинами РПК и минеральными формами некоторых рудных элементов с учетом дисперсности минералов позволяет представить их в виде табл. 3. Как видно из ее данных, для всех рассмотренных рудных элементов характерно значительное изменение РПК в зависимости от их минеральной форм. Наибольшие изменения РПК, достигающие  $10^4$  раз, устанавливаются для бора, молибдена, вольфрама, олова и золота. Значительные изменения (порядка  $10^3$  раз) установлены для меди, лития, радия, свинца и бериллия. Наименьшими изменениями РПК характеризуются цинк и кадмий. Данные табл. 3 следует рассматривать как предварительные, требующие уточнения и детализации применительно к различным конкретным условиям. Очевидно, что и для других рудных элементов, не вошедших в эту таблицу, необходимо изучение соотношений между РПК и их типичными минеральными формами. Соотношения между интенсивностью поглощения растениями рудных элементов и их минеральными формами в рудах и литохимических ореолах, находящихся в корнеобитаемой зоне, оказывают значительное влияние на формирование химического состава растений, произрастающих на рудных месторождениях, и на образование биогеохимических ореолов. Это влияние рассматривается как один из основных факторов формирования химического состава растений (Ковалевский, 1969в).

Отметим также, что почти для всех рассмотренных химических элементов (см. табл. 3) могут быть выделены минеральные типы руд, имеющих большие значения РПК, чем для не определяемых минералогически, сорбированных и изоморфных безминеральных форм (БМ-форм), характерных для безрудных — «фоновых участков». Очевидно, что над такими типами руд биогеохимические аномалии безбарьерных элементов-индика-

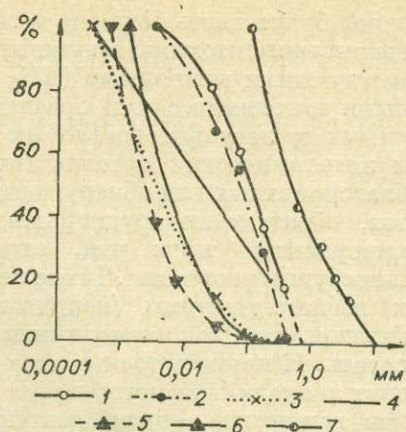


Рис. 4. Зависимости относительной доступности растениям некоторых минералов и горных пород (ось ординат) от размера их зерен (ось абсцисс) с принятой относительной доступностью изученной фракции наименьшего размера, равной 100%. 1, 2 — легкоусвояемые (1) и трудноусвояемые (2) фосфориты (по данным Соколова, 1947); 3, 4 — калий: 3 — среднее для нефелина, гранита, микроклина и мусковита, 4 — биотит (по данным Важенина и Карасевой, 1959); 5, 6 — калий: 5 — среднее для почвенных фракций чернозема и дерново-подзолистых почв, 6 — микроклин (по данным Пчелкина, 1966); 7 — кальций извести (по данным Стрельникова, 1969).

торов будут иметь большие коэффициенты контрастности ( $KK_6$ )\*, чем над открытыми литохимическими ореолами ( $KK_л$ ). Особенно большая разница между этими величинами ( $KK_6 \gg KK_л$ ) будет наблюдаться над ослабленными литохимическими ореолами, которые характерны для легкорастворимых и легковыветриваемых минералов. Эти минеральные типы руд и литохимических ореолов мы предлагаем обособить в группу весьма благоприятных для обнаружения биогеохимическим методом. Для элементов, образующих труднорастворимые минералы, могут быть выделены минеральные типы руд, элементы-индикаторы которых практически недоступны растениям. Такие типы минерализации должны быть отнесены к неблагоприятным (непригодным) для выявления биогеохимическим методом, так как биогеохимические аномалии над ними будут отсутствовать. К промежуточным относятся типы, контрастность биогеохимических аномалий над которыми меньше контрастности литохимических ореолов вследствие меньшей доступности растениям элементов-индикаторов в соответствующих рудных минералах по сравнению с их безминеральными формами за пределами минерализованных зон. Большинство ( $\sim 80\%$ ) типов рудной минерализации, имеющих промышленное значение, относится к минеральным типам, благоприятным для выявления биогеохимическим методом (табл. 4).

При отнесении минеральных типов рудных месторождений к какой-либо из трех выделяемых групп следует учитывать минеральный состав не только рудных тел, но и их первичных и вторичных ореолов рассеяния. Это связано с тем, что минеральные формы рудных элементов и размеры их зерен в рудах и их литохимических ореолах могут быть различными и иметь неодинаковую доступность растениям. Известно, что большинство типов руд сопровождается первичными литохимическими ореолами, представляющими обычно тонкую вкрапленность тех же рудных минералов, которые являются полезными компонентами рудных тел. В некоторых случаях минеральный состав руд и окружающих их первичных ореолов могут различаться между собой. Довольно часто первичные ореолы рудных тел — это повышенные концентрации элементов-индикаторов, представленных как тонкой вкрапленностью их минералов, так и увеличением концентраций этих элементов в породообразующих минералах в виде изоморфных форм. Последнее явление имеет большое значение для отнесения рассматриваемой рудной минерализации к благоприятным или непригодным для выявления биогеохимическим методом типам на основании только минералогических данных без проведения опытных биогеохимических работ. В частности, можно утверждать, что почти все типы рудной минерализации, представленные крупнокристаллическими выделениями труднорастворимых минералов (их элементы-индикаторы недоступны растениям), которые сопровождаются контрастными тонковкрапленными первичными ореолами тех же минералов или повышенными концентрациями безминеральных форм этих элементов, должны быть отнесены в группу минеральных типов, благоприятных для применения биогеохимии. Подобная минерализация, не сопровождающаяся первичными ореолами должна быть отнесена к группе минеральных типов, непригодных для применения биогеохимических поисков. В частности, упоминавшаяся выше кварц-галенитовая жила в сланцах, имеющих вблизи нее тонкую вкрапленность галенита, над которыми установлена довольно контрастная биогеохимическая аномалия (до 0,01%) свинца, может быть причислена к минеральному типу, благоприятному

\* Коэффициент контрастности ( $KK$ ) равен отношению концентрации элемента-индикатора на геохимической аномалии ( $C_a$ ) к его местному фоновому содержанию ( $C_f$ ), т. е.  $KK = \frac{C_a}{C_f}$ , или определяется по более сложным формулам (Беус, 1969).

Пример разделения типов руд с открытыми и ослабленными литохимическими ореолами по эффективности выявления и применимости биохимического метода поисков

Весьма благоприятные ( $KK_{\text{б}} \geq KK_{\text{л}}$ , $РПК_{\text{а}} \geq РПК_{\text{ф}}$ )			Благоприятные ( $KK_{\text{б}} < KK_{\text{л}}$ , $РПК_{\text{а}} < РПК_{\text{ф}}$ )			Непригодные ( $KK_{\text{б}} \leq 1,0$ , $РПК_{\text{а}} < РПК_{\text{ф}}$ ), биогеохимические аномалии отсутствуют		
Тип минерализации	n <sup>1</sup>	Элементы-индикаторы	Тип минерализации	n	Элементы-индикаторы	Тип минерализации	n	Элементы-индикаторы
Молибденовая (с зонами окисления) <sup>2,3</sup>	>50	Mo	Молибденитовая (на разных фазах окисления) <sup>2</sup>	4	Mo	Золотая (с крупным золотом в россыпях) <sup>19</sup>	4	Au
Зейрегитовая <sup>4</sup>	Нет данных	Mo, W	Кварцево—молибденитовая <sup>2</sup>	8	Mo	Берилловая (с крупнокристаллическим бериллом) <sup>2</sup>	3	Be
Колчеданно-полиметаллическая (с железными шляпами) <sup>2</sup>	7	Pb, Ag	Вольфрамитовая, гюбнеритовая, шеелитовая <sup>2,3</sup>	>20	W			
Золото-сульфидная (с дисперсным золотом) <sup>5,6</sup>	>10	Au	Колчеданно-полиметаллическая (с железными шляпами) <sup>2</sup>	4	Pb, Ag	Турмалиновая <sup>10, 11</sup>	20	B
Золотая в глинах (курунах-ский тип) <sup>7</sup>	3	Au	Полиметаллическая в силикатных породах <sup>13, 14, 15</sup>	8	Pb, Zn	Киноварная, касситеритовая, ильменито-цирконовая, монацитовая, вольфрамитовая, платиновая и др. в россыпях, не сопровождающиеся гидрохимическими ореолами <sup>21</sup>	20	Hg, Sn, Ti, Zr, Th, W, Pt и др.
Гельвиновая, гентгельвиновая <sup>8</sup>	>10	Be	Золото-турмалиновая (с дисперсным золотом) <sup>2</sup>	3	Au			
Лепидолитовая <sup>9</sup>	Нет данных	Li	Кварц-золоторудная (с дисперсным золотом) <sup>5, 6</sup>	6	Au			
Боратовая, датолитовая <sup>10, 11</sup>	20	B	Фенакитовая, берtrandитовая, берилловая <sup>2, 16</sup>	>20	Be			
Урановая (с урановыми слюдками и чернями и сорбируемыми формами урана в глинах) <sup>2, 12</sup>	>50	Ra	Сподуменовая, петалитовая <sup>17, 18</sup>	>10	Li	Уранитовая, смолковая <sup>2</sup>	6	Ra
Различные минеральные типы, сопровождающиеся контрастными гидрохимическими ореолами <sup>20</sup>		Mo, Pb, Zn, Cu, Ag, Ni, и др.	Различные минеральные типы, сопровождающиеся мало контрастными гидрохимическими ореолами <sup>20</sup>		Mo, Pb, Zn, Cu, Ag, Sn, Hg, Zr и др.			

<sup>1</sup> Число изученных рудных тел; <sup>2</sup> по нашим данным; <sup>3-10</sup> по литературным данным; <sup>3</sup> Талипова, 1966; <sup>4</sup> Ивашова, 1972; <sup>5</sup> Григорьева, 1962; <sup>6</sup> Шабьнина, 1967; <sup>7</sup> Разица, Рожкова, 1966; <sup>8</sup> Авессаломовой, Грабовской, 1968; <sup>9</sup> Ивашова, 1972; <sup>10</sup> Кожары, 1964; <sup>11</sup> Саева, 1969; <sup>12</sup> Верпинина, 1969; <sup>13</sup> Поликарпочкина, Поликарпочкиной, 1964; <sup>14</sup> Флеровой, Флерова, 1964; <sup>15</sup> Бабаева, 1968; <sup>16</sup> Грабовской, Астрахана, 1963; <sup>17</sup> Загоскина и др., 1969; <sup>18</sup> Шаховой, 1964; <sup>19</sup> Бабички, 1954; <sup>20</sup> по данным о значительной интенсивности поглощения растениями рудных элементов из водных растворов и малочисленным фактическим данным; <sup>21</sup> по данным о растворимости и устойчивости минералов в зоне гипергенеза.

для выявления биогеохимическим методом. Но при интерпретации биогеохимических аномалий необходимо иметь в виду, что к массивным слабыветрелым рудам могут приурочиваться не максимумы, а минимумы или средние концентрации рудных элементов в растениях, и что биогеохимией могут выявляться не сами рудные тела, а их первичные ореолы.

При отнесении минеральных типов руд к благоприятным или непригодным для биогеохимических поисков необходимо учитывать процессы изменения руд и их первичных ореолов вблизи дневной поверхности, которые могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению доступности растениям элементов-индикаторов рудной минерализации. Большинство их способствует увеличению доступности рудных элементов растениям и повышению эффективности биогеохимических поисков. Этими процессами является измельчение первичных и образование вторичных минералов.

Измельчение рудных минералов прямо способствует увеличению доступности находящихся в них рудных элементов, благодаря увеличению площади контакта корней с минералами.

Увеличение доступности элементов-индикаторов при образовании большинства вторичных минералов объясняется известными данными о том, что растворимость их в различных реагентах значительно больше, чем растворимость первичных рудных минералов. В частности, из результатов исследований растворимости различных минералов известно, что молибденит нерастворим в соляной кислоте, едком калии и других реагентах, а повеллит, вульфенит и ферримолибдит растворяются в них на 100%; галенит нерастворим в 5%-ной соляной кислоте и 25%-ном хлористом натрии, а англезит растворим на 100% в этих и других реагентах; халькопирит нерастворим в серной кислоте, а азурит и малахит растворимы в ней на 100% и т. д. (Доливо-Добровольский, Клименко, 1947; Дорфман и др., 1959; Фазовый (рац.) анализ руд, 1961; Фазовый химический анализ руд и минералов, 1962; Тимофеев, 1962; Филиппова, 1963; Ясус, 1967; Храменко, 1967). Поэтому при наличии в корнеобитаемой зоне почв и рыхлого покрова вторичных рудных минералов величины растительно-почвенного коэффициента (РПК) обычно получают значительно большими, чем при отсутствии зоны окисления и наличии первичных минералов. Закономерное увеличение контрастности биогеохимических ореолов от начальных к средним этапам развития зон окисления на урановых месторождениях отмечалось в ряде публикаций (Кавалевский, 1963, 1972). Следует отметить, что в связи с рассматриваемыми процессами увеличения доступности растениям элементов-индикаторов при измельчении и окислении первичных минералов руд и их литохимических ореолов находятся известные данные о смещении рудных биогеохимических ореолов вниз по склону относительно рудных тел.

Анализ фактических данных о смещении биогеохимических аномалий относительно рудных тел, представленных различными минеральными типами, показывает, что над легковыветриваемыми рудами смещение на склонах биогеохимических аномалий или отсутствует, или является незначительным, т. е. в этих случаях растениям доступны элементы-индикаторы самих рудных тел и их первичных ореолов. К таким типам минерализации относятся бораты, представленные людвицитом (см. рис. 1); ураноносные рудные тела в зонах дробления гранитов, верхние части зон окисления которых представлены урановыми слюдками типа отенита и торбернита (рис. 5, а); ураноносные рудные тела в рыхлых осадочных образованиях с ураном, сорбированным глинистым и углистым веществом (рис. 5, б); сульфидные золотоносные жилы (рис. 6); локальные молибденоносные зоны и жилы (рис. 7); многие полиметаллические рудные тела и другие типы легковыветриваемых руд.

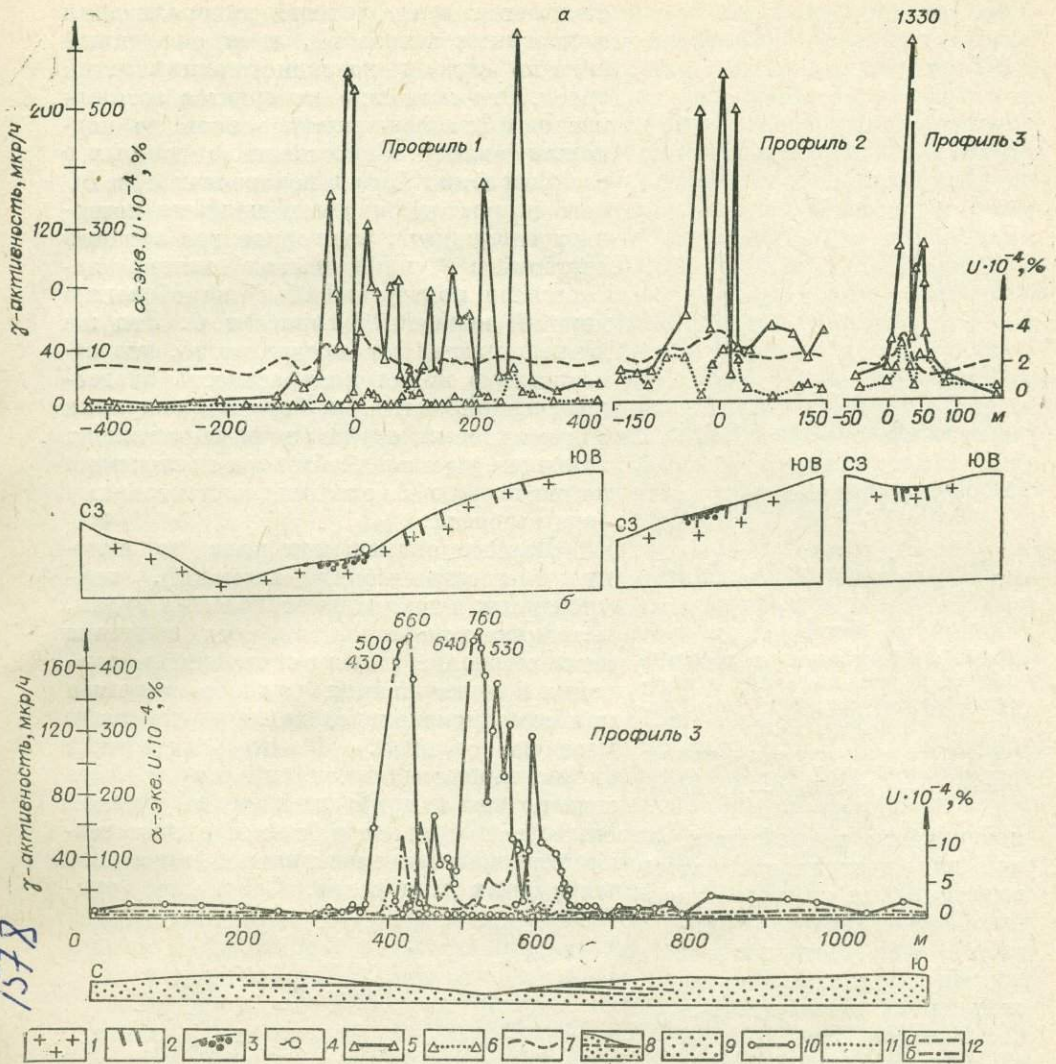


Рис. 5. Сравнительная эффективность биохимического и радиометрического методов при поисках на площадях II категории.

а — урановые руды в зонах дробления гранитов в таежном немерзлом ландшафте: 1 — граниты, гранодиориты, 2 — урановые рудные тела, 3 — ореолы рудных тел, 4 — радиоактивный источник; 5 — α-активность золы ветвей березы, 6 — содержание урана в золе, 7 — γ-активность на дневной поверхности; б — легковыветриваемые урановые руды пластового типа в мерзлотно-таежном ландшафте: 8 — урановые рудные тела, 9 — песчано-глинистые отложения, 10 — α-активность золы ветвей лиственницы, 11 — содержание урана в золе, 12 — γ-активность (а — на дневной поверхности, б — в закопашках или шпурах глубиной 0,3—0,6 м).

Для трудновыветриваемых руд, представленных устойчивыми минералами, характерно смещение биохимических аномалий на склонах, измеряемое обычно сотнями метров, при отсутствии их над рудными телами и их первичными ореолами. Такое явление мы наблюдали, например, над урановой минерализацией, представленной тонкораспыленной урановой смолкой, «запечатанной» в кварце. Биохимические аномалии радия (α-активности) оказываются смещенными на склонах на 30—80 м, и верхние части их примыкают к зоне первичных ореолов рудных тел, представленных гидротермально измененными окварцованными породами (рис. 8). Аналогичное смещение биохимических аномалий было наблюдается относительно дагелитовой минерализации в ландшафте широколиственных лесов. На рис. 9 видно, что биохимической аномалией



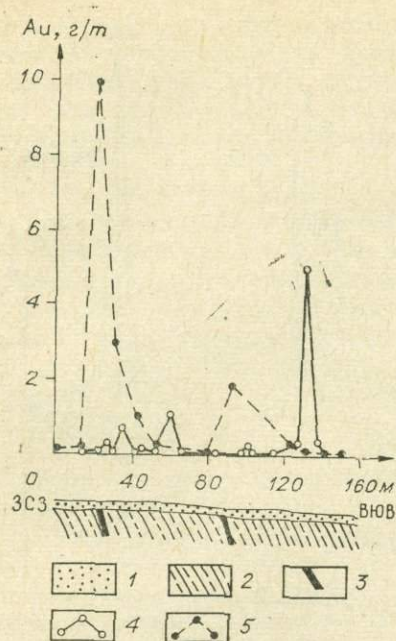


Рис. 6. Распределение золота в почвах и растениях над золото-сульфидными жилами (по Григорьеву, 1962)

1 — рыхлые образования; 2 — сланцы; 3 — рудные жилы; 4, 5 — содержание золота: (4 — в почвах, 5 — в золе багульника).

поверхности погребенных литохимических ореолов, так и с достаточной для доступности растениям степенью измельчения и химического выветривания труднорастворимых рудных минералов. Сравнение рудных биогеохимических аномалий над отдельными жильными телами, представленных легковыветриваемыми (см. рис. 1, 5, 6) и трудновыветриваемыми (см. рис. 8, 9) минералами, показывает, что первые являются обычно локальными (ширина 10—50 м), а вторые — более широкими (100—300 м и более).

Над рудными телами, представленными трудно-растворимыми минералами, биогеохимические аномалии имеют обычно меньшую контрастность, чем над легковыветриваемыми рудами. Типичными примерами минерализации этого типа являются вольфрамовая, бериллиевая, тантало-ниобиевая, некоторые типы золотой, литиевой и др. Как видно на

отмечается и датолитовая минерализация в коренном залегании, и ее смещенный вниз по склону почвенно-геохимический ореол. Это смещение измеряется сотнями метров и прослеживается вплоть до подножья склона. Сопоставление данных о распределении бора в горизонтах  $A_0$  и  $BC$  почв на рассматриваемом профиле позволяет утверждать, что горизонтом питания растений в верхних частях склона является не подвергавшийся опробованию нижний почвенный горизонт  $C$ . Эти же данные позволяют предполагать, что относительно малая контрастность биогеохимической аномалии бора над скарнами с датолитовым оруденением обусловлена наличием у растений барьера поглощения по отношению к большим концентрациям бора в почвах.

Данные о смещении вниз по склону биогеохимических аномалий, приуроченных к трудновыветриваемым рудам, позволяют говорить о том, что величина этого смещения зависит от степени измельчения и выветривания рудного вещества при самопроизвольном движении рыхлых масс на склонах. При этом появление биогеохимических аномалий может быть связано как с приближением к дневной

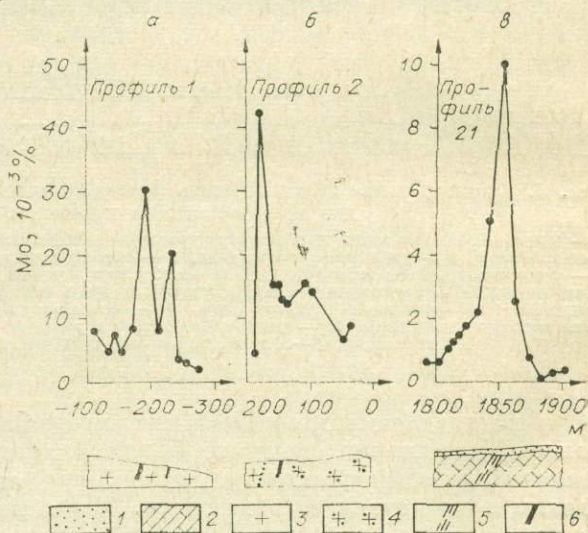


Рис. 7. Распределение молибдена в растениях над жилами и прожилковыми зонами (а — ветви кедра; б — ветви багульника; в — надземные части трав). 1 — рыхлые образования; 2 — доломитизированные известняки с прослоями сланцев и песчаников; 3 — кварцевые монцитито-сциениты; Рз; 4 — брекчии мусковитизированных кварцевых монцитито-сциенитов с рудной минерализацией; 5 — зоны тектонических разрывов; 6 — рудные прожилковые зоны и жилы молибдена.

рис. 10, контрастность биогеохимических аномалий на никелевом месторождении, представленном силикатами никеля в коре выветривания ультраосновных пород, и на хромитовом месторождении невелика и уступает контрастности почвенно-литохимических ореолов. Отношение аномальных концентраций никеля и хрома в золе растений к фоновым содержаниям здесь изменяется от 2 до 4—7. В почвах же показатели контрастности литохимических ореолов равны 5—20, достигая 20—50. Аналогичные соотношения между биогеохимическими и литохимическими ореолами наблюдаются для минерализации различного типа, представленной устойчивыми минералами, например вольфрамовой (гюбнерит и шеелит) и бериллиевой (фенакит и берtrandит). Как видно на рис. 11, не все вольфрамовые рудные тела выделяются биогеохимическими аномалиями. Весьма вероятно, это объясняется присутствием в них крупнокристаллических разностей гюбнерита и шеелита, не доступных растениям. Большинство же вольфрамовых и все бериллиевые рудные тела (рис. 12) отмечаются достаточно контрастными биогеохимическими аномалиями. Однако контрастность биогеохимических аномалий над рассматриваемыми типами минерализации уступает контрастности обуславливающих их открытых литохимических ореолов.

Рассмотренные особенности рудных биогеохимических ореолов над легковыветриваемыми (локальность и отсутствие или незначительное смещение на склонах) и трудновыветриваемыми («размазанность», относительно небольшая контрастность и значительное смещение на склонах) минеральными типами руд необходимо учитывать при интерпретации биогеохимических аномалий.

Таким образом, вследствие наличия вторичных литохимических ореолов и вторичных процессов измельчения, выветривания и преобразования первичного рудного вещества в зоне гипергенеза, многие типы рудной минерализации, представленные устойчивыми к выветриванию труднорастворимыми минералами, могут выявляться биогеохимическим методом. Следует иметь в виду, что биогеохимическими аномалиями часто фиксируются не сами рудные тела, а примыкающие к ним первичные или вторичные литохимические ореолы и смещенные на склонах вторичные литохимические ореолы, элементы-индикаторы которых обычно более доступны растениям, чем их минеральные формы в рудных телах. Это особенно характерно, если они представлены массивными образованиями, слабо измененными вторичными процессами окисления и выветривания. Поэтому отнесение руд, представленных трудновыветриваемыми минералами, к непригодному для выявления биогеохимическим методом типу следует делать только после рассмотрения сведений о минеральных формах их в первичных и вторичных литохимических ореолах и проведения опытных биогеохимических работ на известных месторождениях и рудопроявлениях.

Как видно из табл. 5, при разделении минеральных типов руд на благоприятные и неблагоприятные для выявления биогеохимическим методом необходимо учитывать наличие или отсутствие гидрохимических ореолов. Это связано с тем, что рудная минерализация, представленная некоторыми устойчивыми к выветриванию и практически нерастворимыми минералами, может сопровождаться гидрохимическими ореолами, которые будут давать контрастные биогеохимические аномалии. Поэтому все типы рудных месторождений, сопровождающихся гидрохимическими ореолами, должны быть отнесены к благоприятным для выявления биогеохимическим методом. При этом минеральные типы руд, которые при отсутствии гидрохимических ореолов относились к непригодному типу, могут перейти в группу благоприятных или весьма благоприятных типов (см. табл. 5).

Изучение влияния доступности растениям элементов-индикаторов в корнеобитаемой толще рыхлого покрова на особенности формирования рудных биогеохимических аномалий представляет большую сложность

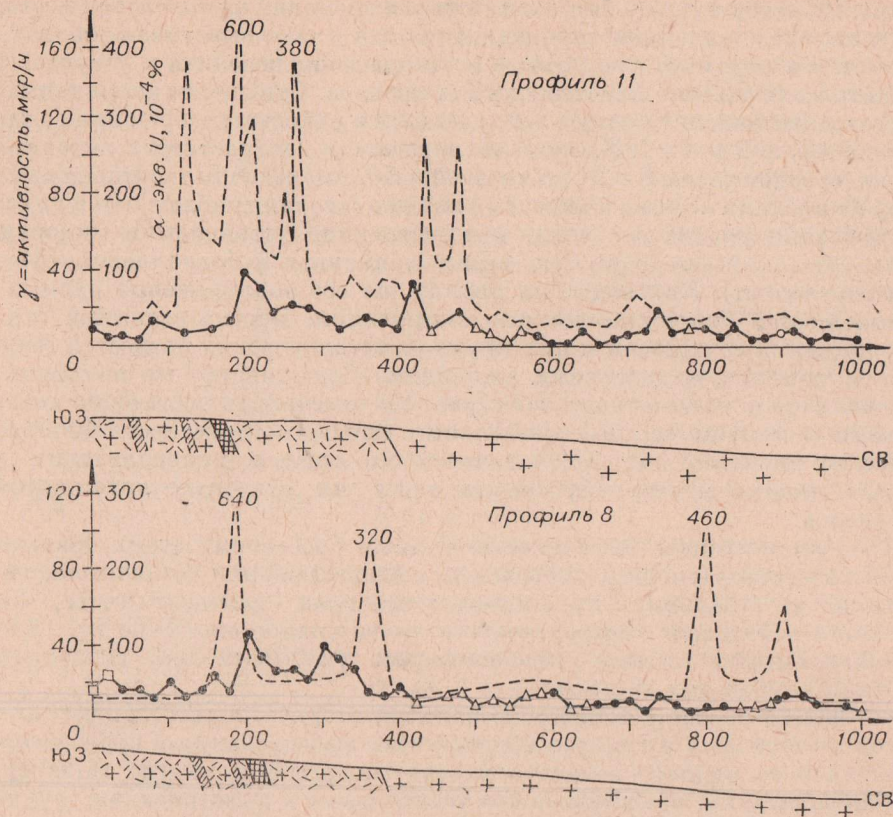
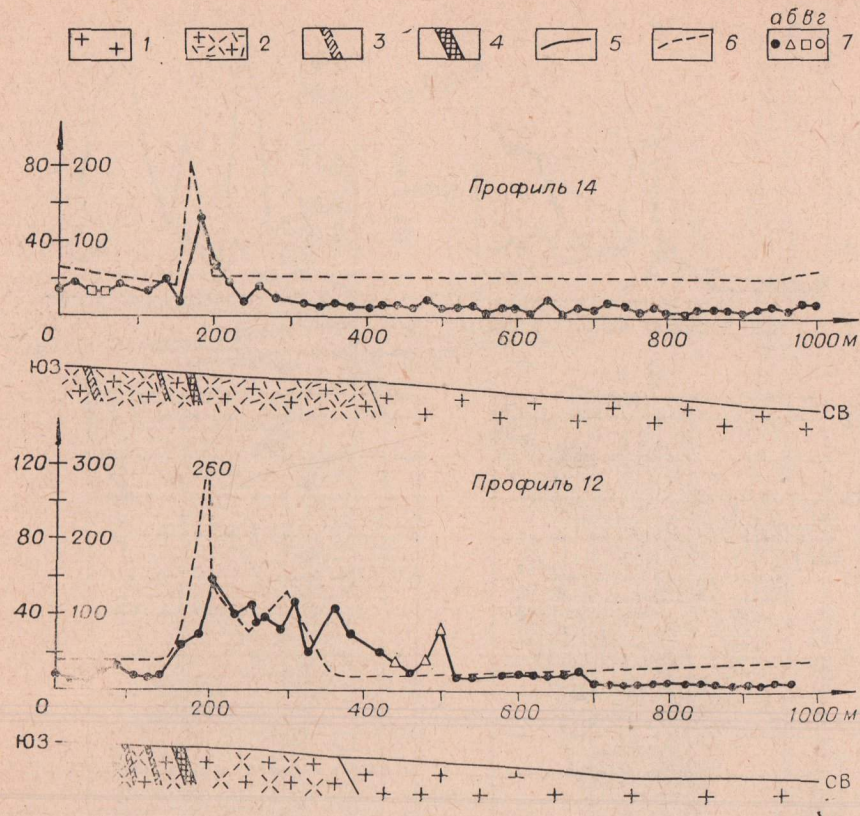


Рис. 8. Сравнительная эффективность биогеохимического и радиометрического методов при поисках уранового месторождения со смолкой, «запечано-таежном ландшафте». 1 — граниты; 2 — зоны гидротермально-измененных гранитов; 3, 4 — рудные тела; 5 — предполагаемые, 6 — вскрытые; 7 — опробованные растения: а — ерник,

вследствие того, что в поглощении их растениями принимают одновременное участие различные формы: легкодоступные и труднодоступные для растений минеральные и химические формы твердой фазы и весьма интенсивно поглощаемые растворенные в подземных водах формы жидкой фазы среды, контактирующей с корнями. Количественное определение вклада каждой из них в формирование биогеохимических аномалий в конкретных условиях имеет большое научное и практическое значение. Разработка методики таких определений — одна из важных задач будущих биогеохимических исследований на рудных месторождениях.

Количественный учет вклада каждой из этих форм может быть сделан, если известны содержания изучаемого химического элемента в каждой из рассматриваемых форм, ее относительное количество в сумме и объемы корней, контактирующих с каждой из форм. Иметь точные сведения о совокупности этих величин невозможно. Однако для некоторых типичных условий приближенные количественные оценки вполне реальны. Сделанные нами расчеты для 4-х форм элементов с приближенными значениями РВК и РПК, изменяющимися от  $3 \cdot 10^3$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  показывают, что в формировании рудных биогеохимических аномалий основное место чаще всего принадлежит легкодоступным для растений формам твердой фазы. Из данных табл. 6 видно, что растворенные в воде рудные элементы могут вносить существенный вклад в формирование рудной биогеохимической аномалии, если содержание их в воде равно или превышает приблизительно 0,03% их количества в твердых фазах. Надо отметить, что такое количество растворенных в воде форм является редким. Это связано с тем, что среднее отношение концентрации рудных элементов в водах ( $C_n$ ) к



ского методов при поисках уранового месторождения со смолкой, «запечано-таежном ландшафте».

предполагаемые, 4 — вскрытые; 5 —  $\alpha$ -активность золы растений; 6 —  $\gamma$ -активность на днев- б — береза, в — сосна, г — лиственница.

их концентрации во вмещающей их твердой фазе ( $C_T$ ), по данным П. А. Удодова и др. (1974), равно  $6 \cdot 10^{-5}$ . С учетом пористости рыхлых образований, равной в среднем 30%, и их удельного веса, близкого к

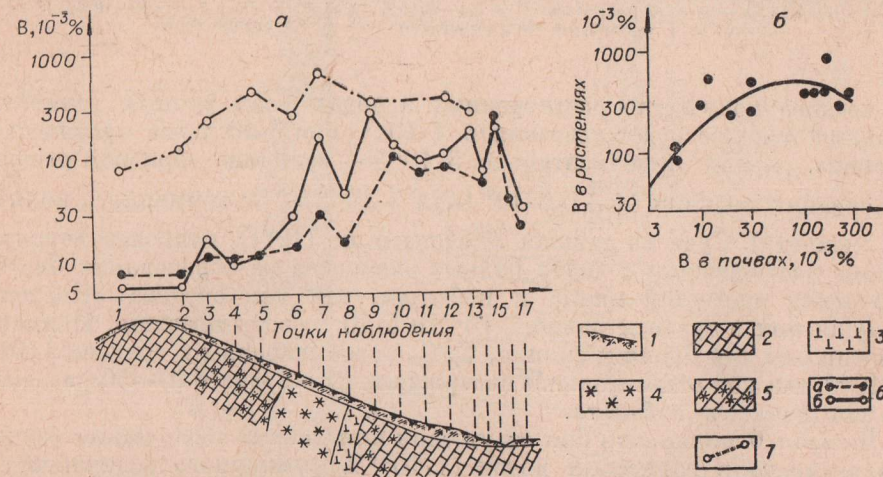


Рис. 9. Распределение бора в почвах и растениях (а) и зависимость между концентрациями бора в системе почва — растение (б) (по данным Саета, 1969).

1 — почвы и делювий; 2 — известняки неизмененные; 3 — диоритовые порфириды; 4 — гранат-воластонитовые скарны с датолитовым оруденением; 5 — скарнированные известняки с эндогенным датолитовым ореолом; 6, 7 — графики распределения бора: 6а — в горизонте А почв, 6б — в горизонте ВС почв, 7 — в золе клена зеленокорого.

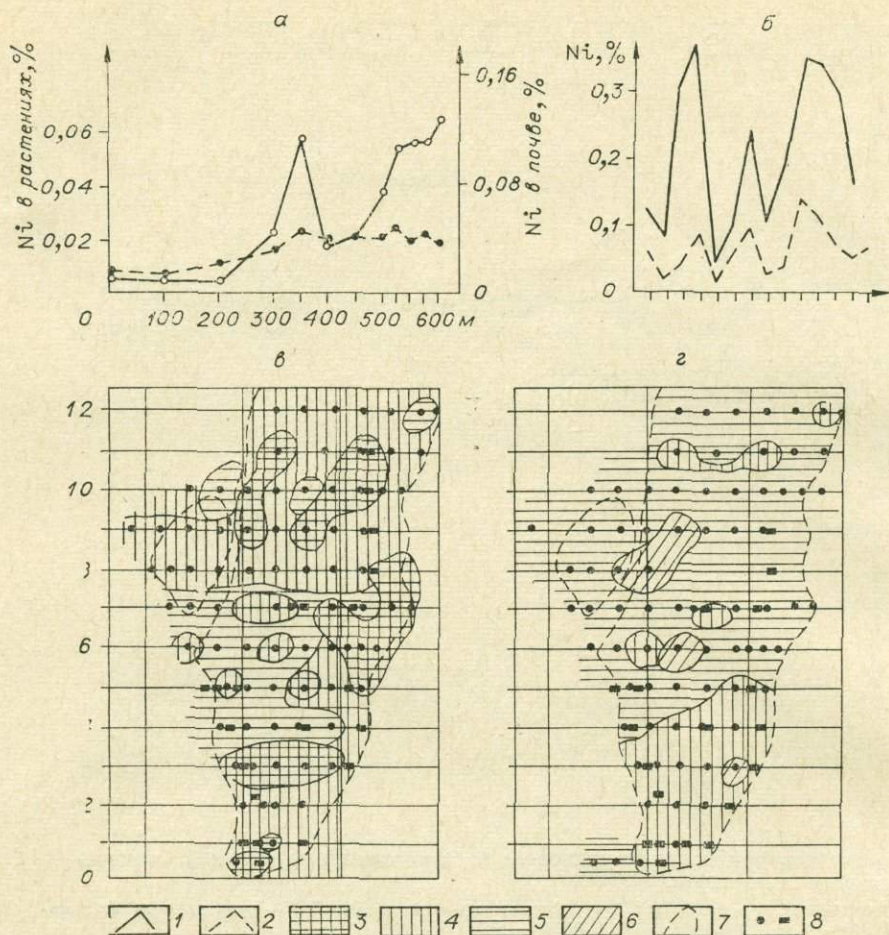


Рис. 10. Биогеохимические и почвенно-геохимические ореолы на Чугаевском месторождении силикатного никеля (а, б) и на Четвертом Геофизическом месторождении хромитов (в, з) (по данным Малюц, 1963).

1—2 — содержания никеля: 1 — в почвах, 2 — в золе растений; 3—6 — содержания хрома (в — в почвах, з — в золе растений): 3 — 0,1—0,15%, 4 — 0,05—0,1, 5 — 0,01—0,05, 6 — <0,01%; 7 — контуры месторождений; 8 — точки отбора проб.

2,0, среднее количество растворенных в водах форм рудных элементов в рыхлом покрове будет составлять  $1 \cdot 10^{-5}$  или  $1/30$  часть критической величины, равной приблизительно  $3 \cdot 10^{-4}$  — величине обратной отношению средних величин  $\frac{РВК}{РПК} = 3 \cdot 10^3$  (или  $3 \cdot 10^{-2}$  % от суммарного количества элемента). Судя по данным Удодова и др. (1971), наиболее вероятно влияние растворенных в водах рудных элементов на образование биогеохимических аномалий цинка и кобальта, так как среднее отношение  $C_B/C_T$  для них в среднем равно  $2 \cdot 10^{-4}$  и  $5 \cdot 10^{-4}$  соответственно. Наименее вероятно оно для бария и свинца,  $C_B/C_T$  которых равны в среднем  $1 \cdot 10^{-5}$  и  $2 \cdot 10^{-5}$ , так как относительное содержание их в водах в 10—50 раз меньше, чем цинка и кобальта.

Из табл. 6 видно, что при отсутствии или низком содержании изучаемого элемента в грунтовых водах ( $1 \cdot 10^{-2}$  % суммарного содержания и менее) существенный вклад в формирование биогеохимических ореолов вносят водорастворимые и обменные формы рудных элементов при их содержании 0,3—3,0 % и более. Такие относительные содержания в почвах и горных породах обычны (Виноградов, 1957; Поликарпочкин, Поли-

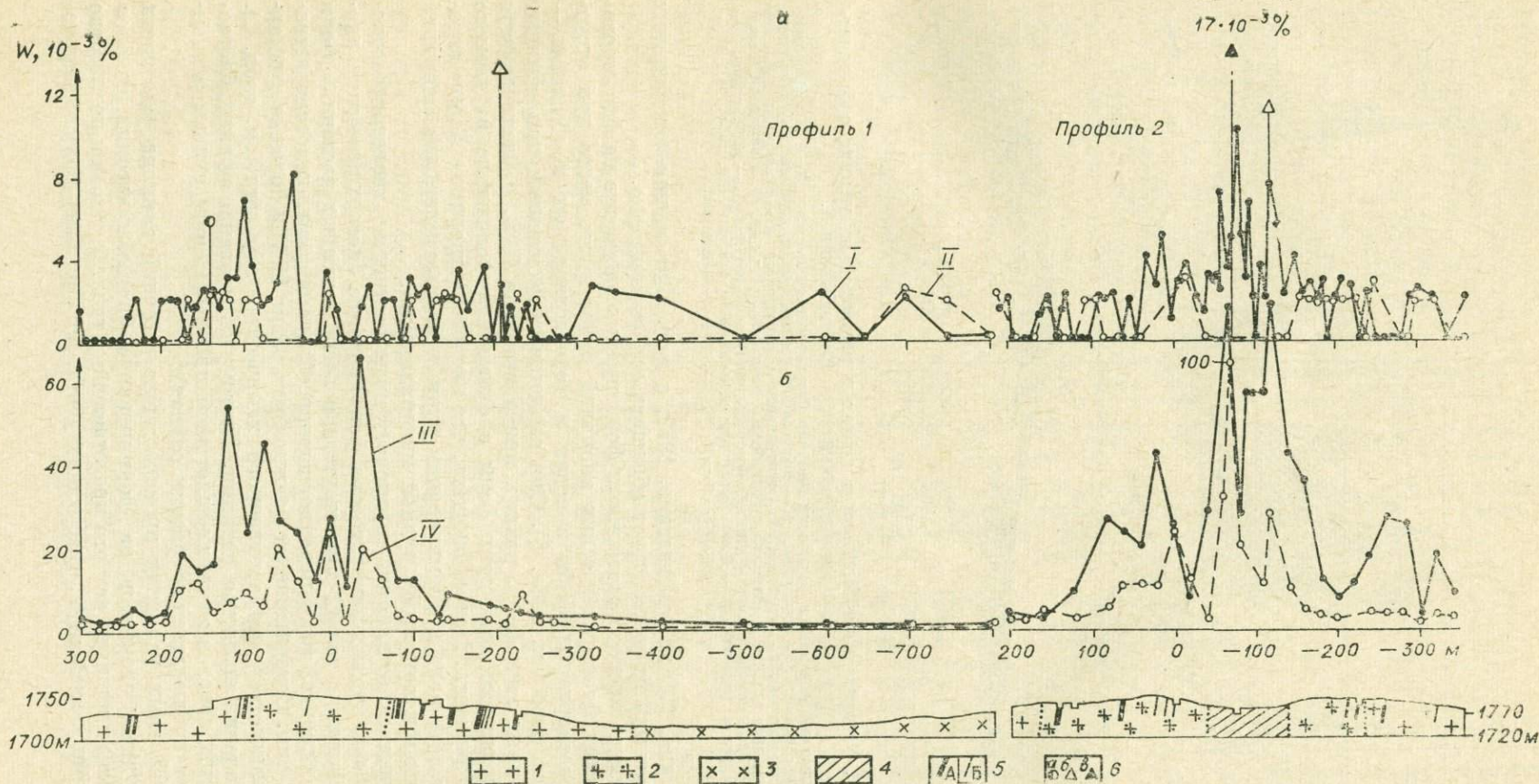


Рис. 11. Распределение вольфрама в растениях (а) и почвах (б) Булуктайского месторождения.

1 — кварцевые монцонито-сиениты, Pz<sub>1</sub>; 2 — брекчия мусковитизированных кварцевых монцонито-сиенитов с рудной минерализацией; 3 — среднезернистые аляскитовые мезозойские граниты; 4 — полимиктовая брекчия трубчатого тела; 5 — рудные прожилковые зоны и жилы; А — молибдена, В — вольфрама; 6 — различные виды и части растений: а — побеги березы плосколистной, б — ветви багульника болотного, в — надземные части костера ржаного. I — ветви кедра; II — хвоя ке а; III, IV — почвенные горизонты; III — ВС/С, 0,3—0,8 м; IV — гумусовый, 0,0—0,2 м.

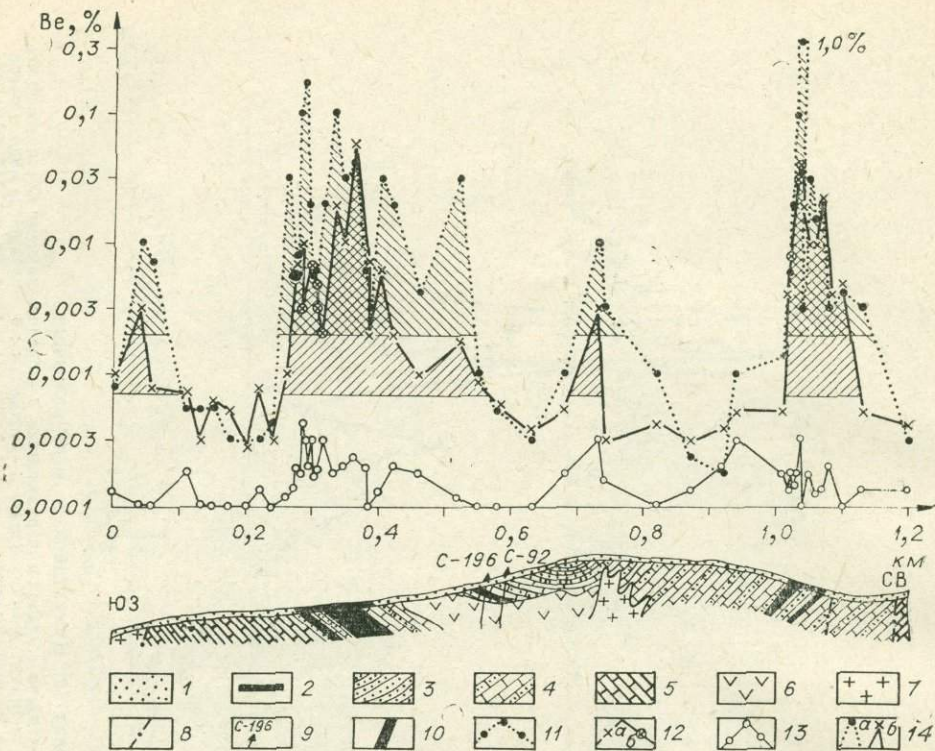


Рис. 12. Распределение бериллия в почвах и растениях на участке с флюорит-берtrandит-фенакитовой минерализацией.

1 — рыхлые образования; 2 — участки профиля без почвенного покрова; 3—7 — протерозойские образования: 3 — песчаники, 4 — чередование известняков и сланцев, 5 — доломиты, 6 — габбро-диориты, 7 — граниты; 8 — тектонические нарушения; 9 — сваяжины; 10 — известные рудные тела; 11 — бериллий в горизонте С почв (0,7—1,4 м); 12, 13 — бериллий в золе растений; 12 — высокобарьерные (гектафенобарьерные) виды и части (а — кора сосны, б — корни кипрея и полыни), 13 — фоновобарьерные виды и части растений (см. табл. 14); 14 — аномалии бериллия: а — в почвах, б — в растениях.

карпочкина, 1964; Почвоведение, 1969; и др.). При опытно-методических исследованиях на них следует обращать особое внимание.

Влияние кислоторастворимых форм рудных элементов на формирование рудных биогеохимических аномалий будет иметь место при отсутствии растворенных форм в водах и водорастворимых и обменных — в твердой фазе (см. табл. 6). Оно является существенным при обычных содержаниях этих форм, равных приблизительно 10%, и увеличивается при возрастании доли этих форм в суммарном количестве изучаемого рудного элемента. Можно ожидать, что кислоторастворимые формы играют основную роль в формировании рудных биогеохимических аномалий над большинством типов рудной минерализации.

Существенное влияние труднодоступных растениям кислотонерастворимых форм рудных элементов на формирование биогеохимических аномалий возможно только при отсутствии легкодоступных растениям форм жидкой и твердой фаз и подавляющем преобладании этих кислотонерастворимых форм. Содержание их должно быть равно 99% и более от суммарного количества рассматриваемого химического элемента (см. табл. 6). Такие условия являются редкими. Поэтому образование рудных биогеохимических ореолов за счет кислотонерастворимых форм рудных элементов будет наблюдаться в редких случаях.

В реальных условиях произрастания растений влияние различных форм рудных элементов на формирование биогеохимических ореолов будет более сложным, чем это представлено в табл. 6, так как количество форм рудных элементов, требующих учета, должно быть больше чем че-

тыре, а соотношение между этими формами может существенно изменяться при переходе от одной точки наблюдения к другой. Кроме того, точные расчеты требуют учета видовых особенностей растений. Тем не менее приведенные в табл. 6 приближенные оценки вклада четырех основных форм рудных элементов жидкой и твердой фаз (растворенных в водах, водорастворимых и кислотонерастворимых) могут быть использованы для интерпретации биогеохимических аномалий в тех случаях, когда в результате детальных минералогических и химических исследований известно соотношение между различными формами изучаемых рудных элементов.

Подводя итоги, отметим три основных момента.

1. Доступность рудных элементов растениям и соответственно, контрастность биогеохимических аномалий возрастает с увеличением растворимости рудных минералов, достигая максимума для водорастворимых минералов и солевых форм элементов-индикаторов рудной минерализации. Рудные элементы, находящиеся в минералах, нерастворимых в кислотах, недоступны растениям, и биогеохимические аномалии над такими минеральными типами руд отсутствуют, если они не сопровождаются первичными и вторичными

Таблица 5

Характеристики минеральных типов руд и их литохимических ореолов, благоприятных и неблагоприятных для выявления биохимическим методом

Тип руд и их ореолов	Соотношение между биогеохимическими аномалиями и литохимическими ореолами	Характеристика литохимических ореолов	Характеристика типичных минералов		Типичный количественный показатель		
			при отсутствии гидрохимических ореолов	при наличии гидрохимических ореолов	РПК <sub>а</sub>	$\frac{РПК_a}{РПК_ф}$	КК <sub>б</sub>
Весьма благоприятные	Биогеохимические аномалии контррастнее открытых литохимических ореолов	Солевые ореолы и механические ореолы сорбированных и дисперсных форм рудных элементов	Растворимые в воде и кислотах и дисперсные труднорастворимые минералы	Различные минералы, включая нерастворимые в воде и кислотах	1—100	$\geq 1,0$	10—1000 и более
Благоприятные	Биогеохимические аномалии имеют меньшую контрастность, чем литохимические ореолы на горизонте питания растений	Механические ореолы среднезернистых выветрелых первичных и вторичных и мелкозернистых первичных минералов	Дисперсные нерастворимые, среднезернистые труднорастворимые и крупнозернистые нерастворимые минералы	Нерастворимые, труднорастворимые и крупнозернистые растворимые минералы	0,01—1,0	0,1—1,0	3—30
Непригодные	Положительные биогеохимические аномалии отсутствуют или имеют статистически недостоверную величину. Иногда наблюдаются отрицательные биогеохимические аномалии	Глиблые, щелочистые и крупнозернистые механические ореолы	Различные крупнозернистые, включая растворимые в кислотах, минералы; среднезернистые нерастворимые минералы	—	0,001—0,1 и менее	0,01—0,1 и менее	0,3—3,0 и менее

Относительный вклад различных форм рудных элементов в питающей среде

Формы элементов	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Растворенные в водах (РПК=3·10 <sup>3</sup> )	$\frac{1,0}{96,5}$	$\frac{1,0}{94}$	$\frac{1 \cdot 10^{-1}}{73}$	$\frac{1 \cdot 10^{-1}}{61}$	$\frac{3 \cdot 10^{-2}}{45}$	$\frac{3 \cdot 10^{-2}}{32}$	$\frac{1 \cdot 10^{-2}}{22}$	$\frac{1 \cdot 10^{-2}}{13,5}$
Водорастворимые и об- менные (РПК=100)	$\frac{1,0}{3,2}$	$\frac{1,0}{3,2}$	$\frac{1,0}{24,4}$	$\frac{1,0}{20}$	$\frac{1,0}{50}$	$\frac{1,0}{36}$	$\frac{1,0}{70}$	$\frac{1,0}{45}$
Кислоторастворимые (РПК=1,0)	$\frac{10}{0,3}$	$\frac{90}{2,8}$	$\frac{10}{2,4}$	$\frac{90}{19}$	$\frac{10}{4,5}$	$\frac{90}{32}$	$\frac{10}{7,3}$	$\frac{90}{41}$
Кислоторастворимые (РПК=0,01)	$\frac{88}{0,0}$	$\frac{8,0}{0,0}$	$\frac{89}{0,2}$	$\frac{9}{0,0}$	$\frac{89}{0,5}$	$\frac{9}{0,0}$	$\frac{89}{0,7}$	$\frac{9}{0,5}$

Примечание. Числитель — относительное содержание данной формы (% от суммы);

ореолами с доступными растениям формами этих элементов.

2. Доступность растениям рудных элементов уменьшается с увеличением размера зерен минералов. Элементы-индикаторы даже легко растворимых в кислотах минералов могут быть недоступны растениям, если они представлены крупноглыбовыми или щелнистыми механическими ореолами. Биогеохимические аномалии над ними отсутствуют. Но растениям доступны рудные элементы, представленные дисперсными формами (< 0,01 мм) даже весьма устойчивых к выветриванию, не растворимых в кислотах минералов. Поэтому над минерализацией любого типа, вторичные литохимические ореолы которых представлены тонкодисперсными минералами или сорбированными формами рудных элементов в рыхлых образованиях, наблюдаются контрастные биогеохимические аномалии.

3. Вследствие значительно большей (в 10<sup>3</sup>—10<sup>4</sup> раз) доступности химических элементов, находящихся в водных растворах, по сравнению с доступностью из твердой фазы, окружающей корни растений, формированию рудных биогеохимических аномалий благоприятствует наличие гидрохимических ореолов рудных тел. Поэтому все минеральные типы руд, сопровождающиеся контрастными гидрохимическими ореолами, являются благоприятными для выявления биогеохимическими методами.

#### ВЛИЯНИЕ КОНТАКТА МЕЖДУ КОРНЯМИ РАСТЕНИЙ И РУДНЫМИ ОРЕОЛАМИ НА БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОРЕОЛЫ

Биогеохимические поиски целесообразны в основном на площадях, закрытых рыхлыми образованиями аллохтонного (дальнеприносного) или склонового типа. Большое значение для формирования биогеохимических ореолов на таких площадях имеет характер и степень контакта корневых систем растений с погребенными рудами или их лито-, гидро- или литогидрохимическим ореолами. Этот вопрос является одним из основополагающих, так как при отсутствии этого контакта или его незначительном объеме (меньшем некоторой критической величины) биогеохимические аномалии над рудными телами будут отсутствовать. Это влияние определяется особенностями корней растений и активностью поглощения рудных элементов различными частями корневых систем.

Рассмотрим группировку растений по глубине проникновения корневых систем.

Таблица 6  
в наблюдаемые концентрации в растениях на биогеохимических ореолах

расчета	Варианты											
	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{3}$	$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{2}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$
$\frac{1,0}{87}$	$\frac{1,0}{52}$	$\frac{100}{100}$	$\frac{10}{98}$	$\frac{1,0}{90}$	$\frac{0,1}{47,5}$	$\frac{0,01}{8}$	$\frac{0,001}{1}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$
$\frac{10}{9}$	$\frac{90}{46}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{10}{47,5}$	$\frac{10}{85}$	$\frac{10}{91}$	$\frac{3,0}{75}$	$\frac{1,0}{50}$	$\frac{0,1}{9}$	$\frac{0,01}{1}$	$\frac{0,01}{1}$
$\frac{89}{1}$	$\frac{9}{0,0}$	$\frac{0,0}{0,0}$	$\frac{80}{1}$	$\frac{89}{1}$	$\frac{89,9}{5}$	$\frac{90}{7}$	$\frac{90}{8}$	$\frac{97}{25}$	$\frac{99}{50}$	$\frac{99,9}{91}$	$\frac{99,99}{99}$	$\frac{99,99}{99}$

знаменатель — относительный вклад ее в суммарное содержание растения.

#### Имеют неглубокопроникающие корни (0,2—1,0 м)

Однолетние злаки, синюха, ластовень, эдельвейс, нителлистник, весенне-летние эфемеры Средней Азии. Плодовые и ягодные деревья и кустарники северной зоны, ель, кедр, пихта, лиственница, брусника, черника, голубика, багульник болотный, мхи мерзлотно-таежной зоны.

#### Имеют средние глубины корневых систем (1—5 м)

Рожь, пшеница, ячмень, овес, кукуруза, вика, люпин, клевер, люцерна, свекла, овощи, тыква, арбуз, молочай, донник, стеллера, василистник, леспедеца, солянки, полыни, ковыль, овсяница, чий, кияк и другие травянистые растения. Кедр, пихта, ель, можжевельник, лиственница, береза, ива, ерник, рододендрон, смородина, малина, жимолость, таволга, осока, иван-чай мерзлотно-таежной зоны. Береза, осина, ольха, акация, тополь, клен, ясень, дуб, боярышник, кизильник, бук, вяз, ива, яблоня, груша, сосна, псевдотсуга, ель, лиственница, жимолость, лещина, вереск, шиповник, карагана, курильский чай, плодовые и ягодные деревья и кустарники средней зоны.

#### Имеют глубокопроникающие корни (5—20 м)

Полыни, астрагалы, люцерна, бодяк, хлопчатник, фреатофиты Средней Азии. Сосна, можжевельник, дуб, бук, вяз, лох, тополь, берест, тамарикс, акация, аморфа, эфедра, саксаул, верблюжья колючка, яблоня, плодовые и ягодные деревья и кустарники южной зоны.

#### Имеют весьма глубокопроникающие корни (20—70 м)

Криптомерия японская (70 м) — Япония; акация (68 м) — пустыня Юго-Западной Африки; тамарикс (30 м), саксаул черный (37 м), верблюжья колючка (40 м), полынь песчаная (25 м) — Средняя Азия; сосна (25 м), можжевельник (25 м) — пустыня США.

Глубина проникновения корней растений в покров рыхлых образований и их морфология зависят от типа водного питания данного вида. Растения, водное питание которых обеспечивается поверхностными дождевыми и снеговыми водами, образуют группу растений, корневые системы которых не проникают в почву на глубину, превышающую 1 м. К этой группе относятся преимущественно однолетние травянистые растения (например, эфемеры и ксерофиты зоны аридного климата) и различные растения мерзлотной зоны с маломощным деятельным слоем — до 0,5—1,0 м. Эту группу растений не следует использовать для биогеохимического опробования при поисках рудных месторождений.

Большинство растений средней и южной зон, а также мерзлотной зоны с деятельным слоем мощностью более 1 м, относятся к группе видов, имеющих средние глубины проникновения корней от 1 до 5 м, в среднем

около 2 м. Эта группа растений может использоваться в качестве объекта опробования при биогеохимических поисках. При этом следует иметь в виду, что благодаря поглощению воды нижними частями корневых систем из верхнего водоносного горизонта биогеохимические аномалии в этих растениях могут давать информацию о более глубоких, чем предел проникновения корней, горизонтах рыхлого покрова. Практика биогеохимических поисков говорит о том, что в некоторых случаях растения этой группы могут давать информацию о рудах и их литохимических ореолах, располагающихся на глубинах до 30 м.

Растения, имеющие глубины проникновения корней порядка 5—20 м, не характерны для северной и средней зон, но часто встречаются в южной зоне аридного климата. К этой группе относятся многие древесные, кустарниковые и многолетние травянистые растения сухих степей, полупустынь и пустынь, в том числе плодовые деревья южной зоны. Все они представляют наибольший интерес для опробования и часто используются в практике биогеохимических поисков, обеспечивая глубинность опоскования территорий в районах аридного климата до 30 м и более.

Наибольшие глубины проникновения корневых систем растений в рыхлый покров, по опубликованным данным, достигают 50—70 м. Они отмечаются в районах аридного климата у некоторых древесных и кустарниковых растений, например у акации и криптомерии японской. Такая большая глубина проникновения корней некоторых видов растений в покров рыхлых образований делает особо ценным использование их для глубинных биогеохимических поисков — каждое растение с большой глубиной корней можно рассматривать как «живую скважину».

Очевидно, что информация о глубине проникновения корней в рыхлый покров весьма важна для правильного выбора растений при биогеохимических поисках. Поэтому таблицы группирования растений по глубине их корневых систем должны составляться для конкретных районов поисковых работ и являться одним из отчетных документов и материалов при подготовке биогеохимических поисков. Естественно, что градации, принятые для разделения видов растений по глубине проникновения корневых систем, могут быть более дробными и должны учитывать не только вид, но и возраст, высоту и другие легко определяемые параметры отдельных доминантных видов, связанные с глубиной их корневых систем. Последнее необходимо для получения информации о глубине расположения литохимических ореолов по результатам опробования разновозрастных растений одного вида методом биогеохимического каротажа. При достаточно точной информации о глубинах проникновения корней в рыхлый покров появляется возможность использовать данные опробования растений для определения приблизительной глубины залегания руд или их лито- и гидрохимических ореолов на биогеохимических аномалиях. При составлении таблиц группирования растений по глубине проникновения их корневых систем в конкретных районах обычно нельзя использовать опубликованные материалы, полученные биологами, так как их, как правило, не интересуют максимальные глубины корней. Для этого следует использовать результаты документации канав, шурфов и скважин картировочного бурения. Необходимо обращать внимание на то, что вблизи корневых окончаний корни редки, тонки (диаметр их меньше 1 мм) и очень хрупки (Онищенко, 1967), что делает их труднодоступными для наблюдения и количественного изучения.

Примеры, когда биогеохимические аномалии над известными неглубокопогребенными зонами рудной минерализации фиксировались только в растениях с глубокопроникающими корневыми системами и отсутствовали в растениях с минимальными глубинами корней, приведены на рис. 13. Эти данные, полученные в условиях степных ландшафтов склонов южной экспозиции, показывают, что даже здесь возможно наличие неглубокопогребенных литохимических ореолов, пропускаемых обычной металломет-

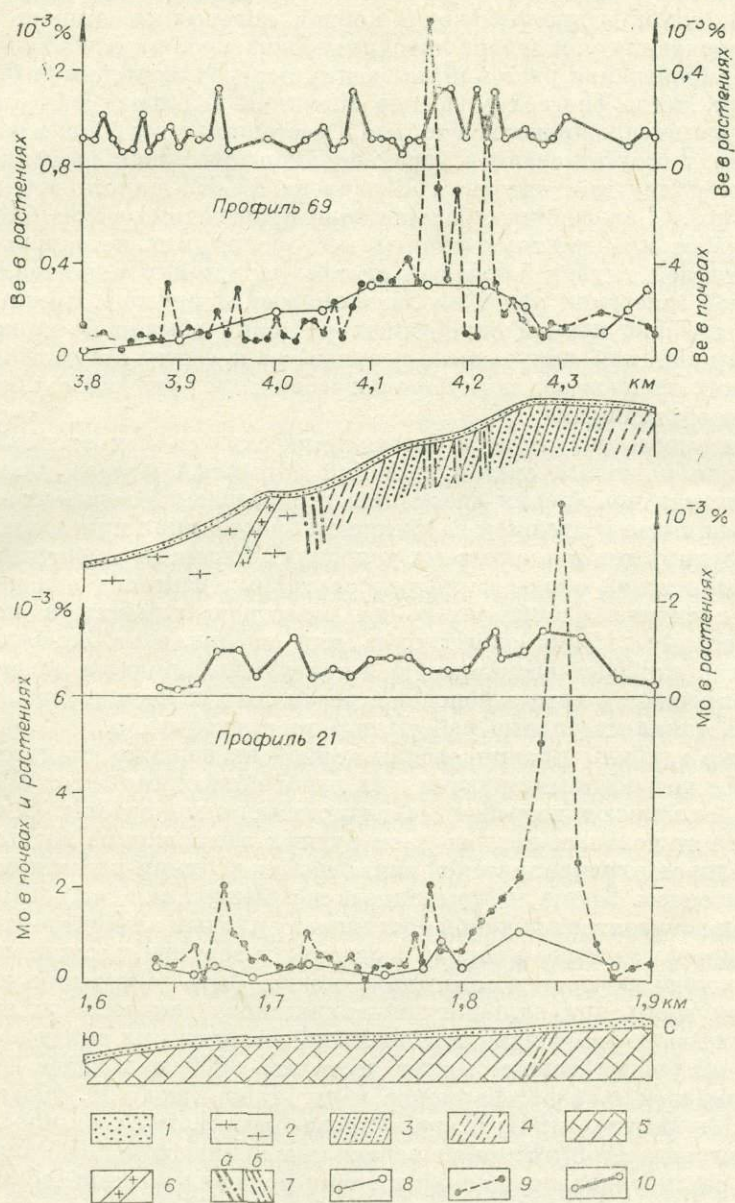


Рис. 13. Распределение молибдена и бериллия в травянистых растениях с различными корневыми системами над погребенными литохимическими ореолами (в степных ландшафтах южных склонов Забайкалья).

1 — рыхлые образования; 2—5 — протерозойские образования: 2 — ортогнейсы, 3 — песчаники, 4 — сланцы, 5 — доломитизированные известняки с прослоями сланцев и песчаников; 6 — кварцевые порфиры и фельзит-порфиры; 7 — зоны тектонических нарушений (а — известные, б — предполагаемые); 8 — содержание Мо и Ве в гумусовом горизонте почв, 0,0—0,1 м; 9, 10 — содержание Мо и Ве в растениях: 9 — с глубокопроникающими корнями, 10 — с неглубокопроникающими корнями.

рической съемкой. Результаты показывают, что минерализованные зоны с неглубокопогребенными литохимическими ореолами могут быть выявлены только глубинным литохимическим опробованием рыхлого покрова с отбором проб на 1 м и глубже или биогеохимическим опробованием растений, глубина проникновения корней которых превышает 1 м. Но они пропускаются при отборе литохимических проб на глубине 0,1—0,3 м или при опробовании растений, имеющих неглубокие корни до 0,3—0,5 м. Примером, когда биогеохимические аномалии над погребенными рудами и их ореолами фиксировались только в растениях с глубокими корневыми системами и отсутствовали в неглубокоукореняющихся растениях, были получены и другими авторами (Швыряева, 1957; Cannon, 1964; Brooks, 1972; и др.). К сожалению, большинство проведенных ранее биогеохимических работ на известных рудных месторождениях не сопровождалось документацией глубин корневых систем растений и сопоставлением их с глубиной залегания руд и их литохимических ореолов. Поэтому данные о малой глубине корней опробуемых растений обычно не привлекались для интерпретации получаемых результатов и факты отсутствия биогеохимических ореолов над неглубокопогребенными рудными телами относились к «необъяснимым».

Зависимость результатов биогеохимических съемок от глубины проникновения корневых систем растений в рыхлый покров указывает на необходимость проведения специальных определений горизонтов питания различных видов растений и глубинности биогеохимии при поисках погребенных рудных тел в конкретных условиях. Весьма перспективно использование для таких определений радиоактивных изотопов или нерадиоактивных элементов, помещаемых на известную глубину в поисковые, картировочные, гидрогеологические или специальные скважины. Они могут дать наиболее объективную и точную информацию о глубинности биогеохимического метода поисков в различных условиях. Насколько нам известно, такие модельные работы еще не проводились.

Кроме глубины проникновения корней на наличие контакта корней растений с погребенными рудами и их литохимическими ореолами большое влияние оказывают погребенные гидрохимические ореолы. Это связано с весьма интенсивным поглощением рудных элементов из водных растворов и наличием гидравлической связи между верхним и нижним водоносным горизонтом. Кроме диффузионного перемешивания вод различных водоносных горизонтов причиной поступления рудных элементов из нижних частей разреза рыхлого покрова в средние и верхние, доступные нижним частям корневых систем растений, может быть миграция подземных вод снизу вверх при наличии гидравлического напора. При глубинных напорных водах расстояние вертикальной миграции их снизу вверх через рыхлые осадочные породы может достигать 1000 м и более (Анисимов, 1963; Бондаренко, 1961; Гармонов и др., 1960; Гинзбург, 1957; Маврицкий, 1962; Митяев, 1947; Полубаринова-Кочина, 1952; Силин-Бекчурин, 1959; Шагоянц, 1960). Влияние вертикальной миграции глубинных напорных вод рассматривалось для объяснения рудных почвенно-геохимических ореолов цинка над полиметаллами (Фултон, 1954). Этот фактор может иметь значение и при объяснении некоторых рудных биогеохимических ореолов.

При рассмотрении вопроса о контакте корней растений с погребенными рудами и их литохимическими ореолами через водоносные горизонты следует учитывать, что растениям доступны воды не только водоносного горизонта, но и его капиллярной каймы. Величина капиллярного подъема воды зависит в основном от механического состава рыхлого покрова и возрастает от песчаных образований к глинистым. Как видно из данных табл. 7, в супесях, суглинках и глинах капиллярный подъем вод достигает 6—12 м. Добавление в рыхлые образования мелкой фракции в количестве около 20% увеличивает капиллярный подъем воды почти

Характеристики капиллярного подъема воды

Тип рыхлого покрова	Высота, м	Время (дни)	Автор
Крупный песок (0,5—1,0 мм) . . . . .	0,13	4	Сергеев, 1959
Мелкий песок (0,1—0,2 мм) . . . . .	0,43	8	» »
Тонкий песок (0,05—0,1 мм) . . . . .	1,06	72	» »
Мелкий песок . . . . .	0,3—1,2	—	Виленский, 1957
Супесь . . . . .	1,2—3,5	—	» »
Суглинок . . . . .	3,5—6,5	—	» »
Легкая глина . . . . .	6,5—12,0	—	» »
Мелкозернистая порода и глина . . . . .	—	350—475	Гинзбург, 1957
Глина . . . . .	До 10 м	—	Ревут, 1972

до той границы, которая свойственна этим мелким фракциям (Сергеев, 1959).

Анализ имеющихся данных о глубинах проникновения корней растений в рыхлый покров, о мощностях водоносных горизонтов, часто превышающих 10—20 м, и величинах капиллярного подъема грунтовых вод позволяет сделать вывод о том, что нижние части корневых систем растений могут иметь контакт с рудами и литохимическими ореолами через водоносные горизонты при мощности рыхлого покрова существенно большей, чем глубина проникновения корней. Поэтому проверку биогеохимических аномалий следует производить до глубин, в 3—10 раз и более превосходящих максимальную известную глубину корней изучаемых растений. Во всех случаях, когда на биогеохимических аномалиях выявляется рудная минерализация на глубинах, в несколько раз превышающих величину проникновения корневых систем изучаемых растений, для объяснения причин образования их необходимо привлечение данных о водоносных горизонтах и гидрохимических ореолах. Примеры, когда возможно такое объяснение наблюдаемым биогеохимическим ореолам, можно найти в опубликованных работах (Авессаломова, Грабовская, 1968; Галецкий, Викторова, 1968; Гетманчук и др., 1969; Боев, 1970; Лепилин, 1972; Cannon, 1964; Chaffee, Hessin, 1971).

Для объяснения механизмов формирования биогеохимических аномалий и проведения количественных расчетов необходимо использовать не только данные о глубине корневых систем, но и результаты изучения активности поглощения химических элементов различными частями корневых систем растений. Такие исследования, насколько нам известно, в геологической практике не проводились. К настоящему времени активность корневых систем некоторых растений изучена биологами. Наиболее удобным для таких исследований является использование радиоактивных изотопов изучаемых элементов (Burton e. a., 1954; Lipps e. a., 1957; Fox e. a., 1961; Fox, Lipps, 1964). Подобные исследования можно проводить не только с радиоактивными изотопами, но и со стабильными химическими элементами, например с литием (Sayre, Morris, 1940) и стронцием (Fox, Lipps, 1964).

Активность корневых систем в большинстве случаев имеет зависимость, приблизительно совпадающую с зависимостью массы корней от глубины, и обычно она монотонно уменьшается сверху вниз (табл. 8).

Для объяснения большой глубинности биогеохимического метода поисков рудных месторождений, наблюдаемой в некоторых условиях, большой интерес представляют данные о том, что активность нижних частей корневой системы иногда резко увеличивается по сравнению со средними и может достигать величины активности ее верхних частей (табл. 9, глубины 2,4—3,4 м, 29/IX). При этом коэффициент активности

Таблица 8

Относительная активность корневых систем двухлетних трав, определенная с помощью фосфора-32 (по Г. Бергону, 1961)

Глубина, см	Вид растений				Среднее геометрическое для всех видов
	Свинойрой обыкновенный	Свинойрой прибрежный	Свинойрой Суворова	Даллис	
15	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
30	0,42	1,01	0,32	0,81	0,57
45	0,30	1,05	0,42	0,12	0,35
60	0,16	0,27	0,29	0,13	0,20
120	0,092	0,096	0,074	0,18	0,10
180	0,027	0,063	0,058	0,010	0,032
240	0,011	0,030	0,009	0,006	0,012

корней, характеризующий поглощение фосфора единицей веса корней, у нижних частей корневой системы люцерны по сравнению с ее верхними частями, где сосредоточена основная масса (по весу) корней, был выше весной в 3—30, а осенью, в засушливый период года, — в 500—1600 раз. Эта разница в коэффициентах активности различных частей корневой системы растений обеспечивает при близительное равенство активности поглощения фосфора-32 верхними и нижними частями корневой системы в осенний период, хотя вес корней в нижней

части корневой системы в одинаковом объеме с верхней частью был в 400—1000 раз меньше. Рассмотренные данные о значительном увеличении активности и коэффициента активности в нижних частях корневых систем растений не исключение. Они подтверждаются и другими исследованиями (Burton e. a., 1954; Lipps e. a., 1957; Fox e. a., 1961; Fox, Lipps, 1964).

Для понимания механизма поглощения химических элементов растениями в условиях, когда рудные ореолы резко обеднены вблизи дневной поверхности или перекрыты покровом аллохтонных образований, необходимо одновременное рассмотрение данных об активности корневых систем растений и о распределении элементов-индикаторов рудной минерализации в вертикальном разрезе корнеобитаемой зоны рыхлого покрова.

Таблица 9

Вес корневой люцерны и ее активность, определенная с помощью фосфора-32 (по данным R. C. Lipps, R. L. Fox, 1964)

Глубина корневой, м	Активность корней				Вес корней		Коэффициент активности корней (активность корней, % (вес корней (фунт)))			
	29/IV		23/IX		в фунтах	в % от общего веса	29/IV		23/IX	
	в % от внесенного кол-ва P-32	в %*	в % от внесенного кол-ва P-32	в %*			абсолютный	относительный**	абсолютный	относительный**
0,00—0,02	5,49	100	0,58	400	2250	11,1	0,04	1,0	0,04	1
0,07—0,10	10,47	191	2,00	345	1600	7,8	0,12	3,0	0,22	5
0,18—0,20	5,20	95	1,23	212	600	3,0	0,18	4,2	0,35	9
0,23—0,25	0,69	12,6	1,18	203	300	1,5	0,04	1,0	0,68	17
0,48—0,50	0,34	6,2	0,75	129	175	0,8	0,035	0,9	0,74	18
0,63—0,65	0,19	3,5	0,26	45	125	0,6	0,028	0,7	0,36	9
0,78—0,82	0,27	4,9	0,47	81	80	0,4	0,061	1,5	1,01	25
0,98—1,00	0,10	1,8	0,09	16	55	0,3	0,033	0,8	0,28	7
1,18—1,20	0,12	2,2	0,18	31	45	0,2	0,049	1,2	0,69	17
1,48—1,50	0,07	1,3	0,09	16	35	0,17	0,037	0,9	0,44	11
1,68—1,80	0,07	1,3	0,25	43	35	0,17	0,037	0,9	1,2	30
2,08—2,10	0,17	3,1	0,65	112	15	0,07	0,21	5,2	7,5	190
2,38—2,40	0,15	2,7	1,14	196	15	0,07	0,18	4,2	13,1	330
2,68—2,70	0,15	2,7	1,10	190	10	0,05	0,27	6,8	19,0	475
2,98—3,00	0,25	4,6	1,70	293	5	0,02	0,92	23,0	58,5	1460
3,12—3,14	0,07	1,3	0,97	167	5	0,02	0,26	6,5	33,4	835
3,38—3,40	0,15	2,7	1,14	196	3	0,01	0,90	22,5	65,3	1620

\* За 100% принята активность верхнего горизонта 0—0,02 м.

\*\* За 1,0 принят коэффициент активности корней верхнего горизонта 0—0,02 м.

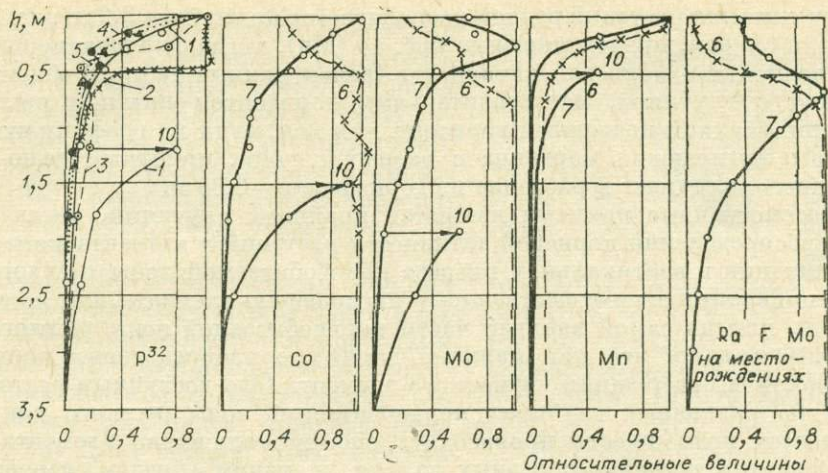


Рис. 14. Поглотительная способность (активность) корневых систем многолетних трав (по данным Бертон, 1961) и поглощение ими микроэлементов из почвенного разреза (в относительных величинах).

1—5 — активность корневых систем растений: 1 — средняя для 4-х видов, 2 — свинойой прибрежной, 3 — Даллис, 4 — свинойой Сувойна, 5 — свинойой обыкновенной; 6 — распределение химических элементов в почвенном разрезе; 7 — относительное поглощение химических элементов из почвенного разреза.

Имея эти данные, представленные графически в удобном для пользования относительном масштабе (рис. 14, 15), перемножением соответствующих значений корневой активности и содержания изучаемого элемента на одинаковых глубинах можно вычислить и построить графически зависимость относительного количества химического элемента, поступающего в растение с разных глубин (относительное поглощение). При монотонно уменьшающейся с глубиной корневой активности растений, но резко увеличивающейся содержания элемента с глубиной, максимум поглощения его располагается не вблизи дневной поверхности, а на некоторой глубине (на рис. 14 для радия, фтора и молибдена — на глубине 0,7 м). В качестве зависимости корневой активности от глубины расположения корней были взяты данные для двухлетних трав (средние для 4-х видов), полученные Г. Бертоном (1961) и приведенные в табл. 8, а распределение радия, фтора и молибдена (по вертикали) — по нашим данным, полученным на соответствующих месторождениях и рудопроявлениях.

Если взять распределение корневой активности люцерны по данным R. C. Lipps, R. L. Fox (1964) в сентябре, а распределение радия — типичное для ореола уранового рудного тела, перекрытого покровом аллохтонных отложений мощностью 3 м (см. рис. 15а, б), то полученная зависимость относительного поглощения радия с разных глубин, показывает, что основное количество радия в этих условиях поступает из нижней части корнеобитаемой зоны рыхлого покрова, а представительный го-

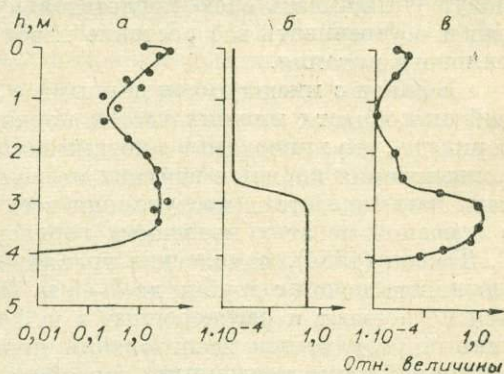


Рис. 15. Распределение активности корней люцерны в августе (по данным Lipps, Fox, 1964), радия и относительного поглощения радия из вертикального разреза аллохтонного покрова мощностью 3,0 м.

а — относительная активность корней, б — содержание радия, в — относительное поглощение радия.

ризонт питания растений радием располагается на глубине 3,2 м (рис. 15в).

Для случая, приведенного на рис. 14 (Mn), когда содержание изучаемого элемента и корневая активность (взяты данные табл. 8) монотонно убывают с глубиной, представительным горизонтом питания растений является верхний почвенный горизонт, так как, судя по графику относительного поглощения марганца с разных глубин, приблизительно 90% последнего поступает в растение из горизонта 0—0,35 м.

Рассмотренные примеры являются крайними случаями, когда сочетание распределения корневой активности растений и элемента минерального питания в вертикальном разрезе корнеобитаемой зоны рыхлого покрова приводит к преимущественному поглощению элемента или из самой нижней, или из самой верхней части корнеобитаемой зоны рыхлого покрова. Очевидно, что при наличии данных о распределении корневой активности и содержания изучаемого элемента (его доступных растениям форм) на различных глубинах корнеобитаемой зоны рыхлого покрова, появляется возможность производить оценку количества элемента, поступающего в растение с разных глубин, и, таким образом, перейти от эмпирического определения представительного горизонта питания растений (Ковалевский, 1967в) к теоретическому определению этой величины. Определение двумя рассмотренными способами дало приблизительно одинаковые величины: при наличии многолетней мерзлоты с мощностью деятельного слоя около 2,0 м, максимальной глубине проникновения корневых систем, равной 1,2—1,6 м, и резком увеличении (в 20 раз) концентрации радиа с глубиной представительный горизонт питания растений приурочивается к горизонту 0,5—0,7 м.

Вследствие сложности аналитических расчетов количественный анализ рассматриваемых зависимостей (корневой активности, распределения содержания изучаемого элемента по вертикали и относительного поглощения его растением с разных глубин) с достаточной для практических целей точностью можно проводить графически, подобно тому как это сделано на рис. 14 и 15. По накоплению достаточно большого количества фактических данных для количественной интерпретации результатов биогеохимических исследований могут быть составлены альбомы палеток корневой активности доминантных видов растений.

Рассмотренные выше данные о значительной неравномерности погложительной способности различных частей корневых систем растений, полученные с помощью радиоактивных индикаторов, подтверждаются результатами лабораторных исследований. Последними было установлено, что отдельные корешки или небольшие части корневой системы растения могут увеличивать свою поглотительную способность в десятки и сотни раз и обеспечивать всё растение необходимым для него элементом минерального питания.

В связи с имеющимися данными о значительно большей поглотительной способности нижних частей корневых систем растений следует подчеркнуть, что приводимые многими исследователями данные о наибольшей концентрации корней в верхних почвенных горизонтах нельзя рассматривать как показатель поступления всех элементов минерального питания в основном из этих почвенных горизонтов. Как указывал, в частности, С. Тиссен (1954), однолетние травянистые растения могут использовать влажность почвы с глубин до 4—5 м. Очевидно, что вместе с водой растения поглощают и растворенные в ней вещества. Большинство опубликованных результатов исследований корневых систем растений ограничивается верхними почвенными горизонтами до глубины 0,5—1,0 м и может создать ложное представление о малой максимальной глубине проникновения корней. Исследования, имеющие целью определение этой величины, показывают, что корневые системы, особенно многолетних растений, часто имеют двухъярусное (рис. 16), а иногда и многоярусное строение, и масса корней убывает с глубиной не монотонно, как это часто предпола-

гается, а имеет два максимума: верхний — в гумусовом горизонте почвенного разреза и нижний — вблизи уровня грунтовых вод (Жуковский, 1964; Рубин, 1948, 1953, 1967; Муромцев, 1969; Эрперт, 1955, 1962; Агроресомелиорация, 1956; Ольховский, 1958; Колесников, 1962, 1963, 1967; Колесников и др., 1966).

Вопрос о контакте между корнями растений и погребенными рудами и их лито- и гидрохимическими ореолами тесно связан с глубиной биогеохимических поисков и надежностью обнаружения этих руд с помощью биогеохимии. Для оценки этих важных для практики параметров следует использовать понятие о представительном литохимическом горизонте питания растений и зависимости вероятности обнаружения конкретного типа руд от глубины залегания их литохимических ореолов.

Представительным литохимическим горизонтом питания растений (кратко — горизонтом питания растений) мы называем тот горизонт рыхлого покрова, на котором контрастность литохимического ореола равна контрастности биогеохимического. При опробовании этого горизонта и растений поисковые результаты литохимической и биогеохимической съемок будут приблизительно одинаковыми. Поэтому глубину расположения горизонта питания растений можно считать глубиной биогеохимического метода (Ковалевский, 1967в).

Для определения представительного горизонта питания растений в конкретных условиях необходимо сопоставить данные опробования растений с результатами изучения рыхлых образований на нескольких глубинах (рис. 17), как это рекомендовалось Н. Н. Сочевановым (1958). Для точного определения горизонта питания растений целесообразно использовать зависимость коэффициента контрастности литохимического ореола ( $KK_{л} = \frac{C_{\max}}{C_{\text{фон}}}$ ) от глубины опробования рыхлых образований. По

ординате точки, имеющей  $KK_{л}$ , равную  $KK$  биогеохимической аномалии, находится глубина представительного горизонта питания изучаемого вида растений. Как видно на рис. 18, по определениям, сделанным в районе с многолетней мерзлотой, она изменяется от 0,5 до 2,2 м. Это позволяет утверждать, что в изученных условиях поисковые результаты биогеохимического метода близко соответствуют литохимическому опробованию или гамма-съемке на глубине 0,5—2,2 м. Следует иметь в виду, что для точного определения представительного горизонта питания растений необходимо опробовать растения и рыхлые отложения через небольшие интервалы (2—5 м), на каждом типе месторождения и геохимического ландшафта производить несколько определений этого горизонта, а содержания изучаемых элементов-индикаторов рудной минерализации определять количественными методами или полуколичественным спектральным анализом с 2—4-кратной повторностью каждой пробы.

Этот способ определения горизонта питания растений и глубины биогеохимических поисков эффективен в условиях, когда содержание изучаемого рудного элемента увеличивается с глубиной и контрастность литохимического ореола в верхней части разреза рыхлого покрова ниже, а в средней или нижней части — выше контрастности соответствующей биогеохимической аномалии (см. рис. 18 и 19). В тех случаях, когда контрастность литохимического ореола уменьшается вниз по разрезу рыхлых образований, часто получают искаженные, кажущиеся глубины

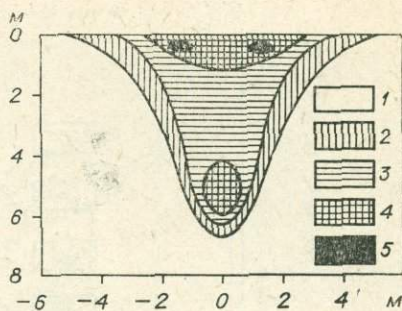


Рис. 16. Плотность всасывающих корней 7-летней яблони, по данным Рубина, 1953 (в тыс. шт. на 1 куб. м).

1 — <0,05; 2 — 0,05—0,5; 3 — 0,5—2,0; 4 — 2,0—5,0; 5 — 5,0—5,5.

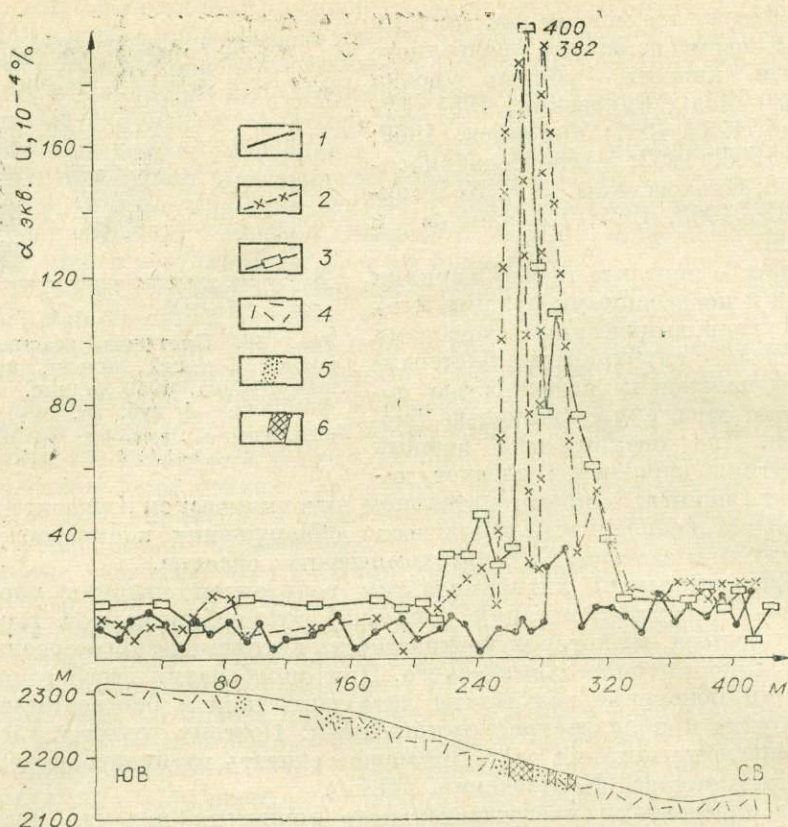


Рис. 17. Распределение радиоактивности по профилю 2 участка № 1.  
 1—3 —  $\alpha$ -активность (1—гумусового горизонта почв, 2 — элювиально-делювиального горизонта на глубине 0,4—0,6 м, 3 — ерника); 4 — кварцевые порфиры; 5 — интенсивная лимонитизация и гематитизация; 6 — урановые рудные тела.

горизонта питания растений. При этом могут возникать даже отрицательные расчетные величины глубин расположения горизонта питания растений, когда контрастность литохимического ореола в верхнем почвенном горизонте существенно превышает контрастность биогеохимической аномалии. Это характерно для случаев, когда изучаемые элементы входят в состав устойчивых минералов и находятся в труднодоступных или не-

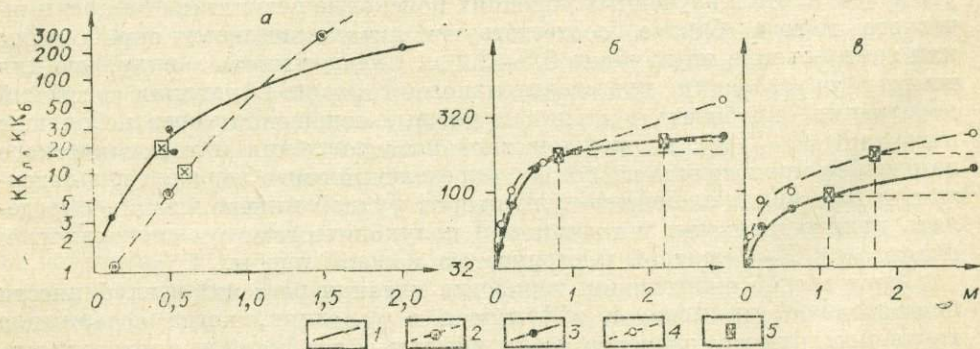


Рис. 18. Зависимости коэффициента контрастности литохимических (ККл) ореолов от глубины отбора проб рыхлого покрова в мерзотно-таежных ландшафтах.  
 а — участки урановых рудопроявлений; б, в — колчеданно-полиметаллическое месторождение. 1 — профиль 2 участка № 1; 2 — профиль 5 участка № 2; 3 — профиль № 1; 4 — профиль № 2; 5 — точки одинаковой контрастности биогеохимических (ККб) и литохимических ореолов, соответствующие эквивалентной глубинности этих видов опробования.

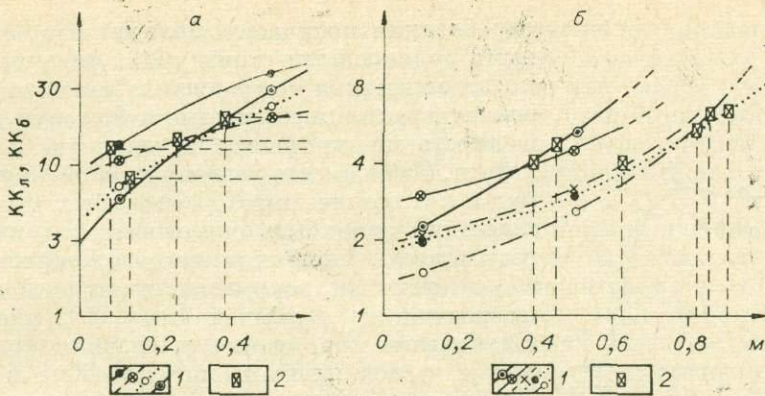


Рис. 19. Зависимости коэффициента контрастности литохимических (КК<sub>л</sub>) ореолов молибдена от глубины отбора проб почв Булуктайского месторождения. а — за фон принято среднее содержание Мо за пределами рудоносного штокверка, за аномальные — над прожилковыми зонами; б — за фон принято среднее содержание Мо над рудным штокверком, а за аномальные — над прожилковыми зонами.

1 — фактические точки и усредняющие их зависимости для отдельных литохимических ореолов, 2 — точки одинаковой контрастности биогеохимических (КК<sub>б</sub>) и литохимических ореолов, соответствующие эквивалентной глубины этих видов опробования.

доступных для растений формах. На определения горизонта питания растений могут оказывать влияние и физиологические факторы: наличие у растений барьеров поглощения, различное распределение их по органам и частям растения и изменение распределения элементов-индикаторов в разные фазы развития растений. Определяемое расчетом положение горизонта питания растений может зависеть также от фона, относительно которого ведется определение биогеохимической и литохимической аномалии. Например, для геохимических аномалий молибдена Булуктайского месторождения (см. рис. 37) глубинность биогеохимического опробования равна 0,1—0,4, в среднем 0,2 м, относительно фона за пределами рудоносного штокверка (см. рис. 19 а). Но относительно фона над штокверком эта глубинность получается равной в среднем 0,6 м при колебаниях отдельных определений от 0,4 до 0,9 м (см. рис. 19б). Из этих данных можно сделать вывод, что биогеохимический метод не имеет преимуществ перед опробованием верхних почвенных горизонтов при выявлении молибденоносных рудоносных штокверков, расположенных, подобно Булуктайскому, на водоразделах. Но он становится несколько эффективнее при выявлении локальных молибденоносных зон, так как дает результаты, соответствующие опробованию нижних почвенных горизонтов В/С и С на глубине, равной приблизительно 0,6 м. Этот пример и другие наши материалы показывают, что обычно глубинность биогеохимического

Таблица 10

Сравнение наличия индикаторных растений с результатами бурения (по данным Cannon, 1964)

Глубина скважин, м	Количество скважин с рудной минерализацией (>0,02 % U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )			Процент скважин с индикаторными растениями
	Всего	Скважины с индикаторными растениями	Скважины без индикаторных растений	
0,0—2,7	16	9	7	56
3,0—6,1	35	25	10	72
6,4—9,8	33	27	6	82
10—15	32	15	17	47
15—20	33	14	19	43
21—30	34	15	19	44
31—35	36	15	21	42
36—45	35	16	19	46
46—51	31	12	19	39
≥52	12	2	10	17
Всего . .	297	150	147	51

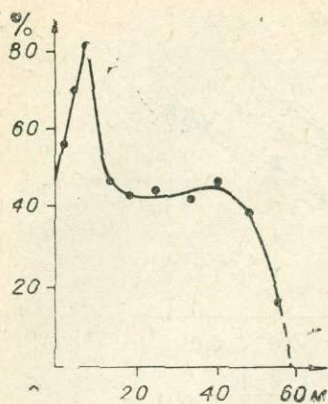


Рис. 20. Зависимость вероятности обнаружения урановой руды по астрагалам от глубины ее залегания (по данным Cannon, 1964). По оси ординат — процент скважин с урановой минерализацией ( $>0,02\%$   $U_3O_8$ ), по оси абсцисс — глубина залегания.  $n=297$  скв.

в одном из районов с однотипным оруденением на основании сопоставления 297 скважин и точек опробования растений была выявлена зависимость вероятности обнаружения руд с помощью биогеохимии от глубины их залегания. Очевидно, что подобные зависимости служат весьма наглядным и достоверным показателем надежности выявления рудной минерализации биогеохимическим методом. Их следует изучать для различных условий поисковых работ. Статистически достоверная информация о вероятности выявления руд биогеохимическими методами может служить материалом для планирования биогеохимических поисков в изучаемом и в аналогичном изучаемому районах и способствовать разработке наиболее эффективной направленности поисковых работ.

### ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ У РАСТЕНИЙ

Наличие у растений барьеров поглощения по отношению к большим концентрациям рудных элементов оказывает отрицательное влияние на поисковые результаты биогеохимических съемок. Оно проявляется в уменьшении контрастности биогеохимических ореолов по сравнению с литохимическими, а в некоторых случаях — в отсутствии биогеохимических аномалий над рудными телами даже с открытыми литохимическими ореолами. Последнее может приводить к нецелесообразности применения биогеохимии при поисках. Изучение барьеров поглощения у растений показало, что в большинстве практических случаев их отрицательное влияние может быть исключено или снижено.

Накопление растениями химических элементов до некоторого предельного уровня, объясняемого функционированием физиолого-биохимических барьерных механизмов, называемых для краткости физиологическими барьерами, давно известно биологам. С 1940—50-х гг. оно неоднократно отмечалось исследователями, проводившими биогеохимические работы на рудных месторождениях (Thyssen, 1942; Тиссен, 1954; Ткалич, 1956, 1959; Гинзбург, 1957; и др.). Однако этому фактору не придавалось

и многими исследователями до настоящего времени не придается существенного значения. Это объясняется отсутствием специальных исследований физиологических барьеров, отрывочностью имеющейся информации и невозможностью проведения количественных оценок их влияния на результаты биогеохимических поисков, которое впервые было сделано для нескольких элементов-индикаторов в Восточной Сибири только в 1974 г. (Ковалевский, 1974).

Вывод о том, что у большинства растений, произрастающих на рудных месторождениях, имеются физиологические барьеры поглощения, был сделан нами на основании анализа концентрационных кривых, полученных вначале на урановых (Ковалевский, 1960, 1963, 1966а, г, 1972), а затем и на других рудных месторождениях (Ковалевский, 1966б, 1967б, д, 1969а, 1971, 1973, 1974). Этими кривыми мы называем усредненные зависимости концентрации химических элементов в растениях от их содержания в питающей среде — зависимости концентрации элементов в системе «питающая среда — растение».

Результаты наших многолетних исследований и обобщение литературных данных позволили сделать вывод о том, что среди разнообразных концентрационных кривых можно выделить два основных типа зависимостей: «безбарьерный» (прямо пропорциональный, линейный) и «барьерный».

При безбарьерной концентрационной зависимости по физиологической реакции растений могут быть выделены четыре диапазона концентрации изучаемого химического элемента в питающей среде и растениях (рис. 21а): I — недостатка элемента — стимулирующего действия; II — оптимума — максимальной продуктивности растения; III — избытка — токсического действия и снижения продуктивности и IV — летальный диапазон, жизнедеятельность растения при котором невозможна. Очевидно, что благодаря естественному отбору на рудных месторождениях не могут произрастать растения, концентрации рудных элементов в которых находятся в III и IV диапазонах.

Барьерный тип зависимости между содержанием элемента в почве и в растении имеет характер своеобразной «барьерной» кривой (см. рис. 21б). У нее выделяются два основных диапазона: I — интервал прямо пропорциональной, приблизительно линейной зависимости, описываемой уравнением  $C_p = K_1 \cdot C_{п}$ , где  $C_p$  и  $C_{п}$  — содержание изучаемого элемента в растении и в питающей среде соответственно.  $K_1$  — коэффициент про-

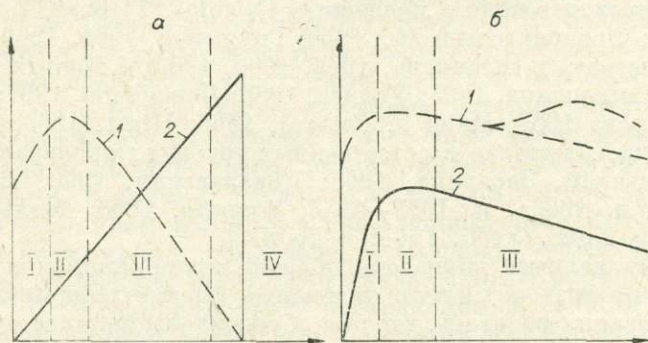


Рис. 21. Типичные зависимости содержаний элемента в растениях и их урожая (ось ординат) от концентрации химических элементов в питающей среде (ось абсцисс) для безбарьерных (а) и барьерных (б) элементов.

1 — урожай; 2 — содержание. Диапазоны: I, II — недостатка и оптимальных концентраций в питающей среде; III — токсических концентраций в питающей среде для безбарьерных элементов и барьерных концентраций — для барьерных элементов; IV — летальных концентраций в питающей среде для безбарьерных элементов.

порциональности и III — интервал обратно пропорциональной, приблизительно линейной зависимости:  $C_p = -K_2 \cdot C_{\text{п}} + C_p^0$ , где  $-K_2$  — коэффициент обратной пропорциональности, а  $C_p^0$  — содержание элемента в растении, полученное путем экстраполяции зависимости в этом диапазоне до точки  $C_{\text{п}}=0$ . Между этими диапазонами приблизительно линейных зависимостей имеется переходный диапазон II криволинейной зависимости, для которого характерны максимальные концентрации в растениях. Первый диапазон содержаний химических элементов в почвах и растениях (см. рис. 216) мы будем называть диапазоном «низких» содержаний элемента в питающей среде и растении. В условиях рудных полей соответствующих месторождений в основном в этом диапазоне находятся содержания радия, кадмия, золота, рения, бора, цинка (в старых органах), свинца (некоторые виды и части растений), молибдена (некоторые виды и части растений) и других элементов. Эти химические элементы можно назвать «безбарьерными» на соответствующих месторождениях. Третий диапазон мы будем называть диапазоном «барьерных» концентраций элемента в питающей среде и в растении. В условиях рудных полей соответствующих месторождений обычно в этом диапазоне находятся содержания лития, бария, олова, свинца (некоторые виды и части растений), фосфора, бериллия (некоторые виды и части растений), урана, фтора, марганца и железа. Это «барьерные» химические элементы на соответствующих месторождениях. Диапазоны низких и барьерных содержаний химических элементов в питающей среде и растений следует рассматривать как области существования двух независимых друг от друга однородных статистических совокупностей, в пределах которых зависимость содержаний в системе питающая среда — растение имеет приблизительно линейный характер. Естественно, что рассмотрение этих двух неоднородных совокупностей в одной, которое довольно часто делается в практике исследований, не позволяет выявлять линейные зависимости содержаний химических элементов в системе питающая среда — растение и выделять диапазоны низких и барьерных концентраций их. Для физиологической реакции растений, имеющих барьерные типы концентрационной зависимости, характерно отсутствие токсического и летального диапазонов (см. рис. 216). Поэтому они часто наблюдаются у растений, произрастающих на рудных месторождениях.

Анализ литературных данных о зависимостях между содержаниями химических элементов в системе питающая среда — растение показал, что барьерные зависимости являются довольно типичными. Их наблюдали многие исследователи в почвенных (Nicolay, Thomas, 1954; Lingle, Carolus, 1958; Фредрикссон и др., 1959; Грушева, 1964, 1969; Мосолов, 1968 и др.), песчаных (Ездакова, 1962, 1966, 1969) и водных культурах (Кибаленко, Сидоршина, 1965; Уоллес, 1966; Леванидов, 1967; Ордынец, 1967; Просвинова 1967; Maier a. Cattani, 1966; Hiatt, 1969, 1970; Wallace, 1971 и др.), а также в естественных условиях произрастания растений (Ковальский, Засорина, 1965; Ковалевский, 1960, 1963, 1966а, 1966б, 1967г, д, 1969а, в, 1971—1974; Буркин, 1968; Мальгин, 1969; Фидлер, 1970; Хокс, Уэбб, 1964; и др.).

Поскольку наличие диапазона обратно пропорциональной зависимости не может быть объяснено явлениями физико-химической адсорбции, есть основания полагать, что они обусловлены наличием у растений специфических физиолого-биохимических механизмов, ограничивающих поступление в них избыточных количеств химических элементов. Поэтому описываемое парадоксальное явление — появление диапазона обратно пропорциональной зависимости между содержанием какого-либо химического элемента в питающей среде и в растении — мы объясняем наличием у растений физиологических барьеров поглощения по отношению к избыточному количеству этого элемента в питающей среде

(для краткости будем называть их барьерами поглощения). Функционированием барьеров можно объяснить не только появление в III диапазоне высоких (барьерных) концентраций в среде обратно пропорциональной зависимости концентрационных кривых (рис. 22,1) но и резкое уменьшение интенсивности накопления изучаемого химического элемента (рис. 22,3), насыщения или остановки накопления (рис. 22,2) и кривых с несколькими максимумами (рис. 22, 4,5).

Имеющиеся данные об уменьшении содержания химических элементов в растениях при увеличении их концентрации в питающей среде мало известны биологам. Этот вывод можно сделать на основании того, что большинство исследователей, в том числе и биогеохимики, получившие фактические данные о снижении концентраций химических элементов в растениях при увеличении их содержания в питающей среде, не обращали внимания на это явление. Те же авторы, которые отмечали этот факт, чаще всего оставляли его без объяснения или связывали с ошибками исследований,

случайностями, токсичностью изучаемых химических элементов, поражающих органы поглощения растений, и другими причинами, но не с барьерами поглощения. Лишь отдельные авторы (Ездакова, 1962, 1966, 1969 и некоторые другие) обращали внимание на это явление. Л. А. Ездакова (1962), комментируя данные о меньшем содержании лития в листьях табака при концентрации его в питательном растворе с 50 мг/л по сравнению с 10 мг/л, пишет: «Приведенные данные позволяют утверждать, что растения обладают способностью ограждать себя от избыточного проникновения лития в ткани при высоком содержании его в питательной среде». Отмечая, что это было известно и ранее, она констатирует: «Указанные факты остались без объяснения и не привлекли внимания исследователей». В своих последующих публикациях она говорит об ограничении накопления лития растениями, когда его концентрации становятся ядовитыми (Ездакова, 1969), о наличии у них буферных функций и буферных сил (Ездакова, 1966, 1969). Однако в публикациях Л. А. Ездаковой не было введено понятия физиологического барьера поглощения.

Обобщение наших и литературных данных о барьерах поглощения химических элементов у растений (часть которых приведена ниже) позволяет считать, что их наличие в настоящее время установлено для 36 химических элементов: лития, натрия, калия, рубидия, цезия, меди, серебра, золота, бериллия, магния, кальция, стронция, бария, цинка, ртути, бора, алюминия, кремния, олова, свинца, азота, фосфора, мышьяка, серы, селена, хрома, молибдена, вольфрама, урана, фтора, хлора, йода, магния, железа, кобальта и никеля (для 10 макро- и 26 микро-элементов). По интерполяции и экстраполяции свойств химических элементов можно предполагать, что у растений есть барьеры поглощения по отношению к большим концентрациям кадмия, иттрия, лантана, циркония, гафния, германия, ниобия, тантала, сурьмы, висмута, теллура, полония, брома, рутения, родия, палладия, тория и по отношению к 14 редкоземельным и известным трансураниевым элементам, т. е. по отношению к большинству элементов Периодической системы Д. И. Менделеева. Выявление барьеров поглощения по отношению к большому количеству химических элементов у многих изученных видов, родов,

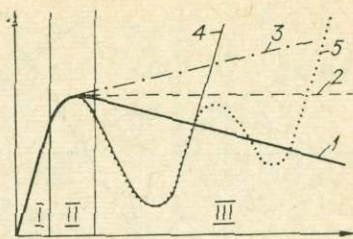


Рис. 22. Типы концентрационных зависимостей (кривых) в системе питающая среда — растение, характеризующие наличие физиологических барьеров. По оси ординат — содержание элемента в растении, по оси абсцисс — в питающей среде.

1 — барьерная; 2 — насыщения (адсорбционная); 3 — с резко уменьшающейся интенсивностью поглощения растениями при высоких концентрациях в питающей среде; 4, 5 — сложные. I—II—диапазоны концентрации: I—низких, II—оптимальных, III—высоких (барьерных).

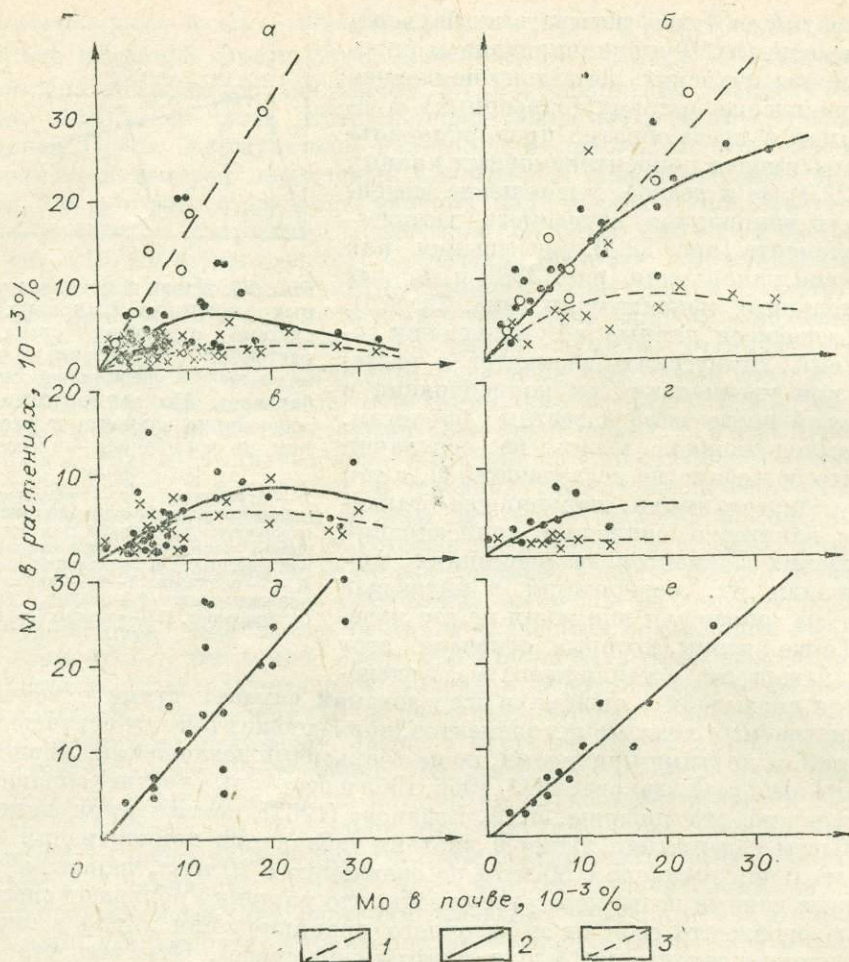


Рис. 23. Зависимости между концентрациями молибдена в почвах и растениях Булуктайского молибдено-вольфрамового месторождения (а — кедр; б — багульник; в — береза; г — лиственница; д — осока; е — брусника).

1 — корни; 2 — ветви деревьев и кустарников и подземные части осоки и брусники; 3 — листья (хвоя).

семейств и классов растений позволяет утверждать, что функционирование этих барьеров является одним из обычных физиологических механизмов приспособления растений к нормальной или несколько измененной жизнедеятельности в условиях высоких (вероятно, токсических) концентраций химических элементов в питающей среде. Отсутствие барьеров поглощения приводит, как правило, к гибели растения от токсических концентраций химического элемента в его органах и тканях или к резкому снижению его продуктивности (см. рис. 21,а). Поэтому безбарьерные виды растений не характерны для большинства рудных месторождений.

Рассмотрим полученные зависимости для естественных условий произрастания растений для молибдена, цинка, марганца и бария (рис. 23—26). У зависимости между содержанием элементов в почвах (горизонт 30—70 см) и растениях намечается ряд особенностей: 1) содержание элементов в листьях и старых частях ветвей (2—8 лет) имеет предел поглощения; 2) по достижении некоторого предельного содержания при дальнейшем увеличении содержания элемента в почве наблюдается постепенное, иногда довольно значительное уменьшение его

содержания в растениях; 3) пределы поглощения молибдена, цинка и бария у различных частей растений не одинаковы, а у некоторых они могут отсутствовать. Например, предела поглощения молибдена корнями кедра в изученном диапазоне его концентраций в почве (до 0,02—0,04%) не наблюдалось; 4) разные виды растений имеют пределы поглощения химических элементов, а у некоторых «безбарьерных» видов в изученном диапазоне содержаний элементов в почвах пределов поглощения у растений не наблюдается — например, у осики и брусники по отношению к молибдену (см. рис. 23).

По соотношению между нормальными и предельными концентрациями в высших растениях элементы минерального питания можно разделить на четыре группы (табл. 11).

В связи с резко различными пределами поглощения у различных видов и органов растений некоторые химические элементы могут относиться к различным группам. Очевидно, что для отдельных видов, органов и частей органов растений местоположение химических элементов в выделенных нами группах будет более стабильным, чем для всей совокупности высших растений, приведенной в табл. 11. Примеры

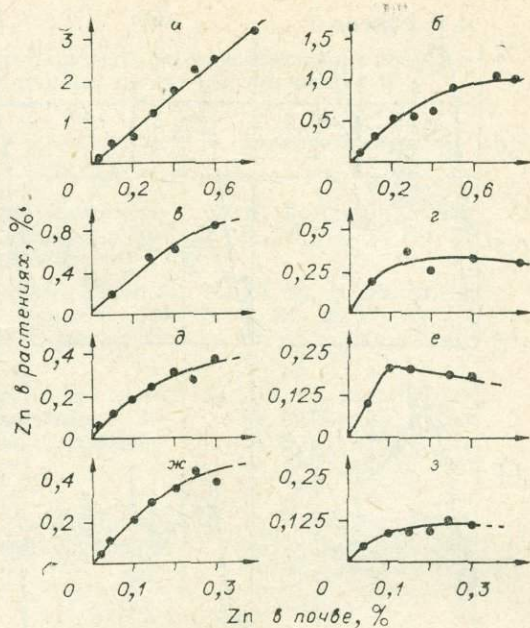


Рис. 24. Зависимости между концентрациями цинка в почвах и растениях мерзлотно-таежного ландшафта.

Ветви: а — березы, а — ивы, д — лиственницы, ж — рододендрона; листья: б — березы, 2 — ивы, 3 — рододендрона; е — хвоя лиственницы.

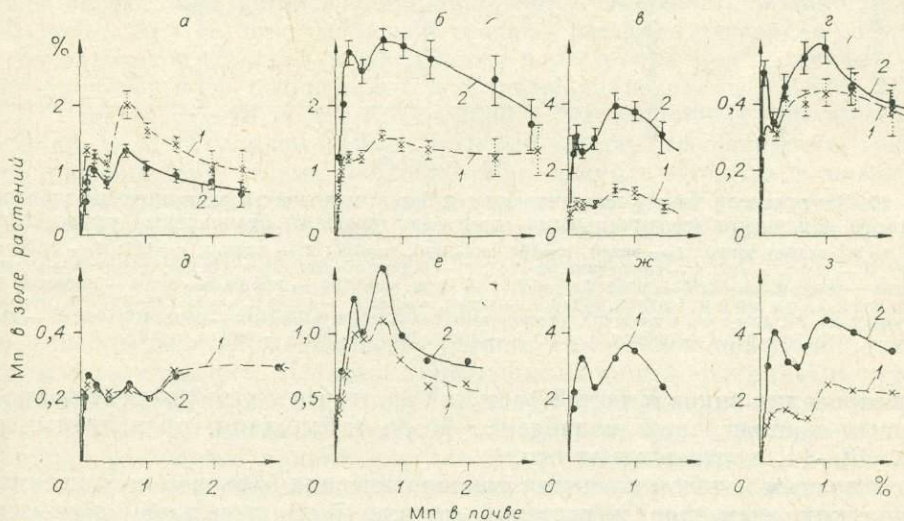


Рис. 25. Зависимости между концентрациями марганца в почвах и растениях мерзлотно-таежного ландшафта (вертикальными штрихами показаны стандартные отклонения).

а — береза,  $n = 200$ ; б — лиственница,  $n = 120$ ; в — рододендрон,  $n = 86$ ; г — осина,  $n = 72$ ; д — ива,  $n = 60$ ; е — таволга,  $n = 16$ ; ж — надземные части брусники,  $n = 28$ ; з — голубика,  $n = 22$ ; 1 — листья, 2 — ветви.

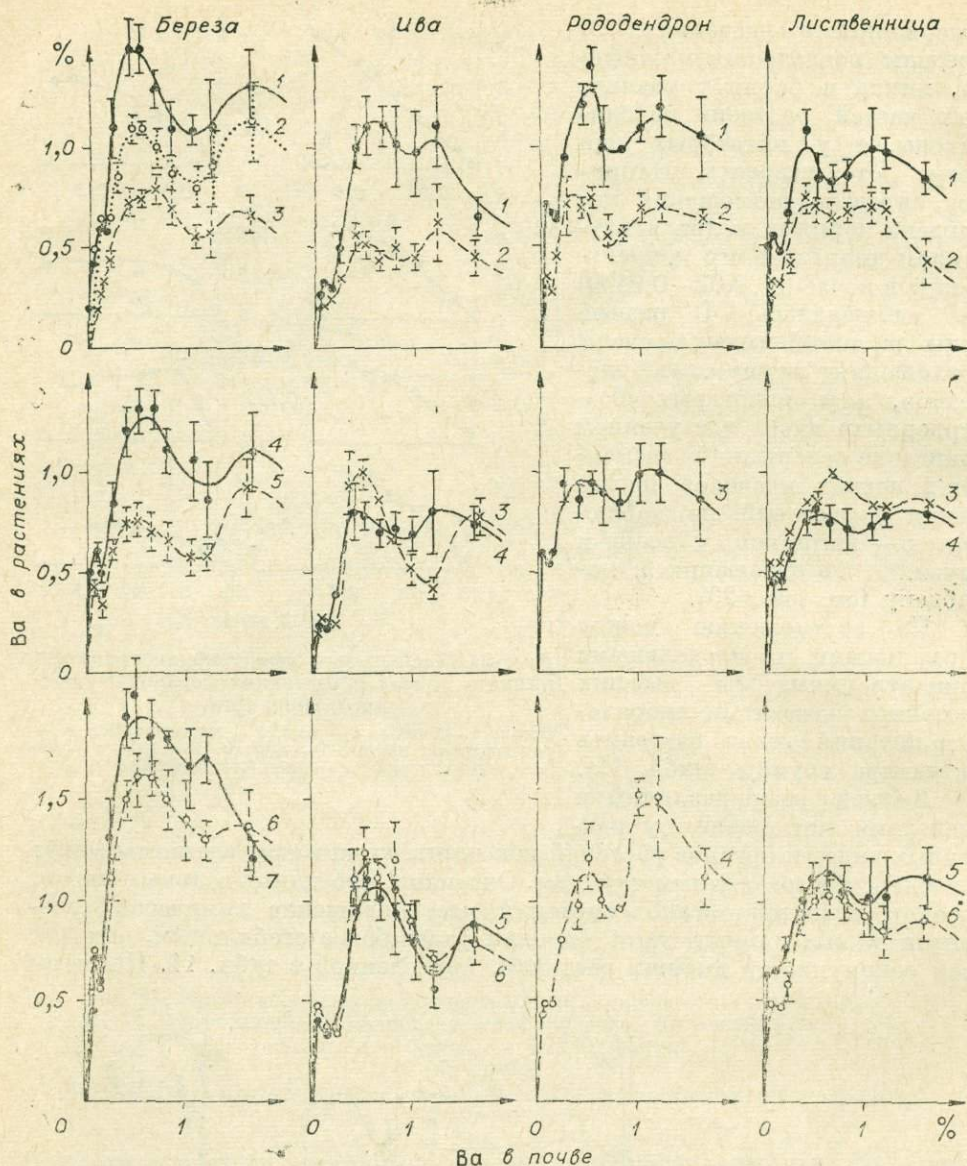


Рис. 26. Зависимости между концентрациями бария в почвах и растениях мерзлотно-таежного ландшафта (вертикальными штрихами показаны стандартные отклонения)  
 Береза (сверху вниз): 1 — ветви,  $n=109$ ; 2 — луб,  $n=105$ ; 3 — листья,  $n=111$ ; 4 — побеги  $n=112$ ; 5 — кора,  $n=97$ ; 6 — древесина,  $n=107$ ; 7 — корни,  $n=99$ . Ива (сверху вниз): 1 — ветви  $n=65$ ; 2 — листья,  $n=62$ ; 3 — побеги,  $n=57$ ; 4 — кора,  $n=42$ ; 5 — корни,  $n=41$ ; 6 — древесина,  $n=43$ . Рододендрон (сверху вниз): 1 — ветви,  $n=73$ ; 2 — листья,  $n=38$ ; 3 — побеги,  $n=35$ ; 4 — корни,  $n=31$ . Лиственница (сверху вниз): 1 — ветви,  $n=104$ ; 2 — хвоя,  $n=106$ ; 3 — кора,  $n=93$ ; 4 — побеги,  $n=95$ ; 5 — древесина,  $n=96$ ; 6 — корни,  $n=87$ .

группирования видов и частей растений по относительной величине предельных концентраций молибдена, фтора и бериллия, приведенные в табл. 12—14, подтверждают это.

Основным методом изучения физиологических барьеров поглощения химических элементов у растений должно быть детальное изучение зависимостей в системе питающая среда — растение по видам, органам, тканям и клеточным структурам в широком диапазоне концентраций изучаемых химических элементов в питающей среде (желательно до их летальных концентраций в течение всего периода роста и развития растений). Для упрощения и ускорения выявления физиологических

## Группировка химических элементов по относительной величине предельных концентраций в надземных частях высших растений

Название групп	Химические элементы
I. Безбарьерные при предельно высоких естественных концентрациях в почвах, превышающих кларковые в 300 и более раз	Na, S, Cl, Ag, Au, Cd, Ra, B, Pb, As, Se, Mo, Re
II. Барьерные при высоких концентрациях в почвах, превышающих кларковые в 30—300 и более раз (высокобарьерные, гектафонобарьерные)	Na, Li, Ag, Au, Sr, Zn, Hg, B, Ge, Sn, Pb, As, Sb, Bi, S, Se, Mo, W, Cl, Co, Ni
III. Барьерные при повышенных содержаниях в почвах, превышающих кларковые в 3—30 раз (среднебарьерные, декафонобарьерные)	Li, Rb, Cs, Cu, Ag, Au, Be, Sr, Ba, Zn, Y, La, Ce, Ge, Sn, Pb, S, Cr, Mo, W, U, F, Mn, Br, Co, Ni
IV. Барьерные при кларковых содержаниях в почвах (низкобарьерные, фонобарьерные)	N, P, K, Ca, Mg, Al, Si, Li, Cu, Ag, Au, Be, Pb, Mn, F, J, Fe, U

барьеров рассмотрению и анализу концентрационных зависимостей подвергаются системы: изучаемый орган, ткань или клеточная структура — безбарьерный орган (рис. 27) или изучаемый вид — безбарьерный вид (рис. 28). Такие безбарьерные органы или виды растений выявляются на первом этапе изучения барьеров поглощения при рассмотрении концентрационных зависимостей в системе питающая среда — разные органы и виды растений. Один из важных вопросов программы этих исследований — изучение устойчивости получаемых зависимостей и факторов, способствующих их устойчивости или изменениям. Это обусловлено имеющимися данными о том, что парадоксальные эффекты у растений и животных обычно плохо воспроизводятся (Schatz e. a., 1964). Эта плохая воспроизводимость обусловлена, вероятно, тем, что в диапазоне перехода от прямо пропорциональной к обратно пропорциональной зависимости в системе питающая среда — растение дисперсия содержания элементов минерального питания в растениях иногда значительно увеличивается по сравнению с соседними диапазонами (Specht, 1960).

Следует отметить, что полученная в вегетационных опытах и описанная С. М. Ткаличем (1959, 1969), как типичная зависимость, согласно которой при весьма больших содержаниях металлов в питающей среде после некоторого диапазона насыщения резко увеличиваются их содержания в растениях (рис. 29), что приводит к гибели последнего на рудных месторождениях, наблюдается довольно редко. Нами она в естественных условиях произрастания на рудных месторождениях не наблюдалась. Этот тип зависимости можно рассматривать как один из частных случаев барьерной зависимости, усложненный появлением дополнительных составляющих. К таким усложненным концентрационным кривым можно отнести зависимость, наблюдавшуюся С. М. Ткаличем в вегетационных опытах с водными питательными растворами, и многовершинные концентрационные кривые в условиях подобных опытов (см. рис. 29).

Судя по многочисленным опубликованным данным, гибель растений от токсических доз химических элементов происходит в диапазоне прямо пропорциональной зависимости между содержаниями элемента в питающей среде и растениях. В изученных нами условиях, когда содержания в растениях урана, вольфрама, молибдена, бериллия, бария, цинка, марганца и фтора имели отчетливо выраженные барьеры поглощения, существенных внешних признаков изменения морфологии растений или

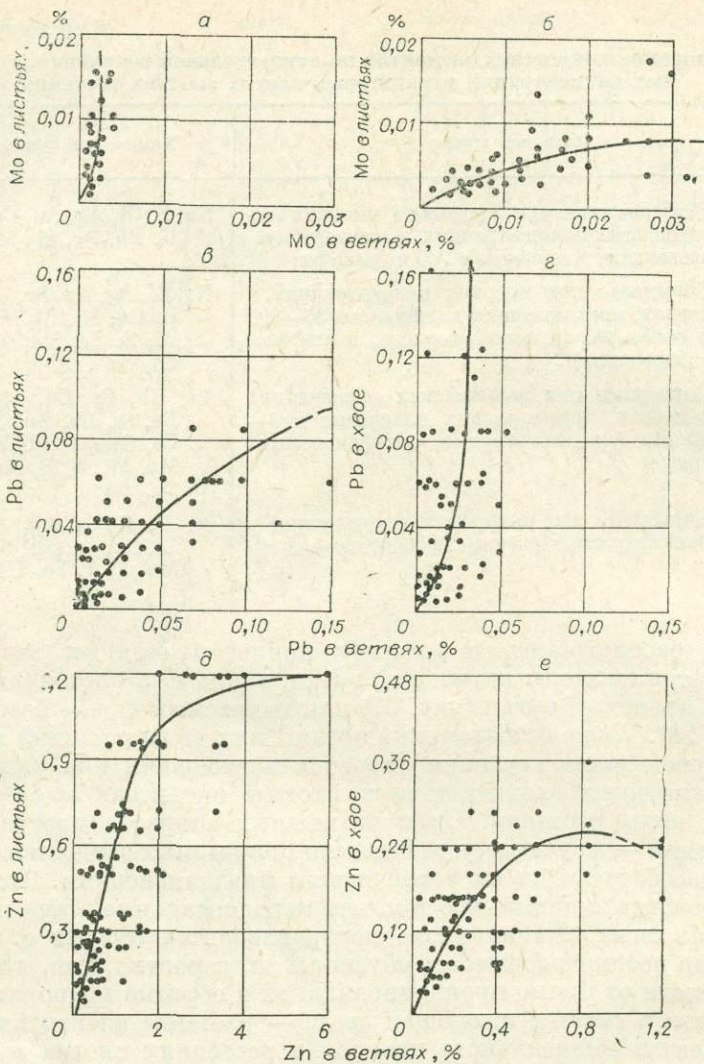


Рис. 27. Зависимости содержания молибдена, свинца и цинка в системе ветви — листья (хвоя).  
 а — ива; б — багульник; в, д — береза; г, е — лиственница.

их угнетения при максимальных концентрациях этих элементов в почвах не наблюдалось. Поэтому наличие пределов поглощения некоторых химических элементов у растений следует рассматривать как ответную реакцию на избыточные, вероятно токсические, содержания этих элементов в питающей среде, которая обеспечивает нормальную жизнедеятельность растений в условиях высоких содержаний химических элементов в почвах. Механизмы формирования пределов поглощения химических элементов растениями до настоящего времени не изучались. Можно, однако, предполагать, что значительная роль в их функционировании принадлежит различным биологическим мембранам и физиологическим механизмам самоочистки барьерных органов, тканей, клеток и клеточных структур растений (и животных).

Данные о значительной специфичности зависимостей между содержаниями элемента в питающей среде и в различных видах и органах растений позволяют рекомендовать для опробования при биогеохимических поисках «безбарьерные» виды и части, у которых содержание

элементов-индикаторов в системе почва — растение находится в диапазоне прямо пропорциональной зависимости. В качестве элементов биогеохимических индикаторов рудных месторождений следует использовать не все рудные элементы, являющиеся типоморфными для минерализации данного типа, а только безбарьерные элементы и те индикаторы руд, предельные концентрации которых в растениях значительно (в десятки и сотни раз) превышают фоновые содержания. Характер зависимости в системе питающая среда — растение может иметь некоторые различия в разные фазы развития растений (рис. 30). Поэтому для опробования растений иногда следует использовать наиболее «безбарьерное» время. Имеющиеся данные об увеличении контрастности медных, молибденовых, ванадиевых, оловянных, цинковых и свинцовых биогеохимических аномалий осенью (Бардюк, Ивашов, 1968) и молибденовых аномалий зимой (исследования Э. Ф. Жбанова) говорят о том, что для некоторых рудных элементов осень и зима являются временем, когда диапазон прямой пропорциональности в системе почва — растение несколько расширяется. При этом контрастность биогеохимических аномалий осенью и зимой увеличивается в 2—10 раз по сравнению с летним периодом.

Очевидно, что сопоставление содержаний элементов в почвах и растениях и установление типов зависимости между ними позволяет объяснить многие, казавшиеся ранее непонятными, результаты биогеохимических исследований на рудных месторождениях и получить исходные данные для интерпретации биогеохимических аномалий. Поэтому они должны быть важной составной частью любых тематических биогеохимических исследований.

Следует иметь в виду, что при отсутствии данных о представительном горизонте питания растений или невозможности провести его опробование концентрационные зависимости содержаний элементов в системе почва — растение можно изучать, сопоставляя данные литохимического и биогеохимического опробования. Получаемые при этом зависимости в некоторых случаях могут быть искажены некоторой несопоставимостью рассматриваемых величин. Несмотря на это, они могут дать весьма важную для практических целей информацию и способствовать выбору лучших объектов опробования. Подобное сопоставление содержаний цинка в гумусовом ( $A_1$ ) и подгумусовых ( $B/C$  и  $C$ ) горизонтах почв и золе ветвей различных видов растений, приведенных к одному виду, иллюстрирует рис. 31.

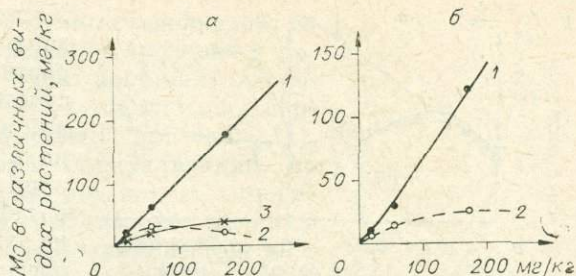


Рис. 28. Зависимости содержаний молибдена в системе безбарьерный вид — изучаемый вид растений. По оси абсцисс — Мо в клевере красном (а), Мо в клевере (б).

а — по данным Lewis (1943): 1 — клевер белый, 2 — костер мягкий, 3 — ежа сборная; б — по данным Kubota e. a. (1961) для клевера: 1 — люцерна; 2 — камыш.

Рис. 29. Некоторые типы зависимостей между содержаниями химических элементов в растениях (ось ординат) и питающей их среде (ось абсцисс).

а — пропорциональная; б — полунасыщенная; в — насыщенная; г — (по С. М. Ткаличу); д — одновершинная с минимумом; е — двухвершинная.

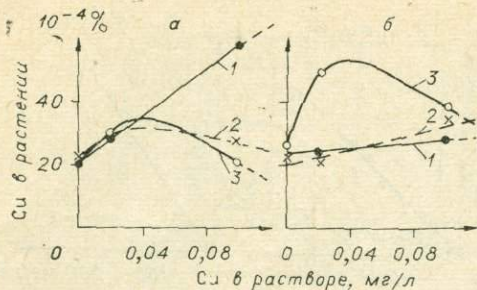


Рис. 30. Зависимости между концентрациями меди в питательном растворе и томатах (по данным Maier a. Cattani, 1966). а — листья; б — стебли. 1—3 — возраст растений в днях: 1 — 35; 2 — 49; 3 — 63.

Характер зависимости между содержаниями цинка в почве и растениях свидетельствует об отсутствии прямо пропорциональной зависимости содержания цинка в растениях от его концентрации в гумусовом горизонте и о целесообразности проб на цинк не гумусового горизонта почв, а растений, так как концентрации цинка в них прямо пропорциональны его концентрациям в нижних почвенных горизонтах. Подобные зависимости концентраций химических элементов в растениях от их содержаний в различных

почвенных горизонтах на месторождениях полезных ископаемых, по нашим данным, являются довольно типичными. Концентрационные кривые, характеризующиеся наличием «предела» содержаний изучаемого элемента в верхних горизонтах почв при значительных изменениях его концентраций в растениях можно рассматривать как признак, говорящий о несопоставимости опробованного слоя почвы и горизонта питания растений и о том, что этот горизонт располагается ниже опробованного. На это, в частности, указывают рис. 31 и 32.

Влияние барьеров поглощения на результаты биогеохимических поисков и пути преодоления их отрицательного влияния были изучены нами применительно к поискам урановых, полиметаллических, молибденовых, вольфрамовых, флюоритовых и бериллиевых месторождений.

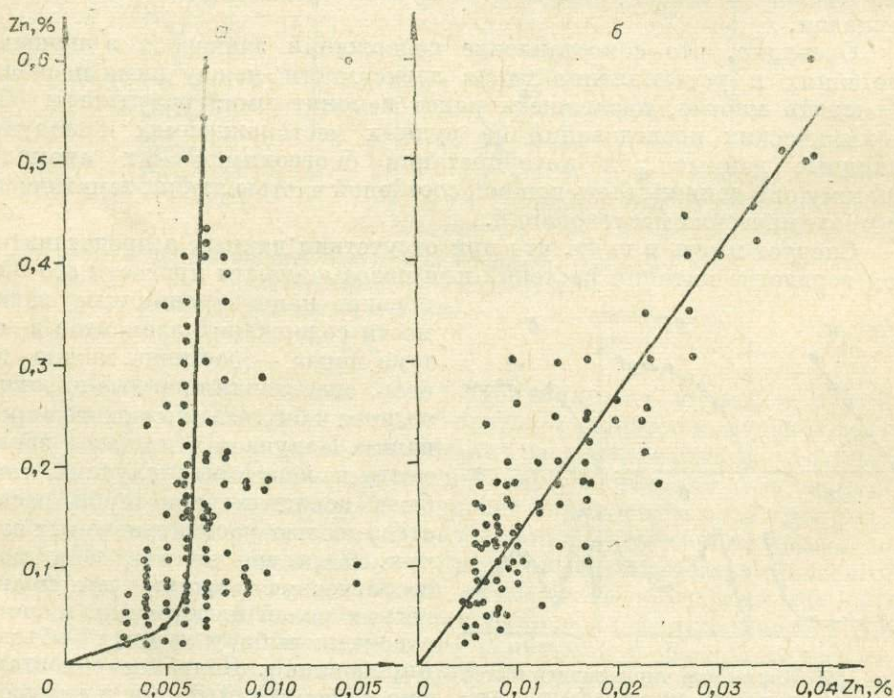


Рис. 31. Зависимости содержаний цинка в системе различные почвенные горизонты — растения (ветви кедра, лиственницы, березы и багульник Булдуктайского месторождения). Ось ординат — цинк в растениях; ось абсцисс — в почве. а — горизонт А<sub>0</sub>, 0—20 см; б — горизонт В/С — С, 30—70 см.

Уран является одним из рудных элементов, по отношению к которому барьеры поглощения у подавляющего большинства видов растений наблюдаются при относительно низких, близких к кларковому, концентрациях его в почвах (см. табл. 11). Поэтому индикация урановой минерализации по урану в растениях обычно не надежна и многие рудные тела, даже имеющие выходы на дневную поверхность, не отмечаются биогеохимическими аномалиями. Наблюдаемые же аномалии урана в растениях мало контрастны с концентрациями урана в них, равными  $10^{-4}$ — $10^{-3}\%$  при его концентрациях в почвах порядка  $10^{-3}$ — $10^{-1}\%$  (см. рис. 5; рис. 33, 34). На наш взгляд, применение биогеохимии по урану в растениях при поисках его месторождений обычно нецелесообразно.

Однако уран в месторождениях и их ореолах рассеяния всегда сопровождается продуктами своего распада. Наиболее интересен из них радий. На изучении концентраций радия основаны основные методы поисков урановых месторождений: гамма- и эманационная съемки. Радий в отличие от урана имеет весьма благоприятные особенности накопления растениями. Главная из них — отсутствие у всех изученных видов и надземных частей растений барьеров поглощения по отношению к предельно высоким естественным концентрациям радия в почвах, свойственным урановым месторождениям (рис. 35). Концентрации радия в золе растений достигают  $1$ — $3 \cdot 10^{-8}\%$ , эквивалентные  $0,1$ — $0,3\%$  урана. При выращивании растений в водных культурах с весьма высокими концентрациями радия, которые не встречаются в естественных условиях (порядка  $10^{-7}$  г/л), его концентрации достигают  $1,6 \cdot 10^{-4}\%$  в корнях и  $3,5 \cdot 10^{-7}\%$  в надземных частях (Баранов, 1939), что эквивалентно  $500\%$  и  $1\%$  урана соответственно. В этих искусственных условиях выращивания у растений наблюдается появление барьеров поглощения по отношению к большим концентрациям радия в питающей среде. Наиболее отчетливо эти барьеры проявляются в надземных частях изученных растений (рис. 36). Однако для естественных условий произрастания растений радий является типичным безбарьерным химическим элементом. Поэтому он отнесен нами в первую группу безбарьерных элементов (см. табл. 11).

Отсутствие физиологических барьеров поглощения у растений по отношению к большим концентрациям радия в почвах и рыхлом покрове и возможность использования для его определений высокопроизводительного радиометрического метода (Ковалевский, 1960, 1966а, 1967а, з), делает радий весьма благоприятным для использования в качестве безбарьерного элемента-индикатора урановых месторождений. Индикация урановой минерализации по радью в растениях получается намного лучше, чем по урану (см. рис. 5, 33, 34). Современные биогеохимические поиски используют радий в качестве основного, а уран и нерадиоактивные элементы-спутники как дополнительные биогеохимические индикаторы урановой минерализации (Ковалевский, 1972).

Таким образом, при биогеохимических поисках урановых месторождений отрицательное влияние барьеров поглощения растений по отношению к урану полностью исключается путем использования в качестве индикатора безбарьерного радия.

К особенностям накопления молибдена растениями (см. рис. 23) относятся: отсутствие барьеров поглощения у некоторых видов (например, у осоки, брусники и иван-чая) и наличие их у отдельных надзем-

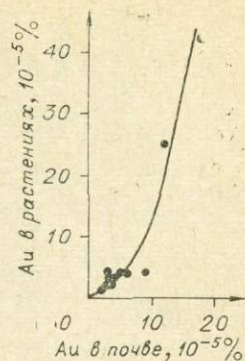


Рис. 32. Зависимость между содержанием золота в горизонте А+В почв и безбарьерных растениях (по данным Разина и Рожкова, 1963).

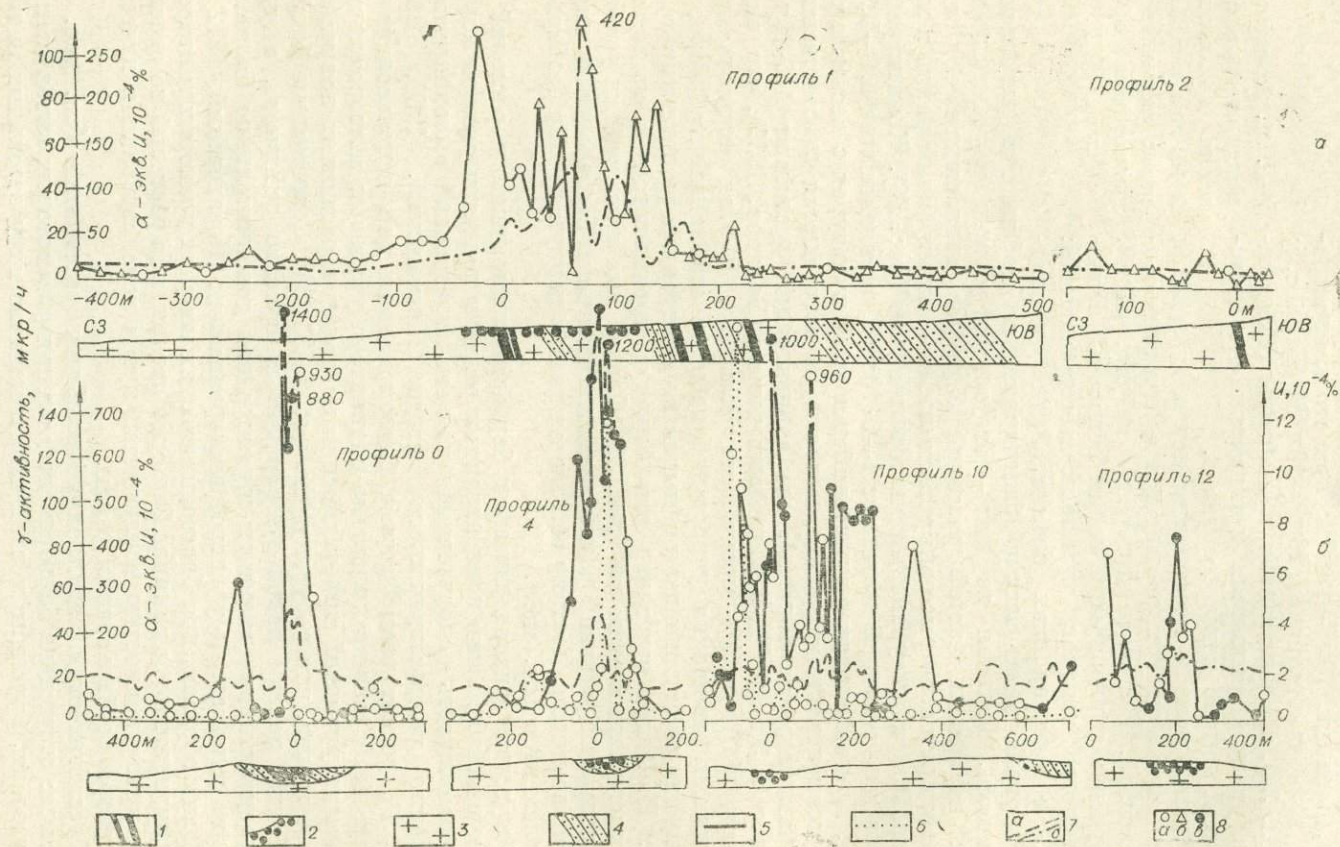


Рис. 33. Сравнительная эффективность биогеохимического и радиометрического методов при поисках легковыветриваемых урановых руд в мерзлотно-таежных ландшафтах (а — со смолковой минерализацией в метаморфических горных породах, б — с минерализацией в зонах дробления гранитоидов).

1 — урановые рудные тела; 2 — ореолы рудных тел; 3 — граниты, гранодиориты; 4 — сланцы и гнейсы; 5 —  $\alpha$ -активность зола растений; 6 — содержание урана в золе; 7 —  $\gamma$ -активность (а — на дневной поверхности, б — в закопках или шпурах глубиной 0,3—0,6 м); 8 — опробованные растения (а — лиственница, б — береза, в — ерник).

ных органов других растений (например, у хвой и ветвей кедра и листьев багульника и березы). В связи с этим характеристики молибденовых биогеохимических аномалий зависят от используемых видов и частей растений. Так, в хвое кедра сибирского контрастность биогеохимической аномалии невелика — на фоне  $2 \cdot 10^{-3}\%$  максимальные концентрации молибдена достигают  $4-6 \cdot 10^{-3}\%$ , т. е. превышают фон только в 2—3 раза (рис. 37). Такие биогеохимические аномалии нельзя считать надежными, особенно если они выявляются по отдельным пробам. При этом наблюдаемые биогеохимические аномалии отмечают не все зоны наиболее богатой прожилково-вкрапленной молибденовой минерализации, что связано с наличием низких барьеров поглощения молибдена у хвой кедра. Значительно лучше индикация молибденом зон прожилково-вкрапленной минерализации происходит по листьям багульника болотного, а наилучшая — по его ветвям, которые являются безбарьерным органом этого вида растения по отношению к молибдену (см. рис. 23). При фоновых содержаниях молибдена в ветвях багульника, равных  $3 \cdot 10^{-3}\%$ , его аномальные концентрации в отдельных точках достигали 0,02—0,04%, превышая фон в 7—14 раз (см. рис. 37).

Распределение молибдена по профилям Булуктайского месторождения и его концентрационные зависимости в системе почва — растение показывают, что для наиболее эффективного использования этого элемента в качестве биогеохимического индикатора молибденовой минерализации следует использовать только безбарьерные и высокобарьерные виды и части растений (табл. 12). Практически в районах, аналогичных

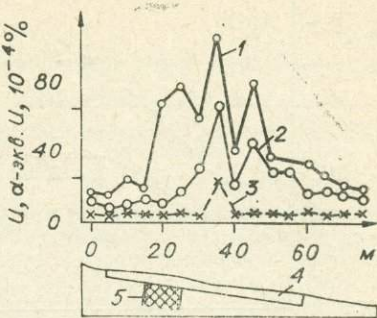


Рис. 34. Распределение по профилю радия ( $\alpha$ -активности) и урана в рододендроне и урана в почвах гумидной зоны (по данным Новикова и Капкова, 1965).

1 —  $\alpha$ -активность почвы; 2 — U в почве  
3 — U в роде; 4 — канава № 10; 5 — рудное тело.

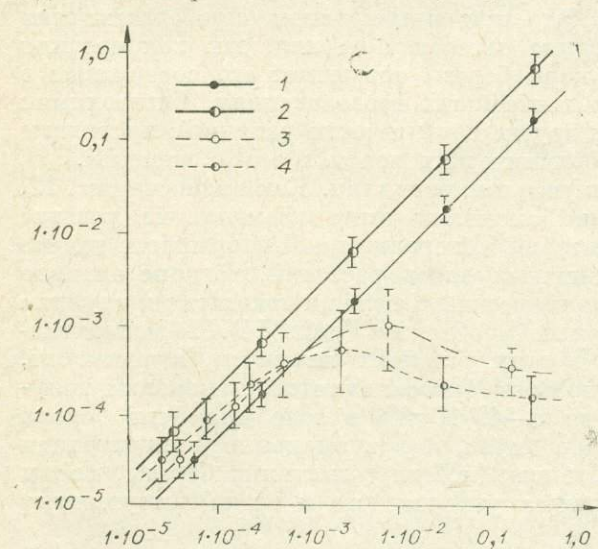


Рис. 35. Типичные зависимости между концентрациями урана (в %) и радия (в %, равновесных U) в почвах (ось абсцисс) и растениях — ось ординат (вертикальными штрихами показаны стандартные отклонения).

1 — Ra в травянистых растениях, 2 — в древесных; 3 — U в травянистых растениях, 4 — в древесных.

изученному, для опробования на молибден могут быть рекомендованы травянистые растения, имеющие широкое распространение и в других районах Сибири (например, осока, иван-чай и брусника). Судя по результатам работ других исследователей, безбарьерны по отношению к молибдену растения семейств бобовых и крестоцветных, а также ольха и рододендрон (Lewis, 1943; Johnson et al., 1952; Warren, Delavault, 1965).

Опыт группирования видов и частей растений по индикаторным характеристикам на молибден, по данным о барьерных концентрациях этого элемента в различных видах

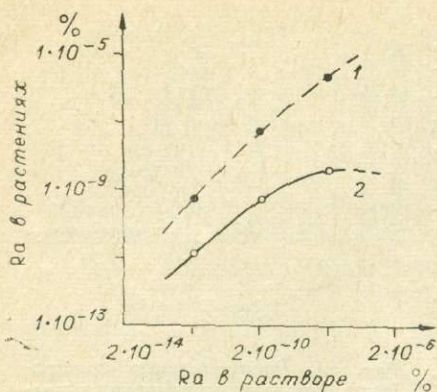


Рис. 36. Зависимости между концентрациями радия в растворе и различных частях овса (по данным Баранова, 1939).

1 — корни; 2 — надземные части.

и частях растений, показывает, что подавляющее большинство их пригодно для опробования при биогеохимических поисках. Это хорошо объясняет результаты исследований многих авторов, свидетельствующие о высокой эффективности использования молибдена в качестве биогеохимического индикатора молибденовых и молибденосодержащих месторождений.

Весьма показательны принципиально разные результаты биогеохимического опробования на фтор различных частей растений одного вида и различных видов растений, полученные в 1971—1972 гг. на двух участках с флюоритовой минерализацией, на которых контрастные биогеохимические аномалии фтора наблюдаются только в коре березы и сосны и отсутствуют в большинстве других биообъектов (рис. 38). Группирование видов и частей растений по индикаторным характеристикам на фтор позволяет относить кору березы плосколистной и сосны обыкновенной к активным биообъектам с высокими предельными концентрациями фтора, превышающими фоновые в 100 раз и более (табл. 13). В то же время в листьях и побегах этих и других видов биогеохимические аномалии отсутствуют (см. рис. 38). Этот пример показывает, что пренебрежение данными о барьерах поглощения по отношению к большим концентрациям фтора в почве у преобладающего числа видов и органов растений может приводить и, как известно, приводило на практике к пропуску зон флюоритизации по данным биогеохимических съемок. Из табл. 13 и рис. 38 видно, что для эффективных биогеохимических поисков зон флюоритизации в изученных условиях Забайкалья могут быть рекомендованы только два биообъекта: кора березы и кора сосны. При этом следует учитывать, что при вынужденном опробовании этих двух видов растений необходима поправка на вид, так как средняя концентрация фтора в золе коры березы превышает его содержание в коре сосны в 3,2 раза. При дальнейших исследованиях биогеохимии фтора, возможно, выявятся и другие виды и части растений, пригодные для использования при биогеохимических поисках этого элемента.

Подобный пример был получен для бериллия. Как видно на рис. 12, контрастные биогеохимические аномалии этого элемента на участке с флюорит-бертраундит-фенакитовой минерализацией получаются только по коре сосны и корням различных видов растений, которые активно поглощают бериллий из литохимических ореолов и относятся к группам безбарьерных и высокобарьерных биообъектов (табл. 14). По малоактивным биообъектам (которыми в этих условиях являются, в частности, надземные части бобовых и полыни) биогеохимические аномалии получаются малоконтрастными: до  $5-40 \cdot 10^{-4}\%$  в золе при фоне около  $1 \cdot 10^{-4}\%$ . На этом же профиле видно, что аномальные концентрации бериллия в пассивных биообъектах (побеги с листьями березы, сосны и ивы и надземные части кипрея узколистного и осоки) отсутствуют (см. рис. 12).

Аналогичные данные о весьма значительном влиянии видов и частей растений на биогеохимические аномалии получены для свинца, серебра и других барьерных элементов. Они свидетельствуют о том, что при использовании этих элементов в качестве биогеохимических индикаторов рудных месторождений ценность информации зависит от используемых видов и частей растений. Наиболее ценная информация о рудной

## Группировка биообъектов Восточной Сибири по индикаторным характеристикам на молибден

Название групп биообъектов	Характеристика объектов на молибденовых месторождениях	Виды, органы и части органов растений (биообъекты)
I. Безбарьерные, количественные	$C_m \geq 0,2-2,0\%$ и превышают $C_f = 0,2-2,0 \cdot 10^{-3}\%$ в 300 раз и более; $РПК_a = 2-100$	Побеги и листья ольхи кустарной; листья ивы. Надземные части кипрея узколистного, бобовых, злаковых, осоки-пушицы, скерды тонколистной, кровохлебки аптечной, купены лекарственной, мхов, лишайников
II. Высокобарьерные, приближенно-количественные	$C_m = 0,02-0,2\%$ и превышают $C_f$ в 30-300 раз и более; $РПК_a = 1-10$	Корни кипрея, сосны обыкновенной, кедра сибирского, багульника болотного, ивы. Побеги и ветви ивы, таволги средней, березы низкой, осины дрожащей, багульника, малины сахалинской, смородины мелкоцветной, можжевельника обыкновенного. Листья (или хвоя) жимолости обыкновенной и голубой, осины, таволги, малины, шиповника, смородины, сосны. Надземные части полыни обыкновенной, Гмелина и холодной, кровохлебки аптечной, лапчатки жимлолистной, липучки обыкновенной, василистника байкальского, скабиозы венечной, осоки лесной, брусники, морковника, смолевки обыкновенной, лебеды, сизюхи, поповника, вейника. Корни лиственницы даурской и сибирской, сосны, березы плосколистной, смородины, полыни обыкновенной.
III. Среднебарьерные, качественные	$C_m = 2-20 \cdot 10^{-3}\%$ и превышают $C_f$ в 3-30 раз; $РПК_a = 0,1-1,0$	Ветви лиственницы, кедра, березы, ели, жимолости, можжевельника, шиповника, ольхи кустарной, ивы сухолистной. Кора и древесина сосны и осины. Корни осины и ели. Хвоя кедр и лиственницы даурской и сибирской, листья березы.
IV. Низкобарьерные, пассивные — «запрещенные»	$C_m < C_a$ ; $РПК_a = 0,01-0,1$	Хвоя кедр и лиственницы даурской и сибирской; листья, дуб и ветви березы. Кора сосны.

Примечание.  $C_m$ ,  $C_f$  и  $C_a$  — максимальные, фоновые и минимально-аномальные содержания элементов-индикаторов в соответствующих биологических объектах;  $РПК_a$  — растительно-почвенный коэффициент на аномалиях.

минерализации, пригодная для количественной интерпретации, может быть получена только по безбарьерным и высокобарьерным биообъектам. В большинстве случаев для получения количественной или приближенно-количественной информации о рудах и их литохимических ореолах пригодны виды и части растений, которые мы относим к группе активных биообъектов с высокими предельными концентрациями изучаемых элементов, превышающими фоновые приблизительно на два математических порядка — в 100 раз и более (см. табл. 12—14). При использовании низкобарьерных (фоновобарьерных) видов и частей растений, пассивных к большим концентрациям изучаемого рудного элемента, опробование их не дает информации о рудной минерализации. Сравнительно малую ценность представляют и результаты исследований среднебарьерных биообъектов, так как они не позволяют отличать богатые руды и их ореолы от бедных и непригодны для количественной интерпретации. Получаемая по ним информация имеет только качественное значение. Она указывает лишь на вероятность наличия рудной минерализации без возможности оценки ее интенсивности. Примером служат результаты

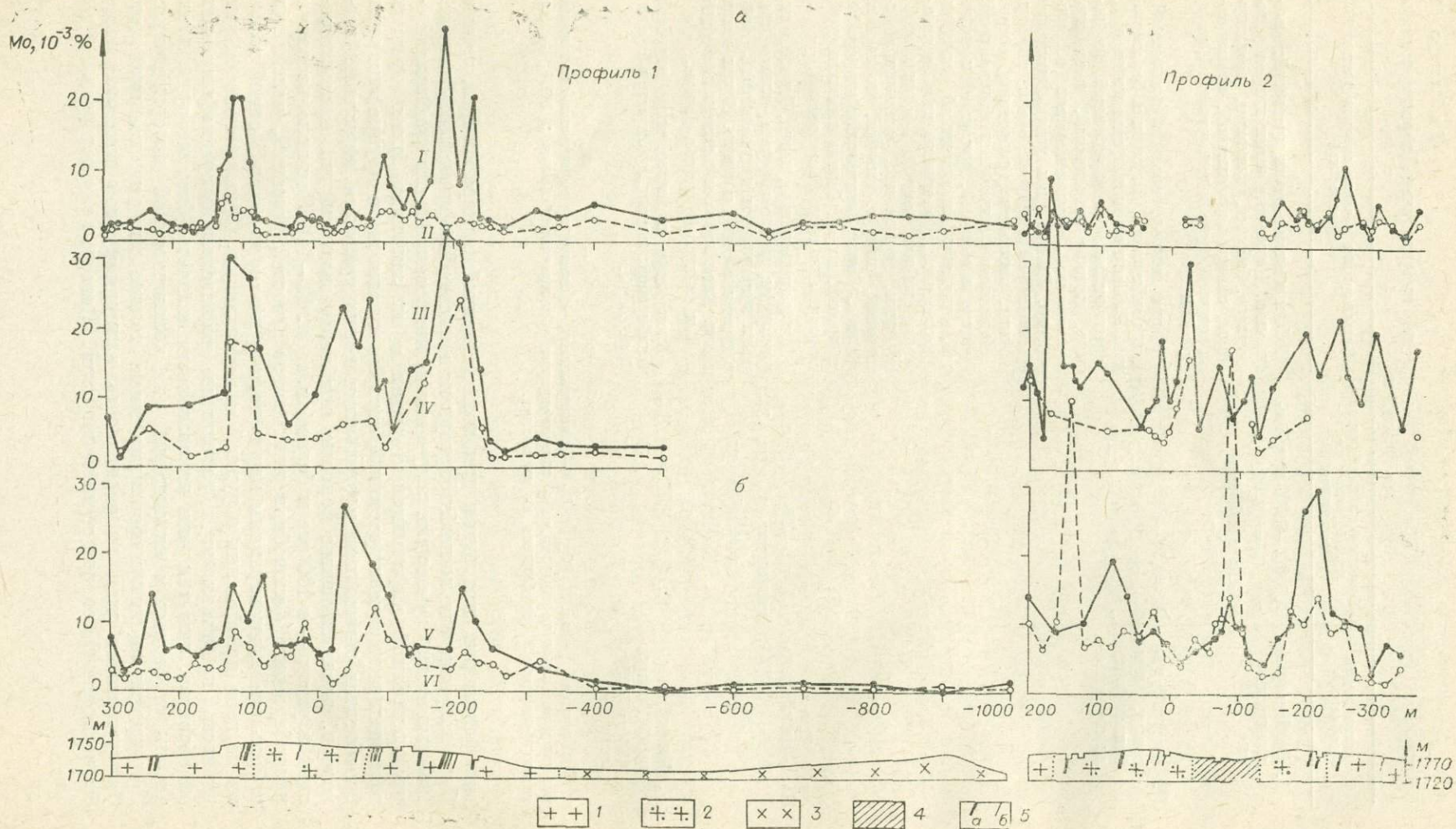


Рис. 37. Распределение молибдена в растениях (а) и почвах (б) по профилям Булук-тайского месторождения.

1 — кварцевые монцитито-сиениты, Pz<sub>1</sub>; 2 — брекчии мусковитизированных кварцевых монцитито-сиенитов с рудной минерализацией; 3 — среднезернистые аляскитовые мезозойские граниты; 4 — полимитовая брекчия трубчатого тела; 5 — рудные прожилковые зоны и жилы; а — молибдена, б — вольфрама. Кедр: I — ветви, II — хвоя; багульник: III — ветви, IV — листья; почвенные горизонты: V — BC/C, 0,3—0,8 м; VI — гумусовый, 0—0,2 м.

проведенных в США биогеохимических съемок по урану в растениях (Н. Л. Cannon, 1952, 1964).

Существенное влияние видов и частей растений на показатели рудных биогеохимических аномалий необходимо учитывать, выбирая виды и части растений для опробования при поисках. При отсутствии на участках поисковых работ доминантных видов растений, имеющих активные (безбарьерные и высокобарьерные) органы накопления основных элементов-индикаторов рудной минерализации, они должны исключаться как непригодные. Данные о влиянии видов и частей растений должны учитываться не только при проведении, но и при планировании биогеохимических поисков и при районировании территорий по применимости поисковых методов. Можно утверждать, что ввиду отсутствия видов и частей растений, пригодных для получения информации о фторе в почвах и рыхлых образованиях по фтору в растениях, биогеохимиче-

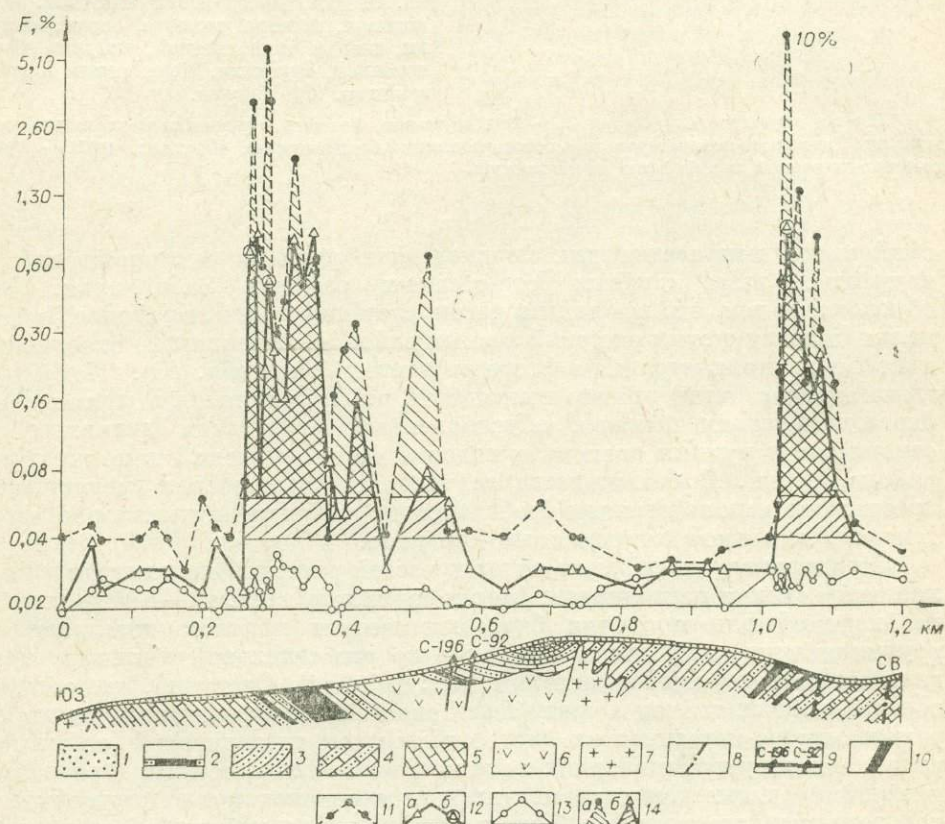


Рис. 38. Распределение фтора в почвах и растениях на участке с флюорит-берtrandит-фенакитовой минерализацией.

1 — рыхлые образования; 2 — участок профиля без почвенного покрова; 3—7 — протерозойские образования (3 — песчаники, 4 — чередование известняков и сланцев, 5 — доломиты, 6 — габбро-диориты, 7 — граниты); 8 — тектонические нарушения; 9 — скважины; 10 — известные рудные тела; 11 — фтор в горизонте С почв (0,7—1,4 м); 12, 13 — фтор в золе растений; 12 — активные биообъекты (а — кора сосны, б — корни кипрея и полыни), 13 — пассивные биообъекты (см. табл. 13); 14 — аномалии фтора (а — в почвах, б — в растениях).

## Группировка биообъектов Забайкалья по индикаторным характеристикам на фтор (осеннее опробование 1971 г.)

Название групп биообъектов	Характеристика объектов над флюоритсодержащими рудами	Виды, органы и части органов растений (биообъекты)
I. Безбарьерные, количественные	$C_m \geq 1-10\%$ и превышают $C_{\Phi} \leq 0,01-0,02\%$ в 100 раз и более; $РПК_a = 1-10$	Кора березы плосколистной и сосны обыкновенной
II. Высокобарьерные, приближенно-количественные	$C_m = 0,3-3,0\%$ и превышают $C_{\Phi}$ в 10-100 раз; $РПК_a = 0,3-3,0$	Кора березы и сосны. Корни кипрея узколистного и осины дрожащей
III. Среднебарьерные, качественные	$C_m = 0,05-0,3\%$ и превышают $C_{\Phi}$ в 3-10 раз; $РПК_a = 0,01-0,2$	Надземные части бобовых, смолевки обыкновенной, поповника, эдельвейса. Корни полни обыкновенной, сосны, лиственницы даурской, березы, ивы
IV. Низкобарьерные, пассивные — «запрещенные»	$C_m < C_a$ ; $РПК_a = 0,002-0,02$	Листья (или хвоя), побеги и ветви березы, осины, жимолости обыкновенной, таволги средней, сосны, лиственницы. Надземные части бобовых, злаковых, кипрея, полни обыкновенной, холодной и Гмелина, лебеды, кровохлебки аптечной, морковника, костера ржаного, осоки, синюхи, скерды тонколистной, липучки обыкновенной, брусники. Кора осины и лиственницы. Луб березы.

Примечание.  $C_m$ ,  $C_{\Phi}$  и  $C_a$  — максимальные, фоновые и минимально-аномальные содержания элементов-индикаторов в соответствующих биологических объектах;  $РПК_a$  — растительно-почвенный коэффициент на аномалиях.

ский метод непригоден для поисков флюоритовых месторождений в изученных нами степных юго-степных районах Забайкалья. Это обусловлено тем, что все виды и части растений степных районов Забайкалья (и травянистых растений лесных районов) пассивны по отношению к большим концентрациям фтора в почвах (см. табл. 13). Подобный (пока единственный) пример показывает, что ограничения в применении биогеохимических поисков, обусловленные отсутствием активных по отношению к рудным элементам видов и частей растений в конкретном районе, редки. В большинстве случаев эти ограничения могут быть преодолены использованием безбарьерных элементов-индикаторов определения, имеющего комплексный характер.

Примеры группирования видов и частей растений по индикаторным характеристикам на молибден, фтор и бериллий (табл. 12—14) являются необходимой для практики биогеохимических поисков детализацией группирования химических элементов по относительной величине предельных концентраций в растениях (см. табл. 11). Очевидно, что составление подобных таблиц должно быть одним из главных вопросов программы опытно-методических биогеохимических исследований на месторождениях и рудопроявлениях с открытыми литохимическими ореолами, имеющими рудные концентрации элементов-индикаторов в корнеобитаемой зоне рыхлого покрова. Использование таких таблиц обеспечивает практические пути преодоления отрицательного влияния барьеров поглощения на результаты биогеохимических съемок в районах поисковых работ.

Отметим еще одну, не использовавшуюся в практике возможность исключения или ослабления отрицательного влияния барьеров поглощения на результаты биогеохимических поисков. Она заключается

## Группировка биообъектов Восточной Сибири по индикаторным характеристикам на бериллий (осеннее опробование 1971 г.)

Название групп биообъектов	Характеристики объектов на участке с бериллиевой минерализацией	Виды, органы и части органов растений (биообъекты)
I. Безбарьерные, количественные	$C_m \geq 0,1-1,0\%$ и превышают $C_{\Phi} = (0,3-3,0) \cdot 10^{-4}\%$ в 300 раз и более; $РПК_a = 0,2-2,0$	Кора сосны обыкновенной
II. Высокобарьерные, при-ближенно-количественные	$C_m = 0,003-0,1\%$ и превышают $C_{\Phi}$ в 30-300 раз и более; $РПК_a = 0,03-1,0$	Кора сосны и березы плосколистной. Надземные части полыни холодной и поповника. Корни кипрея, полыни обыкновенной и Гмелина, сосны, осины дряжащей, ивы
III. Среднебарьерные, качественные	$C_m = 5-50 \cdot 10^{-4}\%$ и превышают $C_{\Phi}$ в 3-30 раз; $РПК_a = 0,01-0,3$	Надземные части полыни холодной и поповника; корни различных видов. Кора лиственницы даурской и березы; хвоя, побеги, ветви и древесина сосны; листья, побеги и ветви рододендрона даурского, жимолости обыкновенной и таволги средней; надземные части бобовых, смолевки обыкновенной, василистника байкальского, липучки обыкновенной, лапчатки жимолостной. Надземные части злаковых, костера ржаного, брусники, полыни обыкновенной и Гмелина, кровохлебки аптечной, лебеды
IV. Низкобарьерные, пассивные — «запрещенные»	$C_m < C_a$ ; $РПК_a = 0,0001-0,03$	Надземные части злаковых, костера, полыни обыкновенной и Гмелина, кровохлебки, лебеды. Кора осины. Луб березы. Листья (или хвоя), побеги и ветви ивы, осины, березы, лиственницы и караганы карликовой; древесина лиственницы, березы, осины. Надземные части морковника, осоки лесной, хвоща, кипрея, брусники

Примечание.  $C_m$ ,  $C_{\Phi}$  и  $C_a$  — максимальные, фоновые и минимально-аномальные содержания элементов-индикаторов в соответствующих биологических объектах;  $РПК_a$  — растительно-почвенный коэффициент на аномалиях.

в еще большей дифференциации, чем это принято в настоящее время, опробуемых частей растений и основана на имеющихся данных о том, что в результате функционирования барьеров поглощения распределение химических элементов приобретает крайнюю неравномерность: в одних группах клеток и тканей органа происходит концентрация избыточных количеств химических элементов, а в других, — за счет самоочистки, содержание их может уменьшиться. При этом накопление элементов в первой группе клеток идет по безбарьерному, а во второй — по барьерному типу. О таком распределении барьерных химических элементов свидетельствуют, например, данные П. А. Власюка (1969) для молибдена и Л. К. Островской и др. (1960) и З. Суйковского (1963) для меди.

По отношению к большим концентрациям молибдена безбарьерными являются верхние части стеблей гороха, в то время как у нижних намечается появление предела поглощения молибдена (рис. 39). Очевидно, что опробование верхних частей стеблей будет давать более контрастные биогеохимические аномалии, чем опробование всей надземной массы гороха или подобных ему растений. Судя по данным П. А. Власюка (1969), аналогичное распределение молибдена — в стеблях кормовых бобов. То есть его можно ожидать у многих растений семейства бобовых.

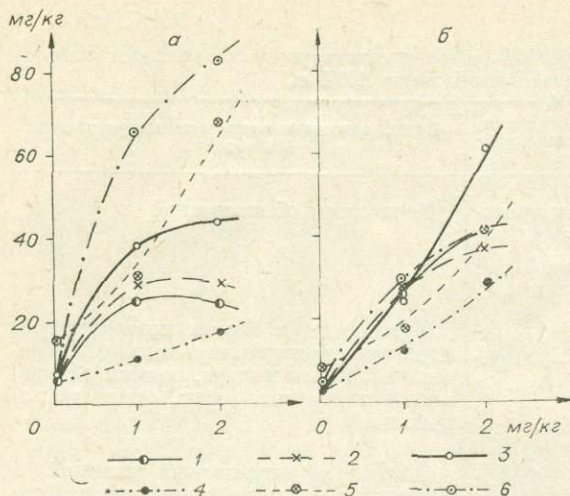


Рис. 39. Зависимости между содержаниями молибдена в растениях (в сухом веществе) и почве (по Власюку, 1969). По оси ординат — Мо в растениях, по оси абсцисс — Мо в почве. а — бобы; б — горох.

1—3 — части стеблей: 1 — нижние, 2 — средние, 3 — верхние; 4 — листья; 5 — корни; 6 — зерно.

стебля, так как содержания меди в них при этом увеличились только в 1,2 раза, а в узлах стеблей они увеличились приблизительно в той же пропорции, как в листьях и зерне, — в 1,9 раза. Таким образом, узлы стеблей ячменя могут быть отнесены к безбарьерным, а междоузлия — к барьерным частям стебля этого растения.

Описанная выше дифференциация барьерных химических элементов по различным частям органов и тканям растений наблюдается и в более мелких частях органов растений — в различных частях клеток и клеточных структурах. У рибосом листьев гороха отчетливо выражен предел накопления молибдена во все изученные фазы развития растений —

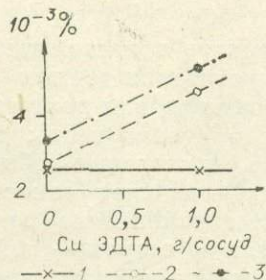


Рис. 40. Зависимости между содержаниями меди в сухом веществе различных частей овса (ось ординат) и в почве — ось абсцисс (по данным Островской и др., 1960).

1, 2 — стебель: 1 — междоузлие, 2 — узел; 3 — зерно.

У овса наличие барьера поглощения довольно отчетливо у междоузлий стеблей при отсутствии их у узлов и у зерна (рис. 40). Это свидетельствует о том, что в узлах стеблей, клетки которых имеют специфическое строение, происходит концентрация меди по безбарьерному типу, а в проводящих тканях, которые слагают междоузлия, происходит самоочистка от избыточных концентраций меди. К безбарьерным по отношению к меди органам ячменя могут быть отнесены корни, листья и зерно, в которых при внесении меди в почву концентрация меди увеличивается в 16, 2,5 и 2,2 раза соответственно (рис. 41). Междоузлия стеблей ячменя и овса можно отнести к барьерной части

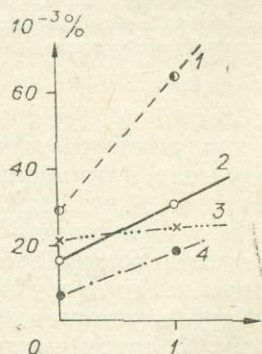


Рис. 41. Зависимости между содержаниями меди в растворе (в относительных дозах) и различных частях ячменя (по данным Суйковского, 1963). По оси абсцисс — Си в растворе, по оси ординат — Си в золе. 1 — зерно; 2 — узлы стеблей; 3 — междоузлия стеблей; 4 — листья.

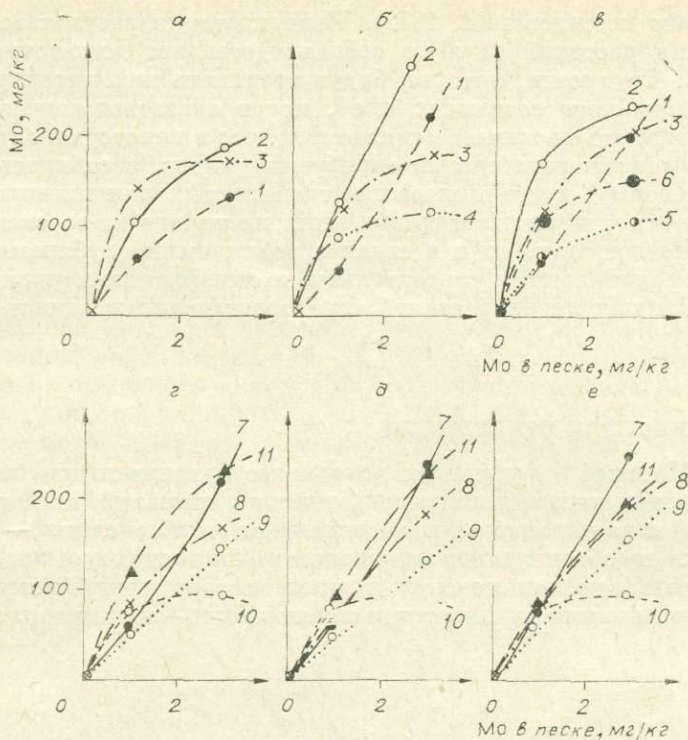


Рис. 42. Зависимости содержания молибдена в органах и оргanelлах гороха (в сухом веществе) от его концентрации в песке (по данным Власюка, 1969).

а, г — фаза 5—7 листьев; б, д — начало цветения; в, е — образование бобиков. 1 — листья; 2 — стебли; 3 — корни; 4 — цветы; 5 — зерновки; 6 — створки бобов; 7 — ядра; 8 — хлоропласты; 9 — митохондрии; 10 — рибосомы; 11 — надосадочная жидкость.

от фазы 5—7 листьев до созревания и образования бобиков (рис. 42). В то же время у всех остальных клеточных структур — ядер, хлоропластов, рибосом и надосадочной жидкости (клеточного сока) — пределов поглощения молибдена не отмечалось. Наличие барьеров поглощения у одних клеточных структур и отсутствие их у других имеет большое значение для объяснения механизмов образования и функционирования барьеров поглощения у растений и у живых организмов вообще.

Рассмотренные данные о различном типе накопления молибдена и меди в различных частях стеблей гороха, овса и ячменя говорят о том, что отбор в биохимическую пробу не всей надземной части травянистых растений, а лишь отдельных безбарьерных частей какого-либо органа (например узлов стебля) позволяет улучшить индикацию соответствующей минерализации по барьерным элементам-индикаторам. В некоторых случаях для этого необходим отбор и анализ проб малого объема, что может представлять технические и аналитические трудности. В случаях, когда отбор дифференцированных частей какого-либо органа растения не представляет затруднений, например верхних или нижних частей стеблей, верхних или нижних листьев и т. д., этот прием увеличения контрастности биогеохимических аномалий следует использовать в практике поисковых работ.

Значительная специфичность барьеров поглощения у различных видов растений заставляет весьма критически относиться к имеющимся рекомендациям вести отбор не видовых, а составных биогеохимических проб (Инструкция..., 1965; Жбанов и др., 1966; Биогеохимические и гео-

ботанические исследования, 1972). Интерпретация результатов видового опробования растений сама по себе представляет достаточно большую сложность. Трудности, которые будут возникать при интерпретации результатов анализов составных проб, могут оказаться непреодолимыми. Особая сложность возникает в связи с тем, что в некоторых случаях рекомендуется не вести регистрации опробуемых видов, а отбирать составные пробы древесных, кустарниковых и травянистых или низших растений. Эта рекомендация вызывает возражения не только из-за специфичности барьеров поглощения, но и в связи с различными глубинами корневых систем и неодинаковыми относительными содержаниями рудных элементов в различных видах растений, произрастающих в одинаковых условиях.

### МАСШТАБ ОРУДЕНЕНИЯ

Масштаб оруденения оказывает значительное влияние на количественные параметры биогеохимических аномалий (их интенсивность и площадь) и на параметры, производные от этих основных, — линейную, площадную и объемную продуктивность биогеохимических аномалий. При биогеохимических поисках рудных месторождений источником поисковой информации служит точка наблюдения — как правило отдельное

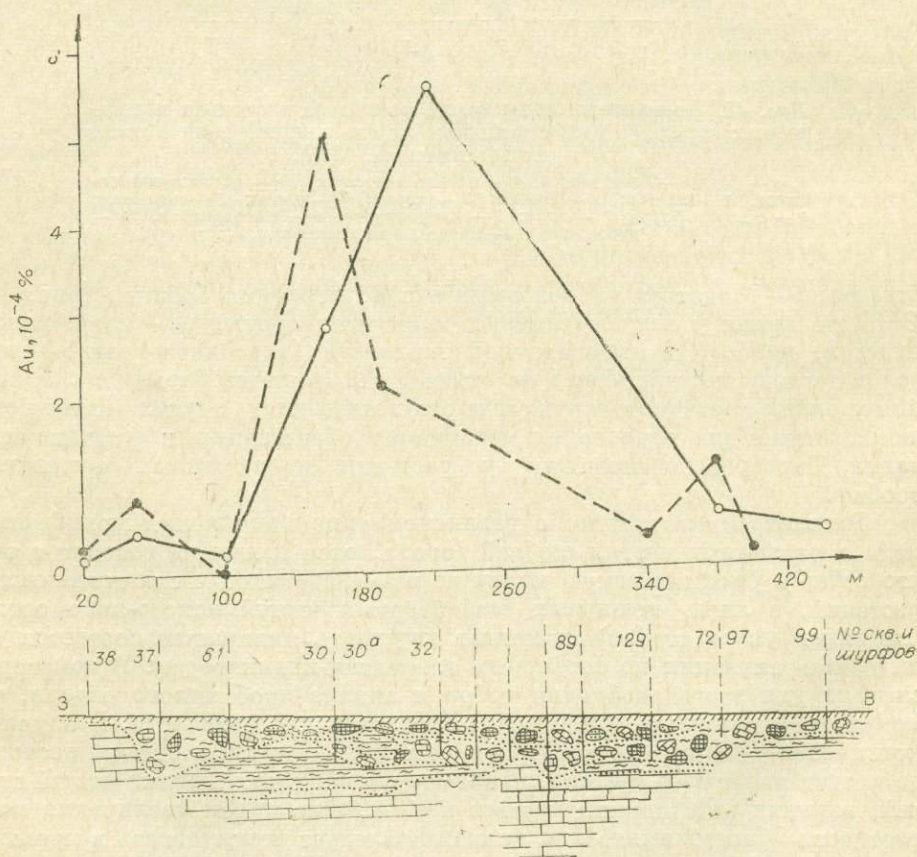
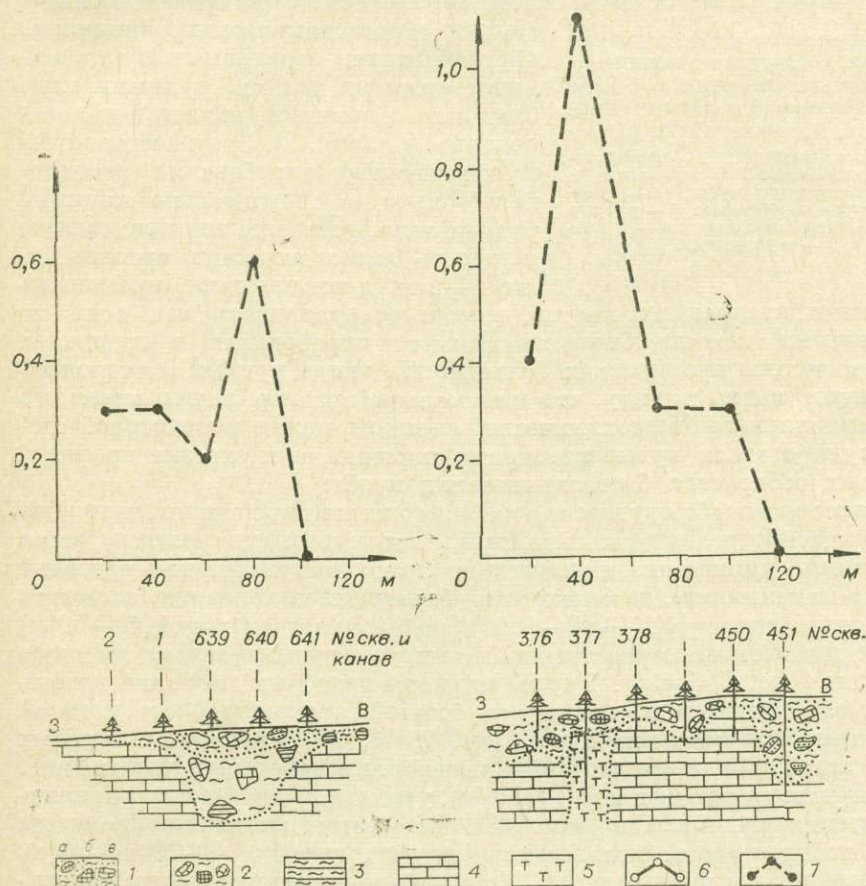


Рис. 43. Распределение золота в почвах и растениях над золоторудным месторождением. абсцисс — расстояние между  
 1 — песчаные и песчано-глинистые карстовые отложения с обломками песчаников (а);  
 2 — вязкие глины выщелачивания; 3 — карстующиеся известняки; 4 — карстующиеся известняки; 5 — керсантитовая дайка,

дерево или совокупность травянистых и кустарниковых растений, произрастающих на однородной площадке ограниченной площади (обычно порядка 30—300 м<sup>2</sup> радиусом 3—10 м). При опробовании древесных, кустарниковых и травянистых растений площадь, характеризующаяся одной биогеохимической пробой, остается приблизительно одинаковой, так как радиус распространения корней древесных растений, равный 3—10 м, является обычным и может превышать эту величину. В связи с получением усредненной информации с некоторой вполне определенной площади распространения корневой системы растения или совокупности однородных растений одного вида, специфичной для биогеохимического опробования, следует рассматривать два случая формирования элементарной биогеохимической аномалии, представленной одной пробой: 1) площадь распространения корней растений ( $S_p$ ) не превышает площади лито-, гидро- или комплексного литогидрохимического ореола — источника биогеохимической аномалии ( $S_o$ ), т. е.  $S_o > S_p$  и 2)  $S_o < S_p$ . Практика исследований показывает, что в большинстве условий ведения поисковых работ  $S_o \gg S_p$ . Поэтому рудные биогеохимические аномалии обычно представлены не одной, а совокупностью точек биогеохимического опробования; сгущение их сети позволяет локализовать и проследивать местоположение отдельных рудных тел и получать ценную информацию о деталях строения их ореолов. Условия с  $S_o < S_p$  могут наблюдаться в тех случаях, когда площадь распространения корней опробования растений



рождением метасоматитов (по данным Разица и Рожкова, 1966). По осмечками опробования.

метасоматитов (б) и известняков (в); 2 — глинистые карстовые отложения; 3 — элю-6, 7 — содержание золота: 6 — в гумусовом горизонте почв, 7 — в золе растений.

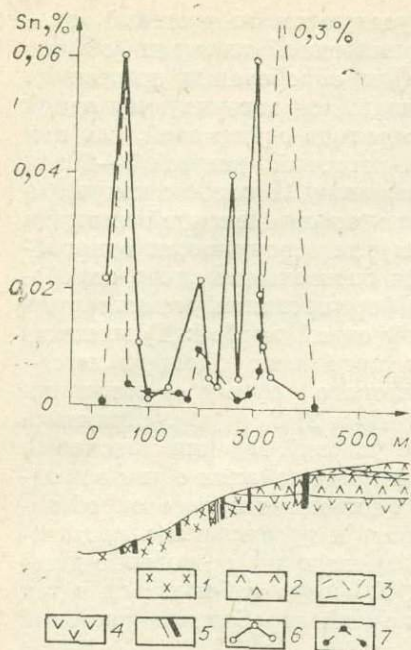


Рис. 44. Содержание олова в почвах и растениях оловорудного месторождения кварц-касситеритового типа Дальнего Востока (по данным Иванова, Бардюка, 1967).

1 — кварцевые порфиры; 2 — лавобрекчии фельзит-порфиров; 3 — перлитовые и кристаллокластические туфы; 4 — лавобрекчии и туфы порфиристов; 5 — рудные тела; 6, 7 — содержание олова: 6 — в почвах, 7 — в растениях.

щие десятки квадратных метров, можно рассматривать как одно из положительных качеств биогеохимического опробования в сравнении с литохимическим при поисках большинства типов рудных месторождений. Следует иметь в виду, что минимальный размер литохимического ореола, выявляемого биогеохимической съемкой, может в некоторой степени регулироваться путем изменения площади или отрезка профиля, на которых отбирается биогеохимическая проба.

Влияние масштаба оруденения на биогеохимические аномалии хорошо видно при рассмотрении данных над жильными и штокверковыми рудными телами. Биогеохимические аномалии по легко доступным для растений элементам-индикаторам, не искаженные барьерами поглощения, являются весьма контрастными ( $KK_6 = 10-1000$ ), локальными (шириной 10-50 м) и приурочиваются непосредственно к выходам рудных тел на дневную поверхность (рис. 1, 5, а, 6). Другие примеры подобных аномалий известны для молибденоносных жил и зон богатой прожилково-вкрапленной молибденовой минерализации (см. рис. 7, 13, 37), золотосульфидных жил (см. рис. 6), золоторудной минерализации в карстовых глинах (рис. 43), кварц-касситеритовых жил (рис. 44), урановых, бериллиевых и полиметаллических рудных тел (рис. 45). Всем этим аномалиям присущи высокая контрастность, локальность (ширина порядка 8-20 до 50 м) и приуроченность к рудным телам. Упомянутые признаки должны использоваться для обоснования сети опробования растений, а также при интерпретации и вскрытии подобных аномалий горными выработками. Многие из рассмотренных биогеохимических аномалий (см. рис. 1, 5а, 6, 7, 13, 17, 33, 37) не могут быть выявлены литохимическими съемками верхней

перекрывает окраинную часть площади литохимического ореола или когда литохимический ореол имеет весьма ограниченные горизонтальную мощность и площадь. Очевидно, что тогда интенсивность биогеохимических аномалий будет уменьшаться и при некоторой небольшой (критической) линейной и площадной продуктивности литохимических ореолов биогеохимические аномалии могут отсутствовать. В частности, ожидается, что они будут отсутствовать над отдельными рудными жилами и прожилками с мощностью менее 0,1-0,3 м или над отдельными рудными обломками.

Рассматривая влияние масштаба оруденения на формирование элементарной биогеохимической аномалии, представленной одной биогеохимической пробой, можно прийти к выводу, что в отличие от литохимического или валунного опробования формирование интенсивных биогеохимических аномалий, обусловленных отдельными маломощными рудными телами, рудными глыбами или обломками, является маловероятным (см. рис. 2). Это качество биогеохимического опробования реагировать только на сравнительно крупные рудные тела, имеющие горизонтальную мощность литохимических ореолов более 1-2 м, а их площади, превышающие

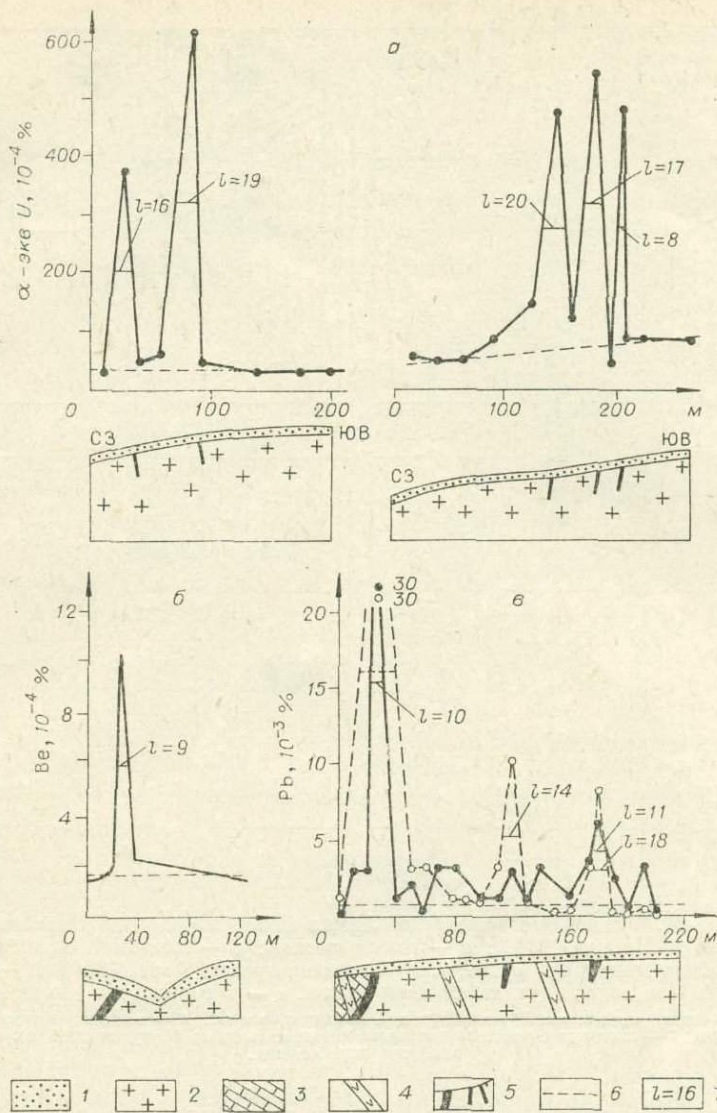


Рис. 45. Примеры биогеохимических аномалий над жильными рудными телами: а — наши данные на урановом месторождении; б — (по данным Ездакова и Ездаковой, 1968) на бериллиевом месторождении; в — (по данным Ивашова и Бардюка, 1970) на скарново-полиметаллическом месторождении.

1 — рыхлый покров; 2 — гранитоиды; 3 — известняки; 4 — дайки кварцевых порфиров; 5 — рудные тела; 6 — фоновые содержания элементов индикаторов; 7 — ширина ( $l$ ) аномалий на половине максимума (м).

части рыхлого покрова, так как литохимические и радиометрические аномалии на поверхности над ними отсутствуют или мало контрастны. Это связано в основном с выщелоченностью литохимических ореолов рудных тел вблизи дневной поверхности, а также с наличием контакта между литохимическими ореолами в нижних частях рыхлого покрова, примыкающими к рудным телам, и нижними частями корневых систем растений.

Следует отметить, что при изучении рудных биогеохимических ореолов над жильными рудными телами, характеризующимися значительной локальностью, необходимо применение достаточно густого шага опробования растений по профилям, пересекающим рудоносные структуры.

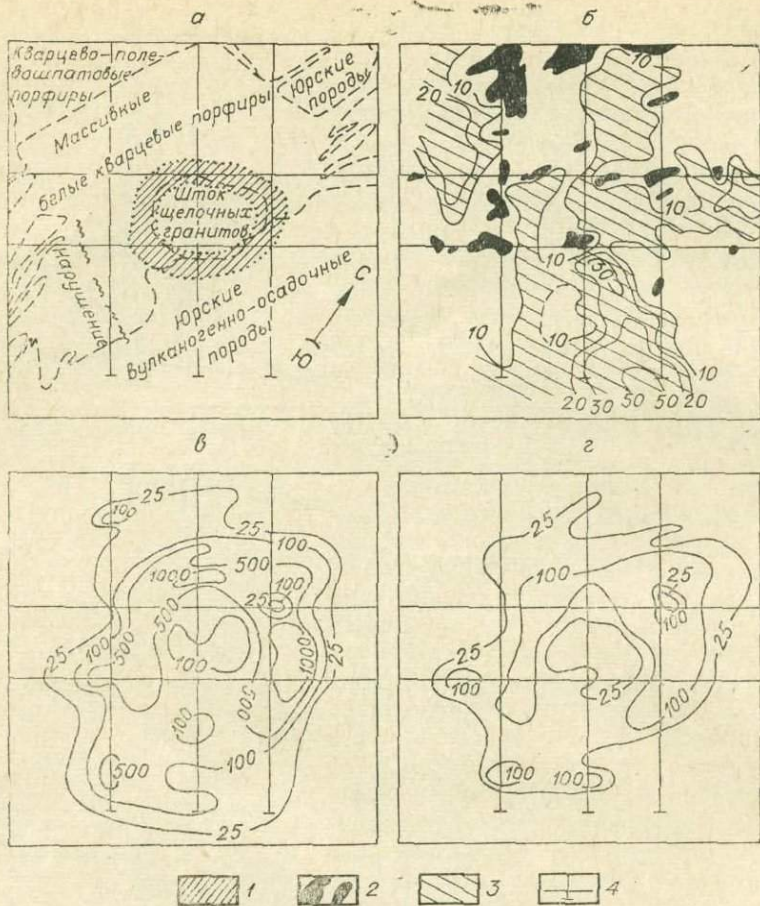


Рис. 46. Планы месторождения Лакки Шип (по данным Hognbrook, 1969, и Hovson, 1969): а — геологический; б — изотермий мощности рыхлого покрова в футах; в, г — изоконцентраций молибдена в 10—4% (в — в золе двухлетней хвой пихты, г — в горизонте В почв).  
 1 — зона интенсивной молибденовой минерализации; 2 — выходы коренных пород; 3 — площади с рыхлым покровом мощностью более 10 футов (3,05 м); 4 — профили опробования.

В частности, при шаге 50—100 м, обычно применяемом в геохимических поисках масштаба 1:50000 (Инструкция..., 1965), большинство локальных биогеохимических ореолов рудных тел шириной 10—20 м и менее могут быть пропущены. Выявленные же одиночными пробами ореолы будут значительно искажены, так как большинство таких проб расположится не на максимумах аномалий. Искажение будет касаться не только интенсивности, но и ширины выявляемых аномалий — она всегда завышается при шаге отбора проб, значительно превышающем истинную ширину рудного биогеохимического ореола. Для надежного выявления локальных биогеохимических аномалий двумя-тремя пробами необходимо отбирать пробы растений с шагом около 10 м, а для их детализации и прослеживания — с шагом порядка 2—10 м.

Над штокверковыми рудными телами, представленными легковыветриваемыми минералами, также характерны весьма контрастные биогеохимические аномалии, площадь которых близка к площади минерализации. Особенно показательной аномалией этого типа является молибденовая биогеохимическая аномалия в двухлетней хвое альпийской ели в Канаде на месторождении Лакки Шип. Рудное поле этого месторождения хорошо оконтуривается концентрациями молибдена в растениях, превышающими

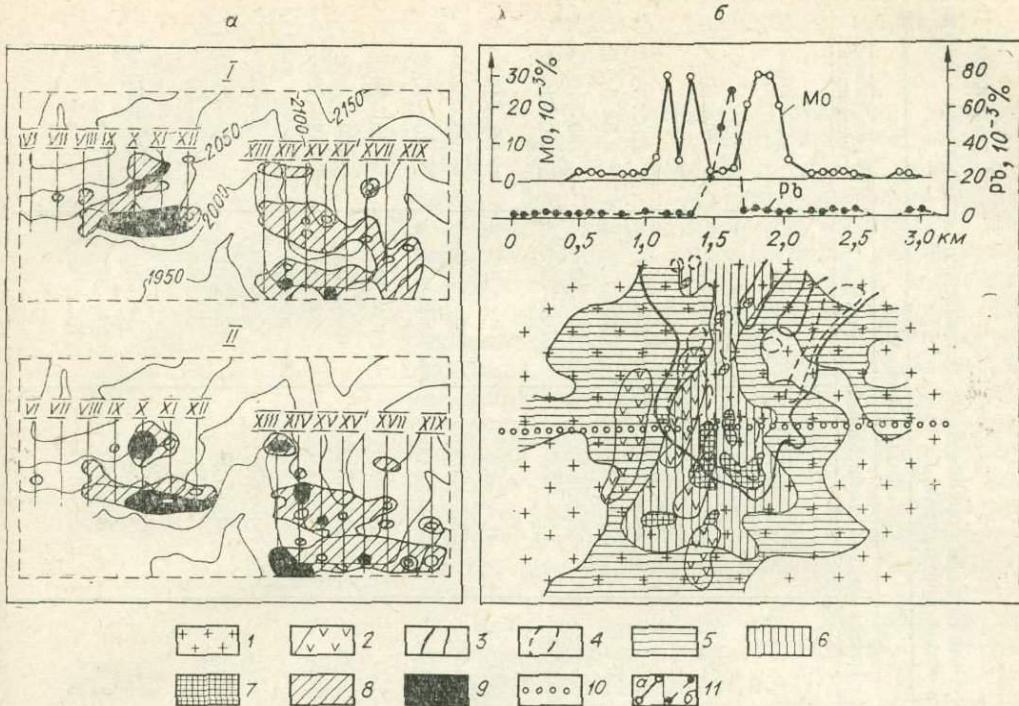


Рис. 47. Распределение молибдена и свинца в почвах (I) и растениях (II) штокверковых молибденовых месторождений: а — в Закавказье (по данным Малюги, 1963); б — в Забайкалье (по данным Поликарпочкина и Поликарпочкиной, 1964).

1 — граниты; 2 — кварцевые порфиры; 3, 4 — содержание Мо (%) в элювий — делювии (3 — от 0,005 до 0,05, 4 — от 0,05 до 0,6); 5—7 — содержание Рb (%) в элювии — делювии (5 — от 0,005 до 0,01, 6 — от 0,01 до 0,1, 7 — от 0,1 до 1,0); 8, 9 — содержание Мо (%) в почвах и золе растений (8—0,01—0,02, 9—>0,02); 10 — пункты отбора проб; 11 — графики содержания элементов в золе ветвей с листьями березы (а — Мо, б — Рb).

0,0025% (рис. 46). Зона распространения руд с промышленными концентрациями молибдена оконтуривается изолинией около 0,02% с максимальными концентрациями в золе 0,1—0,3%. При фоновых содержаниях молибдена  $0,1 \cdot 10^{-3}\%$  контрастность этих биогеохимических аномалий достигает 1000—3000 при контрастности почвенно-геохимических аномалий в горизонте В почв, равной 40—100 (до 0,01—0,02% при фоне  $2,5 \cdot 10^{-4}\%$ ). Весьма показательные результаты биогеохимических исследований на месторождении Лакки Шип использовались при его разведке. В отличие от месторождения Лакки Шип биогеохимические исследования в Армении и Забайкалье не имеют преимуществ перед почвенно-геохимической съемкой (рис. 47). Это характерно только для месторождений, имеющих открытые литохимические ореолы. При поисках аналогичных штокверковых месторождений, погребенных под покровом аллохтонных или склоновых отложений небольшой мощности, биогеохимия будет более эффективна, чем литохимическая съемка по рыхлым образованиям.

Рассмотренные примеры показывают, что размеры биогеохимических аномалий, как правило, близки к размерам рудных тел и их литохимических ореолов. Это свидетельствует о наличии тесной связи между площадными размерами биогеохимических ореолов и выходов рудных тел и о возможности использования результатов изучения элементов-индикаторов в растениях для получения количественной информации о масштабе и продуктивности рудной минерализации и ее литохимических ореолов.

Таблица 15

Характеристики биогеохимических аномалий над рудными телами с открытыми литохимическими ореолами в различных ландшафтах (ветви деревьев и кустарников, надземные части трав)

Минеральный тип руд	Элемент-индикатор	Характеристики фона и биогеохимических аномалий	Типы ландшафтов			
			мерзлотно-таежный	лесной немерзлотный	степной	полупустынный и пустынный
Вольфрамитовый и шеелитовый	W	Фоновые содержания в золе растений, $10^{-3}\%$ ( $C_{\Phi}$ )	<2,0	<2,0	<2,0	0,2—0,6
		Аномальные концентрации в растениях над рудными телами в $10^{-3}\%$ ( $C_a$ )	20—200	20—600	20—300	6—60
		Контрастность аномалий $KK_{\phi} = \frac{C_a}{C_{\Phi}}$	>10—100	>10—300	>10—150	>10—300
Молибденитовый (с зонами окисления)	Mo	$C_{\Phi}$ , $10^{-3}\%$	0,2—2,0	0,2—2,0	0,3—3,0	0,3—3,0
		$C_a$ , $10^{-3}\%$	10—50	20—100	30—1000	30—1000
		$KK_{\phi}$	5—100	10—200	10—1000	10—1000
Колчеданно-полиметаллический	Pb	$C_{\Phi}$ , $10^{-3}\%*$	0,3—3,0	0,3—3,0	1—10	1—10
		$C_a$ , $10^{-3}\%*$	30—10000	30—3000	100—5000	100—3000
		$KK_{\phi}^*$	10—10000	10—3000	10—2000	10—1000
	Zn	$C_{\Phi}$ , $10^{-3}\%$	30—120	30—100	10—50	10—50
		$C_a$ , $10^{-3}\%$	100—5000	200—3000	100—6000	100—2000
		$KK_{\phi}$	2—100	2—50	2—200	2—100
Медноколчеданый	Cu	$C_{\Phi}$ , $10^{-3}\%$	3—30	3—30	2—20	2—20
		$C_a$ , $10^{-3}\%$	20—300	20—700	10—2000	10—1000
		$KK_{\phi}$	2—30	2—70	2—100	2—50
Отцепито-торбернитовый	$\alpha$ -излучатели (Ra)	$C_{\Phi}$ , $10^{-3}\%$ экв. U	0,5—3,0	0,5—3,0	0,1—1,0	Нет данных
		$C_a$ , $10^{-3}\%$ экв. U	30—300	30—300	10—100	»
		$KK_{\phi}$	10—300	10—300	10—300	»

## ДРУГИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ РУДНЫХ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ

	0,5—2,0 1,0—100 2—100		0,5—2,0 1,0—50 2—50		0,5—2,0 1,0—30 2—30		0,3—1,0 1,0—20 2—20		0,5—2,0 1,0—100 2—100
»									
Золото-сульфидный									
U									
Au									
C <sub>ф</sub> , 10 <sup>-4</sup> %									
C <sub>а</sub> , 10 <sup>-4</sup> %									
КК <sub>б</sub>									
C <sub>ф</sub> , г/т									
C <sub>а</sub> , г/т									
КК <sub>б</sub>									
	<0,01—0,03		<0,02—0,05		<0,01—0,02		<0,03		<0,01—0,03
	0,3—200		0,3—60		0,2—50		0,3—100		0,3—200
	>10—5000		10—2000		>10—5000		>10—3000		>10—5000

\* Хвоя и листья безбарберных видов.

Кроме основных факторов, рассмотренных выше, на формирование биогеохимических ореолов влияют и другие, менее значимые, факторы, требующие учета при производственных биогеохимических съемках. К ним относится влияние геохимических ландшафтов, видов и органов растений, времени опробования, климатических и других внутренних (физиологических) и внешних (экологических) факторов. Современная методика биогеохимических поисков предусматривает полное или частичное исключение большинства этих факторов на получаемые результаты с помощью стандартизации биогеохимических проб и введения поправок в тех случаях, когда эта стандартизация невозможна или не обеспечивает достаточно полного исключения мешающих факторов.

**Влияние геохимических ландшафтов** на химический состав растений связано в основном с изменением двух параметров: 1) валовых содержаний изучаемых химических элементов в горных породах и соответственно в рыхлом покрове и в почвах; 2) относительных количеств доступных растениям форм этих элементов. Кроме них может быть существенным влияние близкого залегания грунтовых вод, доступных корням растений, выходов газовых струй, содержащих ртуть, фтористый водород, сернистый газ и другие газообразные вещества, включающие химические элементы, которые используются в качестве индикаторов минерализации.

Влияние геохимических особенностей ландшафтов на рудные биогеохимические аномалии, как правило, несущественно. Об этом говорит сопоставление биогеохимических аномалий над минерализацией близкого минерального типа, наблюдаемых в различных районах (табл. 15). Наибольшее влияние данные особенности оказывают на величину фоновых содержаний элементов-индикаторов в растениях и на дисперсию этих содержаний. Это обусловлено в основном химической реакцией почв, горных пород и подземных вод и характером вмещающих горных пород. В частности, известно, что доступность растениям почвы всех металлов увеличивается по мере роста кислотности почв и уменьшается при щелочной реакции питающей среды, тогда как для молибдена отмечается обратное влияние реакции почв (Пейве, 1954, 1963; Виноградов, 1957; Ткалич, 1959, 1970; Поликарпочкин, Поликарпочкина, 1964; и др.). Соответственно над карбонатными по-

родами доступность большинства из металлов уменьшается, а молибдена — увеличивается. Эти факторы обуславливают изменения биогеохимического фона концентраций элементов-индикаторов не более чем в 2—5 раз. Приблизительно такой же или несколько больший порядок влияния на биогеохимический фон оказывают изменения видового состава растений, характерных для различных геохимических ландшафтов. Эти изменения, по нашему мнению, не следует относить к влиянию геохимических ландшафтов.

Наиболее существенное влияние геохимических ландшафтов на результаты биогеохимических съемок связано с их локальными неоднородностями и наличием различных геохимических барьеров, преимущественно в подчиненных ландшафтах и на участках разгрузки подземных вод, к которым часто приурочиваются безрудные лито-, гидро- и биогеохимические аномалии (Перельман, 1955, 1961, 1968, 1972; Глазовская, 1960, 1967; Гинзбург и др., 1966; Тайсаев, 1970, 1972; Касимов, 1972; Хокс, Уэбб, 1964; и др.). При интерпретации биогеохимических аномалий, приуроченных к геохимическим барьерам и безрудным лито- и гидрохимическим аномалиям необходимо учитывать их приуроченность к типам геохимических ландшафтов, горным породам, геоморфологическим элементам рельефа, типам и видам почв, комплекс химических элементов, имеющих положительные аномальные концентрации в растениях, и значения их растительно-почвенного коэффициента — РПК. При значениях РПК, являющихся обычными для таких элементов, появление биогеохимических аномалий легко расшифровывается наличием пропорциональной концентрационной зависимости в системе почва — растение. При аномально высоких величинах РПК, превышающих, например, 100, их появление может быть обусловлено одним из трех факторов или сочетанием их: 1) увеличением доступности растениям химических элементов твердой фазы вследствие увеличения водорастворимых и обменных форм на геохимических барьерах (восстановительном, испарительном и др.); 2) наличием погребенного литохимического источника такой биогеохимической аномалии — рудного ореола или горной породы с повышенной концентрацией «аномального» химического элемента — и получением при вычислении «кажущегося», а не истинного значения РПК; 3) существенным вкладом в наблюдаемое содержание в растениях растворенных в водах форм аномальных химических элементов, в том числе и в подземных водах, контактирующих с нижними частями корневых систем.

На небольших территориях, которыми обычно являются участки детальных поисковых работ, влияние различных геохимических ландшафтов на биогеохимические аномалии в растениях, произрастающих на одинаковых или близких по составу и типу горных породах, обычно является несущественным — оно изменяет в сравнительно небольшой степени биогеохимический фон и природную дисперсию содержаний рудных элементов в растениях. Поэтому иногда даже разнотипные геохимические ландшафты (автономные, трансэлювиальные и подчиненные) могут быть объединены в один биогеохимический ландшафт, характеризующийся стабильными фоновыми содержаниями и величинами РПК изучаемых химических элементов. Это значительно облегчает использование биогеохимических данных для поисков рудных месторождений, так как биогеохимический фон, служащий основой для выделения биогеохимических аномалий, может вычисляться не отдельно для локальных элементарных геохимических ландшафтов, а для более обширных однородных биогеохимических ландшафтов. Более существенно это влияние в тех случаях, когда неоднородности геохимических ландшафтов обуславливают появление безрудных литохимических аномалий на восстановительных, окислительных, сорбционных, испарительных и других геохимических барьерах. Такие литохимические аномалии, в которых повышенные концентрации

рудных элементов представлены в основном легкодоступными растениям формами, могут быть причиной появления безрудных биогеохимических аномалий. Расшифровка их возможна только после комплексных исследований геохимии элементарного ландшафта, к которому приурочена такая аномалия, и прилегающих к нему элементарных ландшафтов.

Данные о геохимических ландшафтах при биогеохимических съемках используются двойным способом. Во-первых, для выбора площадей и участков, где эффективность биогеохимических поисков превышает эффективность литохимического опробования рыхлого покрова. Такое использование они находят, в частности, в Бурятском, Красноярском и Центрально-Казахстанском геологических управлениях (Жбанов и др., 1966, 1971; Тайсаев, Жбанов, 1971; Тарасов, Жбанов, 1971, 1972; Захаров, 1969а, 1969б; Гетманчук и др., 1969). Во-вторых, эти данные используются при интерпретации результатов биогеохимических съемок. Учет особенностей геохимических ландшафтов позволяет исключить безрудные (ландшафтные) биогеохимические аномалии и точнее оконтуривать предположительно рудные аномалии. Этот способ применяется в Бурятском и Центрально-Казахстанском (Гетманчук и др., 1969) геологических управлениях, в НИИ геологии Арктики (Егорова, 1970; Питулько, 1970) и других организациях.

Использование данных о геохимических ландшафтах при биогеохимических исследованиях вполне реально на многих территориях СССР, так как карты геохимических ландшафтов и основанные на них карты условий ведения поисковых работ или карты применимости различных геохимических методов в настоящее время составлены, как для всей территории СССР, так и для главных рудных регионов СССР (Казахстана, Узбекистана, Урала, Прибайкалья, Забайкалья и др.) и отдельных районов и участков.

#### Климатические факторы.

Большинство региональных климатических факторов, оказывающих влияние на химический состав растений, находит свое отражение в распределении геохимических ландшафтов по широтным и климатическим зонам и учитывается при биогеохимических поисках путем определения местного биогеохимического фона. Ряд других локальных климатических факторов необходимо учитывать при проведении биогеохимических поисковых работ. К ним следует отнести влияние атмосферных осадков двух типов: кратковременные, цикл которых длится несколько дней, и длительные — несколько месяцев или лет. Наиболее хорошо изучены кратковременные изменения содержаний некоторых элементов корневого питания

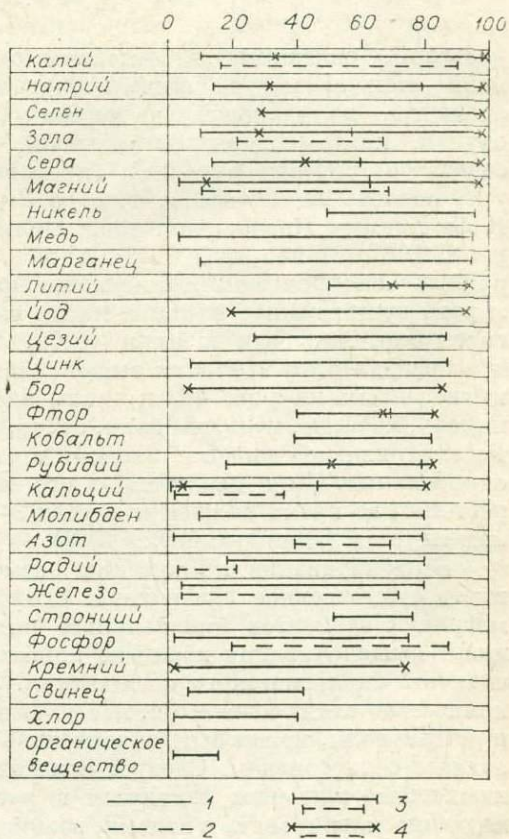


Рис. 48. Содержание водорастворимых форм химических элементов в растениях (в % от валового).

1 — листья; 2 — корни; 3, 4 — варианты экстракции (3 — холодной водой, 4 — кипящей).

Относительное содержание химических элементов в свежих пробах листьев березы и осины и хвои лиственницы, обработанных дистиллированной водой

Химические элементы	Время выщелачивания (ч)							
	3		15		60		300	
	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе
B *	0,83	0,77	0,58	0,50	0,53	0,40	0,38	0,25
Mo	0,88	0,82	0,66	0,58	0,66	0,50	0,50	0,33
Zn	0,90	0,84	0,86	0,76	0,86	0,65	0,61	0,40
Ni, Sn *, Ra( $\alpha$ -ак- тивность)	0,94	0,87	0,93	0,82	0,90	0,68	0,76	0,50
Fe, Co	0,97	0,90	0,95	0,84	0,96	0,73	0,92	0,60
Зола (сумма эле- ментов), Na *, Ca, Mg, As*, V*	1,00	0,93	1,00	0,88	1,00	0,76	1,00	0,66
Mn, Ba, Ti, Ga, Be*	1,02	0,95	1,02	0,90	1,05	0,80	1,06	0,70
Si, P, Zr, Y *, Yb*, Sc *	1,04	0,97	1,06	0,93	1,10	0,84	1,13	0,75
Sr, Cd *	1,07	1,00	1,09	0,96	1,18	0,90	1,20	0,79
Al, Cu, Ag	1,07	1,00	1,10	0,97	1,21	0,92	1,30	0,86
Pb, Cr	1,07	1,00	1,13	0,98	1,25	0,95	1,39	0,90

\* Предварительные данные, полученные по результатам анализов 2—4-х проб.

растений, связанные в основном с дождями, которыми в той или иной степени могут выщелачиваться практически все химические элементы, находящиеся в листьях (рис. 48). В литературе описаны случаи, когда содержание железа, никеля, кобальта, мышьяка и селена в листьях растений, опробованных после интенсивного дождя, уменьшалось на 50—80%, т. е. в 2—5 раз (Максимов, 1958; Ткалич, 1959; Крамер, Козловский, 1963; Поликарпочкин, 1969а; Захаров, Захарова, 1969; Майборода, 1971; Ahrens, 1934). К элементам-индикаторам рудных месторождений, выщелачивание которых дождями может оказывать существенное влияние на их содержание в золе растений, относятся бор, молибден и цинк (табл. 16). По опубликованным данным и по результатам изучения выщелачивания химических элементов водой, приведенным на рис. 48, к таким элементам могут относиться железо, никель, кобальт, медь, мышьяк, селен, литий, рубидий, цезий и марганец. Рассматриваемое явление зависит от вида и части растения и времени опробования. Для исключения его влияния при поисках отбор проб растений во время дождей и спустя 2—3 дня после окончания их не рекомендуется (Инструкция..., 1965).

Выщелачивание химических элементов из живых растений может иметь существенное значение в биологическом круговороте и в водной миграции элементов минерального питания, имеющих большой коэффициент выщелачивания водой из живых растений и значительную интенсивность биологического поглощения. Это связано с тем, что абсолютное количество таких элементов, поступающее в почвы, почвенные, грунтовые и речные воды, может быть значительно больше, чем их количество, поступающее с листопадом. Следует отметить, что выщелоченные из растений химические элементы находятся в растворенном состоянии и могут немедленно мигрировать с водами, взаимодействовать с почвенным комплексом или поглощаться растениями. Химические же элементы, попавшие в почву с листопадом, участвуют в дальнейших процессах миграции постепенно, по мере их разложения. Процессы выщелачивания химических элементов дождями из живых растений и разложения лесной подстилки существенно отличаются друг от друга. Показателем различия

Содержание микроэлементов в растениях, опробованных в разные годы (по данным Родина, 1970), мг/кг сух. вещества

Растение	Орган растения	Вес сухой массы растения, г		Mn		Zn		Cu	
		1967 г.	1968 г.	1967 г.	1968 г.	1967 г.	1968 г.	1967 г.	1968 г.
Яровая пшеница	Листья	39	170	89	8,9	0,7	1,7	12	6
	Стебли	12	28	219	67,0	0,6	3,2	16	6
	Зерно	29	170	90	6,6	12,2	16,9	24	12
Овес	Листья	31	173	138	26,0	3,3	0,6	12	5
	Стебли	13	42	201	267,3	5,7	2,7	10	8
	Зерно	8	170	109	10,1	40,7	19,6	20	9
Ячмень	Листья	34	134	109	10,5	0,7	3,4	8	10
	Стебли	12	41	137	126,0	0,7	12,9	9	13
	Зерно	19	178	68	4,9	25,9	37,4	19	14
Сорго	Листья	19	14	98	28,6	0,4	1,2	11	9
	Стебли	5	4	317	390,9	2,0	1,8	7	7
	Зерно	2	9	58	7,9	7,1	15,4	18	6
Просо	Листья	83	74	170	39,0	6,6	1,8	21	6
	Стебли	81	34	230	58,4	2,6	2,2	12	5
	Зерно	31	116	33	3,2	24,8	9,8	23	8

служит то, что при выщелачивании химических элементов дождями зольность живых листьев уменьшается, а масса органического вещества сохраняется практически неизменной. Разложение же лесной подстилки сопровождается разложением органики и увеличением зольности образующихся из лесной подстилки гумусовых горизонтов почвы.

Многолетние изменения содержаний химических элементов в растениях, обусловленные климатическими факторами, могут быть значительными и при сопоставлении результатов многолетних биогеохимических работ требуют соответствующего учета. Наибольшие изменения концентрации химических элементов в однолетних растениях или в однолетних (зеленых) частях многолетних растений, опробованных в разные годы, отмечаются для марганца. В некоторых органах растений, опробованных в разные годы, содержание этого элемента может различаться до 7—14 раз (табл. 17). Для многолетних частей (ветвей, коры и древесины) эти изменения имеют значительно меньшую величину, и ими в большинстве случаев можно пренебречь.

Сделаем выводы: 1) кратковременные изменения концентраций легковыщелачиваемых дождями рудных элементов (Fe, Ni, Co, Mo, B, Zn) в растениях могут оказывать влияние на результаты биогеохимических поисков и требуют учета с помощью специальных методических приемов или поправок; 2) длительные изменения химического состава растений не оказывают существенного влияния на результаты биогеохимических поисков в пределах отдельных поисковых планшетов, проводимых в течение одного или нескольких месяцев. Однако они должны учитываться при сравнении результатов многолетних работ.

**Время опробования.** Инструкцией по геохимическим поискам рудных месторождений (1965), в которую впервые был включен биогеохимический метод, предусматривается отбор одинаковых видов и частей растений в течение короткого промежутка времени. При выполнении этих рекомендаций практически полностью исключается влияние неодинакового накопления рудных элементов в различных видах и частях растений, а также времени отбора проб на результаты биогеохимических поисков. В случаях, когда опробование растений на поисковом участке производится в течение длительного времени (1,5—2 месяца и более), инструкция предусматривает введение поправок. Рекомендованное в настоящее время опробование старых, одревесневших частей древесных и кустарниковых

растений — коры, 2—8-летних частей ветвей и древесины (Поскотин, Любимова, 1963; Поскотин, и др., 1969; Ковалевский, 1966а, 1966б, 1969а, 1972) — полностью исключает влияние времени опробования, так как в этих частях концентрации рудных элементов стабильны в течение всех периодов года. Практика показывает, что необходимость во введении поправки на время опробования возникает редко — только при длительном опробовании травянистых растений или листьев и побегов деревьев и кустарников. Определение этих поправок не представляет трудности, но требует организации периодического опробования растений с интервалом 2—3 недели на типичных биогеохимических аномалиях изучаемого района, включая прилегающие к ним фоновые участки. Выбор площадок для такого опробования в пределах только безрудных фоновых площадей может привести к нежелательным искажениям получаемых данных, так как изменения концентраций рудных элементов в растениях на фоне и на биогеохимических аномалиях могут быть различными. В частности, при таких исследованиях необходимо обращать внимание на то, что барьеры поглощения у растений в одни периоды роста функционируют, а в другие — отсутствуют.

**Органы и части органов растений.** Легко осуществляемая стандартизация опробуемых частей растений полностью исключает влияние на биогеохимические аномалии различий, связанных с неодинаковым накоплением рудных элементов в них. Выбор этих частей должен определяться в основном отсутствием у них барьеров поглощения по отношению к используемым элементам-индикаторам. В связи с тем, что проводимые в настоящее время поисковые работы имеют целью выявление всех рудных месторождений на изучаемой территории, на точке наблюдения оказывается целесообразным отбирать не одну, а, по крайней мере, две пробы разных частей одного растения или две пробы разных видов растений. Это связано с тем, что безбарьерными по отношению к одной группе рудных элементов являются одни виды и части растений, а по отношению к другой группе — другие биообъекты. В связи с этим для определения в растениях рудных элементов акропетального накопления на биогеохимических аномалиях целесообразно отбирать старые части (кору, 2—8-летние отрезки ветвей или древесину), а для определения элементов безипетального накопления — молодые, растущие части (листья, побеги или побеги с листьями). К элементам акропетального накопления, которые концентрируются на биогеохимических аномалиях в старых частях и корнях, относятся следующие рудные элементы: Zn, Hg, Cr, W, Y, La, Ce, U, Th, Sr, Ba, Ra, F, Fe, Mn, Ni, Co и V). К элементам нейтрального накопления, содержание которых на биогеохимических аномалиях не имеет существенной дифференциации по органам, относятся Cu, Ag, Au, Be, Sn, Ni, Co. Для определений рудных элементов акропетального и нейтрального накопления следует опробовать старые органы растений, так как концентрации в них больше, чем в молодых, и стабильны во времени. К элементам базипетального накопления, которые на биогеохимических аномалиях имеют максимальное содержание в листьях и побегах, а минимальные — в корнях и старых частях, относится бор. Отбор смежных проб молодых и старых частей растений возможен только для деревьев и кустарников и имеет ограниченное применение.

Некоторые авторы обращали внимание на необходимость отбора проб древесных растений, расположенных на них одинаковым образом, на одной высоте и с одного направления относительно стран света, обычно с южной стороны (Грабовская, Астрахан, 1963; Поликарпочкин, Поликарпочкина, 1964; Грабовская, 1965; Инструкция..., 1965; Ткалич, 1970; Биогеохимические и геоботанические исследования, 1972). Анализ имеющихся данных говорит о том, что эта рекомендация не столь необходима, так как распределение рудных элементов в однородных пробах растений различной ориентировки равномерное, а «различия» объясняются при-

родной дисперсией содержания и ошибками используемых анализов. Так, средние содержания свинца, цинка, меди, бария, стронция, марганца и радия ( $\alpha$ -активности) в различно ориентированных по 7 азимутам пробах хвои кедра не имеют статистически значимых различий от среднего и между любой парой азимутов (табл. 18). Максимальная разница между относительными содержаниями марганца в хвое западной и южной ориентировки равна 0,49. Вероятность того, что эта разница статистически достоверна, составляет  $\approx 87\%$  (критерий Стьюдента равен 1,9), т. е. и ее нельзя считать доказанной. Максимальная статистическая достоверность разницы для данных табл. 18 отмечается для свинца. Она достигает 97% ( $t = 2,9$ ). Такая большая вероятность статистической достоверности разницы наблюдается только для максимальных значений, и ее также нельзя считать безусловно достоверной. Самым же главным признаком отсутствия статистически достоверной зависимости содержания изученных элементов от ориентировки проб является отсутствие закономерных изменений этих содержания — приуроченности максимумов или минимумов к пробам, ориентированным каким-либо определенным способом. Еще более убедительны, чем данные, полученные нами с помощью приближенно-количественного анализа с четырехкратной повторностью, результаты исследований других авторов, основанные на высокоточных химических ана-

Таблица 18

Средние относительные содержания рудных элементов в золе различно ориентированных проб хвои кедра сибирского

Ориентировка проб	n*	Химический элемент							
		Pb	Zn	Cu	Ba	Sr	Mn	Ra ( $\alpha$ -эквивалент U)	
Север . . . . .	6	1,3 ± 0,1	1,04 ± 0,04	0,83 ± 0,12	1,29 ± 0,16	0,95 ± 0,06	0,96 ± 0,06	0,99 ± 0,07	
Северо-Запад . . . . .	3	1,3 ± 0,2	0,90 ± 0,08	1,17 ± 0,18	1,17 ± 0,24	1,05 ± 0,10	1,01 ± 0,10	1,11 ± 0,10	
Запад . . . . .	2	1,0 ± 0,2	1,20 ± 0,12	0,90 ± 0,20	0,90 ± 0,20	0,90 ± 0,14	1,30** ± 0,30	1,07 ± 0,12	
Юго-Запад . . . . .	4	0,9 ± 0,1	1,07 ± 0,05	1,11 ± 0,10	0,93 ± 0,12	1,00 ± 0,07	0,86 ± 0,09	0,79 ± 0,10	
Юг . . . . .	6	0,9 ± 0,1	1,02 ± 0,04	1,05 ± 0,10	1,04 ± 0,10	1,00 ± 0,05	0,81 ± 0,07	0,94 ± 0,07	
Восток . . . . .	2	0,9 ± 0,1	1,14 ± 0,10	1,44 ± 0,16	1,05 ± 0,22	1,20 ± 0,12	1,08 ± 0,20	1,17 ± 0,11	
Северо-Восток . . . . .	3	0,9 ± 0,1	1,05 ± 0,06	0,95 ± 0,12	0,99 ± 0,18	0,97 ± 0,09	1,00 ± 0,12	1,03 ± 0,09	
Среднее относительное . . . . .	26	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Среднее, % . . . . .	26	0,0024	0,060	0,021	0,029	0,011	2,4	0,00096	

\* Здесь и в последующих таблицах n — число определений.  
 \*\* Единичное определение.

Содержание химических элементов в различно ориентированных пробах листьев деревьев (по данным W. J. A. Steyn, 1961)

Химический элемент	Ориентировка проб				Среднее содержание	Максимальное относительное отклонение от среднего, %	Относительная ошибка анализа, %
	Север	Восток	Юг	Запад			
Азот, %	1,45	1,45	1,43	1,44	1,442	±0,9	±0,6
Фосфор, »	0,18	0,18	0,18	0,18	0,184	±1,1	±1,2
Калий, »	3,12	3,12	3,08	3,10	3,104	±0,8	±2,9
Кальций, »	0,31	0,30	0,30	0,30	0,302	±2,6	±0,9
Магний, »	0,33	0,33	0,32	0,32	0,325	±1,5	±2,7
Железо, мг/кг	46	42	43	43	43,2	±4,2	±1,8
Марганец, »	160	158	157	159	158,5	±1,0	±0,9
Цинк, »	24	23	23	24	23,5	±2,1	±3,5
Медь, »	12	11	11	13	11,8	±10,0	±5,3

лизах. Максимальное относительное отклонение содержания 9 изученных элементов в различно ориентированных пробах не превышали 4—10% (табл. 19). При этом они были мало достоверны с точки зрения точности анализа данного элемента. Для меди, например, максимальное отклонение превышало точность анализа только в 1,9, а для железа — в 2,3 раза. Эти отклонения единичных определений имеют достоверность не более 80%, и их нельзя считать значимыми. Результаты исследований, приведенные в табл. 18 и 19, говорят о высокой стабильности содержаний химических элементов в разноориентированных однородных пробах, находящейся в пределах  $\pm 1-5\%$ .

Более существенно влияние высоты отбора проб, так как оно имеет характер систематического, но относительно небольшого (на  $\pm 20-40\%$ ), изменения содержаний некоторых элементов от верхних проб к нижним. Эти закономерные изменения концентраций элементов-индикаторов могут оказывать влияние на получаемые результаты, если при проведении поисковых работ пробы отбираются то из верхних, то из нижних частей крон деревьев. Однако при биогеохимических поисках отбор проб листьев, хвой, ветвей, побегов или коры деревьев всегда производится из нижних частей крон или из стволов и наблюдаемые закономерные изменения содержаний рудных элементов в пробах из разных по высоте частей крон не могут оказывать влияние на поисковые результаты. Так, содержания меди и стронция закономерно увеличивались от нижних к верхним частям крон деревьев в 1,2 раза (табл. 20). Содержания бария, марганца, свинца, цинка и радия при этом уменьшались. Однако если исключить пробы вершины, хвоя которой имеет возраст менее одного года, то наблюдаемые изменения содержаний изученных элементов значительно уменьшаются и не превышают 15—20%. Очевидно, что эти систематические изменения содержаний рудных элементов не могут оказывать существенного влияния на результаты биогеохимических съемок при стандартизированной высоте отбора проб в связи с тем, что природная дисперсия концентраций большинства элементов-индикаторов рудных месторождений в пределах однородного ландшафта  $V_{пол}$  обычно значительно превышает упомянутые величины ( $V_{пол} = \pm 20-60\%$ ).

Влияние различных видов на результаты биогеохимических поисков существенно в тех случаях, когда рекомендуемое опробование растений одного вида на всей изучаемой территории невозможно. Практически,

Среднее относительное содержание рудных элементов в золе проб хвой кедр

Высота отбора проб, м	n	Химические элементы						
		Pb	Zn	Cu	Ba	Sr	Mn	Ra ( $\alpha$ -эквивалент U)
0,4—0,5	11	1,03	1,16	0,94	1,03	0,95	1,13	1,04
		$\pm 0,04$	$\pm 0,09$	$\pm 0,12$	$\pm 0,09$	$\pm 0,05$	$\pm 0,08$	$\pm 0,05$
0,8—0,9	9	0,96	1,01	1,05	1,09	0,93	1,11	0,90
		$\pm 0,11$	$\pm 0,06$	$\pm 0,09$	$\pm 0,10$	$\pm 0,04$	$\pm 0,07$	$\pm 0,06$
1,6—1,2	8	1,10	0,96	1,08	0,93	1,12	0,94	0,98
		$\pm 0,10$	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$	$\pm 0,08$	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$	$\pm 0,07$
Вершина	3	0,70	0,90	1,12	0,52	1,12	0,72	0,94
		$\pm 0,20$	$\pm 0,16$	$\pm 0,20$	$\pm 0,07$	$\pm 0,10$	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$

однако, опробование одного или двух доминантных видов бывает возможным на большей части планшетов поисковых работ, и разнородные пробы часто составляют не более 3—10% своего общего количества. В связи с такой степенью стандартизации, введение поправок на вид растения не представляет большой сложности. Кроме того, установлено, что в пределах площадей с нормальными содержаниями рудных элементов поправки на вид растения можно не вводить, а необходимость в них появляется только в пределах выявленных биогеохимических аномалий. Для исключения влияния неодинакового накопления рудных элементов различными видами растений, произрастающими в сходных или сопоставимых условиях, следует применять два приема. Во-первых, следует отбирать пробы растений разных видов, имеющих приблизительно одинаковые или близкие относительные содержания основных рудных элементов — ОСВР (Ковалевский, 1965а, 1969б). При выполнении этой рекомендации поправок на вид растения можно не вводить, так как виды, имеющие близкие ОСВР, будут давать сопоставимые результаты без введения поправки. При вынужденном опробовании несопоставимых видов, имеющих существенно различные значения ОСВР, поправка на вид необходима, особенно на биогеохимических аномалиях и в их окрестностях. Величиной поправки на вид является относительное содержание данного вида растения (ОСВР). Исправленное на вид содержание элемента в растении определяется по формуле:

исправленное содержание элемента-индикатора в растении. В связи с тем, что ОСВР доминантного вида растения, принимаемого за эталонный и составляющего основное количество проб, принимается равным 1,0, поправки вводятся только в остальные, не сопоставимые с эталонным, виды растений. Для определения поправок необходимо группирование растений по значениям их ОСВР. Таблицы ОСВР или биогеохимических коэффициентов ( $K_b$ ) неоднократно публиковались (Ковалевский, 1960, 1962, 1965б, 1966а, 1969а, в; Самойлова, 1961; Грабовская, Астрахан, 1963; Беус и др., 1968; Грабовская, Кузьмина, 1971; Гетманчук и др., 1969; Комский, Мицкевич, 1969). Следует, однако, заметить, что многие опубликованные значения ОСВР или  $K = K_b$  были определены на отдельных точках наблюдения и поэтому могут иметь значительные погрешности, превышающие допустимую величину, которую можно принять равной  $\pm 10$ —20%. Определение природной дисперсии ОСВР показывает, что отдельные величины этого параметра имеют значительную природную дисперсию — коэффициент вариации  $V_n$ , равный  $\pm 60$ —100%, а распре-

Относительные содержания ОСВР молибдена при различных содержаниях его в почвах (ветви деревьев и кустарников и надземные части травянистых растений, август 1964 г.)

Вид растения	Содержание Мо в почвах, $10^{-3}\%$					
	0,1-3,0		3-10		10-40	
	n	ОСВР	n	ОСВР	n	ОСВР
Береза плосколистная ( <i>Betula platyphylla</i> ) . . . . .	8	1,0	20	1,0	12	1,0
Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> ) . . . . .	4	$1,1 \pm 0,2$	16	$1,1 \pm 0,1$	7	$1,0 \pm 0,15$
Кедр сибирский ( <i>Pinus sibirica</i> ) . . . . .	12	$1,1 \pm 0,1$	50	$1,3 \pm 0,1$	16	$1,7 \pm 0,2$
Багульник болотный ( <i>Ledum palustre</i> ) . . . . .	6	$1,2 \pm 0,2$	30	$4,5 \pm 0,3$	14	$5,5 \pm 0,5$
Жимолость голубая ( <i>Lonicera coerulea</i> ) . . . . .	6	$1,3 \pm 0,2$	20	$1,5 \pm 0,15$	6	$0,8 \pm 0,15$
Ива ( <i>Salix</i> sp.) . . . . .	20	$0,8 \pm 0,1$	20	$0,6 \pm 0,06$	12	$0,3 \pm 0,03$
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> ) . . . . .	5	$1,5 \pm 0,3$	12	$5,0 \pm 0,6$	3	$7,0 \pm 1,7$
Осока ( <i>Carex</i> sp.) . . . . .	4	$1,4 \pm 0,3$	14	$4,5 \pm 0,5$	4	$6,0 \pm 1,0$
Иван-чай ( <i>Epilobium angustifolium</i> ) . . . . .	3	$1,5 \pm 0,4$	10	$4,8 \pm 0,6$	6	$6,8 \pm 0,7$

Примечание. ОСВР березы принято за 1,0.

деление их аппроксимируется логарифмически нормальным типом (Ковалевский, 1969б, г). В связи с этим для вычисления ОСВР с точностью  $\pm 10-20\%$  необходимо определение их средних значений из однородных совокупностей, включающих в себя не менее 10-30 отдельных значений.

Некоторое осложнение с введением поправок на вид растения может быть связано с выявившимися в последние годы данными о специфичности физиологических барьеров поглощения у различных видов растений. Наличие этих барьеров обуславливает изменение значений ОСВР в за-

Таблица 22

Относительные содержания ОСВР свинца при различных содержаниях его в почвах (листья или хвоя высших растений, мох и кора лиственницы, Озерное месторождение, июль 1965 г.)

Вид растения	Среднее содержание Pb в золе								
	на фоновых площадях, Pb в почвах $(1-3) \cdot 10^{-3}\%$			при содержаниях Pb в почвах $(3-30) \cdot 10^{-3}\%$			при содержаниях Pb в почвах $(30-300) \cdot 10^{-3}\%$		
	n	Pb	ОСВР	n	Pb	ОСВР	n	Pb	ОСВР
Лиственница даурская ( <i>Larix dahurica</i> ) . . . . .	14	$2,0 \pm 0,2$	1,0	14	$6,0 \pm 0,6$	1,0	54	$54 \pm 4$	1,0
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> ) . . . . .	4	$2,6 \pm 0,4$	1,3	6	$5,2 \pm 1,0$	0,9	4	$44 \pm 9$	0,8
Береза плосколистная ( <i>Betula platyphylla</i> ) . . . . .	20	$1,6 \pm 0,2$	0,8	43	$2,0 \pm 0,4$	0,3	81	$8,2 \pm 1,2$	0,15
Багульник болотный . . . . .	—	—	—	4	$3,6 \pm 0,8$	0,6	6	$6,8 \pm 0,6$	0,13
Рододендрон даурский ( <i>Rhododendron dahurica</i> ) . . . . .	4	$2,0 \pm 0,4$	1,0	12	$4,2 \pm 0,6$	0,7	38	$13 \pm 2$	0,24
Ива ( <i>Salix</i> sp.) . . . . .	6	$1,4 \pm 0,4$	0,7	12	$1,9 \pm 0,4$	0,3	22	$5,2 \pm 0,8$	0,10
Осина дрожащая ( <i>Populus tremula</i> ) . . . . .	10	$1,2 \pm 0,2$	0,6	16	$1,3 \pm 0,2$	0,2	22	$3,2 \pm 0,6$	0,06
Мох — кукушкин лен . . . . .	—	—	—	2	$30 \pm 10$	5,0	4	$280 \pm 60$	5,2
Кора лиственницы . . . . .	10	$4,2 \pm 0,5$	2,1	12	$12 \pm 2$	2,0	18	$110 \pm 14$	2,0

Примечание. ОСВР хвои лиственницы принято за 1,0.

Относительные содержания ОСВР свинца при различных концентрациях его в почвах (ветви с листьями или хвоей, по данным Грабовской и Кузьминой, 1971)

Вид растений	Среднее содержание свинца в золе и его ОСВР								
	на фоновых площадях			на периферии рудоносного массива			в центре рудоносного массива		
	n	Pb, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР	n	Pb, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР	n	Pb, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР
Лиственница даурская ( <i>Larix dahurica</i> ) . . . . .	27	2,0	1,0	207	23	1,0	39	110	1,0
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> ) . . . . .	62	2,8	1,4	211	24	1,0	42	120	1,1
Береза кустарниковая ( <i>Betula Sp.</i> ) . . . . .	43	1,8	0,9	79	8	0,35	129	40	0,36
Ольха ( <i>Alnus sinuata</i> ) . . . . .	13	1,8	0,9	—	—	—	25	35	0,32
Сосна обыкновенная ( <i>Pinus silvestris</i> ) . . . . .	20	2,5	1,2	42	9	0,39	51	40	0,36
Багульник болотный . . . . .	40	2,5	1,2	94	8	0,35	182	40	0,36
Рододендрон даурский ( <i>Rhododendron dahurica</i> ) . . . . .	32	2,7	1,4	29	8	0,35	41	30	0,27

Примечание. ОСВР лиственницы принято за 1,0.

зависимости от концентрации барьерных элементов-индикаторов в питающей среде. Существенное изменение ОСВР отмечается для молибдена и свинца (табл. 21, 22). Следует отметить, что наши данные для свинца (табл. 22) хорошо подтверждаются опубликованными данными Л. И. Грабовской и Г. А. Кузьминой (1971), приведенными в табл. 23.

Сведения о зависимости ОСВР от содержаний в почвах некоторых рудных элементов, имеющих барьеры поглощения у растений, делают необходимым отдельные определения этого параметра для фона и биогеохимических аномалий различной интенсивности. При этом в случае отсутствия сведений о содержаниях изучаемого элемента в почве, что часто имеет место при проведении биогеохимических поисков, следует

Таблица 24

Относительное содержание ОСВР молибдена в растениях Канады при различных концентрациях его в почвах (по данным Warren, Delavault, 1965).

Вид растения	Интервалы содержания молибдена в золе иван-чая							
	0,1-1,0		1-10		10-100		100-1000	
	Mo, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР	Mo, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР	Mo, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР	Mo, 10 <sup>-3</sup> %	ОСВР
Иван-чай ( <i>Epilobium angustifolium</i> ) . . . . .	0,40	1,0	2,4	1,0	85	1,0	380	1,0
Ива ( <i>Salix sp.</i> ) . . . . .	0,24	0,6	1,4	0,6	—	—	100	0,3
Ольха ( <i>Alnus sinuata</i> ) . . . . .	0,28	0,7	1,6	0,7	60	0,7	260	0,7
Пихта ( <i>Abies lasiocarpa</i> ) . . . . .	0,40	1,0	1,9	0,8	—	—	85	0,2
Ель ( <i>Picea glauca</i> и <i>Picea engelmanni</i> ) . . . . .	0,40	1,0	2,0	0,8	45	0,5	90	0,2
Рододендрон ( <i>Rhododendron albiflorum</i> ) . . . . .	0,45	1,1	—	—	87	1,0	430	1,1
Хвощ ( <i>Equisetum sp.</i> ) . . . . .	0,44	1,1	2,7	1,1	14	0,2	160	0,4
Псевдотсуга ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> ) . . . . .	0,36	0,9	2,1	0,9	31	0,4	—	—
Сосна ( <i>Pinus contorta</i> и <i>Pinus ponderosa</i> ) . . . . .	0,50	1,2	3,9	1,6	100	1,2	—	—

Примечание. ОСВР иван-чая принято за 1,0.

изучать зависимость ОСВР опробуемых растений от концентрации этого элемента в одном из безбарьерных видов растений (табл. 24).

Для безбарьерных химических элементов, например радия, зависимости ОСВР от их концентрации в почвах не отмечалось (Ковалевский, 1966а). Для таких элементов установлена стабильность ОСВР для различных районов СССР (табл. 25) и даже для восточного и западного полушарий земного шара (табл. 26). Показатели этой стабильности служат подтверждением идеи В. И. Вернадского и А. П. Виноградова (1931) о том, что химический элементный состав живых организмов можно рассматривать как один из их видовых признаков. Однако стабильным биогеохимическим признаком растений следует рассматривать не содержание химических элементов, а относительное содержание в видах растений, произрастающих в сопоставимых условиях,— биогеохимический параметр ОСВР (см. табл. 25, 26). Результаты исследований, подтверждающие это положение, имеются в ряде публикаций (Ковалевский, 1966а, 1969а,б, 1970).

Таким образом, влияние видов растений на результаты биогеохимических поисков может быть довольно существенным. Однако к настоящему времени разработаны и используются при поисковых работах методы, позволяющие с достаточной точностью исключать это влияние.

## БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ НАД РУДНЫМИ ТЕЛАМИ С ОТКРЫТЫМИ И ПОГРЕБЕННЫМИ ОРЕОЛАМИ

Главной целью интерпретации аномалий, выявляемых при проведении биогеохимических съемок, является разделение их на рудные и безрудные. Эта интерпретация часто затруднена, так как на формирование биогеохимических аномалий оказывает влияние большое количество одновременно действующих факторов. Действие же многих из них в конкретных условиях мало изучено.

Анализ особенностей формирования рудных биогеохимических ореолов в растениях требует учета описанных выше факторов, а также особенностей руд и их лито-, гидро-, а иногда и атмосферических ореолов рассеяния, которые служат источниками рудных биогеохимических аномалий. Ниже будут рассмотрены основные особенности формирования наиболее интересных рудных биогеохимических аномалий, источниками которых являются руды и их литохимические и гидрохимические ореолы рассеяния. Основное внимание при этом обращено на условия, когда рудные тела и их ореолы рассеяния погребены под покровом рыхлых образований, но имеют контакт с нижними частями корневых систем растений. Для простоты будут рассмотрены особенности формирования рудных биогеохимических аномалий в наиболее типичных случаях, когда площадь рудных ореолов ( $S_0$ ), являющихся источниками их, значительно превышает площадь распространения корней опробованных растений ( $S_p$ ), т. е. когда  $S_0 \gg S_p$ .

### АНОМАЛИИ НАД РУДНЫМИ ТЕЛАМИ С ОТКРЫТЫМИ ЛИТОХИМИЧЕСКИМИ ОРЕОЛАМИ

Сравнительно простые условия формирования рудных биогеохимических аномалий имеют место для элементов-индикаторов, которые накапливаются растениями пропорционально концентрации их доступных форм в питающей среде и не имеют барьеров поглощения во всем изучаемом

Относительное содержание цинка в различных видах растений, произрастающих в сопоставимых условиях (ветви древесных и кустарниковых растений)

Вид растений	Районы										Среднее для всех районов
	Украина <sup>1</sup>	Урал, Калугинское месторождение <sup>2</sup>	низовье р. Оби	среднее течение р. Оби	Горный Алтай	Рудный Алтай <sup>3</sup>	Западное Забайкалье	Северное Забайкалье	Восточное Забайкалье	Южная Якутия <sup>4</sup>	
Вид, имеющий ОСВР=1,0 (%) . . . . .	0,012	0,029	0,11	0,08	0,10	0,005	0,10	0,13	0,08	0,07	0,06
Лиственница (разные виды) . . . . .	—	—	1,0	1,0	1,1	—	1,0	1,0	1,1	0,9	1,0
Сосна обыкновенная ( <i>Pinus silvestris</i> ) . . . . .	1,4	1,7	1,3	—	—	—	1,0	1,0	0,9	1,2	1,2
Кедр сибирский ( <i>Pinus sibirica</i> ) . . . . .	—	—	1,1	—	1,1	—	1,2	0,9	—	1,1	1,1
Пихта (разные виды) . . . . .	—	—	—	—	—	1,4	—	0,9	—	—	1,1
Ель (разные виды) . . . . .	—	1,0	1,8	—	—	—	2,0	1,5	1,6	1,8	1,6
Можжевельник обыкновенный ( <i>Juniperus communis</i> ) . . . . .	—	—	0,4	—	—	—	0,5	0,3	—	—	0,4
Осина дрожащая ( <i>Populus tremula</i> ) . . . . .	—	1,4	1,8	1,3	—	0,9	1,5	1,2	1,6	—	1,4
Ива (разные виды) . . . . .	—	—	2,2	2,3	1,7	—	2,2	1,7	2,0	2,2	2,0
Береза (разные виды) . . . . .	2,7	2,8	2,6	3,4	3,0	2,8	3,5	3,3	3,0	3,6	3,1
Багульник болотный . . . . .	—	—	0,5	—	—	—	1,1	1,3	1,0	1,1	1,0
Жимолость (разные виды) . . . . .	—	—	—	—	0,6	1,0	0,6	0,6	0,8	—	0,7
Курильский чай ( <i>Potentilla fruticosa</i> ) . . . . .	—	—	—	—	1,1	—	0,8	0,7	—	—	0,9
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> ) . . . . .	—	—	0,7	—	—	—	0,8	0,6	0,6	1,1	0,7

<sup>1</sup> По данным Комского и Мицкевича, 1969; Мицкевича, 1971.<sup>2</sup> По данным Поскотина и др., 1959.<sup>3</sup> По данным Малюги и Айвазян, 1969.<sup>4</sup> По данным Разина и Рожкова, 1966.

Сопоставление содержания цинка в растениях Сибири и Канады

Вид растений	Сибирь				Канада			Среднее ОСВР цинка для рода растений
	Восточная Сибирь (Забайкалье)		Западная Сибирь		Вид растений	цинк в золе ветвей	ОСВР цинка	
	цинк в золе ветвей, %	ОСВР цинка	цинк в золе ветвей %	ОСВР цинка				
Пихта сибирская ( <i>Abies sibirica</i> )	0,12	1,0	—	—	<i>Abies lasiocarpa</i>	0,14	0,9	0,9
Сосна обыкновенная ( <i>Pinus silvestris</i> )	0,13	1,1	0,12	1,1	<i>A. amabilis</i>	0,13	0,8	
					<i>A. grandis</i>	0,12	0,8	
Кедр сибирский ( <i>Pinus sibirica</i> )	0,12	1,0	0,14	1,3	<i>Pinus contorta</i>	0,15	0,9	1,1
					<i>P. ponderosa</i>	0,18	1,1	
					<i>P. monticola</i>	0,20	1,2	
					<i>P. albicaulis</i>	0,16	1,0	
Ель сибирская ( <i>Picea obovata</i> )	0,19	1,6	0,20	1,8	<i>Picea engelmanni</i>	0,23	1,4	1,3
Лиственница сибирская ( <i>Larix sibirica</i> )	0,11	0,9	0,11	1,0	<i>P. sitchensis</i>	0,16	1,0	
Лиственница даурская ( <i>Larix dahurica</i> )	0,13	1,1	—	—	<i>P. glauca</i>	0,20	1,2	
Можжевельник обыкновенный ( <i>Juniperus communis</i> )	0,04	0,3	0,04	0,4	<i>Larix occidentalis</i>	0,17	1,1	1,0
					<i>Juniperis scopulorum</i>	0,052	0,3	0,32
					<i>J. communis</i>	0,047	0,3	
					<i>Betula fontinalis</i>	0,42	2,6	
Береза бородавчатая ( <i>Betula verrucosa</i> )	0,36	3,0	0,29	2,6	<i>B. papyrifera</i>	0,46	2,9	2,9
Береза плосколистная ( <i>Betula platyphylla</i> )	0,40	3,3	—	—	<i>Salix sitchensis</i>	0,28	1,8	1,9
Ива ( <i>Salix</i> sp. <sup>1</sup> )	0,23	1,9	—	—	<i>S. sp.<sup>4</sup></i>	0,28	1,8	
» » <sup>2</sup>	0,22	1,8	—	—	<i>S. scouleriana</i>	0,15	0,9	
» » <sup>3</sup>	—	—	0,23	2,1	<i>S. argophylla</i>	0,14	0,8	
Таволга средняя ( <i>Spiraea media</i> )	0,16	1,3	—	—	<i>Spiraea lucida</i>	0,21	1,3	1,4
Таволга трехлопастная ( <i>S. trilobata</i> )	—	—	0,19	1,7	<i>Populus tremuloides</i>	0,22	1,4	1,6
Осина дрожащая ( <i>Populus tremula</i> )	0,16	1,3	0,20	1,8	<i>P. trichocarpa</i>	0,31	1,9	
Боярышник сибирский ( <i>Crataegus sanguinea</i> )	0,07	0,6	—	—	<i>Crataegus douglasii</i>	0,10	0,6	0,6
Курильский чай ( <i>Potentilla fruticosa</i> )	0,10	0,8	0,13	1,2	<i>Potentilla fruticosa</i>	0,09	0,6	0,8
Иван-чай ( <i>Epilobium angustifolium</i> )	0,06	0,5	—	—	<i>Epilobium angustifolium</i>	0,15	0,9	0,7
Брусника ( <i>Vaccinium vitis-idaea</i> )	0,08	0,7	—	—	<i>Vaccinium scoparium</i>	0,08	0,5	0,6
					<i>V. membranaceum</i>	0,08	0,5	
Хвощ ( <i>Equisetum</i> sp. <sup>1</sup> )	0,018	0,15	—	—	<i>Equisetum</i> sp. <sup>2</sup>	0,011	0,07	0,1

<sup>1</sup> По данным Комского и Мицкевича, 1969; Мицкевича, 1971. <sup>2</sup> По данным Поскотина и др., 1969.<sup>3</sup> По данным Малюги и Айвазян, 1969. <sup>4</sup> По данным Разина и Рожкова, 1966.

мом диапазоне концентраций в литохимическом ореоле. Примерами таких безбарьерных элементов могут служить радий, кадмий и рений. С некоторыми ограничениями к ним относятся молибден, свинец, цинк, ртуть, мышьяк, сурьма, висмут, бор, золото и некоторые другие элементы (см. табл. 11).

В наиболее простом случае, когда содержание безбарьерного элемента-индикатора в вертикальном разрезе корнеобитаемой зоны открытого литохимического ореола не изменяется (или имеет максимум вблизи дневной поверхности) и доступность его в этом ореоле ( $D_0$ ) и во вмещающих его образованиях с фоновыми содержаниями элемента ( $D_{\phi}$ ) одинаковы, т. е.  $D_0 = D_{\phi}$ , биогеохимические аномалии будут подобны по величине литохимическим и совпадать с ними на площади. Информативность лито- и биогеохимических поисков в этих условиях будет одинаковой. Для перехода от концентраций элемента-индикатора в растениях к его содержаниям в почве как на фоне, так и на аномалии может быть использован растительно-почвенный коэффициент РПК, равный отношению содержания его в золе растения к содержанию в почве. Некоторые более сложные условия формирования рудных биогеохимических аномалий могут быть сведены при их интерпретации к этому простейшему случаю. Примеры их рассмотрены ниже.

В несколько более сложных условиях, когда схема образования биогеохимической аномалии отличается от описанного выше простейшего случая тем, что  $D_0 \neq D_{\phi}$ , коэффициенты контрастности КК литохимического ореола ( $KK_{л}$ ) и биогеохимической аномалии ( $KK_{б}$ ) также будут неодинаковы. Поисковая информация лито- и биогеохимических съемок различна. Для сопоставления контрастности лито- и биогеохимической аномалии в этих условиях целесообразно использовать отношения  $\frac{D_0}{D_{\phi}}$  или

$\frac{РПК_a}{РПК_{\phi}}$ , где  $РПК_a$ ,  $РПК_{\phi}$  — растительно-почвенные коэффициенты РПК рассматриваемого элемента-индикатора на литохимической аномалии и на фоне соответственно. Наиболее показательное влияние неравенства  $D_0$  и  $D_{\phi}$  в условиях, близких к рассматриваемым, было получено В. Л. Кожарой (1964) в мерзлотных ландшафтах над турмалиноносными зонами, залегающими в гнейсах и кристаллических сланцах. Вследствие полной недоступности для растений бора, связанного с турмалином и джумортьеритом (минералов, не растворимых даже в сильных кислотах), над зонами турмалинизации положительных биогеохимических аномалий не наблюдается, но могут иметь место отрицательные аномалии ( $KK_{б} = 0,4 - 0,8$ ). Литохимические ореолы в почвах и рыхлом покрове здесь могут быть весьма значительны —  $KK_{л} = 30 - 300$  (см. рис. 1). В этом случае поисковая биогеохимическая информация о зонах турмалинизации по содержаниям бора в растениях равна нулю при весьма высокой информативности литохимической съемки. Биогеохимическими индикаторами зон турмалинизации могут быть малоконтрастные отрицательные аномалии РПК бора (см. рис. 1 и табл. 27), так как при уменьшении содержаний бора в растениях над этими зонами в 1,2—2,5 раза его концентрации в почвах превышают фоновые в десятки раз.

Случаи, подобные рассмотренному выше для бора, могут наблюдаться для крупного самородного золота в кварцевых жилах или россыпях; для бериллия, представленного крупнокристаллическим бериллом (см. рис. 3); для меди, цинка, кадмия и мышьяка в зонах окисления типа «железной шляпы» и в других условиях. Следует отметить, что для открытых литохимических ореолов, представляющих собой верхние части зон окисления рудных месторождений, условия, когда  $D_0 \ll D_{\phi}$ , будут встречаться довольно часто, так как при их образовании выносятся легко растворимые соединения большинства элементов-индикаторов. Условия  $D_0 \ll D_{\phi}$  будут характерны также для открытых ореолов месторождений,

Содержания и значения РПК бора над зонами турмалинизации

Ландшафт и вид растения	Среднее содержание бора, $10^{-3}\%$				РПК бора		Автор
	в растениях одного вида		в почвах		на фоне	над зоной турмалинизации	
	на фоне	над зоной турмалинизации	на фоне	над зоной турмалинизации			
Мерзлотно-таежный на метаморфических породах (лиственница даурская, <i>Larix dahurica</i> )	0,032	0,027	0,004	0,8	8,0	0,03	Кожара, 1964
Южнотаежный ландшафт на алевролитах и песчанниках (береза плосколистная, <i>Betula platyphylla</i> ) . . . . .	0,14	0,06	0,0060	0,06	23	1,0	Саев, 1969

устойчивых в зоне окисления руд бериллия, золота, тантало-ниобатов, редких земель, тория, титана, циркония и подобных им малоподвижных в зоне гипергенеза рудных элементов. Естественно, что в условиях открытых литохимических ореолов биогеохимические поиски по элементам-индикаторам, имеющим  $D_0 \ll D_f$ , нецелесообразны, так как более простые литохимические поиски с отбором проб на глубине 0,1–0,3 м здесь более информативны.

В практике известны случаи, когда в условиях открытых или ослабленных рудных литохимических ореолов  $D_0 \gg D_f$ . В этих сравнительно редко встречающихся случаях контрастность рудных биогеохимических аномалий получается больше контрастности открытых литохимических ореолов, а  $RPK_a/RPK_f \gg 1,0$ . Так, на Булуктайском редкометальном месторождении в БурАССР контрастность цинковых биогеохимических аномалий над сульфидизированными зонами с редкометальной минерализацией была в 3–4 раза больше контрастности литохимических ореолов на горизонте питания растений и намного превосходила этот показатель литохимических ореолов в гумусовом горизонте почв (Ковалевский, 1969в). Аналогичные условия наблюдались над ураноносными рудными телами, представленными третичными супесями и суглинками, и над телами, верхние части зон окисления которых были представлены легкорастворимыми вторичными урановыми минералами типа отенита и торбернита. Это связано, очевидно, с тем, что радий, использовавшийся в качестве биогеохимического индикатора урана, в литохимических ореолах отмеченных типов находится в формах более доступных растениям по сравнению с их формами за пределами этих ореолов. Случаи, когда в условиях открытых или ослабленных литохимических ореолов контрастность рудных биогеохимических аномалий была больше литохимических, отмечались для урана, сорбированного глинами, А. С. Вершининым (1969), для эндогенных боратов в мерзлотно-таежных ландшафтах — В. Л. Кожарой (1964) для боратов и датолитовой минерализации в Забайкалье и на Дальнем Востоке — Ю. Е. Саевом (1969) и для молибденовой в Забайкалье (наши данные), в Канаде (Warren e. a., 1953; Warren, Delavault, 1965; Hornbrook, 1969) и в Новой Зеландии (Brooks, Lyon, 1966).

Следует отметить, что во многих практических случаях  $KK_B$  может быть больше  $KK_D$  не в связи с тем, что  $D_0 \gg D_f$ , а в связи с несоответствием горизонта литохимического опробования представительному горизонту питания изучаемых видов растений. Они связаны с рассматриваемыми ниже ослабленными вблизи дневной поверхности или погребенными литохимическими ореолами. В некоторых случаях при смешанном поч-

венном и водном питании растений из литохимического и гидрохимического рудных ореолов могут быть получены кажущиеся данные о  $D_o \gg D_f$ , объясняемые не увеличением доступности растениям элементов-индикаторов, находящихся в литохимическом ореоле, а поступлением части, иногда большей, изучаемого элемента в растение из подземных вод. Подобное значительное (приблизительно в 10 раз) увеличение доступности некоторых рудных элементов на обводненных участках наблюдал, например, Т. Т. Тайсаев (1969) для молибдена, хрома, ванадия, циркония и титана на участках разгрузки подземных вод зоны окисления колчеданно-полиметаллических руд. Для интерпретации биогеохимических аномалий, связанных с выходами рудных гидрохимических аномалий на дневную поверхность, при проведении биогеохимических съемок необходима регистрация условий обводненности точек наблюдения и выходов грунтовых вод.

Более сложными являются особенности формирования рудных биогеохимических аномалий над рудными телами с открытыми ореолами, элементы-индикаторы которых имеют физиологические барьеры поглощения в растениях при высоких концентрациях в корнеобитаемой зоне (см. табл. 11). При наличии у растений барьеров поглощения рудные биогеохимические аномалии при  $D_o = D_f$  будут всегда получаться менее контрастными по сравнению с открытыми литохимическими ореолами. При этом уменьшение  $KK_6$  в сравнении с  $KK_{л}$  может достигать  $10^3 - 10^4$  раз, и в крайних случаях положительные биогеохимические аномалии над рудными телами могут отсутствовать ( $KK_6 \leq 1$ ). Значительное уменьшение  $KK_6$  по сравнению с  $KK_{л}$ , объясняемое барьерами поглощения, мы наблюдали для урана, бериллия, свинца, меди, серебра, фтора, молибдена и марганца. По данным других исследователей, оно может быть установлено для железа, марганца, урана, ванадия, мышьяка и меди (Ткалич, 1953, 1956, 1961, 1970; Уоррен, Делавольт, Ирш, 1954; Островская и др., 1960; Глазовская и др., 1961; Жизневская, 1961; Жизневская, Бороденко, 1970; Cannon, 1952, 1963, 1964; Warren e. a., 1968; и др.). Результаты исследований, которые иллюстрируют значительное уменьшение контрастности биогеохимических аномалий, по сравнению с литохимическими, связанное с наличием у растений низких барьеров поглощения по отношению к изученным рудным элементам, приведены на рис. 5, а, б, 11, 12, 23—28, 33—35, 37, 38.

Наиболее неблагоприятные условия формирования рудных биогеохимических аномалий на открытых литохимических ореолах будут наблюдаться тогда, когда действие факторов, уменьшающих  $KK_6$ , складывается. Они будут иметь место для барьерных химических элементов при  $D_o \ll D_f$ . При выяснении истинной причины малых величин  $KK_6$  при больших значениях  $KK_{л}$  следует иметь в виду, что уменьшение доступности растениям изучаемого химического элемента проявляется во всех видах и частях растений приблизительно одинаково, а барьеры поглощения у них весьма специфичны. Одновременное изучение концентрационных кривых для различных объектов биогеохимического опробования позволяет не только выяснять причины снижения  $KK_6$  на рудных литохимических ореолах, но и определять значимость этих причин.

Анализ особенностей формирования рудных биогеохимических аномалий на открытых литохимических ореолах рудных тел показывает, что большинство действующих здесь факторов приводит к неблагоприятному для применения биогеохимических съемок соотношению между  $KK_6$  и  $KK_{л}$ , ( $KK_6 \ll KK_{л}$ ). Поэтому биогеохимические поиски при наличии открытых литогеохимических ореолов рудных тел целесообразны в весьма редких случаях: только по безбарьерным и высокобарьерным элементам-индикаторам в условиях, когда  $D_o \gg D_f$  и  $KK_6 \gg KK_{л}$ . Целесообразны, например, поиски промышленных типов месторождений бора (боратов, датолита и данбурита) при наличии в районе поисковых работ

турмалинизированных зон. Биогеохимические поиски могут быть рекомендованы при поисках руд с открытыми литохимическими ореолами и в случае, когда имеется необходимость в проведении поисковых работ в зимний период, а биогеохимическая и литохимическая съемки дают приблизительно одинаковые поисковые результаты. Это связано с тем, что стоимость биогеохимической съемки зимой ниже, а ее проведение проще, чем литохимической. Такие зимние биогеохимические съемки производятся с 1963 г. в Бурятском (Жбанов и др., 1966) и Красноярском (Захаров, Захарова, 1969) геологических управлениях. В 1958—1960 гг. они проводились с участием автора книги в одной из экспедиций Министерства геологии СССР.

Рассмотренные особенности формирования рудных биогеохимических аномалий над открытыми литохимическими ореолами позволяют объяснить многие, в том числе и казавшиеся ранее непонятными, результаты биогеохимических исследований, проведенных на известных рудных месторождениях, так как большинство из них имеют открытые литохимические ореолы. Эти особенности позволяют утверждать, что применение биогеохимических поисков при наличии открытых литохимических ореолов, характерных для районов аридной зоны с небольшой (до 2 м) мощностью рыхлого покрова автохтонного типа (площади I категории трудности оплодотворения\*), как правило, нецелесообразно. Эти выводы следуют также из эмпирического сопоставления эффективности результатов лито- и биогеохимических съемок, полученных при опытно-методических исследованиях (Карбук, 1954; Тиссен, 1954; Соловов, 1959; Засухин, Логинова, 1963; Аристов, 1968; Вахромеев, 1966, 1972; и др.).

#### АНОМАЛИИ НАД РУДНЫМИ ТЕЛАМИ С ОСЛАБЛЕННЫМИ ЛИТОХИМИЧЕСКИМИ ОРЕОЛАМИ

Ослабленные литохимические ореолы рассеяния характеризуются увеличением концентрации элементов-индикаторов рудных тел с глубиной. Для практики поисков эти ореолы необходимо разделить по степени увеличения концентрации элементов-индикаторов от верхнего горизонта почвы до неизменных рудных тел или до представительного горизонта рыхлого покрова, имеющего наибольшие концентрации, на 3 группы: 1) незначительно ослабленные, в которых концентрация элемента-индикатора в указанном диапазоне глубин увеличивается в 2—4 (в среднем в 3) раза; 2) среднеослабленные с увеличением концентрации в 4—25 (в среднем в 10 раз) и 3) сильноослабленные, в которых концентрации элементов увеличиваются в 25—400 раз и более (в среднем в 100 раз). Следует отметить, что над одним и тем же рудным телом разные элементы-индикаторы могут иметь литохимические ореолы различной степени ослабленности.

При рассмотрении показателя ослабленности рудных литохимических ореолов обращает на себя внимание то, что он довольно часто имеет ступенчатый характер. В пределах выделенных ступеней (характерных горизонтов зон гипергенеза) он может изменяться в сравнительно небольшой степени (не более, чем в 1,5—3 раза), а при переходе от одной ступени к другой эти изменения могут быть значительными (в 3—10 раз и более). По нашему мнению, целесообразно выделять следующие 5 горизонтов ослабленности (выщелоченности) литохимических ореолов: 1) гумусовые горизонты почв, 2) минеральные почвенные горизонты, 3) почвообразующие породы (рыхлый покров, не измененный почвообразующими процессами), 4) выветрелые горные породы или окис-

\* Категории площадей по трудности оплодотворения даются по В. И. Красникову (1959, 1965).

ленные руды и 5) горные породы и руды, не измененные гипергенными процессами. Наиболее контрастно эти горизонты гипергенной ослабленности рудных литохимических ореолов выделяются для подвижных в зоне гипергенеза рудных элементов: бора, цинка, кадмия, мышьяка, меди, урана, молибдена и др. Менее четко они выделяются (могут и не выделяться) для малоподвижных элементов: тория, редких земель, свинца, фосфора и других. Наличие и характеристики ступеней гипергенной ослабленности литохимических ореолов зависят от типа минерализации, выветриваемости руд и горных пород, подвижности элементов, ландшафтно-геохимических и других факторов.

Для рассмотрения условий формирования рудных биогеохимических аномалий над ослабленными литохимическими ореолами следует использовать понятие о представительном горизонте питания изучаемого вида растения. Им мы предлагаем считать тот горизонт рыхлого покрова, на котором распределение безбарьерных элементов-индикаторов руд подобно их распределению в растениях по профилю, пересекающему рудное тело и его литохимический ореол (Ковалевский, 1967в). При использовании понятия о представительном горизонте питания растений особенности формирования рудных биогеохимических аномалий будут в основном совпадать с рассмотренными выше условиями наличия открытых литохимических ореолов. Иными словами, интенсивность, контрастность, площадь и другие параметры биогеохимических ореолов будут зависеть от контрастности литохимических ореолов на горизонте питания растений, величины  $D_o/D_f$  и наличия у растений барьеров поглощения по отношению к высоким концентрациям элементов-индикаторов в литохимическом ореоле. Следует, однако, обратить внимание на следующие обстоятельства.

1. Для рудных тел, имеющих выходы на склонах в условиях трансэлювиальных ландшафтов, весьма характерным является большее смещение и большая «размазанность» почвенно-геохимических ореолов по сравнению с биогеохимическими (наши данные 1957—1972 гг., Малюга, 1963; Новиков, Капков, 1965; Галецкий, Викторова, 1968; Ездаков, Ездакова, 1968; Лепилин, Надененко, 1968; и др.). Это связано со значительным увеличением скорости движения рыхлых масс на склонах при приближении к дневной поверхности (Поликарпочкин, 1966, 1969б, в). Меньшее смещение и большая локальность рудных биогеохимических аномалий в этих условиях обусловлены тем, что горизонтом питания растений обычно являются не верхние, а средние или нижние горизонты рыхлого покрова.

2. Значения растительно-почвенного коэффициента химических элементов, определенные над ослабленными литохимическими ореолами ( $РПК_a$ ), часто получаются искаженными. Это связано с тем, что формула  $РПК = \frac{C_p}{C_{п}}$  исходит из того, что содержание изучаемого элемента в почве ( $C_{п}$ ) является постоянной величиной во всей корнеобитаемой зоне почвы и рыхлого покрова, а над ослабленными рудными литохимическими ореолами она увеличивается от верхних к нижним горизонтам рыхлого покрова. Поскольку в практике почвенно-геохимических съемок опробуется только один из верхних горизонтов почвы: А или В (В/С), расположенных на глубинах 0,1—0,4 м,  $РПК_a$ , вычисленные по формуле  $РПК_a = \frac{C_p}{C_{вг}}$ , где  $C_{вг}$  — содержание изучаемого элемента в верхнем почвенном горизонте, значения  $РПК$  будут часто получаться кажущимися, значительно превышающими их истинную величину. Подобные значения  $РПК$  были получены, по нашему мнению, Р. Г. Юсуповым и Р. М. Талиповым (1969) и Р. М. Талиповым и др. (1969) для свинца и золота. Вычисленные  $РПК_{каж}$  этих элементов, по данным этих авторов, достигали аномально высоких значений, равных 100—150 в то время как обычные величины  $РПК$  свинца и золота редко превышают 1—3 (см. табл. 3). Использование

для определений  $РПК_a$  формулы  $РПК = \frac{C_p}{C_{гп}}$ , где  $C_{гп}$  — содержание изучаемого элемента в горизонте питания растений, хотя и дает большее приближение к истине по сравнению с формулой  $РПК = \frac{C_p}{C_{вг}}$ , также не позволяет получить истинные величины  $РПК_a$ . Значения  $РПК_a$  в этом случае будут заниженными вследствие того, что относительно высокие концентрации изучаемого химического элемента в горизонте питания растения будут распространены на расположенные выше него выщелоченные почвенные горизонты, которые обычно имеют наибольшую плотность корней и наибольшую корневую активность растений. Таким образом, задача вычисления истинных, а не кажущихся, значений  $РПК_a$  над ослабленными литохимическими ореолами — задача еще не решенная, требующая проведения специальных исследований.

3. Легковыщелачиваемые руды не всегда сопровождаются биогеохимическими аномалиями. Эти аномалии отсутствуют в тех случаях, когда мощность зоны полного выщелачивания руд и их литохимических ореолов превышает глубину проникновения корней и они оказываются за пределами контакта между литохимическими ореолами и корнями растений. Подобные условия отмечены нами над боратовыми рудными телами, древняя зона окисления и выщелачивания которых в мерзлотно-таежном ландшафте превышала 10 м (рис. 49, б). Отсутствие биогеохимических аномалий над боратовыми рудными телами наблюдал Ю. Е. Саг (1969) в степных, горно-степных и хвойно-широколиственных ландшафтах. Однако он объяснял это не отсутствием контакта между корнями растений и литохимическими ореолами бора, а другими причинами, что, по нашему мнению, является неправильным. В условиях, когда контакт между корнями растений и литохимическим ореолом рудного тела существенно ослаблен, контрастность биогеохимической аномалии над легковыщелачиваемыми рудами может быть незначительной, соответствуя ее контрастности на горизонте питания растений, а не на горизонте руд и их первичных ореолов, не измененных процессами выщелачивания. Такие рудные биогеохимические аномалии радия мы наблюдали над ураноносными рудными телами (см. рис. 49, а). Подобные малоконтрастные биогеохимические аномалии бора над легкорастворимыми рудами устанавливал Ю. Е. Саг (1969) над боратами в условиях северотаежных и южнотаежных ландшафтов.

Рассмотренные примеры показывают, что при поисках легковыветриваемых руд с выщелоченными литохимическими ореолами глубинность биогеохимического метода часто невелика. Однако применение биогеохимии для их выявления, как правило, целесообразно, так как рудные тела этих минеральных типов не выявляются обычной литохимической или радиометрической съемкой. Глубинные же варианты этих съемок стоят в десятки раз дороже, чем биогеохимические.

4. При наличии гидрохимических ореолов, совпадающих с ослабленными литохимическими ореолами, контрастность биогеохимических аномалий для безбарьерных элементов-индикаторов может значительно возрастать. Для барьерных в этих условиях элементов-индикаторов наличие гидрохимических ореолов может приводить к уменьшению  $КК_б$ .

В условиях, когда литохимические ореолы ослаблены вблизи дневной поверхности, следует исходить из того, что для безбарьерных химических элементов биогеохимический метод будет иметь одинаковую поисковую эффективность с литохимическим при отборе проб рыхлого покрова из горизонта питания растений. В связи с этим выбор поискового метода для выявления таких полуоткрытых литохимических ореолов рудных тел должен определяться в основном экономическими соображениями. Как правило, применение биогеохимических поисков, когда представительный

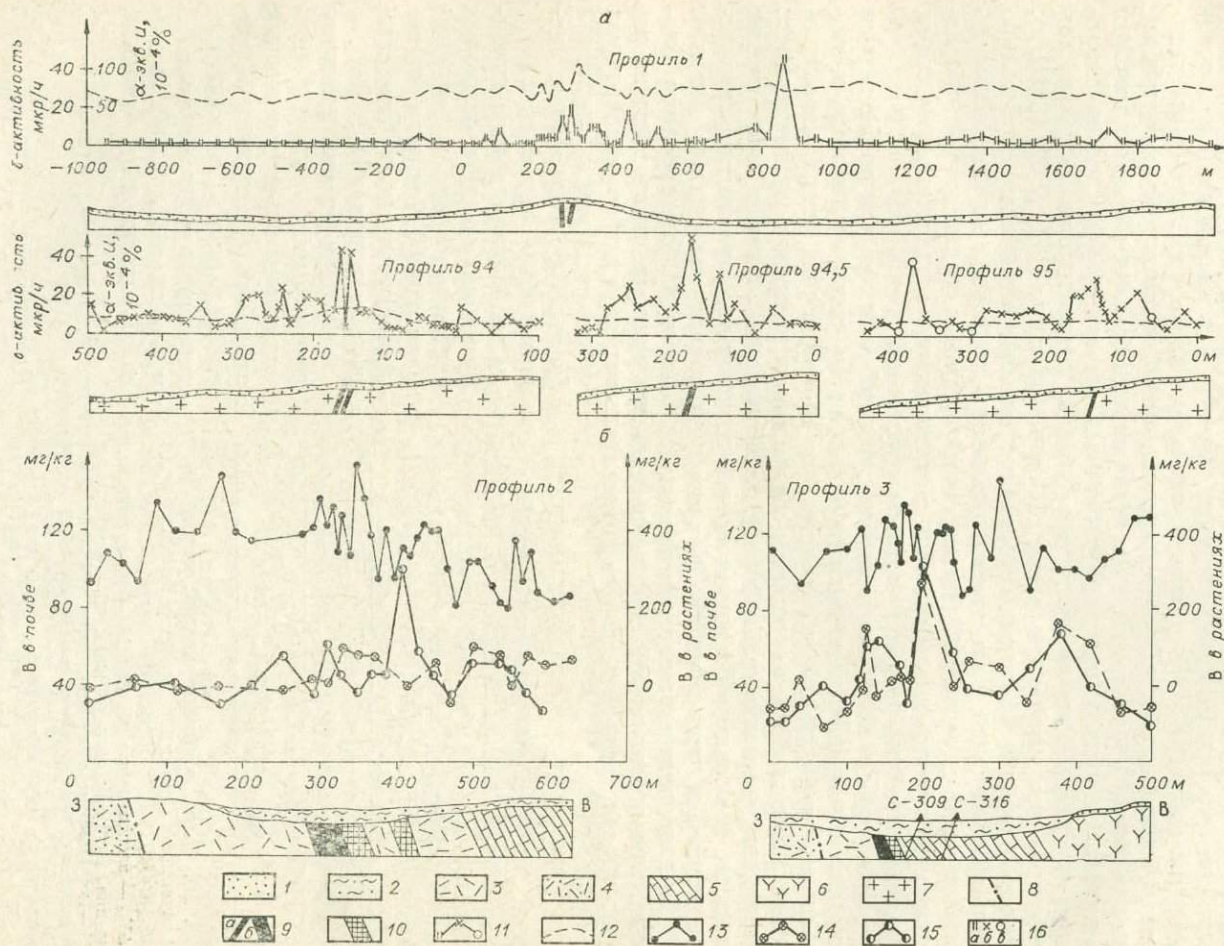


Рис. 49. Биогеохимические ореолы над урановыми (а) и боратовыми (б) рудными телами с выщелоченными вблизи дневной поверхности литохимическими ореолами.

1 — современные рыхлые образования; 2 — неогеновая кора выветривания; 3 — фельзиты, фельзит-порфиры; 4 — туфы кварцевых порфиров; 5 — известняки; 6 — андезитовые порфиры; 7 — граниты, гранодиориты; 8 — тектонические нарушения; 9 — рудные тела (а — урановые, б — магнетитовые); 10 — борсодержащие скарны; 11 — радий (α-активность) в золе растений; 12 — γ-активность на дневной поверхности; 13 — бор в золе ветвей березы, лиственницы и осины; 14, 15 — содержание бора в почвах (14 — в гумусовом горизонте почв, 0,0—0,1 м, 15 — в горизонте В/С почв, 0,5—0,6 м); 16 — опробованные растения (а — травы, б, в — ветви березы и лиственницы.)

горизонт питания растений располагается на глубинах 1 м и более, целесообразнее почвенно-геохимических, так как стоимость последних в этих условиях существенно (в 1,5—2 раза и более) выше стоимости биогеохимических поисков (Захаров, Захарова, 1969). Исключениями являются случаи использования в качестве биогеохимических индикаторов барьерных элементов, например урана, меди, фтора, или барьерных видов и частей растений.

### АНОМАЛИИ НАД РУДНЫМИ ТЕЛАМИ С ПОГРЕБЕННЫМИ ЛИТОХИМИЧЕСКИМИ ОРЕОЛАМИ

Особенности формирования биогеохимических аномалий над погребенными рудными телами представляют наибольший интерес для практики биогеохимических поисков, так как этот метод наиболее целесообразно применять в условиях, когда рудные тела и их лито- и литогидрохимические ореолы погребены под маломощным покровом аллохтонных или склоновых образований, но доступны нижним частям корневых систем растений. Следует отметить, что биогеохимические аномалии на неэродированных залесенных склонах, для которых характерны неглубоко погребенные литохимические ореолы (Поликарипочкин, 1966, 1967, 1969б, в), имеют, подобно полукрытым ореолам, меньшее смещение относительно рудных тел по сравнению с этими ореолами. Это позволяет рекомендовать использование детальных биогеохимических съемок для поисков и прослеживания неглубоко погребенных под склоновыми отложениями отдельных рудных тел и их ореолов и потоков рассеяния.

При формировании биогеохимических аномалий над рудными телами с погребенными литохимическими ореолами наряду с факторами, имеющими значение при формировании этих аномалий над открытыми литохимическими ореолами (наличие барьеров поглощения и доступность растениям элементов-индикаторов), существенное значение приобретает мощность и характер безрудного рыхлого покрова, глубина проникновения корней и распределение корневой активности в рыхлом покрове.

При теоретическом рассмотрении особенностей формирования биогеохимических аномалий над погребенными рудными месторождениями целесообразно исходить из ряда относительных параметров и некоторых предварительных допущений (рис. 50). Рассмотрим используемые параметры.

1. Максимальную глубину проникновения корневых систем растений  $h_p$  принимаем равной единице и все промежуточные глубины выражаем в долях  $h_p$ .

2. При предварительном рассмотрении условий формирования биогеохимических аномалий доступность рассматриваемого элемента-индикатора в рудном ореоле ( $D_o$ ) и в рыхлом безрудном покрове ( $D_n$ ) принимаем равными, т. е. считаем, что  $\frac{D_o}{D_n} = 1,0$ .

Для случаев, когда  $\frac{D_o}{D_n} \neq 1,0$ ,

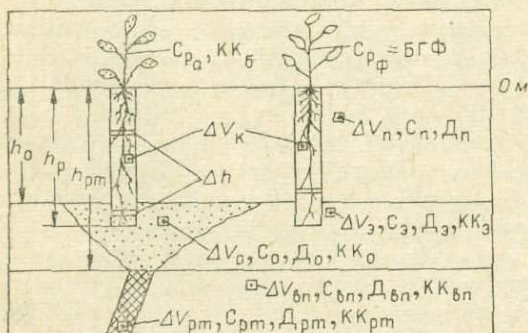


Рис. 50. Схема взаимоотношений между биогеохимической аномалией и погребенным рудным телом.

$\Delta V_K$  — элементарные объемы;  $\Delta h$  — элементарное приращение глубины;  $h$  — глубины;  $C$  — содержания;  $КК$  — коэффициенты концентрации;  $D$  — доступности элементов-индикаторов растениям. Индексы: п — аллохтонный покров, з — элювий, о — рудный ореол, рт — рудное тело, вл — вмещающее рудное тело породы, р — растение, б — биогеохимический, ф — фоновый, а — аномальный.

рассматриваем соответствующие зависимости для различных  $D_o/D_n$ , кратных, например,  $10 \left( \frac{D_o}{D_n} = 0,1; 1,0; 10 \text{ и т. д.} \right)$ .

3) Для оценки эффективности биогеохимических поисков используем коэффициент контрастности биогеохимической аномалии  $KK_b = C_{pa} : C_{pф}$ , который рассматриваем как функцию коэффициента контрастности рудного литохимического ореола  $KK_o = \frac{C_o}{C_n}$ , считая условно, что минимально достоверная биогеохимическая аномалия имеет контрастность  $KK_b = 3,0$ ; средняя эффективность биогеохимического метода будет иметь место при  $KK_b = 10$ , высокая — при 30 и весьма высокая — при  $\geq 100$ .

4) Для качественной характеристики физиологических барьеров поглощения элементов-индикаторов руд у растений будем использовать отношение ФБПР/БГФ, где ФБПР — предельные (средние) концентрации рассматриваемого элемента в растении, ограниченные физиологическими барьерами поглощения, а БГФ — фоновые содержания этого же элемента. Примем условно, что за счет функционирования барьеров поглощения в условиях открытых ореолов рудных тел содержания барьерных элементов в растениях при максимальных концентрациях их в почвах равны ФБПР/3.

5) Активность различных (по вертикали) частей корневых систем растений будем выражать графически, принимая ее максимальную величину равной единице. Исходя из имеющихся фактических данных, ниже будут рассмотрены два основных типа кривых: а) с корневой активностью, непрерывно уменьшающейся книзу, характерной для растений гумидной и, частично, для аридной зоны, корни которых не достигают верхнего водоносного горизонта, б) с корневой активностью, имеющей два одинаковых максимума: верхний — в гумусовом горизонте почвы, а нижний — вблизи уровня верхнего водоносного горизонта или его капиллярной каймы, характерной для растений-фреатофитов аридной зоны, корни которых достигают уровня грунтовых вод.

6) Концентрация элемента-индикатора в рудном литохимическом ореоле, перекрытом аллохтонным безрудным покровом, считаем постоянной и выражаем в относительных единицах — с помощью коэффициента контрастности  $KK_o = \frac{C_o}{C_n}$ , где  $C_o$  и  $C_n$  — содержание элемента в рудном ореоле и в безрудном рыхлом покрове, соответственно.

7) Площадь горизонтального сечения литохимического ореола будем считать существенно превышающей площадь всех поперечных сечений корневой системы в зоне пересечения объемов ореола и корневой системы, т. е. с точки зрения горизонтального сечения корневой системы площадь литохимического ореола принимается равной бесконечности. Естественно, что для локальных литохимических ореолов или для их частей, которые пересекаются частью объема корневой системы растения, величина биогеохимических аномалий меньше, чем для ореолов «бесконечной площади». При соответствующих расчетах необходимо учитывать долю площади (или объема) корневой системы, пересекающуюся с площадью (или объемом) рудного литохимического ореола.

Некоторые из принятых нами для теоретического анализа относительных параметров являются общепринятыми ( $KK_b$ ,  $KK_o$ , БГФ), а  $h_p$  и ФБПР не требуют особых пояснений. Под доступностью растениям элемента-индикатора в рудном ореоле ( $D_o$ ) и в рыхлом покрове ( $D_n$ ) мы понимаем относительное содержание их доступных растениям форм, выражаемое в относительных единицах (например в процентах) и равные:  $D_o = C_{од} : C_{об}$  и  $D_n = C_{нд} : C_{нв}$ , где  $C_{од}$  и  $C_{нд}$  — содержание доступных растениям форм изучаемого элемента в рудном ореоле и в рыхлом покрове

соответственно, а  $C_{0B}$  и  $C_{ПB}$  — валовые содержания элементов в тех же объектах.

С помощью серий однотипных палеток для двух основных типов распределения корневой активности растений рассмотрим некоторые особенности формирования биогеохимических аномалий над погребенными литохимическими ореолами «бесконечной площади».

### Корневая активность, уменьшающаяся с глубиной

Для случая непрерывно уменьшающейся с глубиной корневой активности растений типичная функция корневой активности —  $f_{ка}(h)$

и интеграл этой функции  $\int_0^{h_p} f_{ка}(h) \cdot dh$  приведены на рис. 51, а. Для

этого случая характерна существенная зависимость глубинности биогеохимического метода ( $h_b$ ) и контрастности биогеохимических аномалий от контрастности литохимических ореолов безбарьерных химических элементов. Для ореолов, значения  $KK_0$  которых находятся в пределах от 3 до 10,  $h_b \geq 0,2 \cdot h_p$ , а для высококонтрастных литохимических ореолов,  $KK_0$  которых превышают 200,  $h_b \geq 0,8 h_p$ , т. е. глубинность биогеохимии близка к максимальной глубине проникновения корневых систем растений в грунт (см. рис. 51, б). Для барьерных химических элементов характерна более слабая зависимость контрастности биогеохимических аномалий от глубины залегания рудного литохимического ореола, особенно для элементов-индикаторов с низкими предельными содержаниями в растениях — ФБПР  $\leq 10$  БГФ (см. рис. 51, в). Для этих элементов реальными являются случаи, когда контрастность биогеохимических аномалий и соответственно эффективность биогеохимического метода, будет наибольшей не над открытыми рудными ореолами, а над погребенными на некоторой глубине. Глубинность биогеохимического метода и контрастность биогеохимических аномалий зависят от величины отношения  $D_0/D_{П}$ . Эта зависимость аналогична уменьшению или увеличению контрастности литохимической аномалии в число раз, равное отношению  $D_0/D_{П}$  (см. рис. 51, г).

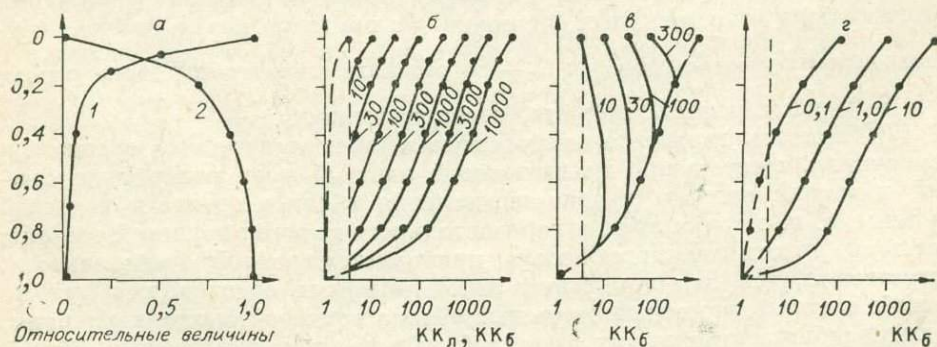


Рис. 51. Палетки зависимостей коэффициента контрастности биогеохимических аномалий ( $KK_b$ ) при корневой активности растений, уменьшающейся с глубиной.

а — зависимости корневой активности  $f_{ка}(h)$  и  $\int_0^{h_p} f_{ка}(h) \cdot dh$  (соответственно кривые 1 и 2) от глу-

бины ( $h$ ) с принятыми значениями, равными единице  $f_{ка}(h)$  при  $h=0$  и  $\int_0^{h_p} f_{ка}(h) \cdot dh$  при  $h_p=1,0$

(ось ординат — глубина проникновения корней в  $h_p$ , ось абсцисс — относительные величины); б — зависимости  $KK_b$  от  $h_0$  и  $KK_0$  (цифры —  $KK_0$ ) при отсутствии физиологических барьеров поглощения у растений (ФБПР); в — зависимости  $KK_b$  от  $h_0$  и величины ФБПР (цифры — отношение ФБПР/БГФ) при  $KK_0=1000$ ; г — зависимости  $KK_b$  от  $h_0$  и отношения  $D_0/D_{П}$  (цифры — отношение  $D_0/D_{П}$ ) при  $KK_0=1000$  и отсутствии ФБПР. Штриховой линией обозначен нижний предел достоверных значений  $KK_b$ .

Рассмотренные зависимости показывают, что контрастность биогеохимических аномалий для безбарьерных элементов-индикаторов тесно связана с контрастностью рудных литохимических ореолов и относительной доступностью для растений соответствующих химических элементов. Для барьерных химических элементов она в значительной степени определяется наличием этих барьеров и их параметрами. Глубинность же биогеохимических поисков определяется, в первую очередь, максимальной глубиной проникновения корней в грунт, контрастностью рудных литохимических ореолов и относительной доступностью для растений их элементов-индикаторов. Эффективность биохимических поисков при глубине рыхлого покрова  $h_{\text{п}} \geq 0,5h_{\text{р}}$  здесь будет наблюдаться только для контрастных литохимических ореолов, имеющих  $KK_0 \geq 30$ .

Факты подтверждают некоторые из отмеченных теоретических особенностей формирования биогеохимических аномалий над погребенными рудными литохимическими ореолами. Например, И. А. Авессаломовой и Л. И. Грабовской (1968) для бериллия отмечалось, что контрастность рудных биогеохимических аномалий не зависит от мощности аллохтонного рыхлого покрова в пределах от первых метров до 10—20 м. Кэнон (Cannon, 1964) приводились фактические данные о том, что наибольшая вероятность обнаружения урана (типичного барьерного элемента) геоботаническим методом наблюдалась не над открытыми рудными телами (вероятность обнаружения  $P \approx 69\%$ ), а над погребенными на глубине 3—8 м ( $P \approx 80\%$ ) (см. рис. 20).

#### Корневая активность растений с двумя максимумами

Для условий, когда корневая активность растений имеет два максимума, функция корневой активности  $f_{\text{ка}}(h)$  и ее интеграл —  $\int_0^{h_{\text{р}}} f_{\text{ка}}(h) dh$  (см. рис. 52, а) имеют вид, существенно отличающийся от рассматриваемого выше случая, когда корневая активность непрерывно уменьшается с глубиной. В этих условиях глубинность биогеохимического метода, как для безбарьерных, так и для барьерных элементов-индикаторов, мало зависит от контрастности рудных литохимических ореолов и близка к  $h_{\text{р}}$ . Для сравнительно мало контрастных рудных литохимических ореолов, имеющих  $KK_0 = 10$ , глубинность биогеохимии сохраняется довольно высокой —  $h_{\text{б}} \approx 0,7h_{\text{р}}$  (см. рис. 52, б, в). Для барьерных элементов-индикаторов рудных тел контрастность биогеохимических аномалий меньше, чем для безбарьерных, и определяется главным образом величиной отношения ФБПР/БГФ (см. рис. 52, в). Влияние отношения  $D_0/D_{\text{п}}$  на контрастность биогеохимических аномалий приблизительно аналогично влиянию этого фактора для рассмотренного выше случая, когда корневая активность непрерывно уменьшается с глубиной (см. рис. 52, г).

Рассмотренные серии палеток показывают, что основные параметры биогеохимических аномалий для сравнительно простых условий, когда их источником являются погребенные руды и их литохимические ореолы, могут быть оценены с помощью расчетов. Поэтому основные показатели биогеохимических поисков — глубинность, контрастность и площади биогеохимических аномалий различных элементов-индикаторов — также могут быть оценены расчетными методами. Практическое использование их в настоящее время затрудняется из-за отсутствия информации о параметрах, используемых для расчетов — максимальной глубине проникновения корневых систем, корневой активности различных видов растений, характеристиках ФБПР элементов-индикаторов, относительной доступ-

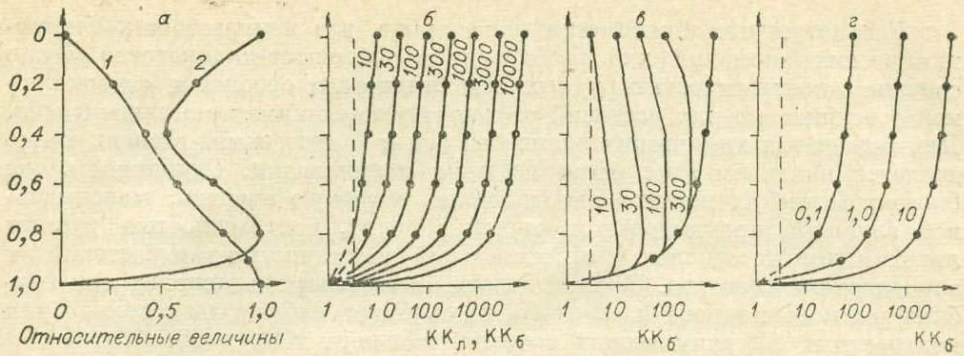


Рис. 52. Палетки зависимостей коэффициента контрастности биогеохимических аномалий ( $KK_6$ ) при двух одинаковых максимумах корневой активности растений.

а — зависимости корневой активности  $f_{Ka}(h)$  и  $\int_0^{h_p} f_{Ka}(h) \cdot dh$  (соотв. кривые 1 и 2) от глубины ( $h$ ) с принятыми значениями, равными единице  $f_{Ka}(h)$  при  $h=0$  м  $\int_0^{h_p} f_{Ka}(h) \cdot dh$  при  $h_p=1,0$  (ось ординат — глубина проникновения корней в  $h_p$ , ось абсцисс — относительные величины); б — зависимости  $KK_6$  от  $h_0$  и  $KK_0$  (цифры —  $KK_0$ ) при отсутствии ФБПР (ось ординат — глубина литохимического ореола в  $h_0$ ); в — зависимости  $KK_6$  от  $h_0$  и величины ФБПР (цифры — отношение ФБПР/БГФ при  $KK_0=1000$ ); г — зависимости  $KK_6$  от  $h_0$  и отношения  $D_0/D_{П}$  (цифры — отношение  $D_0/D_{П}$ ) при  $KK_0=1000$  и отсутствии ФБПР. Штриховой линией обозначен нижний предел достоверных значений  $KK_6$ .

ности растениям этих элементов в рудах и их литохимических ореолах и контрастности погребенных литохимических ореолов. Очевидно, что количественная оценка этих параметров должна включаться в программу исследований по разработке и усовершенствованию биогеохимических поисков рудных месторождений в конкретных условиях.

Как показывает практика работ в Центральном Казахстане, при большой мощности рыхлого покрова, когда глубинность биогеохимических поисков близка к предельной (порядка 30—60 м), контрастность рудных биогеохимических аномалий получается незначительной. Это находится в соответствии с результатами расчетов, представленных в виде палеток на рис. 51, 52. Очевидно, что выделение малоcontrastных аномалий, имеющих  $KK_6$  порядка 2—5, усложняется и требует применения специальных методических приемов, повышающих надежность поисков. Это целесообразно в связи с тем, что биогеохимические поиски имеют в этих условиях наибольшую экономическую эффективность — при глубинности более 30 м стоимость таких поисков в 100 раз и более выше, чем при глубинных литохимических. Применение таких методических приемов необходимо также в связи с тем, что вероятность выявления руд биогеохимическим методом при мощности аллохтонного рыхлого покрова, близкой к предельной глубинности биогеохимического метода, резко уменьшается (см. рис. 20).

Методическими приемами, увеличивающими чувствительность и надежность биогеохимических поисков в этих сложных условиях, служат: сгущение сети отбора проб растений в 4—10 раз; использование в качестве индикаторов рудных элементов, в наименьшей степени подверженных влиянию неоднородностей геохимических ландшафтов; использование мультипликативных ореолов элементов, имеющих положительную корреляцию в рудах и их ореолах; использование индикаторных отношений элементов, имеющих отрицательную корреляцию в рудах и их ореолах; дополнительное опробование растений с наибольшими глубинами корневых систем, и т. д.

## АНОМАЛИИ НАД РУДНЫМИ ТЕЛАМИ С ПОГРЕБЕННЫМИ ГИДРО- И ЛИТОХИМИЧЕСКИМИ ОРЕОЛАМИ

При наличии рудных гидро- и литохимических ореолов, погребенных под покровом аллохтонных образований, по доступных корням растений, механизм образования биогеохимических аномалий будет более сложным, чем при отсутствии гидрохимических ореолов. Наличие гидрохимических ореолов способствует увеличению контрастности биогеохимических аномалий и соответственно повышению эффективности и глубинности биогеохимических поисков. Это связано с тем, что растворенные в подземных водах элементы-индикаторы рудных тел имеют значительно большую доступность растениям (в  $10^3$ — $10^4$  раз) по сравнению с их формами, находящимися в литохимических ореолах. С другой стороны, вследствие возможного смещения рудных гидрохимических ореолов, при интерпретации биогеохимических аномалий могут появиться сложности в определении местоположения рудных тел. Но эти осложнения связаны с особенностями интерпретации гидрохимических аномалий, которые могут быть выявлены биогеохимическим методом, и должны рассматриваться с точки зрения гидрохимического метода поисков. При определении влияния погребенных гидрохимических ореолов следует иметь в виду, что они могут увеличивать глубинность биогеохимических (гидро-биогеохимических, по В. В. Поликарпочкину, 1969*е*) поисков до 100 м и более, делая ее сопоставимой с глубиной гидрохимического метода. Особенно вероятно значительное увеличение глубинности биогеохимического метода в условиях, когда рудные гидрохимические ореолы приурочиваются к приблизительно вертикальным зонам тектонических нарушений. Такое явление наблюдалось, по-видимому, в Карнатах, где при разбуривании биогеохимической аномалии была открыта рудная минерализация на глубине 80 м (Боев, 1970). Наличием связи между рудными телами и их литохимическими ореолами с растениями, благодаря постоянной динамической связи грунтовых вод с водами коренных пород, А. О. Гетманчук и др. (1969) объясняли глубинность биогеохимических поисков, достигавшую 40 м при глубине корневых систем польны, использовавшейся для опробования, до 5—6 м. Эти данные позволяют утверждать, что во всех случаях, когда над рудными телами и их литохимическими ореолами, перекрытыми покровом рыхлых образований аллохтонного типа значительно большей мощности, чем максимальная глубина проникновения корней, наблюдаются контрастные биогеохимические аномалии, в их формировании существенная, а возможно и главная, роль принадлежит погребенным гидрохимическим ореолам. Роль этих ореолов, по всей вероятности, была значительна при формировании биогеохимических аномалий над погребенными бериллоносными рудными телами, описанных И. А. Авессаломовой и Л. И. Грабовской (1968), и над ураноносными рудными телами, описанными Кэннон (Cannon, 1964).

Количественный учет значимости погребенных лито- и гидрохимических ореолов в формировании биогеохимических аномалий может быть сделан, если известны содержание изучаемого элемента в водах ( $C_B$ ) и в литохимическом ореоле ( $C_L$ ), растительно-водный (РВК) и растительно-почвенный (РПК) коэффициенты и объемы корней (ОК), имеющих контакт с лито- (ОК<sub>л</sub>) и гидрохимическим (ОК<sub>в</sub>) ореолами. Практически иметь точные величины этих параметров невозможно, поэтому соответствующие оценки могут быть весьма приближенными. Для них большое значение имеют величины отношений РВК/РПК,  $C_L/C_B$  и ОК<sub>л</sub>/ОК<sub>в</sub>. Вследствие процессов подвижного равновесия между рудными элементами в твердой и жидкой фазах можно предполагать, что во многих реальных условиях будут наблюдаться следующие приближенные соотношения: ОК<sub>л</sub> = ОК<sub>в</sub> и  $\frac{ОК_л}{ОК_в} = 1$ . В этих несколько упрощенных условиях основное значение

в относительном поступлении изучаемых элементов в растение будут иметь отношения  $\frac{РВК}{РПК} \cdot \frac{C_{л}}{C_{в}}$ . Если взять отношение РВК/РПК, равным среднему значению —  $3 \cdot 10^3$ , то для химических элементов, имеющих  $\frac{C_{л}}{C_{в}} = 3 \cdot 10^3$ , относительное поступление из твердой и жидкой фаз погребенного литогидрохимического ореола будет одинаковым. Известные соотношения между  $C_{л}$  и  $C_{в}$ , иллюстрируемые табл. 28, показывают, что средняя величина отношения  $\frac{C_{л}}{C_{в}} = 1,5 \cdot 10^4$ , т. е. в среднем в 5 раз больше, чем средняя величина отношения РВК/РПК, равная  $3 \cdot 10^3$ . Учитывая данные о влажности слагающих корнеобитаемую зону рыхлых горных пород и почв, которая находится обычно в пределах от 5 до 50% в среднем около 30% (Почвоведение, 1969), и отношение удельных весов рыхлых образований и воды, составляющее  $\approx 2,0$ , можно получить среднее отношение поступления химических элементов из твердой и водной фаз рыхлых образований. Оно будет равно приблизительно 30 : 1. Этот расчет показывает, что для большинства рудных элементов основным источником формирования биогеохимических аномалий над погребенными литогидрохимическими ореолами должен быть литохимический ореол. Это не исключает, однако, случаев, когда в некоторых конкретных условиях основным источником отдельных элементов-индикаторов могут быть растворенные в водах вещества, т. е. гидрохимические ореолы. Такие условия можно ожидать при песчаных или песчанистых рыхлых образованиях, значительных концентрациях некоторых рудных элементов в водах с относительно низкими содержаниями в твердой фазе, например при  $\frac{C_{л}}{C_{в}} \leq 500$ , или относительно малой доступности этих элементов твердой фазы, например при  $\frac{РВК}{РПК} \geq 1 \cdot 10^6$ .

Имеющиеся данные позволяют сделать предварительный вывод о том, что влияние погребенных гидрохимических ореолов на формирование рудных биогеохимических аномалий осуществляется в основном путем

Т а б л и ц а 28

Содержания химических элементов в горных породах и водах и соотношения между ними (по данным Удодова и др., 1971)

Химический элемент	Средние содержания элементов				Среднее отношение $\frac{C_{л}}{C_{в}}$
	горных пород ( $C_{л}$ ), $10^{-3}\%$		воды ( $C_{в}$ ), $10^{-7}\%$		
	lim	среднее	lim	среднее	
Ba	3—130	20	0,2—20	2,0	$1 \cdot 10^5$
Mn	20—500	100	10—400	60	$2 \cdot 10^4$
V	1,3—7,6	3,2	0,3—12	1,8	$2 \cdot 10^4$
Cu	2,1—5,5	3,5	1,5—8	2,0	$2 \cdot 10^4$
Pb	1,8—7,2	3,6	0,1—3	0,6	$2 \cdot 10^4$
Ni	1,1—11	3,5	0,2—93	4,3	$8 \cdot 10^3$
Zn	3,6—19	8,3	1,6—200	18	$5 \cdot 10^3$
Co	0,07—2,0	0,4	0,3—10	1,7	$2 \cdot 10^3$

Примечание. Среднее отношение  $\frac{C_{л}}{C_{в}} = 1,5 \cdot 10^4$ .

образования сорбционных литохимических ореолов, безбарьерные элементы-индикаторы которых легко доступны растениям и имеют высокие значения РПК — порядка 10—100. В более редких случаях это влияние может быть связано с непосредственным поглощением элементов индикаторов из подземных вод, обогащенных этими элементами. В связи со сложностью и малой изученностью влияния погребенных гидрохимических ореолов рудных тел на формирование биогеохимических аномалий этот вопрос заслуживает специальных тематических исследований.

Примеры взаимосвязей между биогеохимическими и гидрохимическими ореолами пока еще малочисленны. Это связано с тем, что комплексные геохимические исследования, включающие одновременное изучение растений и грунтовых вод, на рудных месторождениях весьма редки. Результаты таких исследований были опубликованы, в частности, В. Мармо (1954). Биогеохимические аномалии, по его данным, только частично совпадают с гидрохимическими ореолами, оконтуренными при опробовании колодцев, охватывая площадь, смещенную в направлении течения подземных вод на сотни метров. Этот пример показывает (рис. 53), что при установленной связи биогеохимической аномалии с гидрохимическими ореолами и известном направлении движения подземных вод необходимо учитывать возможное смещение биогеохимических аномалий, направление и величина которого зависят от направления и скорости движения этих вод. При детализации и оценке таких аномалий необходимо обращать внимание на головную часть ореола, являющуюся источником гидрохимической, и биогеохимической аномалий.

Результаты комплексных биогеохимических и гидрохимических исследований, полученные Н. И. Боевым (1972) на Квасовском участке, приведены на рис. 54. Как видно на этом рисунке, большинство биогеохимических и гидрохимических аномалий не совпадают собой и часто имеют обратную корреляцию. Этот пример подтверждает результаты наших расчетов о том, что в формировании рудных биогеохимических ореолов большинства элементов-индикаторов основная роль принадлежит литохимическим, а не гидрохимическим ореолам рудных тел и месторождений.

Другие примеры взаимосвязи между гидрохимическими ореолами и биогеохимическими аномалиями приведены в работах П. А. Удова, М. Н. Шварцевой (1969), П. А. Удодова и др. (1971), Н. И. Боева (1970), О. М. Ленилина (1972) и др., сочетающих биогеохимические исследования с гидрохимическими. По их данным, биогеохимические аномалии обычно хорошо совпадают с известными гидрохимическими ореолами. При этом в некоторых случаях площадь биогеохимических аномалий совпадает с площадью минерализации, а в других — контуры их превышают площадь известной рудной минерализации на десятки, а иногда на 100—

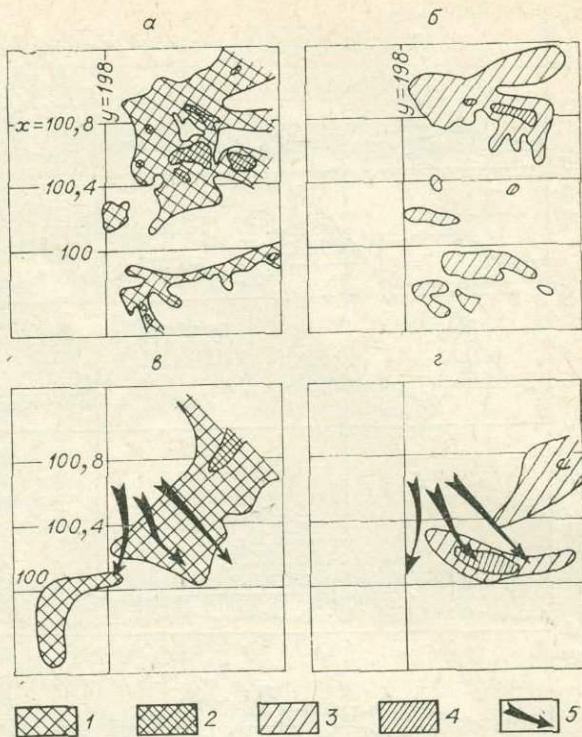


Рис. 53. Соотношение между биогеохимическими и гидрохимическими аномалиями в районе Ноккиа в Финляндии, по данным Мармо, 1954.

Медь: а — в бруснике (1 — 20—30; 2 — > 30 мг/л), в — в воде (1 — 0,5—2,0; 2 — > 2,0 мг/л). Цинк: б — в бруснике (3 — 50—55; 4 — > 55), г — в воде (3 — 5—10; 4 — > 10 мг/л), 5 — основные направления течения грунтовых вод.

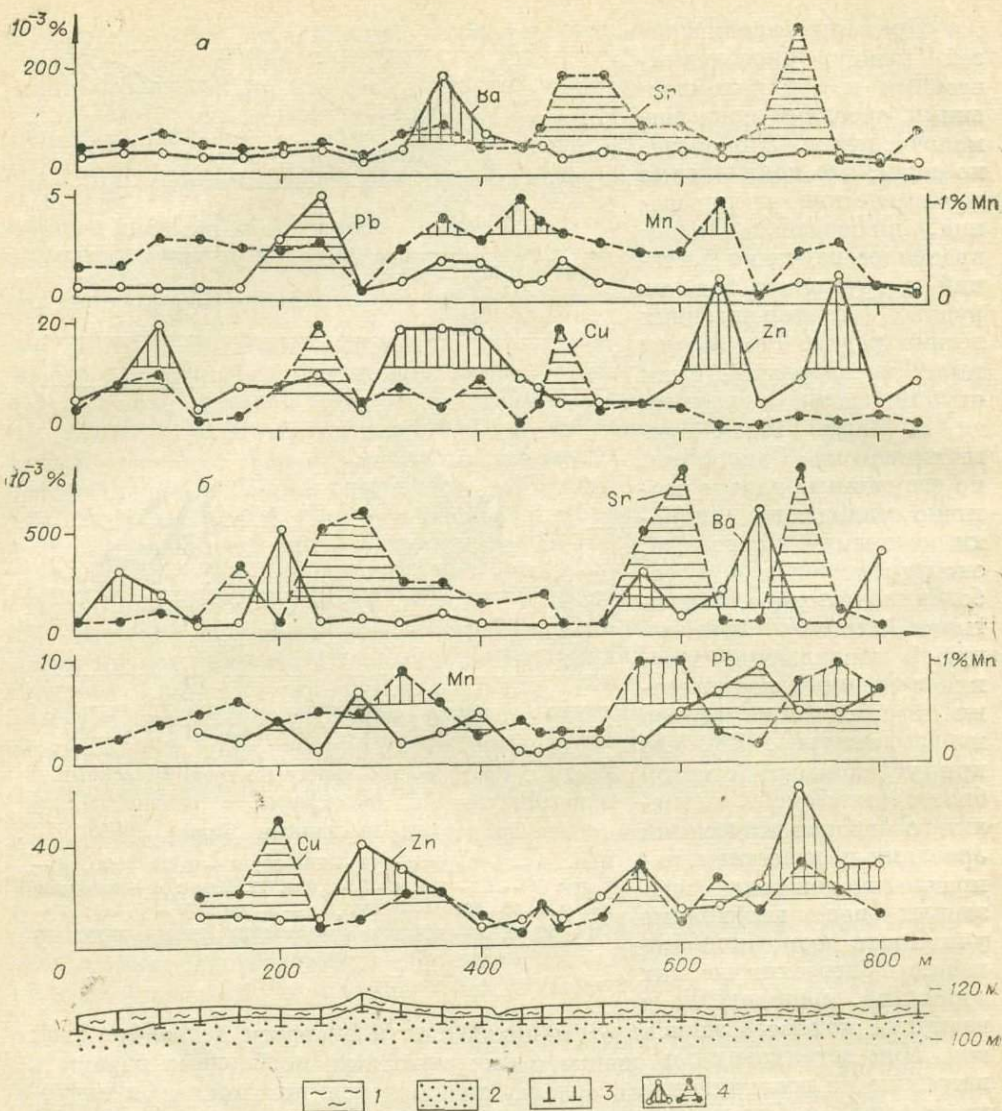


Рис. 51. Литолого-геохимический профиль 2—2 Квасовского участка Береговского рудного поля (по данным Боева, 1972). а — сухой остаток вод; б — растения. 1 — суглинок; 2 — пылеватый песок; 3 — сваяжины; 4 — гидрохимические (слева) и биогеохимические аномалии.

300 м. Очевидно, что увеличение площади биогеохимических аномалий в этих случаях обусловлено наличием гидрохимических ореолов большей площади, чем площадь рудной минерализации. Имеющиеся данные о тесной взаимосвязи между биогеохимическими аномалиями и гидрохимическими ореолами говорят о том, что она отмечается довольно редко. В тех случаях, когда эта связь устанавливается, биогеохимические аномалии могут занимать большую площадь, чем площадь зон минерализации и их литохимических ореолов, и могут смещаться в направлении движения подземных вод. Эти смещения, по имеющимся данным, невелики и измеряются десятками и первыми сотнями метров. Они не могут вносить существенных осложнений в интерпретацию и оценку выявляемых биогеохимических аномалий, но требуют проведения гидрохимических исследований в горных выработках, проходимых при вскрытии и оценке таких аномалий.

## Классификация рудных биогеохимических аномалий

Класс аномалий	Тип аномалий	Эффективность методов выявления			
		биогеохимический	глубинный литохимический	наземный литохимический	гидрохимический
Почвенно-фитогеохимические	Открытых литохимических ореолов	+++	+++	+++*	—
	Ослабленных литохимических ореолов (остаточных и выщелоченных)	+++*	+++	+-+++*	—
Гидро-фитогеохимические Фитогеохимические	Открытых гидрохимических ореолов	+++*	+++	+	+++*
	Погребенных литохимических ореолов	++*	+++	—	—
	Выщелоченных литохимических ореолов	++*	+++	—	—
	Погребенных литогидрохимических ореолов	++*	+++	—	+++
	Погребенных гидрохимических ореолов	++*	+	—	+++

Примечание. Звездочкой выделены методы различной эффективности, наиболее целесообразные для обнаружения рудного объекта с учетом стоимости поисковых работ.

Наиболее интересным для применения биогеохимического метода следует считать класс собственно фитогеохимических аномалий, не сопровождающихся лито-или гидрохимическими аномалиями на дневной поверхности (табл. 29). Такие аномалии наиболее вероятны для сухих степей, полупустынь и пустынь аридного климата, где, вследствие малой биомассы растений, не характерно формирование наложенных почвенно-геохимических аномалий (Малюга, 1956, 1963; Тюрина, Щибрик, 1962; Ермакбаев, Берембеков, 1969; Талипов и др., 1969; Cannon, 1964; Chaffee, Hessin, 1971; и др.). К этому же классу могут быть отнесены рудные биогеохимические аномалии лесной и таежной зон, связанные с погребенными лито-или гидрохимическими ореолами рудных тел, элементы-индикаторы которых имеют низкую интенсивность поглощения растениями ( $RPK < 1,0$ ) и вследствие этого не образуют наложенных почвенно-геохимических ореолов (Авессаломова, Грабовская, 1968). Можно ожидать, что при применении биогеохимических поисков на закрытых площадях к классу фитогеохимических аномалий будут относиться большинство выявляемых рудных биогеохимических аномалий. Определение вероятного класса и типа должно являться одной из задач интерпретации выявленных биогеохимических аномалий.

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Интерпретация результатов биогеохимических съемок имеет много черт, сходных с интерпретацией литохимических и геофизических данных. В то же время она имеет ряд специфических особенностей. Выделение рудных биогеохимических аномалий представляет собой задачу выделения полезных сигналов о рудной минерализации на фоне различных помех. Биогеохимический фон определяется как наиболее вероятное значение содержания элементов-индикаторов в стандартизированных пробах растений для заведомо безрудных участков с однородными геологическими и ландшафтными условиями — т. е. как местный биогеохими-

ческий фон (БГФ). В тех случаях, когда выделение участков, однородных по геологическим и ландшафтным условиям, является затруднительным, определение БГФ удобно производить методом усреднения результатов анализов 4—16 соседних точек на профиле или методом скользящей средней, усредняя результаты анализов на 4—16 соседних точках с перекрытием половины точек. При этом отдельные точки, имеющие концентрации элементов-индикаторов, превышающие 5—10 БГФ, не включаются в определение фоновых значений, а выделяются в качестве локальных биогеохимических аномалий.

Усреднение отдельных значений удобно производить по 4; 8 и 16 точкам, так как в этом случае может использоваться ускоренный метод определения среднего геометрического — метод квадратных корней, который не требует в отличие от обычного логарифмирования содержаний элементов-индикаторов в отдельных пробах. Этот метод, длительное время применяемый в наших исследованиях, заключается в последовательном перемножении пар отдельных значений рассматриваемой совокупности и извлечения из полученного результата квадратного корня. Для удобства последующих вычислений в первую пару берутся максимальная и минимальная цифра рассматриваемой совокупности, во вторую — максимальная и минимальная из оставшихся цифр и так далее (табл. 30). Практически уже на втором или третьем этапе вычислений из полученных квадратных корней можно брать среднее арифметическое, так как при последовательном перемножении максимальных и минимальных значений получаемые квадратные корни отличаются друг от друга значительно меньше, чем исходные цифры. Переходить к расчету средних арифметических вместо средних геометрических можно в том случае, если в полученной совокупности отношение максимальной цифры к минимальной  $\leq 1,5$ . В этом случае значения среднего арифметического и среднего геометрического практически совпадают (см. среднее арифметическое из результатов первого этапа и среднее геометрическое четвертого этапа в табл. 30).

Выделение биогеохимических аномалий осуществляется методами, рекомендуемыми «Инструкцией по геохимическим методам поисков рудных месторождений» (1965), и другими способами, принятыми в данной геологической организации. Кроме минимальных следует выделять надежные аномалии, превышающие 10—30 БГФ, и особо перспективные биогеохимические аномалии наибольшей интенсивности, превышающие 30—100 БГФ. Для таких аномалий на стадии лабораторных исследований необходимо получение дополнительной информации о полном спектре элементов-спутников.

Кроме аномалий отдельных элементов-индикаторов при математической обработке может быть полезным вычисление мультипликативных биогеохимических аномалий безбарьерных элементов по принципам и методам, разработанным для лито-

Таблица 30

Вычисление среднего геометрического методом квадратных корней

Отдельные значения совокупности	Этапы вычислений			
	первый	второй	третий	четвертый
8 (5)*	8,0 (1)	10,2 (1)	11,1	11,3
17 (7)	10,0 (2)	11,2 (2)	11,5	—
6 (3)	11,5 (3)	12,0(1)	—	—
32 (1)	11,8 (4)	11,9(2)	—	—
9 (7)	12,0 (4)	—	—	—
10 (6)	12,6 (2)	—	—	—
22 (3)	12,4 (3)	—	—	—
18 (5)	12,0 (1)	—	—	—
4 (2)	—	—	—	—
14 (8)	Среднее арифметическое 11,4	—	—	—
2 (1)		—	—	—
12 (8)		—	—	—
20 (4)		—	—	—
16 (6)		—	—	—
25 (2)		—	—	—
7 (4)		—	—	—

\* Цифры в скобках показывают номера пар цифр, из произведения которых берется квадратный корень.

химических ореолов (Григорян, 1971). Особенно целесообразно такое вычисление для комплексных биогеохимических ореолов, аномальные концентрации в которых образуют несколько рудных элементов.

Для интерпретации результатов биогеохимических съемок нужно иметь выполненные в одном масштабе следующие материалы: 1) геологическую карту с данными об известных рудных месторождениях и рудопроявлениях района или участка биогеохимической съемки; 2) карту геохимических ландшафтов с данными о мощности и характере рыхлого покрова; 3) карту биогеохимической съемки для основных элементов-индикаторов, на которых результаты анализов различных видов растений должны быть приведены к группе сопоставимых видов; 4) карту геохимической и радиометрической съемок; 5) дополнительные графические материалы, к которым могут быть отнесены — карта растительно-почвенных коэффициентов (карта РПК), карта геоботанической съемки, карты и графики геофизических съемок, графики распределения элементов-индикаторов и их индикаторных отношений (например, Pb/Cu, Pb/Co, Ni/Co, Ag/Cu, Ag/Bi, Mo/Cu, Cs/Li, Mo/Ra, Pb/Ra и т. д.).

Целью интерпретации выявленных биогеохимических аномалий является разбраковка их на предположительно \* рудные и безрудные, выделение аномалий первой и второй очереди, получение информации о типе рудной минерализации, приблизительной глубине залегания рудных тел и их ореолов рассеяния, о вероятной концентрации элементов-индикаторов в рудах и уровне эрозийного среза оруденения на рудных аномалиях. Принципы интерпретации биогеохимических аномалий не отличаются от таковых для литохимических и геофизических аномалий, детально изложенных в соответствующих методических руководствах, сборниках и статьях. Поэтому нами рассматриваются только некоторые особенности интерпретации, специфичные для биогеохимических аномалий.

Следует разграничивать предварительную интерпретацию биогеохимических аномалий на стадии поисковых съемок и окончательную — после проведения детализационных работ. Первая имеет целью решение вопроса: заслуживает ли данная аномалия дальнейшего, более детального геологического, геохимического и геофизического изучения и если заслуживает, то в какой очереди, какими методами и в каких объемах? Задачей окончательной интерпретации является оценка детально изученных биогеохимических аномалий, для которых установлена связь с рудными телами, рудопроявлениями, месторождениями или с перспективными лито- и гидрохимическими ореолами с целью определить целесообразность проведения горно-буровых работ и их первоначальные масштабы.

Основными количественными параметрами, используемыми для разбраковки биогеохимических аномалий, служат данные об их интенсивности и площади, на основании которых по методам, предложенным для интерпретации литохимических ореолов (Соловов, 1952, 1959, 1963; Соловов, Кунип, 1960; Квятковский, Крицук, 1963; Соловов, Дубов, 1965), определяются продуктивность биогеохимического ореола ( $P_{бгх}$ ), равная количеству изучаемого элемента-индикатора в биогеохимическом ореоле в метрпроцентах ( $m \cdot \%$  или  $m^2 \cdot \%$ ) и геологические запасы металла в этом ореоле, в тоннах ( $Q_б$ ). Величины  $P_б$  и  $Q_б$  определяются по формулам, аналогичным для литохимических ореолов (Соловов, 1959, 1963) с использованием РПК для перехода от биогеохимического ореола к литохимическому. Эти количественные расчеты можно проводить только для безбарьерных и высокобарьерных рудных элементов и видов растений. Следует иметь в виду, что расчеты продуктивности биогеохимических ореолов целесообразны не всегда. При решении вопроса об условиях, когда

\* При дальнейшем изложении слово «предположительно» для краткости опускается.

эти расчеты будут давать удовлетворительные результаты, можно исходить из опыта количественной интерпретации литохимических ореолов, считая, что для лито- и биогеохимических ореолов эти методы будут эффективны приблизительно в одинаковых условиях, в основном в автономных ландшафтах.

Кроме количественных параметров и сведений о геологическом положении и геофизических полях к признакам, используемым при предварительной интерпретации, должны быть отнесены данные о типичных элементах-спутниках рудных месторождений, являющихся объектами поисковых работ, о спектре элементов в биогеохимической аномалии (Каблуков, Сочеванов и др., 1964; Соловов, Гаранин, 1972). Изучение этого спектра предусматривается в рациональном комплексе лабораторных исследований биогеохимических проб. Спектр элементов биогеохимической аномалии может дать информацию о вероятном минеральном типе рудной минерализации и об уровне ее эрозионного среза или о типе литохимического ореола, являющегося ее источником (рудный, ложный, безрудный, породный). Поэтому он служит важным признаком как предварительной, так и окончательной интерпретации биогеохимических аномалий.

Количественными параметрами, которые целесообразно использовать при интерпретации биогеохимических аномалий, являются значения растительно-почвенного коэффициента в пределах фона ( $РПК_{\phi}$ ) и биогеохимической аномалии ( $РПК_a$ ). Вычисленные значения этих параметров в пределах обследуемой биогеохимической аномалии в сопоставлении с типичными для района могут дать предварительную информацию о типе и глубине залегания рудной минерализации или ее вторичных ореолов, являющихся источником биогеохимической аномалии. Использование  $РПК$  для получения информации о типе рудной минерализации основывается на зависимости этого параметра от минеральных и химических форм нахождения рудных элементов в корнеобитаемой зоне (см. табл. 3). Использование данных о значениях  $РПК_a$  для оценки глубины залегания рудных тел и их литохимических ореолов или о питании растений за счет гидрохимических ореолов рассеяния основано на имеющихся сведениях о их максимальных значениях. Практически для всех химических элементов максимальные истинные значения  $РПК$  не превышают 100. Поэтому аномально высокие расчетные значения  $РПК_a$ , превышающие 100, могут рассматриваться как показатель того, что эти значения являются кажущимися и что горизонт питания растений рассматриваемым химическим элементом располагается ниже опробованных горизонтов почв и рыхлого покрова.

Высокие значения  $РПК_a$ , превышающие максимальные величины этого параметра ( $>100$ ), могут быть получены также при преимущественно водном питании растений, так как значения растительно-водного коэффициента ( $РВК$ ) превышают значения  $РПК$  соответствующих химических элементов обычно в  $10^3$ — $10^4$  раз (см. табл. 1). Грунтовые воды, выходящие на дневную поверхность в виде источников или мочажин, могут быть определены визуально. Если питание растений происходит из погребенных гидрохимических ореолов, то интерпретация их возможна только после вскрытия горными выработками гидрохимических ореолов и их изучения. Интерпретация биогеохимических аномалий, источником которых являются погребенные гидрохимические ореолы, может быть сделана по геоботаническим признакам, указывающим на связь данного фитоценоза с грунтовыми водами (Востокова, 1961; Викторов и др., 1959, 1962; Викторов, Востокова, 1961; Биогеохимические и геоботанические исследования, 1972), и по химическому составу растений, некоторые компоненты которых в этих условиях тесно связаны с химическим составом питающих их грунтовых вод.

Группировка растений по относительному содержанию (ОСВР) цинка (ветви или побеги древесных и кустарниковых, надземные части травянистых растений)

Деконцентра- торы. ОСВР= =0,04—0,24	Слабые деконцен- траторы. ОСВР= =0,25—0,40	Основная группа, ОСВР=0,4—2,5			Слабые концент- раторы. ОСВР= =2,6—4,0	
		пониженного поглощения, ОСВР=0,4—0,7	среднего поглощения, ОСВР=0,7—1.4	повышенного поглощения, ОСВР=1,5—2,5		
Хвощ, <i>Equi- setum</i> sp. 1...0,15	Можжевельник <i>Juniperus communis</i> 0,35	Дуб, <i>Quercus garriana</i> . . . . . 0,4	Рябина, <i>Sorbus sitchensis</i> . . . . . 0,7	Лиственница, <i>Larix si- birica</i> . . . . . 1,0	Осина, <i>Popu- lus tremulus</i> . . . . . 1,6	Береза, <i>Betula verrucosa</i> 2,8
		<i>Q. robur</i> . . . . . 0,6	Жимолость, <i>Lonicera microphylla</i> . 0,7	<i>L. dahurica</i> . . . . . 1,1		
Е. sp. 2... 0,07	<i>J. scorolorum</i> 0,3 <i>J. sp.</i> . . . . . 0,4	Клен, <i>Acer glabrum</i> 0,5	<i>L. coerulea</i> . . . . . 0,6	<i>L. occidentalis</i> . . . . . 1,0	<i>P. tremuloides</i> . . . . . 1,4	<i>B. platyphylla</i> . . . . . 3,3
		<i>A. Macrophyllum</i> 0,6	<i>L. picera</i> sp. . . . . 0,8	Сосна, <i>Pinus silvestris</i> 1,2		
Яблоня, <i>Malus communis</i> . . . . . 0,07	Туя, <i>Thuja pli- cata</i> . . . . . 0,4	<i>A. Circinatum</i> . . . . . 0,3	<i>L. xylosteum</i> . . . . . 0,7	<i>P. sibirica</i> . . . . . 1,1	<i>P. trichocarpa</i> . . . . . 1,9	<i>B. fontinalis</i> 2,6 <i>B. papyrifera</i> 2,9
		<i>Rosa</i> sp. . . . . 0,4	Бузина, <i>Sambucus</i> sp . . . . . 0,7	<i>P. contorta</i> . . . . . 0,9		
Груша, <i>Pyr- us com- munis</i> . . . . . 0,07	Ильм, <i>Ulmus sp.</i> . . . . . 0,3	<i>Rosa nutkana</i> . . . . . 0,5	Карагана, <i>Caragana altaica</i> . . . . . 0,7	<i>P. ponderosa</i> . . . . . 1,1	<i>B. pubescens</i> 3,0 <i>B. nana</i> . . . . . 4,2	<i>B. humilis</i> . . . . . 3,2 <i>B. rotundifolia</i> . . . . . 3,5
		<i>Rosa</i> sp. . . . . 0,5	Подбел, <i>Andromeda polyfolia</i> . . . . . 0,8	<i>P. monticola</i> . . . . . 1,2		
. . . . . 0,07	Бузина, <i>Sam- bucus glauca</i> . . . . . 0,3	<i>Prunus emargi- nata</i> . . . . . 0,5	Ольха, <i>Alnus tenuifolia</i> . . . . . 0,8	<i>P. albicaulis</i> . . . . . 1,0	<i>S. sp. 2...</i> 1,8 <i>S. sp. 3...</i> 2,1	<i>B. rotundifolia</i> . . . . . 3,5
		<i>P. demissa</i> . . . . . 0,5	<i>A. rubra</i> . . . . . 0,8	Ирга, <i>Cotoneaster mela- nocarpa</i> . . . . . 1,3		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	<i>P. cerasus</i> . . . . . 0,6	<i>A. sinuata</i> . . . . . 0,8	Багульник <i>Ledum</i> . . . . . 1,3	<i>S. sitchensis</i> 1,8 <i>S. starkiana</i> 1,7	Среднее для березы. . . . . 3,1
		Боярышник, <i>Crataegus sanguinea</i> . . . . . 0,7	<i>C. douglasii vitis</i> . . . . . 0,6	<i>P. engelmanni</i> . . . . . 1,4		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	<i>C. douglasii vitis</i> . . . . . 0,6	Ольховник, <i>Alnus fruticosa</i> . . . . . 0,8	<i>P. glauca</i> . . . . . 1,2	Среднее для ивы. . . . . 1,8	
		Брусника, <i>Vaccinium vitis idaea</i> . . . . . 0,7	Курильский чай, <i>Potentilla fruti- cosa</i> . . . . . 0,8	Ель, <i>Picea obovata</i> . . . . . 1,7		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	<i>V. scoparium</i> . . . . . 0,6	Смородина, <i>Ribes pauciflorum</i> . . . . . 0,9	<i>P. sitchensis</i> . . . . . 1,0	Среднее для осины. . . . . 1,6	
		<i>V. membranaceum</i> 0,6	<i>R. lacustre</i> . . . . . 0,8	<i>P. engelmanni</i> . . . . . 1,4		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	Пихта, <i>Abies grandis</i> . . . . . 0,8	<i>R. lasustre</i> . . . . . 0,8	<i>P. glauca</i> . . . . . 1,2	Среднее для ивы. . . . . 1,8	
		<i>A. lasiocarpa</i> . . . . . 0,9	Пихта, <i>Abies grandis</i> . . . . . 0,8	Таволга (спирея), <i>Spi- raea media</i> . . . . . 1,3		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	<i>A. amabilis</i> . . . . . 0,8	<i>A. sibirica</i> . . . . . 1,0	<i>S. trilobata</i> . . . . . 1,7	Среднее для ивы. . . . . 1,8	
		<i>A. sibirica</i> . . . . . 1,0	Лещина, <i>Corylus californica</i> . . . . . 0,9	<i>S. lucida</i> . . . . . 1,3		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	Лещина, <i>Corylus californica</i> . . . . . 0,9	Тсуга, <i>Tsuga heterophylla</i> . . . . . 0,9	Малина, <i>Rubus parviflo- rus</i> . . . . . 0,8	Среднее для осины. . . . . 1,6	
		<i>R. demissa</i> . . . . . 0,5	Барбарис, <i>Berberis sibirica</i> . . . . . 1,0	<i>R. sachalinensis</i> . . . . . 1,3		
. . . . . 0,07	. . . . . 0,3	Барбарис, <i>Berberis sibirica</i> . . . . . 1,0	Рододендрон, <i>Rhododendron dahu- rica</i> . . . . . 1,0	<i>R. sp.</i> . . . . . 1,6	Среднее для ивы. . . . . 1,8	
		Рододендрон, <i>Rhododendron dahu- rica</i> . . . . . 1,0	Голубика, <i>Vaccinium uli- ginosum</i> . . . . . 1,4	<i>Pseudotsuga, Pseudotsu- ga menziesii</i> . . . . . 1,4		

Примечание. Среднее содержание цинка в золе растений, имеющих ОСВР=1,0, равно 0,03—0,1%.

Приблизительная глубина залегания руд и их литохимических или гидрохимических ореолов может быть определена в результате опробования на биогеохимической аномалии растений разных видов или разновозрастных растений одного вида, имеющих различные глубины проникновения корневых систем в рыхлый покров. Зная максимальные глубины проникновения корней этих растений, можно сделать приближенную оценку глубины залегания источников аномальных концентраций химических элементов в растениях, если в почвенном покрове их аномальные содержания не обнаруживаются. Этот метод исследования — назовем его биогеохимическим каротажем — целесообразно применять для детализации и окончательного подтверждения биогеохимических аномалий, производя соответствующее опробование в эпицентрах биогеохимических аномалий и на участках их с различными геологическими или ландшафтными условиями.

Важная для интерпретации биогеохимических аномалий информация может быть получена при использовании отношения содержаний элементов-индикаторов в золе растений с учетом типичных значений их РПК. Они могут дать информацию о соотношении их в рудных телах или литохимических ореолах, важную для определения вероятного типа рудной минерализации. Определение количественных соотношений между химическими элементами может дать также ценную информацию об уровне эрозионного среза рудных тел и их первичных литохимических ореолов, являющихся источником биогеохимической аномалии. Критерии и методы определения уровня эрозионного среза месторождений и рудопоявлений по литохимическим данным разработаны хорошо и находят практическое применение (Григорян, Янишевский, 1968; Григорян, 1971; Соловов, 1972; Григорян, Овчинников, 1972). Очевидно, что с поправками на особенности поглощения соответствующих рудных элементов растениями они могут использоваться. Полезны для интерпретации аномалий и определения мест заложения горных выработок сведения о зональном строении биогеохимических ореолов (Захаров, 1969).

Для проведения интерпретации биогеохимических аномалий по описанной системе необходимо иметь следующий комплект рабочих таблиц: 1) группировка растений по глубине проникновения их корневых систем; 2) содержания и отношения содержаний основных элементов-индикаторов в типичных горных породах и рудах, включая данные по уровням их среза, в почвах, водах и растениях нормальных и аномальных геохимических ландшафтов района работ; 3) типичные значения РПК растений основных групп для используемых индикаторов в пределах фоновых и аномальных геохимических ландшафтов и для различных минеральных типов руд и их литохимических ореолов (см. табл. 3); 4) относительные предельные (барьерные) концентрации этих элементов в доминантных видах растений изучаемого района (см. табл. 12—14); 5) относительные содержания основных рудных элементов в различных видах растений, произрастающих в одинаковых условиях — ОСВР (пример для цинка приведен в табл. 31), включая данные об ОСВР при различных концентрациях этих элементов в почвах или безбарьерных видах растений (см. табл. 21—24). В настоящее время данных для составления этих 5 комплектов таблиц не достаточно. Поэтому накопление фактических данных и обобщение имеющихся материалов для их составления должно стать задачей дальнейших биогеохимических работ, имеющих целью поиски рудных месторождений. Полный комплект этих таблиц составит справочник по поисковой биогеохимии, необходимый для научно-обоснованного планирования, проведения поисковых работ и интерпретации выявляемых биогеохимических аномалий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство известных к настоящему времени результатов опытно-методических биогеохимических исследований были получены на месторождениях и рудопоявлениях, имеющих выходы руд и их первичных ореолов рассеяния на дневную поверхность. Эти исследования дали возможность выявить, в основном, в последние годы, зависимость биогеохимических аномалий от минеральных форм элементов-индикаторов в рудах и их литохимических ореолах, наличие и влияние барьеров поглощения у растений, распределение этих элементов в различных органах и накопления различными видами, произрастающим на фоновых участках и рудных месторождениях. Полученные результаты еще неполны, отрывочны и, конечно, не характеризуют все рудные месторождения и разнообразие природных условий. Поэтому на месторождениях с открытыми литохимическими ореолами необходимы дальнейшие опытно-методические работы с целью количественного анализа влияния минеральных и химических форм элементов-индикаторов на интенсивность поглощения растениями и биогеохимические аномалии, изучения барьеров поглощения и выявления безбарьерных элементов-индикаторов, видов, частей и времени опробования растений в условиях конкретных районов. Дополненные специальными исследованиями с выращиванием растений в искусственных условиях, моделирующих основные влияния природных и физиологических факторов на формирование биогеохимических аномалий, эти работы дадут возможность применять биогеохимический метод в оптимальных условиях с высокой эффективностью.

Биогеохимические исследования на месторождениях с закрытыми или выщелоченными литохимическими и гидрохимическими ореолами проведены к настоящему времени в небольших объемах. На известных объектах с такими ореолами также необходимы опытно-методические биогеохимические исследования, сочетающиеся с минералогическим и геохимическим изучением руд и их первичных и вторичных литохимических ореолов рассеяния; нужны и гидрохимические исследования. В основу программы таких работ должно быть положено следующее: изучение глубинности биогеохимических поисков по различным видам растений, глубины проникновения корневых систем в рыхлый покров, влияния гидрохимических ореолов на рудные биогеохимические аномалии, разработка метода биогеохимического каротажа, основанного на изучении биогеохимических аномалий в растениях с различными глубинами корневых систем, исследование влияния и разработка методов исклю-

чения влияния геохимических ландшафтов на результаты биогеохимических съемок. Кроме этих моментов, специфических для месторождений с погребенными рудами и их ореолами, должны рассматриваться и вопросы программы биогеохимических исследований на месторождениях с открытыми ореолами.

Результаты, изложенные в настоящей книге, позволяют выделить четыре основных фактора формирования рудных биогеохимических аномалий: 1) минеральные и химические формы элементов-индикаторов в рудах и их литохимических ореолах; 2) характер контакта корней растений с рудами и их лито- и гидрохимическими ореолами; 3) барьеры поглощения у растений по отношению к большим концентрациям рудных элементов в питающей среде и 4) масштаб оруденения.

Выделение и учет этих факторов формирования рудных биогеохимических аномалий позволяют дать рекомендации, повышающие эффективность биогеохимических поисков. К ним относятся: 1) применение биогеохимии при поисках месторождений благоприятных минеральных типов руд и отказ от применения при поисках типов месторождений, непригодных для выявления биогеохимическим методом; 2) использование в качестве индикаторов руд безбарьерных или высокобарьерных химических элементов, видов, органов и частей органов растений, предельные концентрации в которых значительно превышают местный биогеохимический фон и не препятствуют формированию достаточно контрастных аномалий; отказ от применения биогеохимических поисков, если это условие является невыполнимым; 3) использование для биогеохимического опробования растений с глубокопроникающими корневыми системами; 4) использование биогеохимии для поисков и оконтуривания отдельных рудных жил и прожилковых зон с богатой рудной минерализацией на участках известных рудных полей, перспективных геохимических и геофизических аномалий и геологических структур.

При практическом применении биогеохимических поисков необходимо иметь в виду экономические и организационные факторы. Анализ затрат на различные поисковые методы показывает, что биогеохимический метод следует применять в основном на территориях с трудными условиями ведения поисковых работ, где геологическая съемка и маршрутные поиски, наземные литохимическая и радиометрическая съемки верхней части рыхлого покрова оказываются неэффективными. Целесообразнее использовать зимний период. Экономические характеристики биогеохимических и глубинных литохимических поисков показывают, что их стоимости выравниваются при глубине отбора литохимических проб, равной 0,7—1,0 м. При возможности получения с помощью биогеохимии информации, соответствующей глубинной литохимической съемке, затраты на биогеохимическую съемку меньше, чем на глубинную литохимию: в 3 раза — при отборе литохимических проб на глубине 2,0 м; в 10 раз — при 4,0 м; в 30 раз — при 10—15 м и в 100 раз при отборе литохимических проб на глубине 30—35 м.

Особенности формирования и интерпретации биогеохимических аномалий над рудными телами с открытыми и погребенными лито- и гидрохимическими ореолами указывают на возможность количественной оценки

биогеохимических аномалий. Серии палеток, рассмотренные в книге, являются первой попыткой их применения для наиболее сложных условий формирования биогеохимических аномалий над погребенными литохимическими ореолами. Начатая в этом направлении работа должна завершиться составлением альбома палеток рудных биогеохимических ореолов, которые могут использоваться в практике поисковых работ. Актуален также вопрос о систематизации многочисленных количественных данных, относящихся к биогеохимическим поискам рудных месторождений, с целью составления справочника по поисковой биогеохимии.

## ЛИТЕРАТУРА

- Авессаломова И. А., Грабовская Л. И. Биогеохимические исследования при поисках редкометалльных месторождений в условиях южно-таежных ландшафтов.— В кн.: Биогеохимические поиски в различных ландшафтах. М., Изд. ОНТИ ВИЭМС, 1968, с. 3—7.
- Агроресомелиорация. М., Сельхозгиз, 1956, 744 с.
- Анисиимов Л. А. К вопросу о возможности разгрузки подземных вод через водоупорную кровлю.—Изв. вузов. Нефть и газ, 1963, № 10, с. 15—17.
- Аристов В. В. Методика поисков месторождений твердых полезных ископаемых.— В кн.: Теоретические основы поисков и разведки твердых полезных ископаемых. Т. 1. М., «Недра», 1968, с. 237—277.
- Бабаев Ф. М. К содержанию свинца в почвах и растениях Филизчайского месторождения.—Уч. зап. Азерб. ун-та, 1968, № 2, с. 37—41.
- Бабичка Н. Золото в организмах.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., ИЛ, 1954, с. 373—426.
- Баранов В. И. Об усвоении радиоактивных элементов растениями.—«Докл. АН СССР», 1939, т. 24, № 9, с. 945—949.
- Бардюк В. В., Иванов П. В. Сезонные изменения содержания микроэлементов в растениях.— В кн.: Геоморфологические ландшафтные и биогеохимические исследования в Приамурье. М., «Наука», 1968, с. 171—175.
- Баркан Я. Г., Химич Г. Г., Журавлева Л. И. Об определении нескольких микроэлементов в солянокислой вытяжке из почв.— В кн.: Методы определения микроэлементов в природных объектах. М., Изд-во МГУ, 1968, с. 276—277.
- Бертон Г. Применение меченых атомов для исследования развития корневой системы.— В кн.: Изотопы в сельском хозяйстве. М., ИЛ, 1961, с. 83—94.
- Беус А. А. Использование математических методов при геохимических поисковых работах.—«Сб. трудов Всесоюз. заочн. политехн. ин-та», М., 1969, вып. 38, с. 48—74.
- Беус А. А., Беренгилова В. В., Грабовская Л. И., Кочемасов Г. Г., Леонтьева Л. А., Ситни А. А. Геохимические поиски эндогенных месторождений редких элементов (на примере тантала). М., «Недра», 1968, 246 с.
- Биогеохимические поиски в различных ландшафтах. М., изд. ОНТИ ВИЭМС, 1968, 24 с.
- Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, 288 с.
- Биогеохимические и геоботанические исследования. Вып. 11. Л., «Недра», 1972, 280 с.
- Боев Н. И. Особенности миграции микроэлементов в условиях Береговского рудного района.— В кн. Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине, Т. 1. Л., «Наука», 1970, с. 26.
- Бондаренко С. С. О динамике подземных вод Западно-Сибирского артезианского бассейна.— Изв. вузов. Геол. и разв., 1961, № 4, с. 96—106.
- Буркин И. А. Физиологическая роль и сельскохозяйственное значение молибдена. М., «Наука», 1968, 294 с.
- Важенни И. Г., Карасева Г. П. О формах калия в почвах и калийное питание растений.—«Почвоведение», 1959, № 3, с. 11—21.
- Васлев Г. В. Об унификации приемов извлечения из почв доступных растениям форм макро- и микроэлементов.— В кн.: Методы определения микроэлементов в природных объектах. М., Изд-во МГУ, 1968, с. 260—261.
- Вахромеев Г. С. Геохимические методы поисков и разведки редкометалльных пегматитов.—«Тр. Иркутского политехн. ин-та», 1966, вып. 30, с. 171—183.
- Вахромеев Г. С. Сравнение эффективности лито-, гидро- и биогеохимического метода поисков рудных месторождений.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, «Наука», 1968, с. 294—298.
- Вернадский В. И., Виноградов А. П. О химическом элементарном составе рясок Lemna как видовом признаке.—«Докл. АН СССР. Сер. А», 1931, № 6, с. 148—152.

- Вершинин А. С. Особенности биогеохимических поисков урановых месторождений в зоне гумидного климата.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 150—156.
- Викторов С. В., Востокова Е. А. Основы индикационной геоботаники. М., Госгеолтехиздат, 1961, 87 с.
- Викторов С. В., Востокова Е. А., Вышивкин Д. Д. Краткое руководство по геоботаническим съемкам. М., Изд-во МГУ, 1959, 166 с.
- Викторов С. В., Востокова Е. А., Вышивкин Д. Д. Введение в индикационную геоботанику. М., Изд-во МГУ, 1962, 227 с.
- Виленский Д. Г. Почвоведение. М., Сельхозгиз, 1957, 456 с.
- Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М., Изд. АН СССР, 1957, 279 с.
- Власюк П. А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Киев, «Наукова думка», 1969, 516 с.
- Востокова Е. А. Геоботанические методы поисков подземных вод в засушливых областях СССР. М., Госгеолтехиздат, 1964, 88 с.
- Галецкий А. С., Викторова Н. А., Сравнительная оценка эффективности различных геохимических методов в условиях северо-западной части Украинского щита.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, «Наука», 1968, с. 145—147.
- Гармонов И. В., Иванов А. В., Сугробов В. М. Области питания и разгрузки подземных вод юго-восточной части Западно-Сибирской низменности.— В кн.: Проблемы гидрогеологии, М., Госгеолтехиздат, 1960, с. 71—82.
- Гетманчук В. О., Иванчиков В. П., Журавлева В. Л., Щибрик В. И. Опыт разработки и перспективы применения биогеохимического метода поисков рудных месторождений в Казахстане.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 59—65.
- Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков. М., Госгеолтехиздат, 1957, 298 с.
- Гинзбург И. И., Росман Г. И., Муканов К. М., Борисевич И. В., Гольцман Ю. В., Иванов И. Б., Чернышев И. В. Применение геохимических методов при металлогенетических исследованиях рудных районов. М., «Недра», 1966, 296 с.
- Глазовская М. А. Методические указания для проведения геохимических поисков медноколчеданных месторождений на Южном Урале по вторичным ореолам и потокам рассеяния. М.— Уфа, Изд-во МГУ, 1960, 76 с.
- Глазовская М. А. «Ложные» геохимические аномалии, их генезис и принципы диагностики.— В кн.: География почв и геохимия ландшафтов. М., Изд-во МГУ, 1967, с. 63—83.
- Глазовская М. А., Макунина А. Л., Павленко И. А., Божко М. Г., Гаврилова И. П. Геохимия ландшафтов и поиски полезных ископаемых на Южном Урале. М., Изд-во МГУ, 1961, 182 с.
- Грабовская Л. И. Биогеохимические методы поисков. М., изд. Госгеолкома СССР, 1965, 64 с.
- Грабовская Л. И., Астрахан Е. Д. Биогеохимические и геоботанические исследования при поисках редкометалльных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1963, 64 с.
- Грабовская Л. И., Кузьмина Г. А. Опыт применения биогеохимического метода при поисках редкометалльных месторождений в районе развития сплошной многолетней мерзлоты.— В кн.: Вопросы прикладной геохимии. Вып. II. М., «Недра», 1971, с. 98—108.
- Григорян С. В. Первичные геохимические ореолы гидротермальных месторождений, методы их изучения и практического использования. Автореф. докт. дисс. М., 1971, 74 с.
- Григорян С. В., Овчинников Л. Н. К вопросу об интерпретации геохимических аномалий.— В кн.: «Литохимические поиски рудных месторождений». Алма-Ата, «Наука», 1972, с. 68—80.
- Григорян С. В., Янинский Е. М., Эндеогенные геохимические ореолы рудных месторождений. М., «Недра», 1968, 204 с.
- Григорьев А. М. К вопросу о возможности применения биогеохимического метода поисков золота в Бурятии.— «Материалы по геол. и полезн. ископ. БурАССР», Улан-Удэ, 1962, вып. 8, с. 92—99.
- Грушечная Т. Н. Влияние высоких доз фосфорных удобрений на развитие, урожай и химический состав яровой пшеницы.— «Агрохимия», 1964, № 4, с. 39—51.
- Грушечная Т. Н. О методике определения запаса усвояемых фосфатов в опытах с высокими дозами фосфорных удобрений.— «Агрохимия», 1969, № 9, с. 113—123.
- Долшов-Добровольский В. В., Клименко Ю. В. Рациональный анализ руд. М., Металлургиздат, 1947, 190 с.
- Дорфман М. Д., Буесен И. В., Дудкин О. Б. Некоторые данные по избирательному растворению минералов.— «Тр. Минер. музея АН СССР», 1959, вып. 9, с. 167—171.
- Егорова И. С. Биогеохимические поиски медно-никелевых и оловянных руд в Енисейском и Яно-Индибирском регионах.— В кн.: Геохимические поиски в областях криогенеза. М., изд. НИИГА, 1970, с. 69—73.

- Ездаков В. И., Ездакова Л. А. Использование биогеохимического метода при разведке на бериллий.—*Изв. вузов. Геол. и разв.*, № 3, 1968, с. 89—92.
- Ездакова Л. А. Литий в растениях, влияние его на некоторые физиологические процессы и урожай.—*Автореф. канд. дисс.*, Душанбе, 1962, 23 с.
- Ездакова Л. А. Содержание лития в растениях Зеравшанской долины.—*«Бот. журн.»*, 1966, т. 51, № 5, с. 727—730.
- Ездакова Л. А. К биогеохимии лития.— В кн.: *Биохимия растений*. Улан-Удэ, 1969, с. 50—66.
- Ермембаев А., Берембеков К. Опыт производства биогеохимической съемки в условиях песчаных пустынь Южного Прибалхашья.— В кн.: *Биогеохимические поиски рудных месторождений*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 171—176.
- Жбанов Э. Ф., Базаров Д. Б., Резанов И. Н. Геолого-геоморфологические условия геохимических поисков в Южной Бурятии.—*Матер. по геол. и полезн. ископ. БурАССР*, Улан-Удэ, 1971, вып. 14, с. 141—143.
- Жбанов Э. Ф., Жбанова К. И., Солодянкин М. В., Чабаненко В. А., Григорьев А. М. Результаты опытно-методических исследований по биогеохимическому методу поисков в БурАССР.— В кн.: *Микроэлементы в сельском хозяйстве и медицине*. Т. 1. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1966, с. 233.—234.
- Жизневская Г. Я. Об эффективности совместного внесения молибдена и меди под сельскохозяйственные культуры.— В кн.: *Микроэлементы и урожай*. Рига, Изд-во АН ЛатвССР, 1961, с. 77—103.
- Жизневская Г. Я., Бороденко Л. И. Медь и железо в метаболизме бобовых растений.— В кн.: *Биологическая роль меди*. М., «Наука», 1970, с. 30—38.
- Жуковский П. М. Ботаника. М., «Высшая школа», 1964, 667 с.
- Загоскин В. А., Загоскина Е. И., Лохтина Н. М., Мясников А. А., Юдин Б. Н., Шиманский А. А. Основные результаты опытно-методических биогеохимических исследований в Восточной Сибири.— В кн.: *Биогеохимические поиски рудных месторождений*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 23—41.
- Засухин Г. К., Логина Л. А. Опыт применения геохимических поисков колчеданных месторождений на Южном Урале. М., Госгеолтехиздат, 1963, 135 с.
- Захаров Е. П. К методике биогеохимического метода поисков кобальтовых руд в условиях Тувинской АССР.— В кн.: *Биогеохимические поиски рудных месторождений*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969а, с. 157—170.
- Захаров Е. П. Ландшафтно-геохимические и геоботанические исследования в связи с биогеохимическими поисками кобальтовых и кобальто-медных руд Тувы.— В кн.: *Биогеохимические поиски рудных месторождений*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969б, с. 138—150.
- Захаров Е. П., Захарова Г. П. О возможности применения биогеохимического метода поисков кобальтовых руд в зимних условиях.— В кн.: *Биогеохимические поиски рудных месторождений*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 238—246.
- Захаров Е. П., Захарова Г. П. Результаты биогеохимических исследований при поисках кобальтовых и кобальто-медных руд в районе Хову-Аксинского месторождения.— В кн.: *Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине*. Т. 1. Л., «Наука», 1970, с. 102—103.
- Зырин Н. Г., Стойлов Г. П. Использование метода проростков для определения подвижности микроэлементов в почвах и оценка химических методов.—*«Агрохимия»*, 1964, № 7, с. 74—79.
- Ивашов П. В. Гипергенные ореолы вольфрама и молибдена в условиях Дальнего Востока.—*Матер. II сессии Сиб. секции СГПМ по проблеме «Научные основы геохим. методов поисков полезных ископ.»*, Улан-Удэ, 1972а, вып. 2, ч. 1, с. 46—48.
- Ивашов П. В. Литий в растениях на редкометалльных пегматитах.— В кн.: *Микроэлементы в биосфере и применение их в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока*. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1972б, с. 66—67.
- Ивашов П. В., Бардюк В. В. Биогеохимические исследования на оловорудном месторождении Дальнего Востока.—*«Геохимия»*, 1967, № 2, с. 228—232.
- Ивашов П. В., Бардюк В. В. Ландшафтно-геохимические исследования на рудных месторождениях юга Дальнего Востока. Л., «Наука», 1970, 138 с.
- Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. М., «Недра», 1965, 227с.
- Кабдуков А. Д., Сочеванов Н. Н., Баранов Э. Н., Боголюбов А. Н., Вертепов Г. И., Григорян С. В., Майорова Е. А., Разумовский Н. К., Тулин В. Н., Янишевский Е. М. Использование ореолов рассеяния урана и элементов-спутников при поисках и разведке гидротермальных урановых месторождений. М., «Недра», 1964, 194 с.
- Карбух Д. В. Биогеохимические исследования в районе трех штатов.— В кн.: *Геохимические методы поисков рудных месторождений*. М., ИЛ, 1954, с. 461—484.
- Касимов Н. С. Геохимия ландшафтов зон разломов.—*Автореф. канд. дисс.* М., 1972, 39 с.
- Квятковский Е. М., Крицук И. Н. Количественная интерпретация вторичных ореолов рассеяния свинца. «Зап. Ленингр. горн. ин-та», 1963, т. 45, вып. 2, с. 3—9.

- Кибаленко А. П., Сидоршина Т. Н. Поступление и распределение бора в растениях сахарной свеклы.— В кн.: Применение микроэлементов в сельском хозяйстве. Киев, «Наукова думка», 1965, с. 38—47.
- Ковалевский А. Л. О естественных радиоактивных элементах в растениях.— В кн.: Труды конференции «Микроэлементы в сельском хозяйстве, биологии и медицине». Новосибирск, 1960, с. 36—38.
- Ковалевский А. Л. О естественных радиоактивных элементах в растениях.— «Изв. СО АН СССР. Серия биол.», 1962, № 4, с. 108—114.
- Ковалевский А. Л. Некоторые вопросы теории и практики биогеохимического метода поисков месторождений. «Геол. и геофиз.», 1963, № 6, с. 68—77.
- Ковалевский А. Л. Об относительных биогеохимических параметрах и методах их статистической обработки.— В кн.: Микроэлементы в Сибири, Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1965а, вып. 4, с. 31—42.
- Ковалевский А. Л. О поглощении радия различными видами растений.— «Изв. СО АН СССР. Сер. биол.-мед. наук», 1965б, вып. 1, № 4, с. 43—47.
- Ковалевский А. Л. Естественные радиоактивные элементы в растениях Сибири. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1966а, 96 с.
- Ковалевский А. Л. К биогеохимии вольфрама в растениях.— «Геохимия», 1966б, № 6, с. 737—744.
- Ковалевский А. Л. К методике определения естественной радиоактивности растений.— В кн.: Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1967а, с. 616—620.
- Ковалевский А. Л. Совещание по биогеохимическим методам поисков месторождений полезных ископаемых.— «Сов. геология», 1967б, № 2, с. 149—153.
- Ковалевский А. Л. О методике определения глубинности биогеохимического метода поисков месторождений полезных ископаемых. «Геол. и геофиз.», 1967в, № 8, с. 111—113.
- Ковалевский А. Л. Некоторые закономерности поглощения естественных радиоактивных элементов растениями.— В кн.: Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1967г, с. 93—98.
- Ковалевский А. Л. Некоторые особенности биогеохимии фтора в почвах и растениях.— «Микроэлементы в Сибири», Улан-Удэ, 1967д, вып. 5, с. 27—31.
- Ковалевский А. Л. О связи биогеохимии растений с минералогическим составом горных пород и руд.— В кн.: Минералого-петрографические очерки Забайкалья. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1968а, с. 148—153.
- Ковалевский А. Л. К методике определения усвояемых растениями форм химических элементов в почвах.— В кн.: Происхождение и свойства почв Забайкалья. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1968б, с. 211—247.
- Ковалевский А. Л. Закономерности поглощения химических элементов растениями как важный фактор в разработке биогеохимического метода поисков.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969а, с. 66—82.
- Ковалевский А. Л. О биогеохимических параметрах растений и некоторых особенностях изучения их.— В кн.: Биогеохимия растений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969б, с. 195—214.
- Ковалевский А. Л. Основные закономерности формирования химического состава растений.— В кн.: Биогеохимия растений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969в, с. 6—28.
- Ковалевский А. Л. О реальной точности исследования и оптимальной погрешности анализов биогенных материалов.— «Агрохимия», 1969г, № 5, с. 136—139.
- Ковалевский А. Л. Относительное содержание микроэлементов в видах растений как их стабильный биогеохимический параметр.— В кн.: Биологическая роль микроэлементов и их применение в сельском хозяйстве и медицине. Т. 1. Л., «Наука», 1970, с. 45—46.
- Ковалевский А. Л. О физиологических барьерах поглощения химических элементов растениями.— В кн.: Микроэлементы в биосфере и применение их в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1971, с. 134—144.
- Ковалевский А. Л. Биогеохимические поиски урановых месторождений.— «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 1, с. 557—562.
- Ковалевский А. Л. Возможности эффективного применения биогеохимических поисков в Сибири.— В кн.: Вторичные ореолы рассеяния и их использование при поисках рудных месторождений на территории Сибири. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1973, с. 225—252.
- Ковалевский А. Л. Условия применения биогеохимических поисков рудных месторождений.— «Докл. АН СССР», 1974, т. 218, № 1, с. 199—202.
- Ковальский В. В., Засорина Е. Ф. К биогеохимии стронция.— «Агрохимия», 1965, № 4, с. 78—88.
- Ковальский В. В., Гололобов А. Д. Методы определения микроэлементов в органах и тканях животных, растениях и почвах. М., «Колос», 1969, с. 47.

- Кожара В. Л. Литохимические и биогеохимические поиски в мерзлотных ландшафтах.—«Разведка и охрана недр», 1964, № 3, с. 13—19.
- Колесников В. А. Корневая система плодовых и ягодных растений и методы ее изучения. М., Сельхозгиз, 1962, 191 с.
- Колесников В. А. Размеры и размещение корневой системы яблони в зависимости от различных факторов.—«Изв. ТСХА, 1963, вып 2(51), с. 85—100.
- Колесников В. А. Повышение урожайности в плодоводстве и роль корневой системы.— В кн.: Корневая система и продуктивность сельскохозяйственных растений. Киев, «Урожай», 1967, с. 14—19.
- Колесников В. А., Резниченко А. Г., Кузнецов М. Д., Ефимов В. А. Плодоводство. М., «Колос», 1966, 431 с.
- Комекий М. М., Мицкевич Б. Ф. Распределение микроэлементов в древесных растениях Украинского Полесья.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 91—100.
- Крамер П., Козловский Т. Физиология древесных растений. М., Гослесбумиздат, 1963, 627 с.
- Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959, 411 с.
- Красников В. И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М., «Недра», 1965, 399 с.
- Круглова Е. К. Медь и ее формы в почвах голодной степи и хлопчатника.—«Почвоведение», 1962, № 5, с. 83—90.
- Круглова Е. К. Система вытяжек, применяемых для определения подвижности микроэлементов в карбонатных почвах.— В кн.: Материалы всесоюзного совещания по диагностике обеспеченности почв микроэлементами и методам их определения. М., изд. МСХ СССР, 1968, с. 13—15.
- Леванидов Л. Я. Марганец в минеральном питании растений.— В кн.: Биогеохимическая роль марганца в растениях. Челябинск, 1967, с. 3—11.
- Лепилин О. М. Вторичные ореолы рассеяния бериллия в рыхлых породах и почвах.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, «Наука», 1972, с. 312—315.
- Лепилин О. М., Надененко В. Н. Результаты опытно-методических работ по изучению вторичных ореолов рассеяния в условиях интенсивного промывного режима.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, «Наука», 1968, с. 24—27.
- Маврицкий Б. Ф. Западно-Сибирский артезианский бассейн.—«Тр. лаб. гидрогеол. проблем», М., 1962, т. 39, с. 1—150.
- Максимов Н. А. Краткий курс физиологии растений. М., «Сельхозгиз», 1958, 559 с.
- Мальгин М. А. Некоторые закономерности поглощения марганца растениями Алтая.— В кн.: Биогеохимия растений. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1969, с. 67—75.
- Малюга Д. П. Опыт применения биогеохимического метода поисков рудных месторождений на Южном Урале.—«Тр. биогеохим. лаб.», М., 1954, т. 10, с. 28—59.
- Малюга Д. П. Геохимические основы поисков руды по растениям и почвам (биогеохим. метод).— Автореф. докт. дисс. М., 1956, 26 с.
- Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. М., АН СССР., 1963, 264 с.
- Малюга Д. П., Айвазян А. Д. Поглощение микроэлементов различными видами растений при разной степени полиметаллической минерализации.— В кн.: Микроэлементы в растениях. Улан-Удэ, 1969, с. 150—155.
- Майборода Н. М. О вымывании элементов питания из злаковых культур атмосферными осадками.—«Агрохимия», 1971, № 8, с. 135—140.
- Мармо В. Биогеохимические исследования в Финляндии.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., ИЛ, 1954, с. 443—460.
- Михайлов И. П., Михайлова Р. П., Солнцева Н. П. Опыт составления крупномасштабной ландшафтно-геохимической карты горнотаяжных районов для целей поисков полезных ископаемых.— В кн.: География почв и геохимия ландшафтов. М., Изд-во МГУ, 1967, с. 135—167.
- Мицкевич Б. Ф. Геохімічні ландшафти Українського щита. Київ, «Наукова думка», 1971, 173 с.
- Мосолов И. В. Физиологические основы применения минеральных удобрений. М., «Колос», 1968, 175 с.
- Муромцев И. А. Активная часть корневых систем плодовых растений. М., «Колос», 1969, 247 с.
- Мятнев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы.—«Изв. АН СССР. Отд. техн. наук», 1947, № 9, с. 1069—1088.
- Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л., «Недра», 1965, 759 с.
- Ольховський Л. Г. Ефективність нових способів внесення добрив під цуркові буряки.— В кн.: XIV наукова конференція, присвячена 40-річчю УРСР. Умань, 1958, с. 40—45.
- Онищенко И. И. Анатомическое строение корня яблони на различных глубинах его залегания в почве.— В кн.: Корневая система и продуктивность сельскохозяйственных растений. Киев, «Урожай», 1967, с. 121—125.

- Ордынец Л. Т. Влияние марганца, кобальта и меди на прорастание семян и развитие проростков дубильных растений.— Автореф. канд. дисс. Оренбург, 1967, 14 с.
- Островская Л. К., Яковенко Г. М., Гамаюнова М. С. Комплексная недостаточность микроэлементов в известковых почвах.— Тр. биогеохим. лаб., М., 1960, т. XI, с. 93—101.
- Пейве Я. В. Микроэлементы в сельском хозяйстве нечерноземной зоны. М., Изд-во АН СССР, 1954, 108 с.
- Пейве Я. В. Руководство по применению микроудобрений. М., Сельхозиздат, 1963, 224 с.
- Перельман А. И. Очерки геохимии ландшафта. М., Географгиз, 1955, 392 с.
- Перельман А. И. Геохимия ландшафта М., Географгиз, 1961, 490 с.
- Перельман А. И. Геохимические ландшафты сухих степей и литогеохимические поиски по вторичным ореолам.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений по их вторичным ореолам и потокам рассеяния. Алма-Ата, «Наука», 1968, с. 11—12.
- Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М., «Недра», 1972, 288 с.
- Питулько В. М. Особенности выделения биогеохимических аномалий в горных мерзлотно-таежных ландшафтах.— В кн.: Геохимические поиски в областях криогенеза. Л., изд. НИИГА, 1970, с. 84—86.
- Поликарпочкин В. В. Распределение концентраций рудообразующих элементов на склонах при самопроизвольном движении рыхлых масс и действию склоновых водных потоков.— В кн.: Математические методы геохимических исследований. М., «Наука», 1966, с. 119—151.
- Поликарпочкин В. В. О некоторых особенностях распределения элементов в ореолах рассеяния и факторах, их определяющих.— «Геология рудн. месторожд.», 1967, № 26, с. 91—94.
- Поликарпочкин В. В. О выщелачивании элементов из растений и его роли для геохимии элементов в биосфере.— В кн.: Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве и медицине Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969а, с. 69—70.
- Поликарпочкин В. В. Потоки рассеянных месторождений полезных ископаемых.— Автореф. докт. дисс., Л., 1969б, 72 с.
- Поликарпочкин В. В. Применение биогеохимических методов поисков рудных месторождений в условиях Сибири.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ. СО АН СССР, 1969в, с. 9—22.
- Поликарпочкин В. В., Поликарпочкина Р. Т. Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. М., «Наука», 1964, 106 с.
- Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехиздат, 1952, 676 с.
- Польнов Б. Б. Первые стадии почвообразования на массивно-кристаллических породах. «Почвоведение», 1945 № 7, с. 327—338.
- Поскотин Д. Л., Любимова М. Применение биогеохимических методов при поисках медноколчеданных месторождений.— «Геохимия», 1963, № 6, с. 603—611.
- Поскотин Д. Л., Юшков Ю. П., Юринский И. А., Снегирев А. Д. О биогеохимических поисках медноколчеданных и редкометалльных месторождений на Урале.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 42—52.
- Почвоведение. М., «Колос», 1969, 543 с.
- Просвирина Л. В. Влияние марганца на накопление таннидов и алкалоидов в некоторых нимфейных.— В кн.: Биогеохимическая роль марганца в растениях. Челябинск, 1967, с. 44—51.
- Пчелкин В. У. Почвенный калий и калийные удобрения. М., «Колос», 1966, 336 с.
- Разиц Л. В., Рожков И. С. К геохимии золота в коре выветривания и биосфере провинции многолетней мерзлоты на Алданском щите.— В кн.: Геохимические исследования золота и редких элементов в Якутии. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 3—22.
- Разиц А. В., Рожков И. С. Геохимия золота в коре выветривания и биосфере золото-рудных месторождений Кураханского типа. М., «Наука», 1966, 254 с.
- Ревут И. Б. Физика почв. Л., «Колос», 1972, 336 с.
- Ринькис Г. Я. Методы ускоренного колориметрического определения микроэлементов в биологических объектах. Рига, изд. АН ЛатвССР, 1963, 123 с.
- Ринькис Г. Я. Проблемы изучения содержания микроэлементов в почвах и растениях химическими методами.— В кн.: Микроэлементы в сельском хозяйстве и медицине. Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1968, с. 761—773.
- Родин Н. А. Динамика накопления микроэлементов меди, свинца и марганца некоторыми зерновыми культурами.— Автореф. канд. дисс. Оренбург, 1970, 22 с.
- Рубин С. С. Развитие корневой системы плодовых деревьев.— «Збірник наукових праць Уманського с.-г. ін-ту», Київ-Харків, 1948, вып. 9, с. 92—98.
- Рубин С. С. Корневая система плодовых деревьев.— «Сб. научных трудов Уманского сельхозинститута», Киев, 1953, вып. XI, с. 5—32.
- Рубин С. С. Корневая система плодовых растений и ее значение для роста и урожайности деревьев.— В кн.: Корневая система и продуктивность сельскохозяйственных растений, Киев, «Урожай», 1967, с. 3—13.

- Сает Ю. Е. Биогенная миграция бора — теоретическая основа биогеохимического метода поисков борных месторождений.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, 1969, изд. БФ СО АН СССР, с. 204—220.
- Самойлова А. П. Метод коэффициентов в биогеохимических исследованиях.— «Разведка и охрана недр», 1961, № 1, с. 11—15.
- Сергеев Е. М. Грунтоведение. М., Изд-во МГУ, 1959, 334 с.
- Силин-Бектурин А. И. Движение подземных вод.— В кн.: Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений. М., изд. АН СССР, 1959, с. 53—59.
- Соколов А. В. Распределение питательных веществ в почве и урожай растений. М., изд. АН СССР, 1947, 329 с.
- Соловов А. П. К вопросу об оценке перспективности оруденения по результатам металлотметрической съемки.— «Разведка и охрана недр», 1952, № 4, с. 48—50.
- Соловов А. П. Основы теории и практики металлотметрических съемок. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1959, 266 с.
- Соловов А. П. Глубинные металлотметрические съемки.— В кн.: Сборник избранных лекций по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Алма-Ата, 1963, с. 161—176.
- Соловов А. П. Оценка гипергенных геохимических аномалий при поисках масштаба 1 : 50 000.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, 1972, с. 53—67.
- Соловов А. П., Кунип Н. Я. Металлотметрическая съемка по потокам рассеяния в горных районах.— «Сов. Геология», 1960, № 5, с. 32—46.
- Соловов А. П., Дубов Р. И. Применение методов физико-математического анализа при геохимических поисках.— «Бюлл. НТИ», М., 1965, № 6, с. 5—22.
- Соловов А. П., Гаранин А. В. Геохимические спектры аномалий и установление различий между сходными объектами.— В кн.: Литохимические поиски рудных месторождений. Алма-Ата, 1972, с. 148—164.
- Солодянкин М. В., Жбанов Э. Ф., Жбанова К. И. Методика полевого озоления флоро-металлотметрических проб.— «Матер. по геол. и полезн. ископ. БурАССР», Улан-Удэ, 1966, вып. 10, с. 230—233.
- Сочеванов Н. Н. Опробование рыхлых отложений по вертикали на стадии предварительной разведки.— «Разведка и охрана недр», 1958, № 1, с. 12—21.
- Стрельников В. Н. Влияние тонины помола извести на урожай растений, качество растительной продукции и изменение свойств почвы.— Автореф. канд. дисс. М., 1969, 21 с.
- Суйковский З. Влияние микроэлементов на пигментную систему и фотосинтез и их топография в растениях.— В кн.: Микроэлементы в сельском хозяйстве и медицине. Киев, Госсельхозиздат, 1963, с. 202—205.
- Тайсаев Т. Т. Особенности поглощения микроэлементов даурской лиственницей, произрастающей над различными горными породами.— В кн.: Биогеохимия растений Улан-Удэ, Бур. кн. изд-во, 1969, с. 177—182.
- Тайсаев Т. Т. Геохимические ландшафты Курбино-Еравнинского рудного района Бурятии и геохимические поиски.— В кн.: Геохимические поиски в областях криогенеза. Л., изд. НИИГА, 1970, с. 93—95.
- Тайсаев Т. Т. Ландшафтно-геохимические основы районирования территории Бурятской АССР.— «Матер. II сессии сиб. секц. СГПМ по проблеме «Научные основы геохимических методов поисков полезных ископаемых». Улан-Удэ, 1972, вып. 2, ч. 1, с. 104—109.
- Тайсаев Т. Т., Жбанов Э. Ф. Применение геохимических методов поисков в условиях БурАССР.— В кн.: Ежегодник по работам 1970 г. Ин-та геохимии СО АН СССР, Иркутск, 1971, с. 334—337.
- Талипов Р. М. Биогеохимические поиски полиметаллических и медных месторождений в условиях Узбекистана. Ташкент, Изд-во «ФАН» УзбССР, 1966, 105 с.
- Тарасов В. Н., Жбанов Э. Ф. Районирование территории БурАССР по условиям ведения поисково-съемочных работ.— «Матер. по геол. полезных ископаемых Бур. АССР». Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1971, вып. 14, с. 135—140.
- Тарасов В. Н., Жбанов Э. Ф. Районирование территории Бурятии по трудности опоскования.— «Матер. II сессии сиб. секции СГПМ по проблеме «Научные основы геохим. методов поисков полезных ископаемых», Улан-Удэ, 1972, вып. 2, ч. 1.
- Тимофеев В. Д. Подготовка проб для минералогического анализа способом избирательного растворения.— «Разведка и охрана недр», 1962, № 2, с. 44—47.
- Тиссен С. Геохимические и фитобиологические связи в свете прикладной геофизики.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., ИЛ, 1954, с. 325—372.
- Ткалич С. М. Опыт использования растений в качестве индикаторов при геологических поисках и разведках.— «Вестн. Дальневосточного филиала АН СССР», № 32(5), 1938, с. 3—25.
- Ткалич С. М. Содержание железа в растениях как поисковый признак.— «Природа», 1953, № 1, с. 93—95.
- Ткалич С. М. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений.— В кн.: Материалы совещания геологов Восточной Сибири и Дальнего Востока по методике геолого-съемочных и поисковых работ. Чита, 1956, с. 86—101.

- Ткалич С. М. Практическое руководство по биогеохимическому методу поисков рудных месторождений. М., Госгеолтехиздат, 1959, 52 с.
- Ткалич С. М. Биогеохимические аномалии и их интерпретация.—Матер. по геол. и полезн. ископ. Иркутской области, Иркутск, 1961, вып. 3 (30), 41 с.
- Ткалич С. М. Некоторые общие закономерности содержания химических элементов в золе растений.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 83—90.
- Ткалич С. М. Фитогеохимический метод поисков месторождений полезных ископаемых. Л., «Недра», 1970, 175 с.
- Тюрнина Г. И., Щибрик В. П. Опыт биогеохимического изучения участка полиметаллического месторождения в Центральном Казахстане. — В кн.: Матер. по геол. и полезн. ископ. Центр. Казахстана. М., 1962, вып. 2, с. 44—48.
- Удодов Н. А., Шварцева Н. М. Режимные биогеохимические наблюдения на участке кварц-сульфидной минерализации.— В кн.: Микроэлементы в биосфере и их применение в сельском хозяйстве Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, изд. БФ СО АН СССР, 1969, с. 84—85.
- Удодов П. А., Паршин П. Н., Левашов Б. М., Лукин А. А., Рассказов Н. М., Копылова Ю. Г., Коробейникова Е. С., Солодовникова Р. С., Фатеев А. Д., Шестаков Б. И. Гидрогеохимические исследования Кольвань-Томской складчатой зоны. Томск, изд. ТГУ, 1971, 283 с.
- Уоллес А. Поглощение растениями питательных веществ из растворов. М., «Колос», 1966, 280 с.
- Уоррен Г. В., Делавольт Р. Н., Ириш Р. И. Предварительное исследование биогеохимии железа и марганца.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., ИЛ, 1954, с. 485—504.
- Фазовый (рациональный) анализ руд цветных металлов, продуктов их обогащения и металлургической переработки. М., изд. Центр. ин-та инф. цвет. металлургии, 1961, 245 с.
- Фазовый химический анализ руд и минералов. Л., изд-во ЛГУ, 1962, 202 с.
- Фидлер В. Листовой анализ в плодоводстве. М., «Колос», 1970, 95 с.
- Филишова Н. А. Фазовый анализ руд цветных металлов и продуктов их переработки. М., «Металлургиздат», 1963, 225 с.
- Флерова Т. П., Флеров В. Е. Опыт проведения биогеохимических и геоботанических поисков в Джунгарском Алатау. В сб. «Матер. по геол. и полезн. ископ. Южного Казахстана». Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1964, с. 144—152.
- Фредрикссон, Эрикссон, Расмусон, Гане, Эдварсон, Лев. Изучение миграции продуктов деления по цепочке почва — растение — животное.— В кн.: Радиобиология и радиационная медицина. М., «Госатомиздат», 1959, с. 106—147.
- Фултон Р. Б. Поиски цинка при помощи полуколичественных химических анализов почвы.— В кн.: Геохимические методы поисков рудных месторождений. М., ИЛ, 1954, с. 169—190.
- Хокс Х. Е., Уэбб Дж. С. Геохимические методы поисков минеральных месторождений. М., «Мир», 1964, 487 с.
- Храмченко С. И. Руды молибдена и вольфрама.— В кн.: Минералогическое исследование руд цветных и редких металлов. М., «Недра», 1967, с. 133—150.
- Шабынин Л. Л. Особенности методики гидрогеохимических исследований некоторых золоторудных месторождений Забайкалья, Кузнецкого Алатау и Горного Алтая. Автореф. канд. дисс. Томск, 1967, 21 с.
- Шагояц С. А. Типы горизонтальной и вертикальной зональности артезианских вод в бассейнах различных структур и факторы их определяющие.— В кн.: Проблемы гидрогеологии. М., Госгеолтехиздат, 1960, с. 69—70.
- Шахова Е. Г. Применение лито-, флоро- и торфOMETаллометрии при поисках месторождений редкометалльных гранитных пегматитов натро-литиевого типа. Л., изд. ОНТИ ВИТР, 1964, с. 5—25.
- Швыряева А. М. О возможности применения биогеохимического метода при поисках борного сырья.— В кн.: Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. М., Госгеолтехиздат, 1957, с. 305—312.
- Эрперт С. Д. Корневые системы некоторых древесных растений в условиях больших палин северо-западной части Прикаспийской низменности.— «Тр. ин-та леса», т. 25, М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 136—174.
- Эрперт С. Д. Рост и влагопотребление вяза мелколистного в условиях различной влагообеспеченности в Северо-Западном Прикаспии. М., Изд-во АН СССР, 1962, 64 с.
- Юсупов Р. Г., Талипов Р. М. О некоторых особенностях распределения микроэлементов в растениях в районе Кураминских гор УзССР.— В кн.: Биогеохимические поиски рудных месторождений. Улан-Удэ, 1969, с. 112—121.
- Ясуе Н. С. Руды свинца, цинка и меди.— В кн.: Минералогическое исследование руд цветных и редких металлов. М., «Недра», 1967, с. 52—69.
- Ahrens K. Die kutikuläre Exkretion der Laubblätterss.— «Jahrb. Wiss. Botanik», 1934, Bd. 80, N. 3, S. 248—309.

- Brooks R. R. Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration. Harper a. Row, 1972, 290 p.
- Brooks R. R., Lyon G. L. Biogeochemical prospecting for molybdenum in New Zealand.—«New Zeal. J. Sci.», 1966, v. 9, № 3, p. 706—718.
- Burton G. W., Devani E. H., Karter R. L. Root distribution and activity in southern grasses measured by yields, drought symptoms and P<sup>32</sup> uptake.—«Agron. J.», 1954, v. 46, № 5, p. 229—233.
- Cannon H. L. The effect of uranium — vanadium deposits on the vegetation of the Colorado Plateau.—«Am. J. Sci.», v. 250, № 10, 1952, p. 735—770.
- Cannon H. L. The biogeochemistry of vanadium.—«Soil. Sci.», 1963, v. 96, № 3, p. 196—204.
- Cannon H. L. Geochemistry of rocks and related soils and vegetation in the Yellow Cat area, Grand Country, Utah.—«U. S. Geol. Surv. Bull.», 1964, № 1176, p. 1—127.
- Chaffee M. A., Hessin T. D. An evaluation of geochemical sampling in the search for concealed porphyry copper — molybdenum deposits on pediments in Southern Arizona.—«Can. Inst. Min. a. Met.», 1971, sp. v. 11, p. 401—409.
- Fortescue J. A. C., Hornbrook E. H. W. Progress report on biogeochemical research at the Geological Survey of Canada, 1963—1966.—«Geol. Surv. Can.», 1967, paper 67—23, p. I, 143 p.
- Fortescue J. A. C., Hornbrook E. H. W. Progress report on biogeochemical research at the Geological Survey of Canada, 1963—1966.—«Geol. Surv. Can.», 1969, paper 67—23, p. II, 101 p.
- Fox R. L., Lipps R. C. A comparison of stable strontium and P<sup>32</sup> as tracers for estimating alfalfa root activity.—«Plant a. Soil», 1964, v. 20, № 3, p. 337—350.
- Fox R. L., Lipps R. C., Moore A. W., Rhoades H. F. The distribution and activity of roots in relation to soil properties.—«Proceed. 7th Intern. Congr. of Soil Sci.», 1961, v. 3, p. 260—267.
- Hiatt A. J. Accumulation of potassium and sodium by barley roots in a K — Na replacement series.—«Plant Physiol.», 1969, v. 44, № 11, p. 1568—1532.
- Hiatt A. J. An anomaly in potassium accumulation by barley roots.— I. Effect of anions, sodium concentration and length of absorption period.—«Plant Physiol.», 1970, v. 45, N 3, p. 408—410.
- Hobson G. D. Hammer refraction seismic survey to assist biogeochemical program Lucky Ship., British Columbia.—«Geol. Surv. Can.», paper 68—56, 1969, p. 30—41.
- Hornbrook E. H. W. Biogeochemical prospecting for molybdenum in west-central British Columbia.—«Geol. Surv. Can.», 1969, paper 68—56, p. 1—29.
- Johnson C. M., Pearson G. A., Stout P. R. Molybdenum nutrition of crop plants.—«Plant a. Soil», 1952, v. 4, N 2, p. 178—196.
- Kubota J., Lazar V. A., Luncan L. N. a Beeson K. C. The relationship of soils to molybdenum toxicity in cattle in Nevada.—«Soil. Sci. Soc. Proc», v. 25, № 3, 1961, p. 227—231.
- Lewis A. H. Reducing the teartness of pasture herbage.—«J. Agr. Sci.», 1943, v. 33, p. 1, p. 58—68.
- Lingle J. C., Carolus R. L. Sodium and boron content as influenced by the sodium and boron level of the soil.—«Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.», 1958, v. 71, p. 507—515.
- Lipps R. C., Fox R. L., Koehler F. E. Characterizing root activity of alfalfa by radioactive tracer technique.—«Soil. Sci.», 1957, v. 84, № 3, p. 195—204.
- Lipps R. C., Fox R. L. Root activity of sub-irrigated alfalfa as related to soil moisture, temperature and oxygen supply.—«Soil. Sci.», 1964, v. 97, № 1, p. 4—12.
- Maier K. H., Cattani R. A. Growth and copper content of anatomical plant parts as influenced by copper supply and time.—«Plant a. soil», 1966, v. 24, № 2, p. 339—342.
- Nicolas D. J. D., Thomas W. D. E. Some effects of heavy metals on plant grown in soil.—«Plant a. Soil.», 1954, v. 5., № 2, p. 182—187.
- Sayre J. D., Morris V. H. The lithium method of measuring the extend of corn root systems.—«Plant Physiol.», 1940, v. 15, № 4, p. 761—764.
- Schatz A., Schalscha E. B., Schatz V. Soil organic matter as a natural chelating material. P. 2: The occurrence and importance of paradoxical concentration effects in biological systems.—«Compost. Sci.», 1964, v. 5, № 1, p. 26—31.
- Specht A. W. Evidence for and some implications of a variation control mechanism in plant composition.—«Soil. Sci.», 1960, v. 89, № 2, p. 83—91.
- Steyn W. J. A. The errors involved in the sampling of citrus and pineapple plants for leaf analysis purposes.— In: Plant Analysis and Fertiliser Problems. Washington, 1961, p. 409—430.
- Wallace A. Regulation of the micronutrient status of plants by chelating agents and other factors. Los Angeles, California, 1971, 309 p.
- Warren H. V., Delavault R. E. Further studies of the biogeochemistry of molybdenum.—«Western Miner», 1965, v. 38, № 10, p. 64—72.
- Warren H. V., Delavault R. E. a. Barakso J. The arsenic content of Douglas Fir as a guide to some gold, silver and base metal deposits.—«Can. Min. a. Met. Bull.», v. 61, № 675, 1968, p. 860—866.
- Warren H. V., Delavault R. E., Routley D. Preliminary studies of the biogeochemistry of molybdenum.—«Trans. Roy. Soc. Can.», 1953, v. 47, III ser., p. 71—75.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>Факторы, влияющие на формирование рудных биогеохимических ореолов . .</b>	<b>5</b>
Минеральные и химические формы рудных элементов в почвах, рыхлом покрове и рудах . . . . .	—
Влияние контакта между корнями растений и рудными ореолами на биогеохимические ореолы . . . . .	26
Физиологические барьеры поглощения у растений . . . . .	38
Масштаб оруденения . . . . .	60
Другие факторы формирования рудных биогеохимических ореолов . .	67
<b>Биогеохимические аномалии над рудными телами с открытыми и погребенными ореолами . . . . .</b>	<b>78</b>
Аномалии над рудными телами с открытыми литохимическими ореолами . . . . .	—
Аномалии над рудными телами с ослабленными литохимическими ореолами . . . . .	84
Аномалии над рудными телами с погребенными литохимическими ореолами . . . . .	88
Корневая активность, уменьшающаяся с глубиной . . . . .	90
Корневая активность растений с двумя максимумами . . . . .	91
Аномалии над рудными телами с погребенными гидро- и литохимическими ореолами . . . . .	93
<b>Интерпретация биогеохимических аномалий . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>106</b>

**Александр Леонидович Ковалевский**

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ  
РУДНЫХ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ**

Ответственный редактор  
*Алексей Александрович Беус*

Редактор *Я. М. Мочалов*  
Художественный редактор *М. Ф. Глазырина*  
Художник *А. Н. Пискун*  
Технические редакторы *А. В. Сурганова, Н. М. Бурлаченко*  
Корректор *В. К. Тришина*

---

Сдано в набор 27 марта 1975 г. Подписано к печати 24 октября 1975 г. МН 02255.  
Формат 70×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типографская № 2. 7,25 печ. л. 10,2 ус. печ. л. 10,4 уч.-изд. л.  
Тираж 1250 экз. Заказ № 487. Цена 1 р. 04 к.

---

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.  
4-я типография издательства «Наука», 630077, Новосибирск 77, Станиславского, 25.

Цена 1 р. 04 к

1578



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ