

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ К.И.САТПАЕВА

**Геологии и нефтегазового дела имени К.Турсыова**  
**Кафедра геологической съемки, поисков и разведки месторождений**  
**полезных ископаемых**



**SATBAYEV**  
**UNIVERSITY**

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС**  
**СТУДЕНТА**

по дисциплине «**Геохимические методы поисков месторождений**  
**полезных ископаемых**»

Алматы, 2022

Учебно-методический комплекс для студентов КазНТУ им. К.И.Сатпаева по учебной дисциплине «Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых» для специальности -«Геология и разведка месторождений полезных ископаемых».

Составитель: Аршамов Ялкунжан Камалвоич, кандидат геолого-минералогических наук, ассоциированный профессор;

#### Аннотация

Рассматриваются теоретические основы геохимических методов поисков рудных месторождений; принципы интерпретации лито-, гидро-, био-, геохимических исследований. Показаны возможности использования особенностей первичных и вторичных ореолов для поисков месторождений полезных ископаемых. Освещены вопросы, связанные с использованием в прикладных геологических исследованиях ландшафтно-геохимической основы.

# 1 УЧЕБНАЯ ПРОГРАММА КУРСА – SYLLABUS

## 1 Информация о преподавателе:

1.1

**Лектор:** кандидат геолого-минералогических наук, ассоц.профессор  
**Аршамов Ялкунжан Камалович**  
(лекции и практические занятия)

Офисные часы: 2 раза в неделю по 1 часу, 318 кабинет, ГУК

Email: [y.arshamov@satbayev.university](mailto:y.arshamov@satbayev.university), сот. тел.: +7 707 817 35 82

Формат обучения – очное

офис: \_\_\_\_\_ 318 ГУК

WhatsApp +7 707 817 35 82

Офис-часы: пятница 10.00-12.00

e-mail: [y.arshamov@satbayev.university](mailto:y.arshamov@satbayev.university)

## 2. Цель и задача курса

**Цель курса:** Целью дисциплины является ознакомление и понимание студентами теоретических основ геохимических методов, на базе которых может быть произведен выбор и применение наиболее рационального метода поисков и обнаружения месторождений полезных ископаемых зависимости от конкретных геологических и ландшафтно-геохимических условий, а также приобретение практических навыков интерпретации и обработке геохимических данных. В результате изучения курса у студентов формируется способность применять и анализировать различную геохимическую информацию.

**Основные задачи изучения курса** сводятся к: изучению форм нахождения элементов в земной коре; усвоению основных факторов миграции элементов; изучению особенностей формирования геохимических ореолов; приобретению навыков математической обработки геохимических данных.

## 3. Описание курса:

Курс предназначен для студентов ОП «6В07202, 6В05201- Геология и разведка МПИ». В рамках курса студент **освоит** практическое использование студентами методов и технологий геохимических поисков месторождений полезных ископаемых на всех этапах геологоразведочных работ (поиски и оценка; разведка и освоение); формирование у студентов необходимых практических навыков по геохимическим методам поисков месторождений полезных ископаемых.

Заключительным этапом курса является сдача экзамена.

## 4. Результаты обучения

*По завершению курса студенты должны знать:* теоретические основы геохимических методов поисков МПИ, формы нахождения элементов в земной коре, общие понятия о геохимических аномалиях, основные закономерности миграции элементов в земной коре, внутренние и внешние факторы миграции элементов, общие закономерности формирования вторичных литохимических ореолов рассеяния, их параметры, виды геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых. *По завершению курса студенты должны уметь:* на базе теоретических основ геохимических методов производит выбор наиболее рационального метода поисков для обнаружения месторождений твердых полезных ископаемых зависимости от конкретных геологических и ландшафтно-геохимических условий. *Личные и ключевые навыки:* обучающиеся приобретут навыки работы в команде при обсуждении плана работы над разделами программы курса, во время подготовки и публичной защиты материалов в виде докладов и презентаций, освоят правила активного и контруктивного слушания, открытости, обратной связи. Приобретут навыки интерпретации геохимических данных. *А также приобретут следующие личные и ключевые навыки:* организаторские навыки, способность находить общий язык; умение быстро принимать решения и уверенность в себе, принимать самостоятельные решения и критически оценивать свои действия.

## 5. Календарно - тематический план:

Неделя	Тема лекции	Тема практической работы	Ссылка на литературу	Задание	Срок сдачи
1	Цели и задачи учебного курса «Геохимические методы поисков МПИ». Становление геохимии как науки изучающей процессы концентрации и рассеяния химических элементов в земной коре.	<b>П-1.</b> Построение геохимических ореолов по данным геохимического опробования	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	1-неделя
2	Основные теоретические положения, используемые в поисковой геохимии. Методы геохимических поисков месторождений полезных ископаемых.	<b>П-1.</b> Построение геохимических ореолов по данным геохимического опробования	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	2-неделя
3	Общие принципы геохимических методов поисков. Условия применения геохимических методов поисков.	<b>П-2.</b> Определение систематических и случайных погрешностей при обработке данных литохимических съемок.	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	3-неделя
4	Основные закономерности миграции элементов в Земной коре.	<b>П-2.</b> Определение систематических и случайных погрешностей при обработке данных литохимических съемок.	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	4-неделя
5	Внутренние и внешние факторы миграции химических элементов.	<b>П-3.</b> Количественная интерпретация вторичных литохимических ореолов рассеяния.	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	5-неделя
6	Геохимические барьеры. Классификация геохимических барьеров. Методологическая основа геохимических поисков месторождений.	<b>П-3.</b> Количественная интерпретация вторичных литохимических ореолов рассеяния.	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	6-неделя
7	Общие понятия о геохимических аномалиях. Геологическая оценка геохимических аномалий. Геохимическое поле и его локальные аномалии.	<b>П-4.</b> Определение соотношения твердого и жидкого стока химических элементов. Выбор рационального метода поисков месторождений	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	7-неделя
8	Геохимические ландшафты. Классификация ландшафтов. Геохимические съемки. Виды и масштабы геохимических съемок (картирования).	<b>П-4.</b> Определение соотношения твердого и жидкого стока химических элементов. Выбор рационального метода поисков месторождений	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	8-неделя
8	<b>Первая промежуточная аттестация</b>				
9	Первичные ореолы рудных месторождений. Оценка первичных ореолов. Зональность первичных ореолов. Оценка продуктивности первичных ореолов и прогноз скрытого оруденения.	<b>П-5.</b> Определение среднего содержания, дисперсию и коэффициента вариации химических элементов. Средние содержание элементов в горных породах.	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	9-неделя
10	Вторичные ореолы месторождений полезных ископаемых. Классификация вторичных	<b>П-6.</b> Определение коэффициента остаточной продуктивности вторичных ореолов рассеяния	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	10-неделя

	ореолов месторождений. Поиски месторождений по вторичным ореолам.				
11	Литогеохимические потоки рассеяния. Геохимические методы поисков по потокам рассеяния.	<b>П-6.</b> Определение коэффициента остаточной продуктивности вторичных ореолов рассеяния	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	11-неделя
12	Литогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.	<b>П-7.</b> Определение миграционной способности элементов и линейной продуктивности в сечении первичного ореола (оценка первичных ореолов и прогноз скрытого оруденения).	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	12-неделя
13	Гидрогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.	<b>П-7.</b> Определение миграционной способности элементов и линейной продуктивности в сечении первичного ореола (оценка первичных ореолов и прогноз скрытого оруденения).	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	13-неделя
14	Биогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.	<b>П-8.</b> Принцип подсчета прогнозных ресурсов по геохимическим данным (по данным детальной литохимической съемки масштаба 1:10000)	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	14-неделя
15	Атмогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.	<b>П-8.</b> Принцип подсчета прогнозных ресурсов по геохимическим данным (по данным детальной литохимической съемки масштаба 1:10000)	[1], [2], [3], [4], [5], [6]	СРС	15-неделя
15	<b>Вторая финальная аттестация</b>				
	<b>Экзамен</b>				

## 6. Литература:

Основная литература	Дополнительная литература
<p>[1] Аршамов Я.К. Пайдалы қазба кенорындарын геохимиялық іздеу әдістері (Қолданбалы геохимия): Оқу құралы (толықтырылған 2-ші басылым). – Алматы: ҚазҰТЗУ, 2021. – 190 бет.</p> <p>[2] Алексеенко В.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Учебник. – Второе издание, пререраб. и доп. – М.: Логос, 2009. – 354 с.</p> <p>[3] Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Учебное пособие. ТПУ. – Томск: Издательство ТПУ, 2011. – 104 с.</p>	<p>[4] Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1985. – 294 с.</p> <p>[5] Соловов А.П., Матвеев А.А., Ряховский В.М. Геохимические методы поисков рудных месторождений. Сборник задач. – М.: Издательство Московского университета, 1978. – 184 с.</p> <p>[6] Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. / А.П.Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.</p>

## 7. Рамка компетенций

Дескрипторы обучения	Компетенции				
	Естественно-научные и теоретико-мировоззренческие	Социально-личностные и гражданские	Общеинженерные профессиональные	Межкультурно-коммуникативные	Специально-профессиональные
Знание и понимание	*		*		*
Применение знаний и	*		*		*

пониманий					
Выражение суждений и анализа действий		*		*	
Коммуникативные и креативные способности		*		*	*
Самообучаемость и цифровые навыки	*			*	*

## 8. График сдачи требуемых работ

№	Виды контроля	Мак балл недели	Недели															Итого макс баллов	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	Выполнение и защита практических работ 1-4	4		*		*		*		*									16
2	Выполнение самостоятельных заданий (СРС)	4				*			*										8
3	1-я промежуточная аттестация (Midterm) – 1 рубежный контроль	6								*									6
4	Выполнение и защита практических работ 5-8	4										*	*		*		*		16
5	Выполнение самостоятельных заданий (СРС)	4											*				*		8
6	2-я финальная аттестация (Endterm) – 2 рубежный контроль	6															*		6
	<b>Итоговый экзамен</b>																		<b>40</b>
	<b>Всего в сумме</b>																		<b>100</b>

## 9. Оценочный рейтинг и возможные итоговые варианты оценок по критериям

Буквенная оценка	GPA	баллы	Критерий
A	4	95-100	Показывает самые высокие стандарты знаний, превышающие объем преподаваемого курса
A-	3,67	90-94	Соответствует самым высоким стандартам знаний
B+	3,33	85-89	Очень хорошо и соответствует высоким стандартам знаний
B	3	80-84	Хорошо и соответствует большинству высоких стандартов знаний
B-	2,67	75-79	Более, чем достаточные знания, приближающиеся к высоким стандартам
C+	2,33	70-74	Достаточные знания, соответствующие общим стандартам
C	2	65-69	Удовлетворяет и соответствует большинству общих стандартов знаний
C-	1,67	60-64	Удовлетворяет, но по некоторым знаниям не соответствует стандартам
D+	1,33	55-59	Минимально удовлетворяет, но по большому спектру знаний не соответствует стандартам
D	1	50-54	Минимально удовлетворительный проходной балл с сомнительным соответствием стандартам
FX	0,5	25-49	Временная оценка: Неудовлетворительные низкие показатели, требуется передача экзамена
F	0	0-49	Не пытался освоить дисциплину. Выставляется также при попытке студента получить оценку на экзамене обманом
I	0	0	Временная оценка: Студент, завершивший большую часть курса успешно, не завершивший итоговые контрольные мероприятия в силу уважительных

			обстоятельств
W	0	0	Студент добровольно снялся с дисциплины и ее не освоил до 6-ой учебной недели
AW	0	0	студент снят с дисциплины преподавателем за систематические нарушения академического порядка и правил

### 10. Критерии оценивания

Каждая работа кроме тестов оценивается по 4 критериям:

- аккуратность и точность (А) – 30% (как точно и аккуратно рассчитана работа);
- творчество и креативность (Т) – 30% (как и каким образом представлена работа);
- полнота и зрелость (З) – 40% (как глубоко, логично и структурно решена работа);
- оригинальность (О) – используется специальный коэффициент 1.0;0.5 или 0.

Критерии	Отлично (0.9-1.0)	Хорошо (0.7-0.9)	Удовлетворительно (0.4-0.7)	Неудовл. (0-0.4)
Аккуратность и точность	Абсолютная точность при изложении ответа, полная широта аналитического и графического подходов решений поставленной задачи	Имеются незначительные неточности (минус 0.1 – за каждый некорректный ответ; минус 0.5 – за неясность изложения аналитического решения)	Имеются значительные неточности (минус 0.1 – за каждый некорректный ответ; минус 0.5 – за неясность изложения аналитического решения)	Работа рассчитана неверно (минус 0.1 – за каждый некорректный ответ; минус 0.5 – за неясность изложения аналитического решения)
Творчество и креативность	Авторский творческий и нестандартный подход с ясным сценарным планом изложения (иметь свою гипотезу)	Стандартный подход в рамках метод.указаний с ясным сценарным планом изложения	Стандартный подход в рамках метод.указаний неясным или сумбурным сценарным планом изложения	Отклонение от минимального стандарта изложения
Полнота и зрелость	Поставленные задачи не только выполнены полностью, но и представлены с дополнениями в виде графика и план-схем-карт	Поставленные задачи выполнены полностью с незначительными огрешностями, (минус 0.1 – за каждый пропущенный случай)	Поставленные задачи выполнены неполностью или со значительными огрешностями, (минус 0.5 – за каждый пропущенный случай)	Поставленные задачи в основной массе не выполнены
Оригинальность	1.0 - работа полностью оригинальна, даны сравнительные гипотезы + своя собственная	0.5 - работа списана у коллеги (коэффициент выставляется обоим)		0 – работа и ее значительные фрагменты заимствованы из других источников без указания оригинальных ссылок

Общая оценка будет рассчитана по формуле:

$$\text{Оценка} = (A + T + З) \times O$$

### Максимальная оценка знаний по видам заданий

Самостоятельная работа студента (СРС)	16
Практические занятия	32
1-я промежуточная аттестация (Midterm)	6
2-я финальная аттестация (Endterm)	6
Итоговый экзамен	40
<b>Итого</b>	<b>100</b>

### 11. Политика поздней сдачи работ

Студент должен прийти подготовленным к лекционным и практическим занятиям. Требуется своевременная защита и полное выполнение всех видов работ (практических, и самостоятельных). Студент не должен опаздывать и пропускать занятия, быть пунктуальным и обязательным. Предусматривается уменьшение максимального балла на 10% за несвоевременно сданные работы. Если Вы вынуждены пропустить промежуточную аттестацию по уважительным причинам, Вы должны предупредить преподавателя заранее до нее, чтобы была возможность сдать пройти рубежный контроль заранее. Пропуск экзамена по неуважительной причине лишает Вас права на его

сдачу. При пропуске экзамена по уважительной причине оформляется специальное разрешение и назначается дата, время и место сдачи экзамена.

Студент не должен опаздывать и пропускать занятия, быть пунктуальным и обязательным. Студент должен прийти подготовленным к лекционным и практическим занятиям. Требуются своевременные сдачи расчетов практических работ, полное выполнение всех видов работ (практических и самостоятельных). Допускается пропуски занятий не более 20%.

## **12. Политика академического поведения и этики**

Будьте толерантны, уважайте чужое мнение. Возражения формулируйте в корректной форме. Плагиат и другие формы нечестной работы недопустимы. Недопустимы подкашивание и списывание во время экзаменов, сдача экзамена за другого студента. Студент, уличенный в фальсификации любой информации курса, получит итоговую оценку «F».

*Активность* на лекционных и практических занятиях обязательна и является одной из составляющих Вашего итогового балла / оценки. Многие теоретические вопросы, подкрепляющие лекционный материал, будут представлены лишь на лекциях. Следовательно, пропуск занятия может повлиять на Вашу успеваемость и итоговую оценку. Каждые два опоздания и/или уходы до окончания занятия *по любым причинам* будут считаться как *одно пропущенное занятие*. Однако посещение занятий само по себе еще не означает увеличение баллов. Необходимо Ваше постоянное активное участие на занятиях. Обязательным требованием курса является подготовка к каждому занятию. Необходимо просматривать указанные разделы учебника и дополнительный материал не только при подготовке к практическим занятиям, но и перед посещением соответствующей лекции. Такая подготовка облегчит восприятие Вами нового материала и будет содействовать Вашему активному приобретению знаний в стенах университета.

В рамках обучения по дисциплине недопустимы любые коррупционные проявления в любой форме. Организатор таких действий (преподаватель, студенты или третьи лица по их поручению) несут полную ответственность за нарушение законов РК.

**Помощь:** За консультациями по выполнению самостоятельных работ, их сдачей и защитой, а также за дополнительной информацией по пройденному материалу и всеми другими возникающими вопросами по читаемому курсу обращайтесь к преподавателю в период его офис часов или через электронные средства связи круглосуточно.

### **При обучении**

Обязательное участие на учебных занятиях согласно расписанию, которая определяет готовность к занятию. В случае отсутствия на занятии студент обязан в течение суток известить преподавателя и объяснить план самостоятельного изучения занятия:

- обязательное прочтение представленных материалов до занятия;
- сдача заданий вовремя. Предусмотрены штрафы -10% за позднюю сдачу;
- 20% неучастия в аудиториях (по уважительной причине с подтверждающими документами) - оценка «F (Fail)»;
- плагиатизм и списывание при выполнении задания не допустимы;
- обязательное использование электронных гаджетов на занятии, что приветствуется, но недопустимо использование на экзамене.

В рамках обучения по дисциплине недопустимы любые коррупционные проявления в любой форме. Организатор таких действий (преподаватель, студенты или третьи лица по их поручению) несут полную ответственность за нарушение законов РК.

Утверждено на заседании кафедры «Геологической съемки, поисков и разведки МПИ».  
Протокол №1 от «26» августа 2022 г.

## **Перечень вопросов для проведения контроля по модулям и промежуточной аттестации.**

### **Вопросы по проведению контроля по 1 модулю**

1. Что является предметом изучения геохимии?
2. Каковы заслуги В.М.Ломоносова в становлении геохимии?
3. Значение открытия Д.И.Менделеева для геохимии.
4. Кто из зарубежных ученых внес весомый вклад в развитие геохимии как науки?
5. Дайте определение «форма нахождения элементов».

6. Каковы основные формы нахождения элементов в земной коре?
7. Какие выделяются типы и виды миграции химических элементов?
8. Что собой представляет ряд последовательного осаждения ионов при их свободной миграции?
9. Что такое «летучесть» и как она влияет на положение элементов в ряду осаждения?
10. Какие существуют типы и классы геохимических барьеров?
11. Как определить контрастность барьера?
12. Как определить на барьере концентрацию элементов?
13. Каковы важнейшие внутренние факторы миграции элементов?
14. Как влияют внутренние факторы на миграцию элементов в земной коре?
15. Как влияют на миграцию элементов температура, давление и степень электролитической диссоциации?
16. Каково влияние окислительно-восстановительной обстановки и жизнедеятельности организмов на миграцию элементов?
17. Что собой представляет геохимическая аномалия?
18. Как подразделяются геохимические аномалии по размерам?
19. Как классифицируются геохимические аномалии?
20. Что такое «ассоциация элементов» и чем она обусловлена?
21. Что такое геохимический ландшафт?
22. Как подразделяются ландшафты?
23. Приведите классификацию ландшафтов.
24. Основные положения геохимических методов поисков.
25. Как подразделяются геохимические съемки по условиям проведения?
26. Как делятся геохимические съемки по целевому назначению?

#### **Вопросы по проведению контроля по 2 модулю**

1. Дайте характеристику первичных ореолов рудных месторождений.
2. Чем отличаются первичные ореолы эндогенных и экзогенных месторождений?
3. Каковы основные особенности первичных ореолов стратиформных месторождений?
4. Каковы основные факторы, обуславливающие геохимическую зональность первичных ореолов постмагматических месторождений?
5. Какова обобщающая схема первичного ореола гидротермального месторождения?
6. Что представляют собой продукты гипергенного разрушения месторождений?
7. Каковы основные факторы, определяющие особенности вторичных ореолов рассеяния?
8. Как делятся вторичные ореолы рассеяния по фазовому состоянию?
9. Как подразделяются вторичные ореолы рассеяния по условиям образования и по признаку доступности для обнаружения?
10. Что такое геохимические параметры?
11. Каковы основные геохимические параметры вторичных ореолов рассеяния?
12. Что характеризует коэффициент рассеяния?
13. Что представляет собой метод «трех уравнений» и где он используется?
14. Что представляют собой потоки рассеяния?
15. Каковы факторы, определяющие геохимические особенности потоков рассеяния?
16. Что характеризуют коэффициенты водной миграции и талассофильности?
17. В каком масштабе могут эффективно проводиться поиски по потокам рассеяния?
18. В каких условиях применяются поиски по потокам и ореолам рассеяния?
19. Как подразделяются литохимические поиски в зависимости от масштаба работ?
20. Как производится отбор проб при литохимических поисках по потокам рассеяния и по ореолам рассеяния?
21. Как производится обработка литохимических проб?
22. Как изображаются результаты литохимических поисков?

23. Как оцениваются выявленные аномалии по литохимическим поискам?
24. Основные задачи гидрохимических методов поисков.
25. Каковы наиболее благоприятные объекты гидрохимических исследований?
26. Дать классификацию водных ореолов.
27. Как производится отбор проб воды? Как изображаются результаты гидрохимических поисков?
28. Где целесообразно проводить биогеохимические методы поисков?
29. Что такое «биологический» барьер и как он учитывается при поисках месторождений полезных ископаемых?
30. Как изображаются результаты биогеохимических методов поисков?
31. Для поисков каких месторождений используется атмосферический метод?
32. Какие рудные элементы фиксируются атмосферическим методом поисков?
33. Как производится отбор проб при атмосферических методах поисков?

#### **Вопросы для подготовки к промежуточной аттестации**

1. Что является предметом изучения геохимии?
2. Каковы заслуги В.М.Ломоносова в становлении геохимии?
3. Значение открытия Д.И.Менделеева для геохимии.
4. Кто из зарубежных ученых внес весомый вклад в развитие геохимии как науки?
5. Дайте определение «форма нахождения элементов».
6. Каковы основные формы нахождения элементов в земной коре?
7. Какие выделяются типы и виды миграции химических элементов?
8. Что собой представляет ряд последовательного осаждения ионов при их свободной миграции?
9. Что такое «летучесть» и как она влияет на положение элементов в ряду осаждения?
10. Какие существуют типы и классы геохимических барьеров?
11. Как определить контрастность барьера?
12. Как определить на барьере концентрацию элементов?
13. Каковы важнейшие внутренние факторы миграции элементов?
14. Как влияют внутренние факторы на миграцию элементов в земной коре?
15. Как влияют на миграцию элементов температура, давление и степень электролитической диссоциации?
16. Каково влияние окислительно-восстановительной обстановки и жизнедеятельности организмов на миграцию элементов?
17. Что собой представляет геохимическая аномалия?
18. Как подразделяются геохимические аномалии по размерам?
19. Как классифицируются геохимические аномалии?
20. Что такое «ассоциация элементов» и чем она обусловлена?
21. Что такое геохимический ландшафт?
22. Как подразделяются ландшафты?
23. Приведите классификацию ландшафтов.
24. Основные положения геохимических методов поисков.
25. Как подразделяются геохимические съемки по условиям проведения?
26. Как делятся геохимические съемки по целевому назначению?
27. Дайте характеристику первичных ореолов рудных месторождений.
28. Чем отличаются первичные ореолы эндогенных и экзогенных месторождений?
29. Каковы основные особенности первичных ореолов стратиформных месторождений?
30. Каковы основные факторы, обуславливающие геохимическую зональность первичных ореолов постмагматических месторождений?
31. Какова обобщающая схема первичного ореола гидротермального месторождения?

## Конспекты лекционных занятий

**Лекция 1.** Цели и задачи учебного курса «Геохимические методы поисков МПИ». Становление геохимии как науки изучающей процессы концентрации и рассеяния химических элементов в земной коре.

*Геохимия* – наука о химическом составе земной коры и процессах миграции, рассеяния и концентрации химических элементов. Зародилась впервые в нашей стране (СССР) в начале XX века.

В создании геохимии как науки исключительную роль сыграли работы В.Н.Вернадского, А.Е. Ферсмана и норвежского ученого В.Н. Гольдшмидта.

За короткий срок своего существования геохимия, развивающаяся на основе двух наук: геологии и химии, сделала гигантские успехи и заняла такое же положение в геологическом цикле наук, как минералогия и петрография.

Геохимия изучает процессы концентрации и рассеяния химических элементов в земной коре.

Как самостоятельная наука геохимия имеет свой предмет и задачи изучения, свои методы и методики исследования.

Объектом геохимических исследований, а следовательно, предметом изучения геохимии являются атомы *химических элементов Земли* в первую очередь. Кроме того, геохимия изучает атомы химических элементов и за пределами Земли – в космических телах и образованиях – *космохимия*.

Еще в 1924 г. В.И. Вернадский определил, что геохимия изучает:

- 1) химические элементы, т.е. атомы земной коры, их историю, их распределение и движение в пространстве – времени, их генетические соотношения;
- 2) количественное и качественное распространение отдельных элементов в земной коре и в отдельных ее оболочках;
- 3) законы перемещения (миграции), рассеяния или накопления элементов с образованием тех мест концентраций, которые мы называем *месторождением*;
- 4) законы сочетания элементов между собой в различных условиях земной коры;
- 5) законы участия элементов в построении почвы, горных пород, живого вещества.

Возникла геохимия на основе учения об *атоме*.

Понятия химический элемент, химический состав минералов и горных пород, признаки отыскания руд и полезных минералов существовали давно. Еще в 460-370 гг. до н.э. в работах Демокрита, Аристотеля и др., а также в работах Авиценны (985-1057), Бойля (1627-1691), Лавуазье (1743-1794) и др.

В работах М.В. Ломоносова (1711-1765 гг.) заложены глубокие геохимические идеи (главным в его работах было химическое направление и естественно исторический подход к явлениям природы), в основании всех воззрений М.В. Ломоносова лежит *гипотеза об атомистическом строении вещества*; он сформулировал закон «сохранения вещества и энергии», являющийся основным законом современного естествознания и имеющий огромное значение для геохимических явлений, особенно для понимания процессов *миграции* химических элементов в природе. В основе геохимических воззрений Ломоносова М.В. лежит идея об *изменчивости мира*, в котором мы живем.

М.В. Ломоносов высказал ряд важных и для современной науки геохимических идей: об условиях образования минералов; о парагенезисе минералов и элементов; о типоморфных свойствах минералов, как геохимических поисковых критериях; о миграции химических элементов; о роли организмов в образовании минералов и многое другое.

Геохимические идеи М.В. Ломоносова наследовали и развивали Севергин В.М., Вернадский В.И., Ферсман А.Е. и др. русские и современные ученые.

Современные представления об атомах химических элементов, основном объекте (предмете) изучения геохимии, стали возможны только после открытия Д.И. Менделеевым периодического закона, открытия радиоактивности и др. физических явлений и создания на

основе этого современных *моделей атомов*, когда атом стал для нас такой же реальностью, как и химический элемент. Периодическая система Д.И. Менделеева положила начало современному учению об атомах химических элементов и сделала возможным систематическое изучение законов поведения и сочетания химических элементов в природных условиях.

В 1882 г. химик Американского геологического комитета Ф.У. Кларк дал точные количественные данные о распространенности главных 30-40 химических элементов в земной коре, на основе огромного фактического материала.

Возникновение геохимии в России не случайно, она выросла на основе химико-генетической минералогии, минералогии понимаемой как «химия земной коры».

Первый курс лекций по геохимии впервые был прочитан в Московском университете им. А.Л. Шенявского в 1912 году Ферсманом А.Е. и затем опубликован.

Большой вклад в развитие геохимии сделал норвежский ученый Гольдшмидт В.М., осветивший ряд общих вопросов геохимии, развивший кристаллохимическое направление (т.е. кристаллическое строение решетки минералов). М.Лауэ открыл применение рентгеновских лучей при изучении поведения атомов и ионов в кристаллических решетках, что раскрыло перед геохимией новые перспективы.

Но все это было бы невозможно, если бы не работы Е.С. Федорова, впервые выведшего математическим путем в 1890 г. все 230 реально возможных законов сочетания атомов и ионов в кристаллических решетках, что впоследствии подтвердилось экспериментальным путем.

Геохимия так бы и осталась только описательной наукой, если бы сначала В.И. Вернадский, а затем А.Е.Ферсман и В.М. Гольдшмидт в 1923 году не связали геохимические вопросы с вопросами строения атомов и не сформулировали очень важное для геохимии положение: что строение атомов химических элементов определяет их поведение в природе

Геохимия как наука требует широкой ориентации во многих сопредельных дисциплинах как геологического, так и физического, химического и математического циклов.

Геохимия является объединяющей наукой в геологическом цикле наук, т.к. в основе ее лежит атом химического элемента.

Геохимия наиболее тесно связана с минералогией, у них много общего, особенно в области минералогических и геохимических процессов. Но в тоже время, геохимия, объектом изучения которой являются атомы химических элементов земной коры, резко отличается от минералогии, которая объектом изучения имеет соединения атомов – молекул (минералы и кристаллы) в том же пространстве, в том же времени истории Земли, что и геохимия.

Земная кора – каменная оболочка Земли (литосфера) толщиной 15-70 км, ограниченная сверху атмосферой и гидросферой, а внизу, так называемым, сейсмическим разделом Мохоровичича, где скорость прохождения сейсмических волн дает резкий скачок с 6-7ткм/сек. до 13-16ткм/сек. Нижняя граница земной коры имеет извилистую линию и точно неизвестна.

**Лекция 2. Основные теоретические положения, используемые в поисковой геохимии. Методы геохимических поисков месторождений полезных ископаемых.**

Современная горная промышленность извлекает разнообразные химические элементы из их природных скоплений, предъявляя к соответствующим месторождениям полезных ископаемых вполне определенные требования в части содержания ценных компонентов, масштабов запасов и геолого-экономических условий их залегания. Это определяет общую направленность геологосъемочных, поисковых и разведочных работ к обнаружению локальных концентраций химических элементов с целью выбора объектов для

промышленной разработки. Прямой метод выявления таких концентраций – геохимические поиски.

В основе прикладной геохимии или геохимических методов поисков лежат теоретические положения, разработанные основоположником геохимии В. И. Вернадским. Среди них наиболее важными являются:

- закон всеобщего рассеяния элементов в геосферах;
- закон всеобщей миграции элементов;
- закон о многообразии форм существования элементов в природе;
- закон преобладания рассеянного состояния элементов земной коры над

концентрированным.

### **Закон всеобщего рассеяния элементов в геосферах**

Геологической науке давно известны факты рассеяния некоторых элементов в геологических объектах. Так, при химическом анализе минералов в них весьма часто обнаруживались химические элементы, не предусмотренные канонической формулой исследуемого минерала: железо в сфалерите ( $ZnS$ ), цинк в халькопирите ( $CuFeS_2$ ) и т. д. На основе этих данных впоследствии было открыто явление *изоморфизма*, т.е. замещение одного элемента другим в кристаллической решетке минерала, вызванное, как известно, сходством ионных радиусов замещаемого и замещающего элементов, а также общностью ряда других свойств.

Постепенно, по мере проведения аналитических работ начали появляться и такие факты присутствия одних элементов в минералах других, которые противоречили представлениям о механизме изоморфизма и не могли быть объяснимыми с этих позиций. Действительно, если провести точный химический анализ монокристалла оптически чистого кварца, в нем можно обнаружить самые "неожиданные" элементы (Fe, Cl, N, Pb, S и др.), присутствие которых невозможно объяснить проявлением изоморфизма.

По мере усовершенствования точности аналитических методик геологи и химики все более убеждались в том, что количество обнаруживаемых "посторонних" элементов в любом минерале или горной породе непрерывно возрастает. И они пришли к заключению о том, что если бы существовали крайне точные виды анализа, то в любой горной породе можно было бы обнаружить все известные химические элементы. В 1909 г., выступив на XII съезде врачей и естествоиспытателей, В.И.Вернадский говорил: "...в каждой песчинке или капле воды, как в микрокосмосе, обнаруживаются все элементы..., отражающие состав космоса".

Современные геохимики не знают такого случая, когда при анализе любой горной породы на любой химический элемент ответом был бы результат: "нет" ("отсутствует"). И когда тот или иной элемент не выявляется принятой методикой анализа, они дают ответ "не обнаружено". Это означает, что присутствие данного элемента в исследуемой породе не отрицается вовсе, но содержание его измеряется количеством, недоступным точности проведенного анализа.

С 1910 г. положение о всеобщем рассеянии элементов, высказанное В.И.Вернадским, стало общепризнанным, а позже по предложению Н.И.Сафронова оно получило наименование *закона Вернадского*. Из этого закона вытекает ряд следствий. Первое из них заключается в *распространенности всех элементов во всех без исключения геосферах*.

## Основной химический состав геосфер

Геосферы	Главнейшие элементы	Число химических элементов	Сумма кларков, %
Литосфера	O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti	9	99,48
Гидросфера	O, H, Cl, Na, Mg	5	99,58
Атмосфера	N, O, Ar	3	99,94
Биосфера	O, C, H, Ca, K, N, Si, Mg, P, S	10	99,96

**Примечание.** Под биосферой понимается область развития живых организмов, охватывающая нижние горизонты атмосферы, часть литосферы и гидросферы. Кларки биосферы характеризуют средний химический состав живого вещества.

Несмотря на то, что весовые содержания многих элементов в тех или иных геологических образованиях весьма малы или даже ничтожны, на уровне микромира, с которым имеет дело аналитическая геохимия, эти содержания не столь уж и незначительны. Например, содержание радия в воде ничтожно мало (порядка  $10^{-14}\%$ ), тем не менее каждый кубический сантиметр воды содержит  $10^7$  атомов этого элемента. Процентное содержание меди в воде примерно в миллион раз выше содержания радия, поэтому количество атомов меди в 1 см<sup>3</sup> воды выражается уже астрономической цифрой (сотнями триллионов).

Вторым следствием проявления закона всеобщего рассеяния элементов является вывод о невозможности существования в природе чистых веществ. Поэтому огромной проблемой современной научно-технической мысли является получение сверхчистых металлов для различных технических и экспериментальных нужд, например, металлов с чистотой 99,99999 % металлов, в которых посторонние примеси не превышают величины 10-5%. Но и в это ничтожно малое количество примесей укладываются все элементы таблицы Д. И. Менделеева.

### Закон всеобщей миграции элементов

*Миграция* или перемещение вещества в пространстве - широко известное явление. Она проявляется в геологических образованиях самыми различными формами.

Например, тектонические поднятия суши или полет метеорита являются, в сущности, процессами миграции вещества.

Миграция элементов происходит как внутри геосфер (лито-, гидро-, био- или атмосферы), так и между ними.

Перемещение вещества в литосфере можно представить в виде следующей циклической диаграммы.

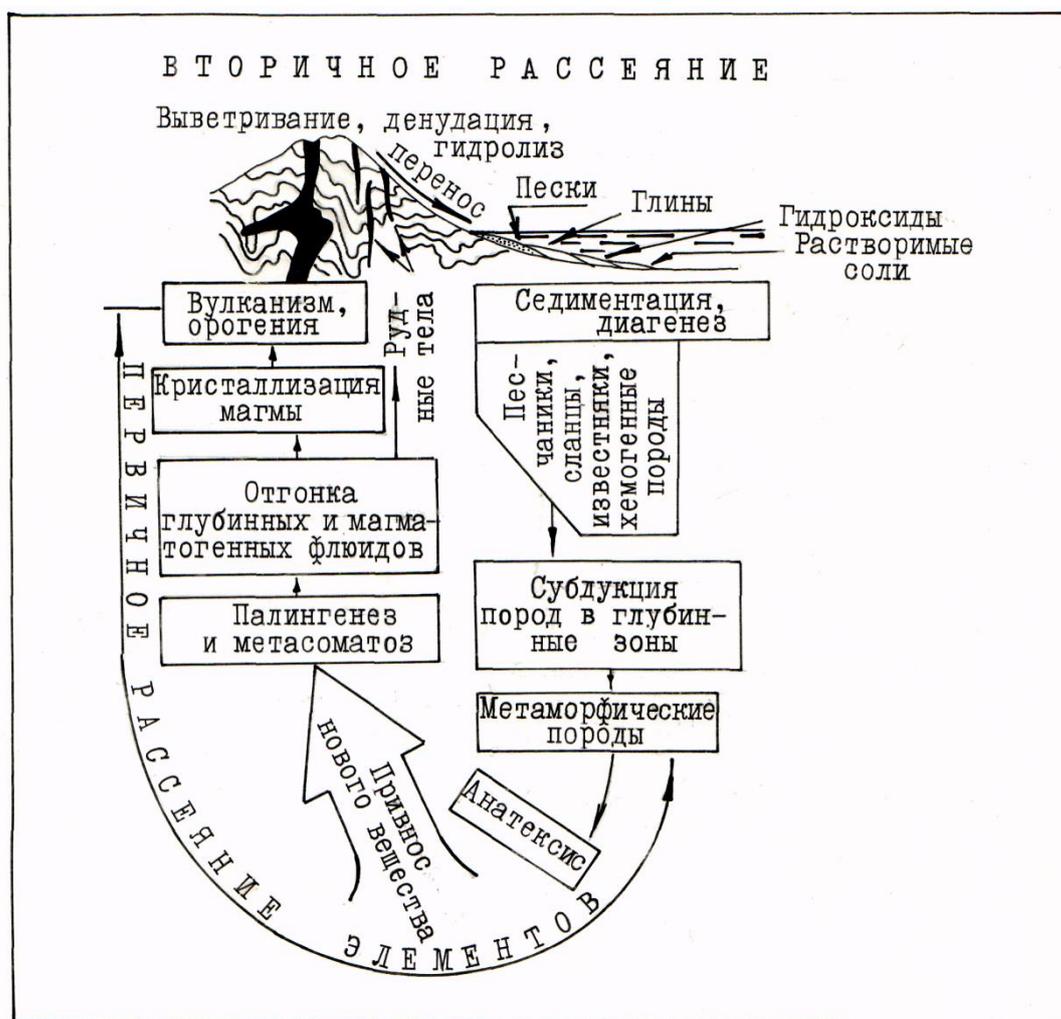


Схема большого геологического цикла миграции элементов земной коры

Большой цикл миграции элементов можно рассматривать с любой точки диаграммы. Допустим, что он начинается привносом магматических масс из глубинного очага. При их внедрении или палингенном преобразовании (т.е. расплавлении) вмещающей среды происходит дифференциация вещества, ведущая к формированию эндогенных месторождений. Последующие тектонические движения и денудация выводят образовавшиеся месторождения к дневной поверхности. При этом непрерывно проявляющимися процессами денудации создаются новые продукты выветривания: обломочные (пески, алевриты и пр.), различные соли. Этими же процессами в совокупности с гидролизом из алюмосиликатов образуются минералы глин. Названные продукты разрушения пород сносятся затем в бассейн седиментации, формируя осадочные породы и некоторые экзогенные месторождения, в частности, россыпи золота, платины, циркона, ванадиеносных сланцев, медистых песчаников, бокситов и др. В дальнейшем седиментные продукты, вовлекаясь в погружение, подвергаются метаморфизму, анатексису и палингенному плавлению.

Эндогенные и экзогенные месторождения, возникающие на второй стадии большого геологического цикла также могут быть подвергнуты метаморфизму, давая так называемые месторождения спорного генезиса.

Верхняя часть рассматриваемого цикла миграции элементов, т.е. поверхность суши, может быть названа *полем рассеяния* полезных ископаемых, хотя и здесь частично могут протекать процессы формирования месторождений некоторых типов (россыпных, зон вторичного сульфидного обогащения и ряда других). Однако, основным процессом, который

преобладает на поверхности суши, является не образование, а, наоборот, *разрушение и ликвидация* месторождений полезных ископаемых.

Таким образом, *область верхних горизонтов суши*, в которой протекают процессы денудации месторождений, *допустимо именовать полем рассеяния* элементов.

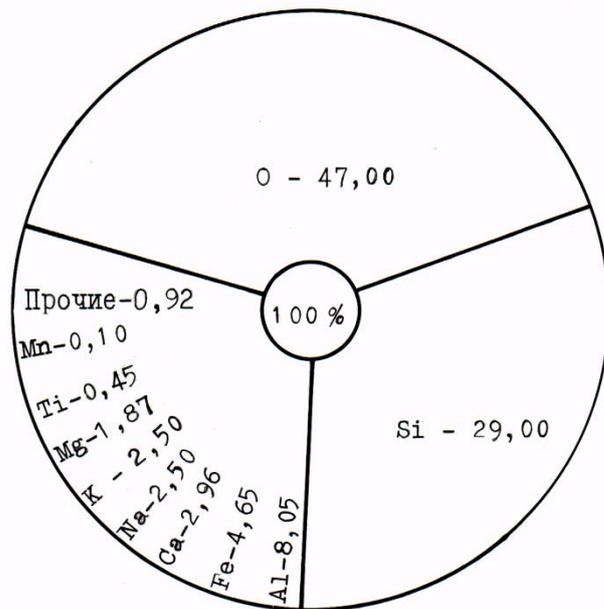
### **Многообразие форм существования элементов в природе**

Содержание отдельных химических элементов в литосфере весьма неравномерно, а их виды и формы существования являются довольно многообразными.

Прежде всего, различают два следующие вида существования элементов:

- *минеральный, т.е. в виде собственных минералов;*
- *безминеральный.*

Примером безминерального существования элементов является морская вода, в которой присутствуют в растворенном состоянии практически все химические элементы, и собственно минералом (жидким) является лишь  $H_2O$ .



Средние содержания химических элементов в земной коре. По А.П. Виноградову

Безминеральная форма существования элементов является менее распространенной в литосфере, но она играет значительную роль в различных геологических процессах, а обмен элементами в биосфере Земли вообще осуществляется преимущественно в этой форме.

Основными видами безминерального сонахождения элементов являются следующие:

- *изоморфное вхождение элемента в решетку минерала-хозяина (изовалентный и гетеровалентный изоморфизм);*
- *присутствие элементов в виде субмикроскопических минералов-узников в других минералах;*
- *присутствие элементов в дефектах кристаллических решеток минералов;*
- *квазигазообразное, т.е. мнимогоазообразное нахождение одного элемента в другом.*

### **Закон преобладания рассеянного состояния элементов над концентрированным**

Считается, что химический элемент *находится в рассеянном состоянии*, если его содержание в опробуемой породе незначительно отличается от среднего содержания этого же элемента в земной коре, называемого *кларком*. Термин «кларк» введен в геохимию А.Е.Ферсманом. Это единица измерения содержания элемента названа в честь американского геохимика Ф.У. Кларка

Кларк химического элемента - это *количество данного элемента в определенной геохимической системе*, например, в земной коре или земном шаре, выраженное в процентах к общему весу, объему или количеству атомов этой системы.

Различают следующие виды кларков:

- *весовые, т.е. вес химического элемента, выраженный в процентах по отношению к общему весу всех атомов геохимической системы;*
- *объемные, под которыми понимается объем, занимаемый атомами интересующего нас элемента по отношению к общему объему атомов геохимической системы;*
- *атомные, т.е. количество атомов данного элемента, выраженное в процентах к общему числу атомов всех элементов геохимической системы (иногда - к числу атомов кремния, как наиболее распространенного элемента земной коры).*

Названные виды кларков систематически пересчитываются по мере совершенствования методов анализирования минерального вещества. Их рассчитывают отдельно для литосферы, гидросферы и биосферы.

Подавляющее большинство сидерофильных элементов встречается в природе в *рассеянном состоянии*, что убедительно демонстрируется в таблице, составленной Н. И. Сафроновым.

Т а б л и ц а 1. *Ресурсы металлов, заключенные в литосфере*

Металл	Кларк в литосфере по А.П.Виноградову (1950), вес.%%	Ресурсы в 1 км <sup>3</sup> литосферы,	Размер месторождения
Fe	4,65	149 000 000	Среднее
Cu	1·10 <sup>-3</sup>	27 000	— “ —
Pb	1,6·10 <sup>-3</sup>	45 000	Мелкое
Zn	5·10 <sup>-3</sup>	140 000	— “ —
Ni	8·10 <sup>-3</sup>	224 000	Среднее
Co	3·10 <sup>-3</sup>	83 000	Уникальное
Sn	4·10 <sup>-3</sup>	112 000	Крупное
W	1·10 <sup>-4</sup>	2 800	Мелкое
Mo	3·10 <sup>-4</sup>	8 400	— “ —
Hg	7·10 <sup>-6</sup>	195	— “ —
Au	5·10 <sup>-7</sup>	14	Среднее

### **Кларк концентрации**

*Концентрированным* считается такое существование элемента в геохимической системе, когда его содержание приближается к промышленному. В качестве показателя концентрации элемента используется понятие "*кларк концентрации*". Это отношение *среднего содержания* элемента в месторождении (Ср) или в любом минеральном теле к *кларку* этого элемента в земной коре (С):

$$K = C_p / C$$

Примером концентрированного существования элементов являются месторождения полезных ископаемых, в которых кларки концентрации достигают очень высоких значений (табл. 2).

Таким образом, современная горная промышленность требует высоких кларков концентрации, чтобы именовать содержание рудой.

Т а б л и ц а 2. Значения кларков концентрации элементов в некоторых рудных месторождениях

Химический элемент	Кларк С, %	Промышленное содержание элемента в рудах С <sub>р</sub> , %	Кларк концентрации К <sub>к</sub>
Fe	4,65	45,0	≈ 10
Pb	1,6·10 <sup>-3</sup>	1,5	1000
Cu	4,7·10 <sup>-3</sup>	1,0	200
Hg	8,3·10 <sup>-6</sup>	0,2	24000

Если подсчитать ресурсы, например, меди в горных породах литосферы до глубины 1 км и ресурсы ее, заключенные во всех месторождениях земного шара, как в выработанных, разрабатываемых, так и тех, которые будут обнаружены в будущем (цифра в последних принята в 40-250 раз больше, чем запасы известных и отработанных месторождений), то и в этом случае медь месторождений составляет 0,04%, тогда как 99,96% ее ресурсов заключено в литосфере. Для свинца это соотношение выражается цифрами 0,15% (запасы, сконцентрированные в месторождениях) и 99,85% (ресурсы литосферы).

Для некоторых других металлов соотношения запасов в месторождениях с ресурсами литосферы подсчитаны Н. И. Сафроновым. Они выражаются следующими цифрами (табл. 3):

Т а б л и ц а 3. Доля запасов металлов, сконцентрированных в месторождениях по отношению к ресурсам литосферы

Металл	Ресурсы металла в земной коре под материками (площадь 149 млн. км <sup>2</sup> , глубина 1 км), т		Доля запасов, сконцентрированная в месторождениях, %
	рассеянного в породах	сконцентрированного в месторождениях	
Fe	2,1 · 10 <sup>16</sup>	4,3 · 10 <sup>12</sup>	2,1 · 10 <sup>-2</sup>
Zn	2,1 · 10 <sup>13</sup>	11,6 · 10 <sup>9</sup>	5,5 · 10 <sup>-2</sup>
Ni	3,3 · 10 <sup>13</sup>	0,6 · 10 <sup>9</sup>	1,8 · 10 <sup>-3</sup>
Co	1,2 · 10 <sup>13</sup>	52,5 · 10 <sup>6</sup>	4,4 · 10 <sup>-1</sup>
Sn	1,7 · 10 <sup>13</sup>	0,5 · 10 <sup>9</sup>	3,0 · 10 <sup>-3</sup>
W	4,2 · 10 <sup>11</sup>	0,1 · 10 <sup>9</sup>	2,4 · 10 <sup>-2</sup>
Mo	1,2 · 10 <sup>12</sup>	0,1 · 10 <sup>9</sup>	8,0 · 10 <sup>-3</sup>
Hg	2,9 · 10 <sup>10</sup>	37,0 · 10 <sup>6</sup>	1,3 · 10 <sup>-5</sup>
Au	2,1 · 10 <sup>9</sup>	3,15 · 10 <sup>6</sup>	1,5 · 10 <sup>-3</sup>

Из табл. 3 следует, что суммарные запасы большинства практически важных элементов, сосредоточенные в месторождениях составляют ничтожные доли (п x 10<sup>-2</sup> — п x 10<sup>-5</sup> %) от величины ресурсов этих же элементов, рассеянных в горных породах литосферы.

Таким образом, несомненно, что для металлических рудообразующих элементов существование в рассеянном состоянии в земной коре является более естественным, чем концентрированное. Не в меньшей мере это положение справедливо и для

породообразующих элементов, т.к. абсолютные значения кларков концентрации этих элементов в их собственных месторождениях невелики. Это позволяет говорить о *всеобщем* рассеянии элементов в литосфере. Поскольку между литосферой и другими верхними оболочками Земли (гидросферой, биосферой и атмосферой) осуществляется постоянное взаимодействие, допустимо говорить также о всеобщем рассеянии химических элементов и в других геосферах.

*Состояние рассеяния* элементов в геосферах является их *естественным*, другими словами, *нормальным* состоянием. Появление же элементов в концентрированном виде считается *аномальным*, поскольку концентрация элементов требует затраты дополнительной энергии, возникающей, чаще всего, в результате проявления геологических процессов. С этой точки зрения каждое *месторождение* полезного ископаемого *представляет* собою *геохимическую аномалию*. Заметим, однако, что из такого определения отнюдь не следует противоположное заключение о том, что каждая геохимическая аномалия есть месторождение.

Понятие "месторождение полезного ископаемого" является не геохимическим понятием, а геолого-экономическим, включая в себя ряд экономических факторов, таких как рентабельность отработки данного вида минерального сырья на современном уровне развития горнодобывающей техники, близость путей сообщения, наличие энергетических источников и т.д.

#### **Вопросы для самоподготовки:**

1. Назовите основные теоретические положения геохимии, имеющие первостепенное прикладное значение?
2. В чем заключается сущность закона всеобщего рассеяния элементов в геосферах?
3. В чем состоит сущность закона всеобщей миграции элементов в геосферах?
4. Перечислите основные виды и формы существования элементов в природе?
5. Что понимается под кларком концентрации?

Лекция 3. Общие принципы геохимических методов поисков. Условия применения геохимических методов поисков.

#### **Общие принципы геохимических методов поисков**

- Геохимическое поле и его локальные аномалии
- Геохимические съемки
- Параметры геохимического поля
- Объекты поисков
- Взаимосвязанность геохимических аномалий в геосферах
- Геохимические ландшафты
- Методика поисков и оценка их эффективности

Для обнаружения месторождений применяются геохимические методы поисков.

Выбор наилучшего из них обуславливается геологическими, геохимическими и ландшафтно-геохимическими особенностями исследуемого района. Часто с целью повышения эффективности поиска проводятся комплексные работы с применением нескольких методов.

Выделяются следующие методы геохимических методов поисков МПИ:

1) Литохимический метод поисков МПИ – основан на изучении распределения химических в горных породах и почвах.

2) Гидрохимический метод поисков МПИ - Этот метод основан на исследовании химического состава природных поверхностных и подземных вод .

3) Биохимический метод поисков МПИ - основан на исследовании химического состава живого вещества, как правило, состава растений.

4) Атмохимический метод поисков МПИ - основан на исследовании состава подземной атмосферы т.е. химического состава газов, насыщающих горные породы вблизи дневной поверхности.

## **Геохимические поиски**

**Геохимические поиски полезных ископаемых**, методы, основанные на исследовании закономерностей распределения химических элементов в литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере с целью обнаружения месторождений полезных ископаемых. Соответственно характеру вещества, исследуемому в геологопоисковых целях, различают литохимические, гидрохимические, атмохимические (газовые) и биогеохимические методы.

Местное среднее содержание химических элементов в горных породах, почвах, природных водах, в приземной атмосфере и растениях в удалении от месторождений характеризует т. н. геохимический фон ( $C_{\phi}$ ), близкий к цифрам кларков элементов.

Вблизи залежей полезных ископаемых содержания химических элементов закономерно изменяются, образуя геохимические аномалии — признаки возможного нахождения промышленных месторождений.

Эти аномалии представляют собой первичные и вторичные ореолы и потоки рассеяния вещества полезного ископаемого, возникающие в процессе образования месторождений или в результате последующей миграции химических элементов.

Геохимические ореолы месторождений значительно превышают размеры залежей и нередко приурочены к покрывающим породам, т. е. расположены вблизи поверхности, что облегчает их обнаружение и в благоприятных условиях определяет высокую эффективность геохимических поисков.

*Геохимические поиски проводятся систематическим определением содержаний химических элементов в пределах **исследуемого района путём отбора проб по определённой поисковой сетке для последующего анализа их состава.***

В пробах определяют содержание химических элементов искомого полезного ископаемого — основных ценных компонентов залежи или их спутников.

Более прогрессивны геохимические поиски, не требующие отбора проб (воздушные и автомобильные методы) с непрерывной автоматической записью, или пешеходные с отсчётом показаний приборов в точках наблюдений.

Наиболее широко проводятся геохимические поиски рудных месторождений, важнейшее значение среди них имеет Литохимическая съёмка, которая основана на массовом опробовании горных пород и продуктов их выветривания.

С помощью этого метода открыты многие месторождения цветных, редких металлов и золота, в том числе находящиеся в скрытом залегании и недоступные для выявления обычными геологическими методами.

Гидрохимический метод основан на исследовании *состава природных поверхностных и подземных вод путём получения сухого остатка, соосаждения или экстракции рудных элементов с последующим спектральным или химическим анализом.*

При поисках сульфидных месторождений индикаторами оруденения могут служить пониженные значения рН и высокие содержания в водах сульфат-иона ( $SO_4^{2-}$ ). Геохимические поиски месторождений нефти и газа основаны на определении содержаний углеводородных газов в почвенном воздухе или в пробах горных пород.

### **Особенности зональности вторичных литохимических ореолов**

Элементы в зоне гипергенеза ведут себя по-разному, поэтому первичная эндогенная зональность не всегда адекватно отражается во вторичных ореолах. Все рудные минералы можно разделить на устойчивые и неустойчивые в зоне окисления. Соответственно, элементы, входящие в них, либо остаются на месте, либо выносятся за пределы рудных зон на десятки и сотни метров.

В целом, для сульфидных месторождений можно выделить два ряда главных индикаторных элементов:

1) Элементы с ограниченной подвижностью, образующие трудно-растворимые сульфаты, либо адсорбирующиеся на продуктах зоны окисления: Pb, Ag, Mo, As, Bi.

2) Элементы, образующие легко растворимые сульфаты и формирующие вторичные ореолы на значительном удалении от первоисточника: Cu, Zn, Ni, Co.

В табл. 3 дана характеристика гипергенной подвижности ряда элементов при различных окислительно-восстановительных параметрах среды

Таблица 3. Подвижность химических элементов в гипергенных условиях

Высокая	Mo, V, U, Se Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn	Mo, V, Se, Re, Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra
Средняя	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, As, Cd	As, Cd	As, Cd	
Низкая	Si, P, K, Pb Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Li	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Sb, Ge, Cs, Tl, Fe, Mn	Si, P, K, Fe, Mn
Очень низкая до неподвиж- ной	Fe, Mn, Al, Ti, Sn, Fe, W, Nb, Ta, Pt, Zr Th, редкоземельные элементы	Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, редкозе- мельные эле- менты	Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, ред- коземельные элементы, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Al, Ti, Sn, Te, W, Nb, Ta, Pt, Cr, Zr, Th, редкоземель- ные элементы, S, B, Mo, V, U, Se, Re, Zn, Cz, Co, Cu, Ni, Hg, Ag, Au, As, Cd, Pb, Li, Rb, Ba, Be, Bi, Cs, Ge, Ti

#### Литохимические потоки рассеяния

Под литохимическими потоками рассеяния понимаются массы разрушенных денудацией горных пород, перемещаемые поверхностными водами в сторону понижений рельефа.

На поверхность суши ежегодно выпадает воды на 36 000 км<sup>3</sup> больше, чем испаряется. Стекая в моря и океаны, эти воды ежегодно выносят 20 млрд т твердых осадков и 2,5 млрд т растворенных солей.

Поскольку механический перенос явно преобладает, при исследовании потоков рассеяния наиболее информативным является опробование твердой фазы стока (обычно это илесто-глинистая фракция).

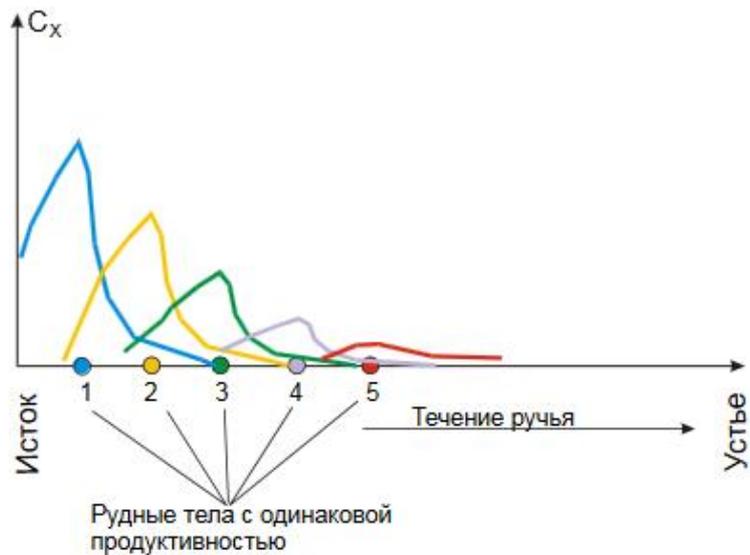
Питание потоков рассеяния может осуществляться 4-мя путями:

- 1) в результате осыпания, обваливания и смыва со склонов материала механических вторичных ореолов;
- 2) путем переноса материала в растворенном состоянии подземными и поверхностными водами боковых склонов;
- 3) через солевые и газовые ореолы восходящей миграции;
- 4) в результате непосредственного размыва коренных пород и руд.

#### Факторы, влияющие на содержание элемента в потоке рассеяния

Содержание элемента в потоке рассеяния в реальности зависит от ряда факторов, которые необходимо учитывать при выборе методики опробования потоков и интерпретации полученных результатов

Положение рудного тела в долине водотока



*Рис. 14. Изменение содержания рудного элемента в потоке рассеяния в зависимости от положения рудного тела в долине ручья*

Чем ближе рудное тело к вершине ручья, тем интенсивнее аномалия  $C_x$  при одних и тех же ресурсах полезного ископаемого. Это повышает требования к методике выделения слабых аномалий в нижней части долин.

### *Гранулометрический состав пробы*



*Рис. 15. Изменение содержания рудного элемента в потоке рассеяния в зависимости от гранулометрического состава пробы*

Крупная фракция дает более интенсивные, но менее протяженные потоки рассеяния, чем мелкая фракция. Таким образом, для выявления слабых аномалий в ряде случаев предпочтительнее отбирать крупную фракцию.

## Интенсивность денудации

На содержание элемента в потоке рассеяния влияет скорость истирания материала.

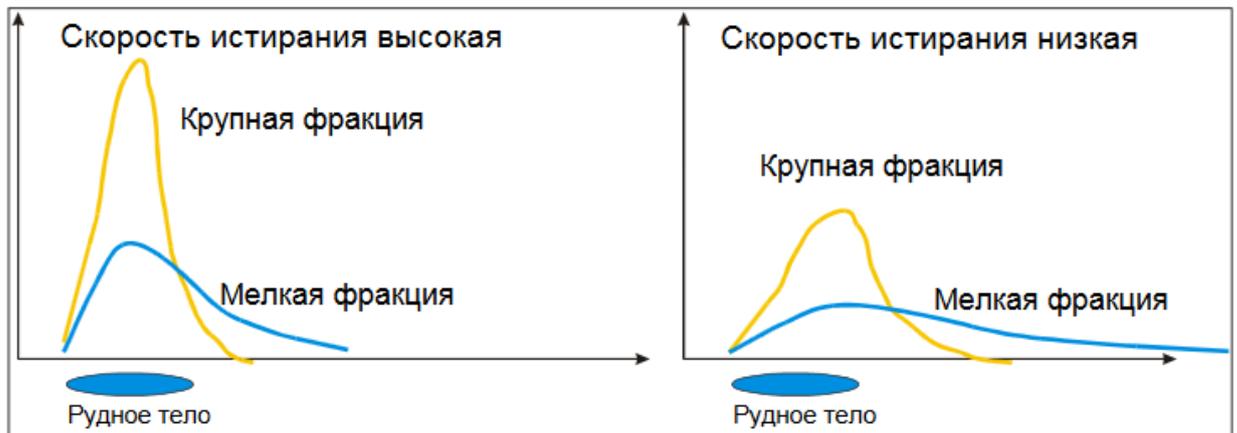


Рис. 16. Зависимость содержания рудного элемента в потоке рассеяния от интенсивности денудации

Чем выше скорость денудации, тем интенсивнее аномалии  $C_x$  по короче потоки рассеяния, как в крупной, так и в мелкой фракциях.

### Методика поисковых литогеохимических работ

Поисковые литогеохимические работы проводятся обычно совместно с геофизическими съемками на первом (опережающем) этапе выполнения поисковых работ. Сеть опробования определяется масштабом работ, характером поставленных задач и в целом соответствует следующим параметрам.

По потокам рассеяния:

Отбор проб: при масштабе 1:200 000

–1 проба на 1 кв. км (между ручьями примерно 2 км, между пробами по ручью 0,5 км);  
при масштабе 1: 50 000

–8 проб на кв. км (расстояние между ручьями 0,5 км, между пробами по ручью 0,25 км).

В более крупных масштабах потоки рассеяния обычно не исследуются, поэтому дальнейшее сгущение сети опробования может осуществляться только при проведении специальных опытно-методических работ.

Проба отбирается из илисто-глинистой фракции аллювия в русле ручья, вес пробы 200–500 г. Проба высушивается, просеивается через сито 1 мм, истирается и отправляется на анализ.

В ряде случаев опробоваться и раздельно анализироваться могут несколько фракций, если опытно-методическими исследованиями доказана такая необходимость.

По вторичным ореолам рассеяния:

расстояние между профилями–1 см в масштабе карты, между пробами

–2 мм в масштабе карты. Например, для масштаба 1:10 000 сеть опробования составляет 100 ×20 м.

Проба отбирается из представительного горизонта почвы (определяется в процессе опытно-методических работ), с глубины 20–40 см.

Обычно это суглинки.

В пробу берется 200–300 г материала. Проба высушивается, просеивается через сито 1 мм, чтобы избавиться от корней растений и крупных обломков, истирается до пудры (0,07 мм) и соответствующие навески отправляются на анализы.

Следует иметь в виду, что на территориях, где представительного материала для опробования не хватает (горные, горно-таежные районы с развитием осыпей и курумников, арктические регионы с развитием солифлюкционных террас) как вынужденная мера широко практикуется отбор в проб у дресвы и даже щебня.

По сути дела, это тоже образования вторичных механических ореолов рассеяния, но к интерпретации таких результатов следует подходить очень тщательно. Разнородность и неравная представительность проб может привести как к пропуску промышленных объектов, так и к необоснованному оптимизму в оценке аномалий.

#### **По первичным ореолам:**

по всем горным выработкам, керну скважин и имеющимся обнажениям отбираются сколковые пробы (рис. 19).

В одну пробу объединяется 8–10 сколков. Длина интервала (пробы) обычно 5 м (вблизи рудных тел до 1 м, на периферии рудного поля до 20 м).

Вес пробы 400–500 г. Проба дробится, истирается и отправляется на анализы.

В качестве геохимических проб можно также использовать дубликаты истертых бороздовых или керновых проб. Для всех видов геохимических работ обязательным является отбор контрольных проб в объеме 3 %.

При выполнении анализов также обязательным является внутренний и внешний контроль анализов (по 3%). В качестве основных методов анализа на производстве до сих пор широко используются приближенно-количественный спектральный анализ на 20–40 элементов и спектрозолотометрический для определения золота. Их преимущества – относительная дешевизна и экспрессность.

Однако, для решения актуальной на сегодня задачи выявления скрытого оруденения эти методы уже не обладают необходимой чувствительностью и воспроизводимостью. В ряде организаций уже начался переход на масс-

спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (ICP MS). Эта методика, используемая сегодня во всех развитых странах, позволяет оперативно определять концентрации практически всех элементов и даже их изотопов с максимально высокой чувствительностью.

Для решения частных задач широко используются также атомно-абсорбционный, рентгенофлуоресцентный, нейтронно-активационный и другие виды анализов

**Биогеохимический метод** основан на исследовании химического состава растений, обычно путём их предварительного озоления и последующего спектрального анализа. Применение гидро- и биогеохимических методов целесообразно в условиях, неблагоприятных для проведения литохимических поисков.

В результате геохимических поисков составляются карты и графики содержаний элементов-индикаторов полезных ископаемых, по которым с учётом геологических и др. данных проводится интерпретация выявленных геохимических аномалий; среди них, как правило, только немногие отвечают промышленным месторождениям. Поэтому оценка геохимических аномалий требует тщательного анализа условий рассеяния и концентрации химических элементов на основе теоретических законов геохимии.

Эффективность геохимических поисков обеспечивается их совместным проведением с геологическими и геофизическими исследованиями, в сочетании с проходкой горных выработок и буровых скважин.

#### **Биогеохимический метод поисков**

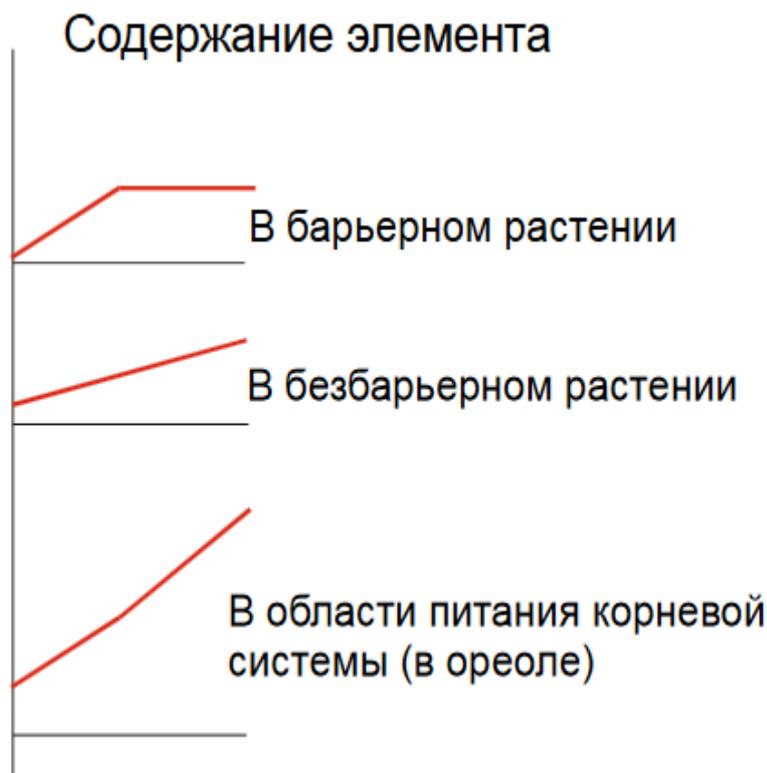
Биогеохимический метод поисков основан на измерении содержаний химических элементов в растениях (точнее, в золе растений), растущих над погребенными ореолами и месторождениями.

Предполагается, что колебания содержаний элементов в растениях адекватно отражают различия концентраций этих элементов в породах зоны питания

корневой системы растений.

Растения должны быть безбарьерными и широко распространенными.

Безбарьерными называются растения, в которых содержание элемента прямо пропорционально его содержанию в области питания корневой системы. В барьерных растениях накопление элемента идет только до определенного уровня и далее остается постоянным (рис. 19).



*Рис. 19. Соотношение концентраций химического элемента во вторичном ореоле и в различных типах растений*

В пробу берутся определенные части одного и того же растения (к березы в лесной зоне, надземная часть кустов полыни в степях и т. д.).

Можно брать в пробу листья, это значительно ускоряет процесс отбора и обработки проб. Но содержания элементов в листьях подвержены значительным сезонным и климатическим колебаниям, поэтому такую съемку надо делать очень быстро и интерпретировать результат значительно труднее.

Вес пробы составляет 100–400 г (в зависимости от материала).

Проба переводится в золу в специальных тиглях, обычно прямо в поле.

Зола затем анализируется на комплекс элементов так же, как и литогео-химические пробы.

*Основная литература:* [1] с. 17-22; [2] с. 14-18, [6] с. 450-454.

*Дополнительная литература:* [7], [8], [9] [10].

*Контрольные вопросы*

1. С какими науками более тесно связана геохимия?
2. Что является объектом исследования в геохимии?
3. Заслуги Ломоносова М.В. в становлении геохимии?
4. Значение открытия Д.И. Менделеева для геохимии?
5. Кто из зарубежных ученых внес весомый вклад в развитие геохимии как науки?
6. Что такое «форма нахождения элементов»?
7. Что такое изоморфизм?
8. Как перемещаются ионы в водных растворах?
9. Что такое техногенные соединения, как они образуются?

10. Какие формы миграции элементов Вам известны?
11. Какие типы миграции элементов Вам известны?
12. Охарактеризуйте состояние рассеяния.
13. Дайте определение понятиям геохимические провинции и металлогенические провинции?
14. Геохимические щиты и геохимические пояса ?
15. Геохимическое поле и его параметры?
16. Первичные и вторичные геохимические ореолы?
17. Прямые и косвенные геохимические индикаторы?
18. Поисковые критерии и поисковые признаки?

#### Лекция 4. Основные закономерности миграции элементов в Земной коре.

### Формы нахождения элементов в земной коре

Распределение и перемещение химических элементов в земной коре во многом определяется особенностями их строения, формой нахождения, а также комплексом внешних условий, в которых находятся рассматриваемые элементы (их соединения). Учет этих факторов при проведении поисков месторождений полезных ископаемых геохимическими методами дает возможность более точно установить историю и пути миграции рассматриваемых элементов, несомненно увеличивая эффективность поисковых работ.

Элементы в земной коре образуют системы относительно устойчивых химических равновесий. Группы таких систем получили название форм нахождения химических элементов. Знание особенностей поведения элементов, находящихся в различных формах, способствует увеличению достоверности поисковых прогнозов. Выделяются следующие 8 важнейших форм нахождения элементов в земной коре (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Весовое участие различных классов минералов в составе земной коры

Минеральный класс	Минимальное количество минералов	Слагаемый состав земной коры, вес %	Элементы, наиболее часто входящие в состав минералов данного класса
1. Самородные элементы	90	0,1	Pt и ее группа Au, Ag, Cu, Hg, Bi, C, S, As
2. Сульфиды и их аналоги	200	0,25	S, Se, Sb, Te, As, Fe, Cu, Pb, Zn, As, Co, Ni, Hg, Bi, Mo, Au
3. Окислы	200	17,0	O, Si, Fe, Al, H, Ti, Mn, Cr, Sn, Nb, Ta, TR
4. Силикаты	800	80,0	O, Si, Fe, Al, Ca, Na, K, Mg, реже Mn, Ti, B и др.
5. Карбонаты	80	1,7	C, O, Ca, менее Fe, Na, Ba, Sr? Cu, Pb, Zn
6. Бораты	40	незначит.	B, O, Ca, Mg, Na, H иногда S, Cl
7. Фосфаты, арсенаты, ванадаты	350	0,7	P, As, V, Ca, Mg, Fe, Mn, отчасти Al, H, редко Pb, Cu, Zn, Cl, F, U
8. Сульфаты	260	0,1	S, O, Na, K, Mg, Ca, Al, Fe, H, реже Cu, Pb, Sn, Ba, Sr
9. Хроматы, молибдаты, вольфраматы	15	незначит.	Sr, Mo, W, O, Fe, Mn, Pb, Cu, Ca, H
10. Галогениды	100	незначит.	F, Cl, Ca, Mg, Na, K, Al, иногда Li, H, O
	2135	99,85	

1. *Самостоятельные минеральные виды* (кристаллические и коллоидные системы – молекулы и их соединения). Эта форма существования химических элементов является *важнейшей для литосферы*. Элементы, находясь в этой форме, **мигрируют совместно в постоянном соотношении между собой**. К **этой форме отнесено** сравнительно небольшое количество коллоидных систем с твердой дисперсной средой (**кристаллозоли и кристаллогели**). **Миграция составляющих их элементов происходит в минеральной форме и только совместно**. Однако, соотношение между элементами в каждой отдельно обломке может быть резко различным. Эта особенность приближает коллоидные минералы к изоморфным смесям.

2. В настоящее время известно около 2400 *самостоятельных минеральных видов* и более 7000 разновидностей. Они делятся на 5 групп в зависимости от распространенности:

а) очень распространенные, являющиеся существенными по количеству составными частями большинства *горных пород* (полевые шпаты, кварц, слюды, кальцит и др.);

б) распространенные, являющиеся по количеству существенными составными частями редких горных пород или входят в большинство горных пород в незначительных количествах (апатит, нефелин, лейцит и др.);

в) средне распространенные, не породообразующие, но встречающиеся в огромном большинстве месторождений полезных ископаемых в составе руд (пирит, халькопирит, галенит, ильменит и др.);

г) редкие, встречающиеся в сравнительно небольшом количестве месторождений или в небольших количествах (самородное золото, сильвин, виверит, минералы бериллия, тантала, ниобия и т.д.);

д) очень редкие, известны не больше, чем в 10 и меньше точках земного шара и, очень небольших количествах (криолит, германит, рейнерит и др.).

Химические элементы имеют различную способность образовывать самостоятельные виды.

Как видно из таблицы весовое участие различных классов в составе земной коры, так же как и отдельных элементов, в образовании минералов – различно.

Главнейшими минералообразователями земной коры являются O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, C, Mn, P и S (т.е. 14 элементов). Остальные химические элементы, за исключением Cu, Zn, Pb, TR, Nb, Ta, Be, As, Sb, U или образуют небольшое число минералов, или совсем их не образуют (Pb, Hf, Zr, инертные газы, ряд радиоактивных элементов).

2. *Изоморфные смеси в минералах*. При рассмотрении данных химического состава минералов уже давно выяснилось, что состав даже самых простых бинарных соединений по результатам анализа оказывается значительно более сложным, чем это следует из формулы соединения. Например, соединение простого состава Zn S (сфалерит) может содержать примесь целого ряда элементов (Zn, Fe, Mn, Cd, Ga, Se, Sn, S, Sc). Нередко природные соединения – *минералы* можно представить состоящими как бы из смеси двух или даже 3-х соединений. Например, плагиоклазы представляют собой смесь двух определенных соединений: альбита (Na [Al Si<sub>3</sub> O<sub>8</sub>]) и анортита (Ca [Al<sub>2</sub> Si<sub>2</sub> O<sub>8</sub>]).

Такие соединения носят название «*смешанных кристаллов*», а само явление, которое ведет к образованию подобных «смешанных» соединений – *изоморфией*, или *изоморфизмом*.

Вернадский В.И. (1909-1910 гг.) на основании эмпирических данных о совместном нахождении химических элементов в минералах земной коры дал свои классические эмпирические ряды изоморфизма. Его заслуга заключается в том, что он впервые указал на роль *термодинамических условий* для изоморфного замещения, т.е. изоморфные ряды перемещаются под влиянием T и P (температуры и давления).

#### *Изоморфные ряды элементов В.И. Вернадского*

1. Al, Fe, Cr, Mn, Ti, B (V), (Cl), V

6. NH<sub>4</sub>, K, Na, Cs, Rb, Te, Li, H

I		I	
II			II, III
	III		
2. Ba, Ca, Sr, Pb		7. W, Mo	8. Ge, Se
I, II		I	I
III			
3. Br, J, Cl, F, OH		9. Mg, Mn, Fe, Zn, Be, Cd, Cu, Ni, Co	
I		I	
II, III			II, III
4. V, P, As, Sb		10. Au, Ag, Hg, Cu, Pb, Tl	
I		I	
		II, III	
5. Bi, Sb, As		11. Pt, Fe, Cd, Zr, Rh, Cu	
I		III	
12. Os, Ru, Rh, Zr	13. Ca, Mg, Mn	14. O, F, OH	15. Co, Te, Ni
	I		I
III	II, III	III	II
16. Si, Ti, Zr, Sn, Mn, Th	17. Nb, Ta	18. S, Se, Te	
II, III	I, II, III	II, III	

I. Кора выветривания, область низкой Т и низкого Р (гипергенез)

II. Область метаморфизации, высокое Р и не очень высокая Т

III. Область магматизации, область высокой Т и высокого Р.

Рассматривая эти 18 рядов В.И. Вернадского можно сделать следующие выводы, что более широкие пределы изоморфной смесимости характерны для глубинных магматических и метаморфических образований с высокими значениями Т и Р по сравнению с зоной гипергенеза. Но если *термодинамические* условия обуславливают только *степень* совершенства изоморфного замещения элементов, то *кристаллохимические* факторы определяют еще и возможность этого замещения.

К факторам, определяющим возможность изоморфного замещения, относятся:

1) координационное число (kr) атомов – это одно из основных понятий кристаллохимии, означающее число атомов или ионов, окружающих любой атом или ион на ближайшем расстоянии;

2) тип конфигурации связей (в ковалентных соединениях);

3) валентность атомов.

Факторами, определяющими совершенство изоморфизма (степень), являются – межатомные расстояния и тип химической связи.

Исходя из выше сказанного, можно конкретизировать понятие изоморфизма так: *изоморфизмом называется свойство аналогичных элементов замещать друг друга в структуре минерала, возможное только при одинаковых координационных числах атомов, а в ковалентных соединениях – при тождественной конфигурации связей, степень*

совершенства которого (при данной  $T$  и  $P$ ) определяется близостью межатомных расстояний, типом химической связи и строением электронной оболочки атомов.

Различают два вида изоморфизма – *изовалентный* и *гетеровалентный*.

При первом, ионы имеют одинаковый заряд (одинаковую валентность) при условии близости радиусов ионов, при этом, баланс кристаллической решетки сохраняется:

1)  $Ta^{+5}$  с радиусом иона 0,68 и  $Nb^{+5}$  - 0,69 (в ряду танталит – колумбит)

2)  $Mg^{+2}$  (0,78) –  $Fe^{+2}$  (0,83) –  $Mn^{+2}$  (0,91) –  $Ca^{+2}$  (1,06).

Пары  $Mg^{+2}$  –  $Fe^{+2}$  и  $Fe^{+2}$  –  $Mn^{+2}$  – являются примером совершенного изоморфизма (ромб Пх, группа оливина, группа Пх и Amf);

3)  $Mn^{+2}$  –  $Ca^{+2}$  – волластонит – родонит или кальцит – родохрозит;

4)  $Zr^{+4}$  (0,87) –  $Hf^{+4}$  (0,86) – в цирконах

5)  $Al^{+3}$  (0,57) –  $Ga^{+3}$  (0,62) – в нефелинах и др. алюмосиликатах;

6)  $Mo^{+4}$  (0,68) и  $Re^{+4}$  (0,68) – в молибденитах

7)  $K^{+1}$  (1,33) и  $Rb^{+1}$  (1,49) – в полевых шпатах и слюдах

8)  $Mg^{+2}$  (0,78) и  $Ni^{+2}$  (0,78) – в оливинах.

При гетеровалентном изоморфизме происходит взаимное замещение ионов *различных зарядов* (валентностей). В этом случае, в замещение ионы вовлекаются так, чтобы суммарный баланс решетки сохранялся неизменным (но сохраняется близость радиусов ионов).

Например, при замещении катиона с меньшим зарядом на катион с большим зарядом (и наоборот), должна осуществляться *компенсация зарядов*. Эта компенсация осуществляется тремя способами:

1) вместо одного катиона с повышенным зарядом в решетку входит большее число катионов с пониженным зарядом или наоборот (2  $Al^{+3}$  – 3  $Mg^{+2}$  – в слюдах ; 2  $Na^{+1}$  –  $Ca^{+2}$  в нефелинах ; 3  $Ca^{+2}$  – 2  $Y^{+3}$  в иттрофлюоритах);

2) вместе с катионом повышенного заряда, замещающим катион меньшего заряда, параллельно на место другого катиона входит катион с меньшим зарядом (2  $Ca^{+2}$  -  $\sum TR^{+3}$  +  $Na^{+1}$  – в апатитах; 2  $Mg^{+2}$  –  $Al^{+3}$  +  $Li^{+1}$  в пироксенах;  $Si^{+4}$   $Na^{+1}$  -  $Al^{+3}$   $Ca^{+2}$  в плагиоклазах);

3) при вхождении катиона с большим зарядом наблюдается изменение в анионной части соединения. Анион с меньшим зарядом замещается анионом с большим зарядом ( $Ca^{+2}$  +  $F^{-1}$  -  $\sum TR^{+3}$  +  $O^{-2}$  – в апатитах).

3. *Биогенная форма*. Она включает в себя нахождение элементов в животных и растительных организмах. Впервые была рассмотрена при изучении биосферы В.И. Вернадским. Без учета деятельности живых организмов невозможно правильно представить геохимические процессы, протекающие на поверхности Земли (в том числе процессы формирования вторичных геохимических ореолов). В живых организмах уже выявлены почти все известные элементы. В растениях они находятся в виде сложных органических соединений. Многие металлы, реагируя с природными органическими кислотами, образуют соединения, которые в последнее время стали учитываться при проведении геохимических поисков.

4. *Водные растворы* – составляют отдельную оболочку Земли, называемую гидросферой. Основная часть водных растворов приходится на долю Мирового океана, меньшая – на поверхностные и подземные воды континентов. К ним относятся и гидротермы различного происхождения. При геохимических поисках основное внимание уделяется подземным, реже поверхностным водам континентов, в которых элементы могут находиться в виде ионов, молекул, органических и комплексных соединений. Основная часть элементов, в связи с процессами диссоциации (распада молекул) в растворах, представлена анионами и катионами. Анионы (ион, несущий отрицательный заряд) в основном комплексные, а катионы (ион, несущий положительный заряд) бывают связаны с молекулами воды. Распад на ионы наблюдается при растворении в воде веществ с ионной, металлической и ковалентной связью.

Перемещение ионов в водных растворах зависит от электростатических (кристаллизационных свойств), а также обуславливается изменениями, происходящими с растворами, и реакциями рассматриваемых ионов с другими веществами, находящимися в растворе. Довольно много элементов переносится в природных водных растворах (в том числе и гидротермальных) в виде комплексных соединений, образующихся путем присоединения к ионам нейтральных молекул или ионов противоположного знака.

5. *Коллоиды с жидкой дисперсной средой.* Эта форма нахождения элементов получила широкое распространение в природе. Они встречаются в океанических и континентальных водах, кроме того, «наиболее важные составные части ландшафта, определяющие его своеобразие, или находятся в коллоидном состоянии, или в процессе своего образования прошли через коллоидное состояние» (А.И. Перельман, 1975). В жидкой дисперсной среде, дисперсная (изменение – рассеяние) фаза может находиться в твердом и газообразном состоянии. Для геохимических поисков важен первый случай, когда дисперсная фаза представлена металлами (Au, Ag, Pt, Bi, Sn и др.); гидроксидами металлов – Fe (OH)<sub>3</sub>, Ti (OH)<sub>4</sub>, Al (OH)<sub>3</sub> и т.д.; оксидами (MnO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, и т.п.); сульфидами (PbS, ZnS, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> и т.д.); глинистыми минералами (галлуазит, каолинит, монтмориллонит и др.).

Образование коллоидов происходит в природе двумя основными способами:

- 1) дисперсионным (при разрушении кристаллического вещества);
- 2) конденсационным (при соединении молекулярных частиц до коллоидных размеров).

В связи с высокой степенью дисперсности и большой суммарной поверхностью дисперсной фазы, коллоидные системы обладают повышенным запасом свободной поверхностной энергии. Ее самопроизвольное уменьшение приводит к *сорбции* (концентрированию вещества на поверхности раздела фаз).

6. *Техногенные соединения*, не имеющие природных аналогов – получают все большее распространение в самых различных регионах, чаще всего, встречаясь в почвах, донных отложениях и водах. Особенно много их в энергично осваиваемых районах, к которым, в первую очередь, следует отнести различные сельскохозяйственные угодья и участки вблизи крупных промышленных комбинатов. Эта форма нахождения элементов включает различные *искусственные* полимеры, пластмассы, сплавы металлов, пестициды, гербициды, поверхностно-активные вещества и т.д. К ней же следует относить соединения (и элементы в самородном состоянии), вообще встречающиеся в природе, но не образующиеся природным путем в конкретных условиях, где они выявлены.

7. *Магматические расплавы.* Это сложные, изменчивые (в связи с изменением термодинамических условий), насыщенные газами системы. Состояние элементов в них до сих пор является проблематичным. Роль магматических расплавов в распределении и перераспределении элементов в земной коре очень велика и поэтому рассмотрение гипотез о состоянии в них элементов представляет интерес. Первое представление о магме было как о расплаве, состоящим из оксидов, но уже в 1935 г. Ф.Ю. Левинсон-Лессинг писал, что в магме находятся «комплексы, соответствующие будущим минералам». В работах Н.В. Белова и Л.Н. Овчинникова это положение было детально разработано и дополнено. Сейчас считается, что в магме существуют два основных вида комплексов: октаэдрические группы (среди них преобладают [Mg O<sub>6</sub>] и [Ca O<sub>6</sub>]) и тетраэдрические, где (преобладают [Si O<sub>4</sub>] и [Al O<sub>4</sub>]). Кроме них предполагается существование свободных подвижных катионов, атомов растворенных металлов, соединений типа FeS и Fe<sub>2</sub> O<sub>4</sub>, являющихся, в какой-то мере, электронными жидкостями, а также отдельных молекул (прежде всего, газов).

8. *Состояние рассеяния.* Впервые его описал В.И. Вернадский (1909). Оно представляет особую форму нахождения химических элементов земной коры и, по-видимому, связано с расположением атомов в «пустых» пространствах кристаллических решеток. Благоприятствует чрезвычайному рассеянию атмосферы: газ, попавший в смесь других газов, полностью в ней растворяется. Содержание элементов в состоянии рассеяния достигает 10<sup>-12</sup> – 10<sup>-15</sup> %, а пределом рассеяния можно считать нахождение 1 атома в 1 см<sup>3</sup>

вещества. Для ряда элементов это состояние является обычным: к их числу относятся йод, ксенон, радон.

Рассматривая формы нахождения элементов в земной коре, следует *помнить*, что в природе часто встречаются не нейтральные атомы, а ионы. Число ионов, принимающих участие в геохимических процессах, превышает число элементов и доходит до 150. А каждый ион, по В.И. Вернадскому, должен рассматриваться в процессах миграции как «особый химический элемент». Связывая перемещение элементов в земной коре с формами их нахождения, можно выделить 3 основные типа миграции.

*I тип миграции* представляет собой изменение формы нахождения элементов без их значительного перемещения; например, переход элемента из минеральной формы в водные растворы. Для характеристики этого типа миграции можно использовать коэффициент перехода элементов из одной формы в другую. Впервые такой коэффициент был введен Б.Б. Польшовым для биогенной формы:  $K = P/\Pi$ , где  $K$  - коэффициент биологического поглощения;  $P$  - содержание элемента в зоне растения;  $\Pi$  - содержание этого же элемента в почвах (породах), на которых произрастает растение.

*II тип миграции* представляет собой перемещение элемента без изменения формы его нахождения. Примерами такого типа может служить перемещение обломков минералов в поверхностных водах или перемещение элементов, находящихся в растворе, при движении поверхностных или подземных вод.

*III тип миграции* объединяет два предыдущих и состоит в перемещении элементов с изменением формы их нахождения; например, перемещение элементов в подземных водах, растворяющих минералы на месторождениях; переход из минеральной формы в биогенную при мощном чехле рыхлых отложений и т.д.

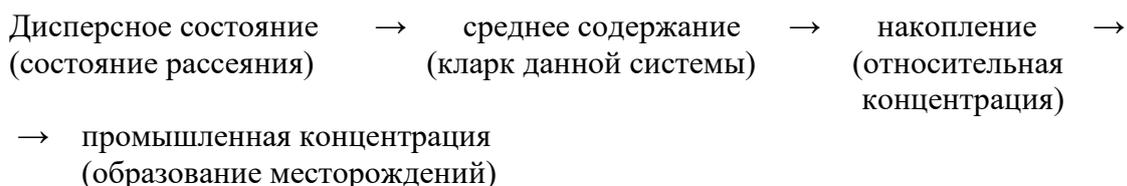
Рассмотренные формы нахождения элементов являются системами только относительно устойчивыми. Можно считать, что большая часть элементов в земной коре находится в состоянии постоянного движения, которое и представляет собой миграцию элементов.

Все вещество природы и составляющие ее атомы химических элементов находятся в непрерывном и закономерном движении, перемещении, перегруппировке и перераспределении в результате различных геохимических и космохимических процессов.

Термин «*миграция химических элементов*» был введен в геохимию А.Е.Ферсманом (1923 г.). Под ним он подразумевал *комплекс процессов*, определяющих перемещение химических элементов в земной коре и ведущих, обычно, к их *рассеянию* или *концентрации*.

Ферсман А.Е. подчеркивал, что явление миграции элементов должны рассматриваться как важнейшие явления природы, определяющие все разнообразие и многообразие геохимических реакций и геохимических комплексов. Уточняя понятие о геохимической миграции он отмечал, что в схеме кларк распространения химического элемента в определенной геохимической системе можно рассматривать как *среднюю норму*, всякое отклонение от которой в ту или иную сторону осуществляется путем миграции.

Форму миграционного состояния каждого химического элемента в земной коре, согласно А.Е. Ферсману, можно представить в виде следующей схемы:



Миграция химических элементов составляет содержание геохимических процессов и приводит к перемещению атомов в пространстве, к изменению их количественных соотношений.

Перемещение (миграция) атомов химических элементов происходит как в жидких, более или менее подвижных системах (магматические расплавы и растворы, поверхностные

растворы и т.п.), так и в виде газообразной фазы (газы атмосферы, вулканические газы, радиоактивные газы и т.п.), реже в твердых минеральных массах (явление диффузии атомов в горных породах и др.). Миграции многих химических элементов способствует жизнедеятельность организмов и человека.

Миграция химических элементов в земных условиях осуществляется: в *атомной* (инертные газы, пары ртути и т.п.), *ионной* (растворы, частью расплавы и коллоидные системы), *молекулярной* (растворы, силикатные расплавы) или *коллоидной*, а также *грубодисперсной* (обломки пород и минералов) форме.

Химические элементы различаются между собой по миграционной способности, т.е. по интенсивности перемещения в геохимических процессах. При этом миграционная способность элемента может меняться в зависимости от термодинамических условий среды миграции.

К числу активных мигрантов относятся химические элементы легко мигрирующие в широком диапазоне термодинамических условий, имеющих место в пределах земной коры.

Атомы этих элементов свободно перемещаются как в магматических расплавах, так и в растворах, включая растворы зоны гипергенеза. Характерными примерами элементов активных мигрантов являются галогены, щелочные металлы и др. Неактивные мигранты (например, элементы группы платины) мигрируют лишь в узком диапазоне термодинамических условий (магматические расплавы) стадии *протокристаллизации* – дифференциация базальтовой магмы с образованием оливиновых пород (перидотиты, дуниты, пироксениты, габбро, нориты).

Большинство же химических элементов земной коры являются достаточно активными мигрантами.

### **Геохимическая классификация элементов по их способности к гипергенной миграции**

#### *Воздушные мигранты*

Активные  
(образуют химические соединения)  
O, H, C, N, J

Пассивные  
(не образуют химические соединения)  
Ar, He, Ne, Kr, Xe, Rn

#### *Водные мигранты*

Очень подвижные

Ca, Na, Mg, Sr, Ra

Cl, Br, F, B

Слабо подвижные

K, Ba, Rb, Li, Be, Cs, Ti

Si, P, Ge, Sn, Sb, As

Хорошо мигрируют в кислых водах окислительной обстановки

Zn, Cu, Ni, Pb, Cd

Мигрируют в кислых и щелочных водах окислительной обстановки

Hg, Ag

Подвижные и слабо подвижные в окислительной обстановке и инертные в восстановительных обстановках

V, Mo, Se, U, Re

Подвижные и слабо подвижные в восстановительной гелеевой среде и инертные в окислительной и восстановительной сероводородных средах

Fe, Mn, Co

Мало подвижные в большинстве обстановок

Слабая водная миграция с органическими комплексами. Частично мигрируют в сильноокислой среде

Al, Ti, Cr, Ce, Nd, Y, La, Ca, Th, Sc, Sm,  
Cd, Dy, Tb, Er, Ho, Eu, Lu, Yb, In, Bi

Слабая водная миграция органическими комплексами. Частично мигрируют в щелочной среде

Zn, Nb, Ta, W, Hf, Te

Не образуют, или почти не образуют химических соединений, характерно самородное состояние

Os, Pd, Ru, Pt, Au, Rh, Zr

Концентрация химических элементов в пределах локальных участков земной коры обусловлена в общем случае более или менее резкой сменой внешних условий миграции на сравнительно коротком расстоянии. Такие локальные участки резкого уменьшения интенсивности миграции А.И. Перельман (1972 г.) предложил именовать *геохимическими барьерами*.

Наиболее хорошо изучены геохимические барьеры *гипергенной* (поверхностной) зоны миграции элементов, которые подразделяются на: физико-химические, биохимические и механические.

При *гипогенной* (глубинной) миграции главную роль играют термодинамический, окислительно-восстановительный и щелочно-кислотные барьеры.

Например, во многих теориях гидротермального процесса образование руд связывается с наличием термодинамических барьеров. Д.С. Коржинский и его школа придает ведущее значение щелочно-кислотным барьерам при формировании метасоматитов и руд.

Формирование же сульфидных руд в ряде случаев обусловлено наличием сероводородного (восстановительного) барьера.

Огромную роль в процессе миграции элементов играет *устойчивость минералов* в гипогенных и гипергенных зонах миграции.

Для получения обобщенной количественной характеристики интенсивности миграции химических элементов в различных обстановках зоны гипергенеза, было предложено А.И. Перельманом использовать, так называемый, коэффициент водной миграции (т. к. большинство химических элементов в зоне гипергенеза мигрирует в водной среде) – водные мигранты.

$$K_x = C_x' \times 100 / (m \times C_x), \text{ где}$$

$C_x'$  - содержание элемента в водах (мг/л);

$C_x$  - содержание элемента в породах (%);

$m$  - минеральный остаток воды (мг/л).

По значениям  $K_x$  можно установить ряды миграции элементов в различных условиях.

Различие в интенсивности миграции одного и того же элемента в разных обстановках может быть охарактеризовано так называемым коэффициентом контрастности миграции (КК), представляющим собой отношение коэффициентов водной миграции элементов в разных условиях.

Коэффициент контрастности миграции (КК) позволяет количественно охарактеризовать результаты процессов, протекающих на геохимических барьерах, т.е. на границе двух сред с разными условиями миграции.

Понятие о миграционной способности элементов в наибольшей степени применимо к оценке их геохимической подвижности в рамках конкретных процессов минералообразования, т.е. нужно рассматривать процесс миграции элементов не только с качественной стороны (активные или неактивные мигранты), но и с количественной т.е. какое количество элементов в единицу времени переходит в подвижное состояние. И это количество будет зависеть не только от внутренних свойств элемента, но и от общего числа атомов данного элемента, содержащегося в данной геохимической системе.

Так, например, если предположить, что миграционная способность Na и Li одинакова, то понятно, что при прочих равных условиях в подвижное состояние (например, из горных пород в природные воды) Na перейдет значительно большее, чем Li, т.к. содержание Na в породах обычно в сотни раз превышает содержание Li.

Если общее количество атомов данного элемента X- (Cu, Pb, Ba) в природной системе обозначить как  $V_x$ , то количество атомов, перешедшее в подвижное состояние за промежуток времени  $\Delta t$ , можно выразить как  $\Delta V_x$ . Тогда относительная часть атомов, перешедших в подвижное состояние, будет составлять  $\Delta V_x/V_x$ , а в единицу времени это составит

$\Delta V_x/V_x \cdot 1/\Delta t \rightarrow$  эта величина представляет собой миграционную способность, которая обозначается символом  $P_x$ .

Получается уравнение миграционной способности.

$P_x = 1/V_x \cdot \Delta V_x/\Delta t$  а в дифференциальной форме для бесконечно малого промежутка времени:

$P_x = 1/V_x \cdot dV_x/dt$  – уравнение миграционной способности.

Оно применимо лишь к процессам миграции в гипергенной среде, т.к. в гипогенных, глубинных условиях неизвестна зависимость  $V$  от  $t$ .

Явления и процессы миграции химических элементов в природе не есть просто явления и процессы какого-то активного или пассивного перемещения элементов в мировом пространстве, это глубочайшее проявление законов строения атома, его ядра и электронных оболочек и влияния этих законов на историю атома в определенных термодинамических условиях мирового пространства.

Миграция химических элементов вызывается бесконечным количеством факторов, но все их можно объединить в 2 группы: 1) внутренние – связанные со свойствами самих атомов химических элементов и их соединений; 2) внешние – термодинамические условия обстановки миграции.

При этом каждая отдельная группа факторов объясняет только некоторые существенные черты геохимической миграции, оказываясь недостаточной для объяснения явления в целом, и полное объяснение можно получить только при рассмотрении всех групп факторов в их противоречивом взаимодействии.

Противоречивое взаимодействие внутренних и внешних факторов как основная причина геохимического процесса миграции элементов ярко выступает в эволюционно-геохимических концепциях В.И. Вернадского, А.Е. Ферсмана и А.Н. Заварицкого, которые видели в нем (противоречии) диалектическую основу *законов эволюции геохимических систем*.

Таким образом, основная причина процессов геохимической миграции – это противоречие между внутренними и внешними – макропланетарными и космическими факторами миграции, действующими в земной коре.

Если говорить образно, то процессы геохимической миграции сводятся к тому, что физико-химические процессы в земной коре стремятся привести каждый ее геологический участок и всю земную кору в целом в состояние физико-химического и термодинамического равновесия. Но макропланетные, внутриядерные и космические процессы идут по своим законам, не считаясь с тем, достигнуто или нет физико-химическое равновесие, и неумолимо его нарушают или не дают ему наступить, переводя систему в новые условия.

Действуя одновременно и последовательно, все указанные факторы приводят к наблюдаемой картине закономерной миграции: круговоротам, перемещениям, перегруппировкам, перераспределению концентраций и т.п. атомов элементов в земной коре.

#### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют типы и виды миграции химических элементов?
2. В какой форме мигрируют химические элементы в земных условиях?
3. Приведите ряд последовательного осаждения ионов при их свободной миграции?
4. Что такое «летучесть» и как она влияет на положение элементов в ряду осаждения?
5. Какие существуют типы и классы геохимических барьеров?
6. Как определить контрастность барьера?
7. Как определить концентрацию элементов на барьере?
8. Перечислите основные внутренние факторы миграции элементов.

Лекция 5. Внутренние и внешние факторы миграции химических элементов.

#### **Внутренние факторы геохимической миграции химических элементов в земной коре**

В качестве главных внутренних факторов миграции могут быть выделены следующие свойства атомов: 1) гравитационные; 2) свойства связи; 3) химические, 4) радиоактивные.

1. *Гравитационные свойства атомов* связаны с величиной их массы и имеют очень большое значение в процессах дифференциации элементов на Земле и в космосе. Особенно большую роль гравитационные свойства атомов играли на ранних стадиях формирования Земли.

Все земные процессы миграции элементов идут в первую очередь под влиянием сил мирового тяготения, при этом в центре космических тел концентрируются более тяжелые атомы, в наружных частях – более легкие. К гравитационным свойствам атомов относятся удельные веса и атомные объемы.

Давно известно, что такие ранние минералы магматической кристаллизации, как хромит, оливин, пироксены, имеющие довольно большой удельный вес по сравнению с полевыми шпатами, кварцем, осаждаются под влиянием сил гравитации на дно магматического очага и там образуют породы соответствующего состава. Также известно, что континенты в земной коре сложены, главным образом, более легкими породами, чем подстилающие их породы. В центральных частях Земли по всей вероятности, находятся железо и никель, самые тяжелые элементы из числа наиболее распространенных.

Однако, распространение ряда элементов в различных породах показывает, что далеко не всегда наиболее тяжелые элементы и даже их соединения подчиняются гравитационным свойствам. Например, для таких элементов как Nb, Ta, Zn, Hf, W, Mo и особенно Th и U (атомные номера которых - 41, 73, 30, 72, 74, 42, 90, 92), характерна связь их преимущественно с кислыми магмами и даже с постмагматическими дереватами кислых магм, т. е. с породами относительно легкими.

Таким образом, с точки зрения распределения элементов их гравитационные свойства преимущественно проявляются на относительно ранних этапах формирования Земли среди элементов, играющих ведущую роль в сложении оболочек Земного шара. В распределении же малораспространенных элементов гравитационные свойства, по-видимому, не имеют определяющего значения. Все это относится к магматическим процессам.

В гипергенных породах гравитационные свойства не столько отдельных элементов, сколько их соединений, имеют важное значение для миграции. Многие элементы, образующие тяжелые и механически прочные соединения (золото, алмаз, касситерит, циркон, топаз, вольфрамит, рутил, ильменит и др.), способны к образованию концентраций, связанных с гравитационными свойствами этих соединений (россыпи).

Атомные (и молекулярные) объемы, связанные с геохимическими типами элементов, по В.М. Гольдшмидту, также определяют пути миграции элементов, играя роль в пространственном распределении этих типов в космических телах, сходных с Землей, от периферии к центру – (атмофильные – H, N, C, O, Cl, Br, J, He/ Ne, Ar, Kr, Xe, литофильные – Si, Ti, Zr, Hf, Th, F, B, Al, Sa, K, Na, Rb, Li, Be, Mg, Sr, Ba, Cr, халькофильные – S, Sc, Te, As, Sb, Bi, Ca, In, Tl, Pb, Zn, Cu, Cd, Hg, Ag, Ni, Co, сидерофильные – Ke, Ni, Co, P, C, Os, Ir, Pt, Pd/ Au, Ge, Sn, Mo, Ta.

П. *Свойства связи* (термические свойства) – заключаются в способности элемента или соединения противостоять силам, направленным к разобщению его атомов, ионов или молекул. Этими силами могут быть механические или тепловые (механическая – это отрыв, тепловая – это сообщение атомам (ионам) такого количества тепловой энергии, которое приведет его в более подвижное состояние).

При воздействии разобщающих сил, связанных с переходом атомов или их соединений из одного агрегатного состояния в другое, свойства связи определяются температурами кипения (летучестью) и плавления соответствующих химических элементов или соединений.

*Летучесть элементов*, связанная с температурами кипения, а отсюда их высокая миграционная подвижность уменьшается в таком порядке: летучие газы (He, Ar, N, O и др.), подвижные металлоиды (F, Cl, Br, J, S), металлы (Hg), щелочные и щелочноземельные металлы (Li, Rb, Cs, K, Na, Ca, Mg и др.), обычные металлы (Fe, Ni, Co, Cu и др.) и, наконец, наиболее труднолетучие элементы (Pt-группы, C, W, Ta, Mo, Hf, V, Zr и др.).

В процессах миграции, идущих в земной коре, летучесть играет заметную роль в геохимической истории элементов, температура кипения, которых не превышает 60<sup>0</sup> С.

Для элементов, имеющих температуру кипения менее 400<sup>0</sup> С, летучесть является главным фактором их миграции в геохимических процессах.

Подобно летучести для миграции химических элементов в условиях магматических расплавов земной коры существенную роль играют температуры плавления не самих элементов, а их соединений, преимущественно окислов, силикатов и галоидных соединений.

Наиболее вероятный интервал внутрикоровых магматических температур лежит в пределах 700 – 1300<sup>0</sup> С. Этот температурный интервал и рассматривается как область проявления термических свойств элементов и их соединений в условиях земной коры.

Ш. *Химические свойства*. В природе при очень высоких температурах все соединения несомненно находятся в диссоциированном состоянии (диссоциация – распад молекул) и в этих условиях по преимуществу проявляются факторы, связанные с природой самих атомов и ионов. По мере же понижения температуры среды главное значение в процессах миграции приобретают молекулы. Характер и степень миграции отдельных элементов при этом зависят от миграционных свойств наиболее типичного и вероятного в данных условиях соединения.

Следует обратить внимание, что химические свойства элементов и их соединений являются главным фактором геохимической миграции элементов в послемагматическую стадию эволюции горных пород земной коры, когда миграция вещества преимущественно осуществляется при участии надкритических, позднее гидротермальных и, наконец, поверхностных водных растворов.

Роль химических свойств элементов в процессах миграции (согласно А.Е. Ферсману) характеризуется следующими основными положениями.

1) Степень и пути миграции зависят от устойчивости основных соединений данного элемента в соответствующих условиях, т.е. в каждой данной термодинамической и химической обстановке миграция элемента определяется устойчивостью его главных соединений:

а) так, например, в условиях высоких температур магмы способность к миграции будет в значительной мере зависеть от возможности образования данным элементом

тугоплавких соединений с наивысшими точками плавления и кипения, выпадающих в этих условиях в твердую фазу;

б) в условиях водных растворов уменьшение миграционных способностей для целого ряда элементов определяется трудной растворимостью их соединений, например, образованием трудно растворимых фосфорнокислых или сернокислых солей;

в) в условиях гипергенеза наиболее стойкими с этой точки зрения будут те соединения, которые не подвергаются процессам окисления.

2) Образование тех или иных соединений элемента при наличии нескольких возможностей определяется свободными энергиями.

Обычная последовательность выделения сульфидных минералов в природных парагенезисах следующая за счет свободной энергии: Fe(FeS<sub>2</sub>), Cu, Zn (Mn), Pb, Ag, Cd, Te, Hg.

Способность элементов к образованию ковалентных связей (с кислородом, серой) является главным фактором, определяющим, возможность миграции этих элементов в водных растворах в составе комплексных соединений: ZnS, Fe<sub>2</sub>O, FeO, CaO, CaMgCO<sub>3</sub>.

А.Е. Ферсман высказал следующие предположения о роли потенциалов ионизации атомов химических элементов для процессов миграции:

а) атомы с близкими потенциалами ионизации обладают сходными свойствами миграции (R, Na, Li, Rb, Si, Ge);

б) атомы или ионы, строящие решетки одинакового типа, сходны по миграционным свойствам.

3) Сходство радиусов атомов и ионов химических элементов обуславливает сходство путей миграции. А.Е.Ферсман отмечал, что атомы и ионы, имеющие слишком большие (более 1,60 Å - Cs<sup>+1</sup>, S<sup>-2</sup>, Cl<sup>-1</sup>, Se<sup>-2</sup>, Br<sup>-1</sup>, J<sup>-1</sup>, Ne, Ar, Kr) или слишком малые (0,40 Å - C<sup>+4</sup>, B<sup>+3</sup>, N<sup>+5</sup>, Be<sup>+2</sup>, S<sup>+6</sup>, P<sup>+5</sup>, Cr<sup>+6</sup>) радиусы, обладают повышенной способностью к миграции и перераспределению (при прочих равных условиях). Например, гранитные пегматиты, где накапливаются элементы с очень малыми (Be, V) и очень большими Rb, Cs) величинами радиусов иона.

4) Радиоактивные свойства атомов в процессе миграции заключаются в непрерывном изменении (уменьшении) количества радиоактивных элементов при их распаде и в образовании новых ядер с иными физико-химическими свойствами.

#### **Внешние факторы миграции химических элементов в земной коре**

К главнейшим внешним термодинамическим факторам миграций относятся:

1) температура; 2) давление; 3) химический состав среды миграции; 4) сорбционные связи.

1. *Температура* среды является одним из самых главных внешних факторов миграции.

Основным условием хода геохимических процессов является понижение температуры. Температура определяет: подвижность и агрегатное состояние вещества (физико-химические фазы), скорость химических реакций, скорость и последовательность кристаллизации из расплавов и растворов, дифференциацию элементов по их критическим температурам.

В.С.Соболев отмечает следующую роль температуры для образования и разрушения силикатов в природных процессах:

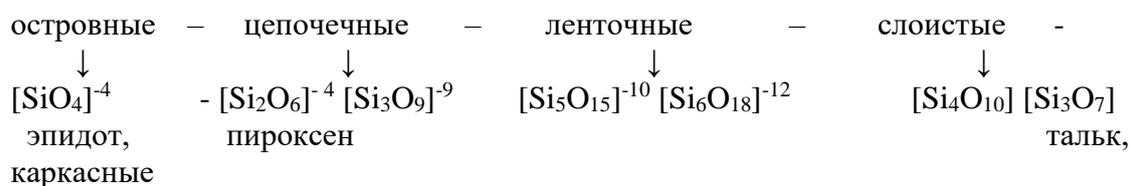
а) понижение температуры способствует реакциям с поглощением воды, т.е. приводит к образованию силикатов и парагенезисов, содержащих все большее и большее количество воды;

б) с понижением температуры увеличивается активность CO<sub>2</sub> и ангидридов более сильных кислот. Это приводит к разрушению простых и двойных силикатов, (простые H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, двойные – [Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>]- [Si<sub>2</sub>O<sub>9</sub>]- [Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>] → Si<sub>6</sub> O<sub>12</sub>), содержащих сильные основания с их выщелачиванием и образованием карбонатов и минералов других классов- с одной стороны, и силикатов наиболее слабых оснований, в первую очередь глинозема, - с другой.

в) понижение температуры уменьшает взаимную растворимость в твердых фазах и способствует распаду изоморфных смесей и образованию минералов, приближающихся к чистым химическим соединениям определенных катионов (ZnS, CuS);

г) понижение температуры способствует образованию соединений с более высоким числом (AlSiO<sub>4</sub>) координации катионов, в частности силикатов Al вместо высокотемпературных алюмосиликатов (полевые шпаты, цеолиты, слюды, хлориты) K[AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>](OH)x3H<sub>2</sub>O;

д) с понижением температуры наблюдается тенденция к ассоциации кремнекислородных тетраэдров в более сложные радикалы по схеме



↓  
[AlSiO<sub>4</sub>], [AlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>], [AlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>] – что в некоторой степени связано с увеличением роли воды в кристаллической решетке.

Следует отметить, что очень высокие температуры центральных частей звезд разрушают легкие ядра элементов Li, Be и B, они как бы «сгорают» в результате ядерных реакций, чем частично может быть объяснена их дефицитность в космосе.

Колебания температур во вселенной очень велики, и с этим связана огромная амплитуда и разнообразие вызванных ими явлений миграции.

В космосе встречается сочетание очень низких температур, близких к абсолютному нулю и очень высоких температур космических тел (звезд). В земной коре температуры колеблются, по-видимому, от 1600-1500<sup>0</sup> до 1200-1300<sup>0</sup>С в магматических расплавах и глубоких частях земной коры до -85<sup>0</sup>С на поверхности литосферы (в Антарктиде).

Таким образом, геохимические процессы миграции элементов в земной коре происходят в диапазоне температур 1600-1500<sup>0</sup>С. Определенные температуры геохимических процессов способствуют образованию геологических тел, различных по минералогическому составу. Поэтому температуры геохимических процессов являются важным фактором генетических классификаций, как минералогических процессов, так и месторождений полезных ископаемых.

Однако, рассуждения о температурах природных процессов усложняются тем, что все они (или большинство) происходили в геологическом прошлом, сейчас же мы можем изучать лишь конечные результаты этих процессов.

Температуры геохимических процессов определяются с помощью так называемых геологических или минералогических термометров, это такие минералы или их комбинации, или определенные свойства минералов, для которых известны температуры их образования, превращения и изменения. С помощью их можно более или менее точно определить температуру данного процесса.

Однако многие минералы имеют очень большой разброс температур образования, что зависит от ряда факторов (давления, примесей, состава растворов и расплавов), поэтому их нельзя использовать в качестве минералогических термометров.

В этом случае можно использовать только типоморфные минералы, которые по тем или иным причинам занимают строго определенное место в геохимических процессах. Они определяют условия (температуры) и время геохимического процесса, поэтому их изучение так же важно для понимания геохимических процессов, как палеонтологическое изучение руководящих форм важно для анализа какой-либо осадочной свиты.

Примером типоморфных минералов, используемых как минералогический термометр, может служить киноварь HgS - типичный минерал конечных стадий гидротермальных процессов – T<sup>0</sup> выделения ниже 140<sup>0</sup>С).

Может также использоваться кварц, как Вы знаете, имеющий большое количество модификаций.

1) Кварц в пегматитовом процессе гранитной магмы – 800-700<sup>0</sup> – светло-серый или прозрачный в виде зерен или кристалликов ( $\beta$  - кварц).

2) Кварц – дымчатый до мориона столбчатые кристаллы (альфа-кварц) Т-700-550<sup>0</sup>С.

3) Кварц – серый или белый просвечивающий, часто нарастает на кристаллы мориона - Т-550-500<sup>0</sup> С.

4) Кварц – рост неправильный прерывистый, перемежающийся растворением, зонарным отложением - Т-500-400<sup>0</sup>С.

5) Кварц – молочный кварц, изредка кристаллы горного хрусталя, удлиненные вначале, а затем шестоватые, мутные - Т-400-300<sup>0</sup> С.

6) Кварц – мелкокристаллические образования, иногда переходящие в халцедон или аметист, коротко столбчатые кристаллики – Т - 300-200<sup>0</sup> С.

7) Кварц – новообразования горного хрусталя в виде щеток - Т-200<sup>0</sup> С и ниже.

Эта схема типоморфных свойств кварца характерна не только для пегматитового процесса, но и для гидротермальных образований.

Кальцит – имеет следующий ход изменений облика кристаллов в зависимости от Т выделения:

350-300<sup>0</sup>С – пластинчатый (0001);

300-200<sup>0</sup>С – основной ромбоэдр (1011);

150-100<sup>0</sup>С – плоский ромбоэдр (0112);

100<sup>0</sup>С и ниже – острые ромбоэдры (4041).

Более объективные и точные данные для установления температур геохимических процессов дают минераллотермометрические исследования газовой-жидких включений в минералах.

Они основываются на том, что при кристаллизации минерала, например из раствора, он захватывает и консервирует (как бы «запечатывает») в своем теле в виде включений гомогенные частицы маточного раствора (в виде жидкости, газа, твердой соли).

Если такое включение нагревать, то при определенной температуре оно опять гомогенизируется, и температура гомогенизации покажет приблизительную Т маточного раствора в момент «запечатывания» включения.

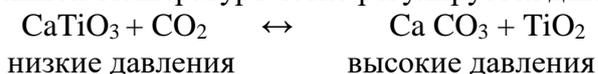
Этот метод многообразный и позволяет с известными допущениями градуировать постмагматические и гипергенные геохимические процессы и устанавливать температуру образования минералов. Они могут быть также использованы для оценки давления, существовавшего в период кристаллизации.

2. *Давление* наиболее сильно сказывается на миграции химических элементов, особенно при его резких изменениях, например над магматическим очагом вследствие появления тектонических разломов. Связанное с этим выделение летучих компонентов дает начало деятельности пневматолито-гидротермальным процессам и интенсивной миграции элементов из магматического очага в окружающую среду.

Колебания давления тесно связано с колебаниями температур. Давление также влияет на температуру плавления и кипения элементов. Например, с повышением давления на 1 атм. температура плавления железа повышается на 0,011<sup>0</sup> С.

Значительные колебания Т и Р и их соотношения определяют изменение физического состояния элементов, при котором происходят явления взаимной миграции элементов: расплавление, растворение, сжижение и т.д., являющиеся важным условием миграции элементов.

Нередко давление определяет направление химических реакций: например, образование пировскита (CaTiO<sub>3</sub>) или рутила (TiO<sub>2</sub>) в присутствии углекислоты (CO<sub>2</sub>) при постоянной температуре четко регулируется давлением:



т.е. при относительно низком давлении будет устойчиво сочетание пировскита и углекислоты, а при высоком – кальцита и рутила.

В гипергенных процессах с изменением давления связано изменение содержания в окружающей среде кислорода, углекислоты и других газов, оказывающих большое влияние на ход этих процессов.

Особое значение для миграции имеет стресс – боковое давление (особенно в процессах минералообразования). Так например, стресс минералами являются: мусковит, хлорит, эпидот, цоизит, тальк, дистен, ставролит.

Стресс – один из факторов метаморфизма, вызывающий появление закономерной пространственной ориентировки минералов, способствующий их перекристаллизации.

Для геохимических процессов земной коры нижний предел давления принимается равным 1 атм. - давление на границе тропо-(нижняя оболочка атмосферы) и литосферы.

Если считать, что геохимические процессы, доступные нашему наблюдению, происходят до глубины 30 км, то верхним пределом будет давление 7500-10000 атм. Очень трудно судить о величинах давления, возникающего при тектонических процессах. Поскольку, по расчетам физиков, алмаз является устойчивой модификацией углерода при давлениях выше 60000 атм. то и верхний предел можно увеличить до этой величины. Эта величина может достигаться в геохимических процессах земной коры, но, по-видимому, исключительно редко, так же как редок в земной коре и сам алмаз.

3. Химический состав среды является фактором: определяющим особенности миграции, концентрации и рассеяния химических элементов в природных растворах и расплавах в условиях земной коры. При этом поведение элементов в процессах миграции, регулируются основными законами физической химии, без знания которых невозможно изучение даже простых геохимических явлений.

Весьма важным фактором, определяющим особенности миграции в геохимической системе, является концентрация вещества, равная отношению количества данного элемента к количеству других элементов. Чаще всего концентрация выражается числом молекул растворенного вещества, содержащихся в 1 л раствора, или числом молекул, растворенных в 1000 г растворителя.

*Концентрация водородных ионов* (кислотность или щелочность растворов – водородный потенциал)  $pH$  - характеризует относительную активность катионов и анионов, направление химических реакций между элементами и, следовательно, образование тех или других природных соединений минералов.

В воде наряду с молекулами ( $H_2O$ ) присутствуют диссоциированные ионы воды  $H^+$  и  $(OH)^-$  концентрация которых  $C_H = C_{OH} = 10^{-7}$ .

Для определения степени кислотности водного раствора наиболее удобно выражать концентрацию водородных ионов в виде логарифма концентрации, взятого со знаком минус и обозначаемого величиной  $pH$

$$pH = -\log C_H = -\log(10^{-7}) = 7$$

$pH = 7$  - нейтральные растворы;

$pH$  от 7 до 1 – кислые растворы (с уменьшением  $pH$  кислотность увеличивается);

$pH$  от 7 до 14 – щелочные растворы (чем больше  $pH$  - тем щелочнее раствор);

$pH$  – отражает щелочно-кислотное равновесие среды осадкообразования:

а) увеличение кислотности растворов благоприятствует реакциям замещения (метасоматоза), в процессе которых происходит вытеснение сильных оснований более слабыми, (например при альбитизации КПШ вытеснение калия (39), натрием (22)); окварцевание – вытеснение наиболее сильным основанием кремнием (28) более слабых, в том числе и  $Al$  (26).

б) в свою очередь увеличение щелочности растворов благоприятствует реакциям вытеснения слабых оснований более сильными. Например – калиевый метасоматоз микроклизация, ортоклизация, а также все случаи замещения кварца полевыми шпатами или слюдами.

Огромное значение рН имеет для миграции химических элементов в гипергенных, в том числе и почвенных процессах. Образование многих гипергенных и осадочных минералов связано с вполне определенной величиной рН.

Важной характеристикой миграционной способности элементов в гипергенных процессах является величина рН, при которой из раствора начинается выпадение гидроокиси данного элемента (рН начала выпадения гидроокиси). Эта величина зависит как от свойств самого атома элемента (радиус иона, валентность, поляризация, энергетические свойства), так и от условий внешней среды (температуры раствора, концентрации, состава других ионов и т.д.).

А.И. Перельман приводит рН начала выпадения гидроокисей металлов из разбавленных растворов солей (однонормальных):

рН	рН	рН
10.5 Mg (OH) <sub>2</sub>	6 Pb (OH) <sub>2</sub>	3.5 Ga (OH) <sub>2</sub>
9 Ag (OH)	5.7 Be (OH) <sub>2</sub>	3.0 Sn (OH) <sub>2</sub>
8 La (OH) <sub>3</sub>	5.5 Fe (OH) <sub>2</sub>	2.4-4.5 Fe (OH) <sub>3</sub>
7-8 Hg (OH)	5.4 Cu (OH) <sub>2</sub>	2 Sn (OH) <sub>4</sub>
8.5-8.8 Mn (OH) <sub>2</sub>	5.2 Zn (OH) <sub>2</sub>	1.4-1.6 Ti (OH) <sub>4</sub>
6.8 Co (OH) <sub>2</sub>	2.5 Si	2 Zr (OH) <sub>4</sub>
6.7 Ni (OH) <sub>2</sub>	4.2 UO <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub>	
	4.1 Al (OH) <sub>2</sub>	

Данные о рН выпадения гидроокисей позволяют предсказывать, в каких условиях элементы будут переходить в раствор и рассеиваться, а в каких случаях, наоборот, будут выпадать из растворов и концентрироваться, что дает возможность решить ряд геохимических задач о миграции химических элементов в земной коре. Например: кремний (Si) обычно образует гидраты уже при рН = 2.5. Поэтому SiO<sub>2</sub> легко накапливается в кислой среде и хорошо мигрирует в щелочных растворах.

Двухвалентное Fe<sup>+2</sup> может находиться в растворе в менее кислых водах, чем Fe<sup>+3</sup>, что подтверждает интенсивную миграцию Fe<sup>+2</sup> в болотах тундры и тайги (кислые воды) и более слабую в болотах степей и пустынь (слабощелочные воды), а также объясняет ограниченную возможность миграции Fe<sup>+3</sup> в истинных растворах, т.к. очень кислые воды встречаются редко.

При рН (3-5) можно ожидать разложение алюмосиликатов с выносом из них сильных оснований (накопление глин). В рудных месторождениях – происходит выпадение охр Мо и W, образование свободной серной кислоты с вытеснением CO<sub>2</sub>, с одной стороны, и коагуляцией (переход вещества из коллоидного растворенного состояния в состояние геля) SiO<sub>2</sub> в опалы и полуопалы – с другой. Образование очень низких рН в гипергенной обстановке связано с окремнением самородной серы и сульфидов в рудных месторождениях.

Совершенно другой характер миграции будет наблюдаться в областях с высокими и очень высокими рН (9-14). Здесь имеет место вынос SiO<sub>2</sub> с накоплением Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO<sub>2</sub> от части Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (при не очень высоком рН). В рудных комплексах наблюдается вынос щелочными растворами Мо, W и других элементов.

Величина рН объяснят также различный минералогический состав железных шляп сульфидных месторождений:

1) из очень кислых растворов сульфаты Fe<sup>3+</sup>, образовавшиеся при окислении пирита и халькопирита, будут уноситься, и в местах их нейтрализации в стороне от сульфидного месторождения будут отлагаться гидроокислы Fe (лимониты).

2) при соответствующих климатических условиях и вмещающих породах, когда очень кислые растворы не могут быть образованы, над сульфидным месторождением будет формироваться железная шляпа.

Если  $pH \leq 5$ , то в железной шляпе такого месторождения не могут образовываться такие минералы, как малахит, азурит, смитсонит и церуссит. Они могут возникать лишь, если кислотность среды не ниже 6.

Многие химические элементы, подвижны в широком диапазоне pH и могут мигрировать как в кислой, так и в щелочной среде (Li, Na, K, Rb, B, Cs, F, Cl, Vz и другие).

Большое влияние на pH выпадения гидроокисей и на миграцию в поверхностных условиях оказывает способность элементов образовывать комплексные соединения. Эта способность характерна для Au, Ag, Cu, Hg, Cd, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Be и др.

Значение комплексообразования для миграции можно показать на примере урана.  $U^{+6}$  в кислых растворах чаще всего присутствует в виде уранила  $(UO_2)^{+2}$ , pH выпадения гидроокиси которого равно 4,2.

В нейтральных и слабощелочных средах уран (U) не должен бы быть в растворе, осаждаясь в форме  $[(UO_2)(OH)_2]$ , карбонатов и других солей. Но уран легко мигрирует в карбонатных водах и осадка не образует, потому что он дает растворимое комплексное соединение типа  $Na_4 [UO_2 (CO_3)_3]$  - урановый карбонат Na.

Определяется pH экспериментально. В природных геохимических процессах кислотность и щелочность среды можно определить с помощью минералов-индикаторов химизма среды. Так, например: присутствие кальцита (разлагается в кислых растворах), серицита и цеолитов (разлагаются слабыми кислотами) – говорит о щелочной, в крайнем случае, нейтральной среде.

Тогда как алунит и ярозит (основные сульфаты Al и Fe) для гипергенных процессов и топаз для пегматитового и пневматолитового процессов существуют в кислой среде.

Пирит ( $FeS$ ) и сфалерит ( $ZnS$ ) образуются в слабо щелочной среде, а марказит ( $FeS_2$ ) и вюртцит ( $p ZnS$ - лучистая цинковая обманка) – в кислой.

*Окислительно-восстановительные условия* (кислородный потенциал Eh), также как и концентрация водородных ионов (водородный потенциал pH), определяют направление химических реакций в геохимических процессах миграции элементов.

Химические реакции окисления-восстановления сводятся к изменению валентности взаимодействующих атомов химических элементов и заключаются в потере электронов атомами, которые окисляются, и в приобретении их атомами, которые восстанавливаются. Окисляющееся вещество, атомы которого отдают электроны, называется восстановителем, а вещество восстанавливаемое – окислителем.

Приобретение электронов одними атомами происходит одновременно с потерей электронов другими, поэтому всякая реакция окисления связана с одновременно идущей реакцией восстановления, этот единый процесс называется реакцией окисления-восстановления.

Причиной такого процесса является различие в энергии связи электронов: в восстановителе они связаны слабее, чем связываются затем в окислителе. При контакте этих веществ происходит переход электронов до тех пор, пока энергетические уровни в них не сравняются. Скорость протекания реакции различная.

Наиболее важным окислителем в земной коре является кислород, принадлежащий к самым распространенным элементам земной коры. Подавляющая часть атомов кислорода ( $\approx 99,99\%$ ) находится в связанном состоянии в минералах и горных породах и только 0,01% - в свободном состоянии. Несмотря на такое относительно незначительное количество свободного кислорода по сравнению со связанным, значение его для геохимических процессов, особенно для гипергенных и биогенных условий, очень велико.

Свободный кислород участвует в очень многих разнообразных химических реакциях, охватывающих большинство химических элементов, с которыми он вступает в реакции окисления.

Кроме (O) кислорода, окислителями в земной коре являются:  $Fe^{+3}$ ,  $Mn^{+4}$ ,  $N^{+5}$ ,  $F_2$ ,  $Cl_2$ ,  $S^0$  и другие, а восстановителями -  $Fe^{+2}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $Cr^{+3}$ ,  $V^{+3}$ ,  $S^{-2}$ ,  $As^{-2}$ ,  $H^0$ ,  $Fe^0$ ,  $Cu^0$ ,  $Zn^0$ ,  $Al^0$  и другие, а также ряд органических соединений.

Один и тот же элемент может быть окислителем и восстановителем ( $\text{Fe}^{+3}$  и  $\text{Fe}^{+2}$ ) в зависимости от степени ионизации и условий среды.

Особенно легко окисляются щелочные и щелочноземельные элементы (Na, Ca, K, Mg и другие) легко восстанавливаются некоторые неметаллы (F, Cl и другие).

Способность к окислению и восстановлению характеризуется окислительно-восстановительным потенциалом (Eh), измеряемым в вольтах, относительно какой-либо стандартной окислительно-восстановительной реакции, потенциал которой приравнивается к нулю.

Такой реакцией принято считать переход водорода из газообразного состояния в состояние иона ( $\text{H}_2 - 2e = 2\text{H}^+$ ).

Реакция  $\text{R} - ne = \text{R}^{+n}$  обозначает, что элемент, R отдавая окислителю  $n$  электронов  $e$ , переходит в состояние и она с зарядом  $+n$ , т.е.  $\text{R}^{+n}$ . Чем выше отрицательное значение или, что, то же самое, чем меньше абсолютное (или положительное) значение потенциала, тем сильнее процесс окисления данного элемента или его иона.

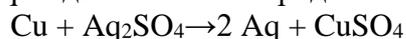
Щелочные и щелочноземельные элементы обладают самыми высокими значениями отрицательных потенциалов [ $-2,91$  ( $\text{Cs}^{+1}$ ) до  $-1,1$  ( $\text{Mn}^{+2}$ )] и легко вступают в соединения с кислородом, хлором и другими окислителями, поэтому не встречаются в самородном виде в земной коре.

Чем больше положительные значения потенциала, тем способность элементов находиться в самородном виде увеличивается.

Например:  $\text{Sn}^{+4}(+0,05)$ ;  $\text{Sn}^{+3}(+0,20)$ ;  $\text{Bi}^{+3}(+0,23)$ ;  $\text{As}^{+2}(+0,30)$ ;  $\text{Pb}^{+1}(+0,10)$ ; редко встречаются в самородном виде, а для  $\text{Ag}^{+1}(+0,808)$ ;  $\text{Au}^{+3}(+1,38)$ ;  $\text{Au}^{+1}(+1,55)$ ;  $\text{Pd}^{+1}(+0,82)$ ;  $\text{Hg}^{+1}(+0,86)$  - самородная форма нахождения является преобладающей.

Каждый из вышестоящих элементов (металлов) по окислительно-восстановительному потенциалу способен вытеснять из растворов солей нижестоящие элементы.

Например: в зоне вторичных сульфидов железной шляпы сульфидных месторождений – Cu вытесняет Ag из его солей и Ag выделяется в самородном виде:



Окислительно-восстановительные условия в геохимических процессах определяются обычно по железу, имеющему разные степени окисления:

Например, присутствие закисных соединений железа - сидерита ( $\text{FeCO}_3$ ), мелантерита ( $\text{Fe}[\text{SO}_4] \times 7\text{H}_2\text{O}$ ), вивианита ( $\text{Fe}_3^{+2} [\text{PO}_4] \times 8\text{H}_2\text{O}$ ) говорит о восстановительной среде, а соответствующие окисные его соединения – лимонит ( $\text{H} \times \text{FeO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$ ); ярозит ( $\text{KFe}^{+3}[(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2]$ ), дельвоксит ( $\text{Fe}_2^{+3}[\text{PO}_4] (\text{OH})_8 \times 3,5\text{H}_2\text{O}$ ) - указывают на окислительную среду.

Для восстановительной среды характерны минералы  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{V}^{+3}$ ,  $\text{Y}^{+4}$ ,  $\text{Cr}^{+3}$ , урановые черны и сульфиды, а для окислительной -  $\text{Mn}^{+4}$  (пирролюзит, вад), ванадаты, арсенаты, молибдаты, вольфрамиты, хроматы, желтые и зеленые минералы  $\text{U}^{+6}$ , карбонаты и сульфаты.

Показателями окислительно-восстановительных условий в геохимических процессах являются также хлориты, слюды, амфиболы, пироксены, гранаты и другие минералы переменного состава, содержащие Fe или другие катионы различной степени окисления.

#### 4) Сорбционные связи.

Важную роль в явлениях миграции при процессах метаморфизма, метасоматоза, гидротермального рудоотложения играет, так называемый фильтрационный эффект. Сущность, которого состоит в том, что в растворах, проходящих через полупроницаемые перегородки- (какими в земной коре являются горные породы), растворенное вещество может отставать от растворителя, иначе говоря, существует неодинаковая проницаемость горных пород для различных компонентов растворов, фильтрующихся через эти породы. Это отставание тем значительнее, чем меньше пористость горной породы и чем больше размеры гидратированных ионов растворенного вещества по сравнению с размерами молекул растворителя.

Величина фильтрационного эффекта выражается в % задерживаемого фильтром вещества по отношению к количеству вещества, первоначально содержащегося в растворе, прошедшем через фильтр:

$$I. (1-K_i) \times 100 = \alpha_i \times 100$$

где  $K_i$  - коэффициент фильтрации;

$\alpha_i$  - обратный ему коэффициент полупроводимости.

Коэффициент фильтрации показывает отношение скорости движения частиц растворенного вещества и растворителя по Д.С.Коржинскому:

$$II. K_i = w_i / w_0$$

где  $K_i$  - коэффициент фильтрации;

$w_i$  - скорость фильтрации растворенного вещества;

$w_0$  - скорость фильтрации растворителя.

Многие исследователи (Ф.В.Чухров, Ф.И.Вольфсон, О.Д.Левицкий и другие) объясняют сущность фильтрационного эффекта явлениями сорбционно-обменного характера.

Поверхностные (сорбционные) силы связаны с проявлением электрических сил на поверхности твердых веществ. Величина этих сил возрастает с ростом удельной поверхности твердых тел (минералов, горных пород и др.) и поэтому наибольшей сорбционной (поглощающей) способностью характеризуются высокодисперсные (рассеянные, рассыпанные) системы – коллоиды. Коллоиды представляют собой системы вещества, состоящие из мелко раздробленных частиц кристаллического вещества (от 1 до 100 мкм), равномерно распределенных в однородной среде. Эти частицы называются дисперсной фазой, а среда, в которой они распределены – дисперсионной средой. Поверхность, приходящаяся на единицу объема такой дисперсной фазы (удельная поверхность или дисперсность), очень велика. Когда она достигает предельного развития, система называется коллоидной.

Основные свойства дисперсных систем определяются молекулярным взаимодействием частиц в данной среде, что является причиной их неустойчивости: способность агрегироваться в хлопья, выпадающие в осадок (коагуляция), или давать гели - студнеобразные системы, в дальнейшем отвердевающие (стареющие).

Основными причинами коагуляции (выпадение осадка) – перехода гидрозолей (растворимых коллоидов в воде) в гидрогели (нерастворимые коллоиды) является:

1) наличие в растворе электролитов  $Na^{+1}$ ,  $Cl^{-1}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $(SO_4)^{-2}$  и других.

2) смешение зольей противоположно заряженных коллоидов. Положительно заряженными зольями являются гидраты окисей Al, Fe, Cr, Ti, Th, Zr и другие, а отрицательно заряженными –  $SiO_2$ ,  $V(OH)_5$ ,  $MnO_2$ , сульфиды, гумусовые коллоиды;

3) биогеохимические процессы.

Определяющими факторами сорбирования (поглощения, притяжения) являются заряд, объем, поляризационные свойства ионов, а также их дипольная природа. При этом сорбция увеличивается с возрастанием заряда ионов и их поляризуемости.

В гипергенных условиях коллоидные системы охватывают почти все классы химических соединений.

Наиболее типичными являются коллоиды для следующих элементов: Si, Al, Fe, Mn, P, As, S, C, значительно реже – Zn, Cu, Ni, Cr, Ti, Zr, Sr, Th, Bi, Cd, Pt.

Кроме хорошо выраженных коллоидов, в гипергенных условиях имеется большое количество непостоянных, очень сложных систем – коллоидальных пород: почв, илов, грязей, глинистых тел, сапропелей и сапропелитов, киров, асфальтов и других.

Коллоидные системы играют большую геохимическую роль в процессах миграции ряда химических элементов в литосфере, гидросфере, биосфере и атмосфере.

Так растворимость сульфидов тяжелых металлов в коллоидных растворах во много раз превосходит их растворимость в истинных растворах.

Кроме того, экспериментальные исследования показали, что почти все сульфиды дают высокодисперсные коллоидные системы при наличии сероводорода в растворе ( $H_2S$ ).

Большую группу представляют минеральные коллоидные системы, участвующие в образовании литологического состава коры выветривания (аллофан, галлуазит, монтмориллонит, каолинит, бемит, гетит и другие), осадочных пород и почвенного покрова.

Огромное количество коллоидных систем Fe, Mn, Al, Si, Ca, Mg и других элементов мигрирует в поверхностных водах, особенно в областях с теплым и влажным климатом, способствующим их образованию.

Органические коллоиды играют важную роль (сапропели, сапропелиты, сапрофиты, илы) в миграции элементов, их концентрации и рассеянии.

Органические коллоиды способны сортировать многие элементы, в том числе и редкие – Be, Co, Ni, Zn, Ge, As, Cd, Sn, Sb, Rb, Ti, Ag, Th, Au и другие.

Для атмосферы также характерно коллоидное состояние вещества (дисперсно-коллоидное), которое представлено аэрозолями (дисперсионная среда – газ, воздух). Твердые частицы атмосферной пыли (космической, вулканической, наземной, дымовой) служат центрами конвенции водяных паров и образование эрозолей.

*Основная литература:* [1] с. 22-29, с. 36-43; [2] с. 18-34; [3]; [4] с. 34-40.

*Дополнительная литература:* [9], [15].

*Контрольные вопросы*

1. Каково влияние гравитационных свойств атомов на геохимическую миграцию элементов?
2. Какова роль химических свойств в процессе геохимической миграции элементов?
3. Как влияет на миграцию образование различных соединений?
4. Как влияют на миграцию элементов температура и давление?
5. Каково влияние на миграцию элементов степени электролитической диссоциации растворов?
6. Каково влияние щелочности среды на миграцию элементов?
7. Как влияет окислительно-восстановительная обстановка на миграционную способность элементов?
8. Влияние жизнедеятельности организмов на миграцию элементов.

**Лекция 6. Геохимические барьеры. Классификация геохимических барьеров. Методологическая основа геохимических поисков месторождений.**

**Геохимические барьеры** – это те участки земной коры, где на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация. В пределах большинства геохимических барьеров довольно резко изменяется форма нахождения элементов в мигрирующем потоке (изменение типа миграции), а затем происходят связанные с ней изменения интенсивности миграции и осаждение (концентрация) определенных химических элементов или их соединений.

Следовательно, именно на геохимических барьерах происходят максимальные эколого-геохимические изменения, отмечаемые в биосфере. В связи с этим барьерам уделяется особенное внимание.

Широко распространенное в природе и усиливающееся под влиянием техногенеза осаждение химических элементов на геохимическом барьере, связанное с изменением типа миграции, можно рассмотреть на приведенном ниже примере.

При отсутствии свободного кислорода (глеевая обстановка) железо в подземных водах будет находиться в двухвалентном, хорошо растворимом состоянии ( $Fe^{2+}$ ). Выход таких вод на дневную поверхность со свободным кислородом приводит к окислению и образованию труднорастворимого гидроксида железа –  $Fe(OH)_3$ . Происходит переход металла из формы водных растворов в минеральную. При этом изменение типа миграции

железа сопровождается его осаждением и концентрацией. Рассматриваемый барьер относится к так называемым кислородным.

С этим барьером мы постоянно сталкиваемся и в повседневной жизни. На дне ванн и раковин умывальников мы замечаем постепенно появляющуюся «ржавчину». Обычно она представляет собой смесь гетита и гидрогетита (лимонита), в составе которой около 90% приходится на долю оксида трехвалентного железа. Образование этих минералов в рассматриваемом случае также связано с осаждением металла на кислородном барьере. Только транспортировка растворимого двухвалентного железа идет техногенным путем по трубам. Из водного раствора в условиях присутствия свободного кислорода, т.е. на геохимическом барьере, железо переходит в минеральную форму и осаждается. Происходит это, когда вода вытекает из крана. Мощная струя воды смывает значительную часть осаждающихся минералов. Поэтому, если струя не столь мощна (просто протекает кран), осажденного железа остается больше.

К настоящему времени учение о геохимических барьерах имеет огромное научное и практическое значение. Его использование позволяет оценивать геохимические (эколого-геохимические) условия концентрации химических элементов и их соединений. Это в свою очередь дает возможность определять особенности образования месторождений полезных ископаемых различных типов, а затем переходит к наиболее рациональному проведению поисков аналогичных месторождений.

### **Краткая история учения о геохимических барьерах**

Термин «*геохимические барьеры*» был предложен А.И. Перельманом в 1961 г., о чем он сам писал в своей монографии «Геохимия». Первоначально учение о барьерах начало использоваться для зоны гипергенеза. Уже первое применение, особенно с привлечением ландшафтно-геохимической основы, позволило объяснить многие процессы формирования повышенных концентраций химических элементов в почвах и растениях.

Используя учение о геохимических барьерах, делаются попытки объяснить особенности формирования рудных месторождений – сначала гипергенных, а затем и гидротермальных. Появляется возможность по-новому взглянуть и на первичные ореолы, а следовательно, увеличить достоверность поисковых геохимических прогнозов. В 1973 г. В.А. Алексеенко в учебном пособии для студентов вузов пишет: «Особо следует отметить, что учение о геохимических барьерах, разработанное А.И. Перельманом для гипергенных процессов, можно применять и при рассмотрении гипогенной миграции элементов».

Уже первые случаи привлечения учения о геохимических барьерах при проведении литохимических поисков по вторичным ореолам и биогеохимических поисках позволили существенно уменьшить число ложных геохимических аномалий.

Установлено, что в переживаемый сейчас период перехода биосферы в ноосферу существенно возрастает количество геохимических барьеров. При этом возникают новые техногенные барьеры, не имеющие природных аналогов.

К числу особо перспективных направлений в рассматриваемом учении относится изучение социальных геохимических барьеров, не имеющих природных аналогов. Часть их вызывает резкое уменьшение безопасности жизнедеятельности. К ним относятся зоны складирования и захоронения большинства отходов. Другая часть социальных барьеров представлена отвалами горных пород и различными хвостохранилищами обогатительных фабрик. При определенных условиях многие из этих барьеров можно переводить в разряд техногенных месторождений и таким образом более рационально использовать природные ресурсы.

**Типы барьеров.** По генетической классификации А.И. Перельмана все геохимические барьеры биосферы разделяются на два основных типа – *природные* и *техногенные*. И те, и другие располагаются на участках изменения факторов миграции. В первом случае смена факторов, а соответственно и смена одной геохимической обстановки другой обуславливается природными особенностями конкретного участка биосферы. Во втором –

такая смена геохимических обстановок происходит в результате антропогенной деятельности.

Однако довольно часто антропогенное изменение геохимической обстановки и формирование техногенных геохимических барьеров являются своеобразным толчком, после которого идет образование природных геохимических барьеров. Происходит наложение на техногенные барьеры природных. Иногда все они (в том числе и техногенные) могут лишь частично перекрывать друг-друга. Такие процессы формирования геохимических барьеров обосновали выделение нового третьего типа *техногенно-природных* геохимических барьеров.

**Классы барьеров.** Выделенные типы геохимических барьеров подразделены А.И. Перельманом на три основных класса: *физико-химические, механические и биохимические*.

Образование *физико-химических барьеров* связано с изменением физико-химической обстановки. К настоящему времени детальная классификация разработана только для этого класса барьеров, а точнее, для случая осаждения химических элементов, мигрирующих в ионной форме в водах с различными окислительно-восстановительными и щелочно-кислотными условиями.

*Механические барьеры* представляют собой участки резкого уменьшения интенсивности механической миграции. Они в основном связаны со вторым типом миграции химических элементов, когда их форма нахождения не изменяется, но они перемещаются в пространстве. Перемещение происходит, как правило, в пределах биосферы – чаще всего с миграцией элементов в минеральной или коллоидной форме. Перемещение коллоидов и минералов может происходить в воздушной и водной средах, а также на границе сред (скатывание обломков по склонам).

*Биогеохимические барьеры*, в отличие от многих других, связаны в основном с первым типом миграции химических элементов, когда изменяется их форма нахождения без значительного перемещения в пространстве. По своей сути они представляют собой накопление химических элементов растительными и животными организмами. Эти геохимические барьеры относятся к числу наиболее распространенных в биосфере и могут быть как природными, так и техногенными. Концентрация химических элементов на биогеохимических барьерах непосредственно является частью биологического круговорота этих элементов.

Исследования последних десятилетий в области геохимических барьеров показали настоятельную потребность в выделении дополнительных классов. В связи с этим выделяется самостоятельный класс *комплексных геохимических барьеров*. Следует отметить, что природно-техногенные геохимические барьеры третьего типа всегда являются комплексными. Их число, а также научная и практическая значимость непрерывно возрастают.

В типе техногенных геохимических барьеров В.А. Алексеенко также предложено (1997) выделять еще один самостоятельный класс – *класс социальных барьеров*. После выхода последних работ А.И. Перельмана в научной литературе начал широко использоваться термин «*социальная миграция химических элементов*». По аналогии с социальной миграцией, В.А. Алексеенко считает целесообразным введение понятия «*социальный геохимический барьер*».

Все это в сумме и обуславливает, по мнению В.А. Алексеенко, обособление *социальных геохимических барьеров*. Широкое (и все возрастающее) распространение этих барьеров, а главное, все возрастающее негативное воздействие их на среду, окружающую человека, и непосредственно на его здоровье делают необходимым не только самостоятельное выделение, но и детальное эколого-геохимическое изучение данных барьеров.

Геохимические барьеры могут существенно отличаться друг от друга не только концентрациями определенных элементов и их общим количеством на барьере, но и величиной самих барьеров. По этому критерию А.И. Перельман выделил *макро-, мезо- и микробарьеры*.

К *макрогеохимическим барьерам* относятся зоны с резким уменьшением интенсивности миграции химических элементов на расстоянии в тысячи метров. Мощности зон могут достигать нескольких сотен метров. Такими барьерами являются, например, дельты крупных рек, где происходит смешивание пресных речных вод с морскими, которые являются слабыми электролитами.

Протяженность *мезогеохимических барьеров* обычно колеблется от первых метров до тысячи метров. Их примером могут быть краевые зоны болот, где резко изменяются окислительно-восстановительные условия и могут накапливаться многие химические элементы, предварительно выщелоченные из водораздельных и склоновых участков.

Размеры *микрoгеохимических барьеров* могут колебаться от долей миллиметра до первых метров. К ним относятся барьеры выделяемые в отдельных растениях и барьеры, на которых формируются рудные прожилки и жилы в пределах месторождений полезных ископаемых.

#### **Вопросы для самоподготовки:**

1. Дайте определение понятия «Геохимические барьеры». Приведите примеры барьеров?
2. Какова роль А.И. Перельмана в становлении учения о геохимических барьерах?
3. Каковы отличительные особенности различных типов барьеров?
4. Дайте подробную характеристику типам геохимических барьеров?
5. Дайте подробную характеристику классам геохимических барьеров?

Лекция 7. Общие понятия о геохимических аномалиях. Геологическая оценка геохимических аномалий. Геохимическое поле и его локальные аномалии.

Геохимическая аномалия—это отклонение от геохимических норм, свойственных либо определенному типу – пород, растений, вод, либо – геохимическому ландшафту, либо определенному району. Это значительное повышение или понижение содержания элементов по сравнению с фоном. Геохимические аномалии различаются по размерам: локальные, отвечающие по размерам рудным телам или месторождениям; региональные, соответствующие полям концентрации и перераспределения или полям рассеяния.

Региональные аномалии выявляются при мелкомасштабных геохимических исследованиях, а локальные – при средне- и крупномасштабных.

Геохимические аномалии по отношению к телам или месторождениям полезных ископаемых можно разделить на перспективные, неперспективные и ложные.

Перспективные аномалии генетически связаны с полезными ископаемыми, поэтому они в первую очередь должны исследоваться при поисках отдельных тел и месторождений полезных ископаемых.

Неперспективные аномалии – это геохимические аномалии, связанные с повышенными, но не промышленными концентрациями элементов в горных породах (это могут быть отдельные точки и зоны рассеяния). На первых этапах работ, очень трудно отличить неперспективные аномалии от перспективных, для этого необходимо учитывать конкретные геохимические и геологические особенности участка. Часто большинство трудно различимых аномалий отбраковывается после проведения горных и буровых работ.

Ложные аномалии отличаются от выше описанных тем, что они не связаны со сколько-нибудь повышенным для данного типа пород содержанием каких-либо элементов. Возникновение ложных аномалий вызвано либо неправильным объединением в одну выборку проб, либо неправильным ландшафтно-геохимическим районированием территории, либо при проведении поисков не учитывались биогеохимические особенности растений.

В зависимости от распределения содержаний элементов аномалии могут быть положительными или отрицательными. Первые отличаются повышенными концентрациями элементов-индикаторов, вторые – резко пониженными (так отрицательные аномалии ряда металлов выявлены в горных породах на пегматитовых месторождениях). Для выделения аномалий необходимо определить минимальное аномальное содержание ( $C_{ан}$ ) или верхний и нижний пределы его колебания относительно нормального фонового ( $C_{ф}$ ) содержания.

$$C_{ан} = C_{ф} + 3S;$$

где  $C_{ан}$  – аномальное содержание элемента,  
 $C_{ф}$  – фоновое содержание элемента,  
 $S$  – среднеквадратическое отклонение.

Все ранее рассмотренные геохимические аномалии относятся к природным, т.е. образовавшимся без вмешательства человека.

В период формирования ноосферы гипергенная миграция химических элементов стала во многом определяться антропогенной деятельностью. В результате на ряде геохимических барьерах сформировались аномалии, вызванные этой деятельностью. Такие аномалии получили название «техногенных». В настоящее время техногенные процессы достигли таких масштабов, что и на природных, и на техногенных барьерах под их воздействием возможно накопление определенных элементов (соединений) в промышленных концентрациях.

Техногенные барьеры В.А. Алексеенко (2000 г.) предложил называть «социальными геохимическими барьерами». Под этим термином объединяются зоны складирования как промышленных, так и бытовых отходов. Техногенные источники этих веществ, попавших в миграционный поток, называют загрязнителями. Ими могут быть отдельные предприятия, горные выработки, определенные сельскохозяйственные ландшафты. Размеры техногенных аномалий колеблются в широких пределах (от нескольких км до 100 км). Элементы в техногенных аномалиях могут находиться в минеральной, биогенной или изоморфной формах, в виде растворов и газовых смесей.

Основными критериями разделения аномалий на природные и техногенные являются – морфология аномалий, их приуроченность к определенным горным породам и геологическим структурам, а также ассоциации химических элементов, образующих эти аномалии.

Исходя из положения В.И.Вернадского, что «в любом природном объекте содержатся все химические элементы», следует отметить, что довольно часто на отдельных участках земной коры в коренных породах, почвах, водах, атмосфере ряд элементов накапливается совместно. И это совместное накопление принято называть «ассоциация элементов». Такое совместное накопление элементов можно объяснить общностью условий миграции, обусловленных внутренними и внешними факторами. Если на концентрацию определенных элементов решающее влияние оказывают сходные внутренние факторы, то ассоциации элементов, находящихся в повышенных содержаниях, сохраняются в широком диапазоне различных ландшафтно-геологических условий. Например: устойчивые ассоциации—U, Pb, He, Th-Pb-He, K-Ag, образование которых связано с радиоактивным распадом.

Если же на образование ассоциаций основное влияние оказывают внешние факторы, то совместное нахождение элементов ограничено комплексом определенных условий (Т, Р, рН и т.д.). Например: ассоциация – Au-Cu-As-Pb-Zn-Fe типична только для золотосульфидных руд, при выветривании которых могут возникать новые ассоциации: Au-As-Fe, Cu-As-Zn-Au-Fe и т.д.

Для техногенных геохимических аномалий характерны своеобразные ассоциации химических элементов, которые определяются в основном уровнем развития науки и техники в период загрязнения. Такие аномалии представлены – свинцом, цинком, медью,

молибденом, никелем, ванадием, кобальтом, барием, марганцем, титаном, хромом, железом – их еще называют «загрязняющими веществами». В техногенных аномалиях контуры, образуемые отдельными элементами, часто не совпадают. Контрастности техногенных аномалий каждого элемента могут быть резко различными.

При проведении геохимических исследований часто приходится иметь дело с ассоциациями элементов, составляющих минералы, слагающие различные горные породы (осадочные, магматические, метаморфические). Как пример можно привести данные об ассоциациях элементов, находящихся в повышенных концентрациях в коренных породах на месторождениях полезных ископаемых (таблица 3.1).

Этот неполный перечень ассоциаций элементов в различных типах полезных ископаемых свидетельствует о многообразии сочетаний различных элементов. Кроме знаний ассоциаций минералов необходимо учитывать ассоциации элементов-примесей, находящихся в повышенных содержаниях в минералах-хозяевах. При этом образование одной части элементов-примесей объясняется законами изоморфного замещения. Образование же второй части, представляющей собой механическую примесь в минералах, можно объяснить неполным разделением веществ по миграционной способности. Часто изучение элементов-примесей значительно увеличивает эффективность поисковых работ.

**Таблица 3.1 - Ассоциации элементов, находящихся в повышенных концентрациях в коренных породах**

Типы полезных ископаемых	Ассоциации элементов
Магматические месторождения	
Хромитовые	Cr, Fe, Mg, (Pt, Al)
Платиновые	Cr, Fe, Pt, (Os, Ir), Mg
Титано-магнетитовые	Fe, Ti, V
Медно-никелевые (сульфидные)	Ni, Cu, (Pt, Pd, Co)
Апатитовые	P, Ti, U, Zr, Th, Be, F, Cl, Sr, Nb, Ta, TR
Стратиформные месторождения	
Медные	Cu, Fe, (Pb, Zn, Ag)
Свинцово-цинковые	Pb, Zn, Ag, Fe, Mg (Ba, F)
Скарновые месторождения	
Железорудные	Fe, Ca, Al, Si
Медные	Cu, Fe, Ca, Al, Si, (Mo, Co), (Pb, Zn)
Молибденово-вольфрамовые	Mo, W, Fe, Cu, Al, Si
Свинцово-цинковые	Pb, Zn, Fe, Cu, Ag, Bi, Al, Si
Оловорудные	Sn, Fe, Cu, (Mo, As, Zn, Pb, Bi, Ag, W), Si
Осадочные месторождения	
Борные	B, Mg, K
Железные	Fe, Mn
Марганцевые	Mn, Fe
Алюминевые	Al, Fe
Гидротермальные месторождения	
Кварцевого парагенезиса	Au, As, Fe, Bi, Mo, W, U, Si, Cu
Сульфидного парагенезиса:	
-свинца и цинка	Pb, Ba, Zn, Cu, Fe, U, Mo
-пятиэлементной формации	Co, Bi, Ni, Ag, Ca, Ba, U, Fe, As, (Pb, Zn, Cu)
-касситерита	Sn, Pb, Zn, Fe, W
Карбонатного парагенезиса	
-железа	Fe, Mg, Ca, (Cu, Pb)
-марганца	Mn, Mg, Ca, (Fe, Ba)
-магния	Mg, Ca

Колчеданные	Fe, Cu, S, Zn, Pb, (Au, Ba)
-------------	-----------------------------

Как известно, в подземных водах на месторождениях почти всех типов встречаются в повышенных содержаниях Cu, Zn, Mo, являющиеся «проходящими» минералами. Их содержание не свидетельствует об оруденении, но значительные концентрации этих элементов могут иметь поисковое значение. В связи с этим, применение гидрохимического метода поисков рудных месторождений предполагает знание ассоциаций элементов, находящихся в повышенных содержаниях в водах месторождений различного типа.

Кроме прямых индикаторов оруденения в поверхностных и подземных водах, большое значение имеют косвенные элементы-индикаторы. Так, одним из лучших гидрохимических индикаторов полиметаллического оруденения является кадмий.

Гидрогеохимические поиски кимберлитовых трубок могут вестись по повышенным концентрациям Zn, Ni, Co, Cr, V, Ga, Cu.

Использование газовой съемки для поисков рудных месторождений началось сравнительно недавно. Определенные ассоциации газов отмечаются как над радиоактивными, так и над нерадиоактивными рудными телами. Так в коренных породах и почвах над полиметаллическими и ртутными месторождениями в повышенных содержаниях встречаются диоксид углерода, водород и пары ртути. Над колчеданными месторождениями – диоксид углерода (до 4%) и сероводород; над золотосодержащими сульфидными рудами – диоксид углерода и азот, а над группой сульфидных месторождений отмечаются повышенные содержания – H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>.

Особое место занимают ассоциации элементов, вызванные биогеохимическими процессами. Их образование с одной стороны обусловлено физиологическими потребностями живой материи, а с другой - химическим составом окружающей и питающей среды. С изменением состава окружающей среды (коренных пород и почв) изменяется содержание в растениях металлов. Особенно резкие изменения происходят над месторождениями. Работами многих исследователей выделены специфические ассоциации основных элементов, находящихся в повышенных содержаниях в золе растений над различными типами месторождений (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Ассоциации элементов над различными типами месторождений

Тип месторождений	Ассоциации элементов
<b>Скарновые</b>	
медно-кобальтовые	Co, Ni, Cu, As, (Ag, Pb, Zn)
медные	Mo, Cu
молибденовольфрамовые	Mo, W, (Bi)
<b>Грейзеновые</b>	
сульфидные	Be, Mo, Bi
редкометальные	Be, F, Zr, (Cu, Mo, Pb)
<b>Гидротермальные</b>	
золотокварцевые	Zn, Au, (Pb, Cu)
золотосульфидные	Au, Cu, As, (Ag, Pb, Mo)
оловорудные	Sn, Pb, Cu, Zn
медные	Mo, Cu, Zn
молибденовые	Mo
полиметаллические	Zn, Pb, (Ti, Mn)
Колчеданно-полиметаллические	Pb, Zn, Mo, Ag, (Sn, Cu)
Медно-колчеданные	Mo, Cu, Zn, Co, (Ag)
Стратиформные свинцово-цинковые	Pb, Zn, (Ag)
Никеленосные коры выветривания	Ni, (Co, Cu)

*Основная литература: [1] с. 64-78; [2] с. 54-66.*

*Дополнительная литература: [13].*

*Контрольные вопросы*

1. Что такое геохимическая аномалия?
2. Как подразделяются геохимические аномалии по размерам?
3. Как классифицируются геохимические аномалии?
4. Что такое «ассоциация элементов» и чем она обусловлена?
5. Какие Вам известны ассоциации элементов в природных водах?
6. Какие существуют ассоциации элементов в газах?
7. Какие характерны ассоциации элементов для растений?

Лекция 8. Геохимические ландшафты. Классификация ландшафтов. Геохимические съемки. Виды и масштабы геохимических съемок (картирования).

Геохимические поиски месторождений полезных ископаемых ведутся на земной поверхности, в области сочленения литосферы с атмосферой и гидросферой, в условиях активной современной механической, солевой и биогенной миграции химических элементов.

В итоге методика этих геохимических поисков и оценка выявленных литохимических, гидрохимических, атмохимических и биогеохимических аномалий в большой мере определяется закономерностями гипергенной миграции элементов. Глубина, на которую распространяются процессы гипергенеза на суше, зависит от многих факторов и их разнообразного сочетания, определяющего разрушение пород и вынос подвижных продуктов выветривания элювиальными процессами. Наиболее активно эти процессы протекают до глубин грунтовых вод в так называемой зоне просачивания (инфильтрации), где происходит достаточно свободная и быстрая миграция атмосферных вод. Воды этой зоны богаты кислородом, углекислотой, часто органическим веществом, поэтому характеризуются значительной окисляющей и растворяющей способностью.

Ниже уровня грунтовых вод происходит подземный сток в сторону гидрографической сети (реки, озера и т. д.), на основании чего выделяется одна общая верхняя зона активного водного обмена в гипергенной оболочке.

Исключительно важную роль в составе и строении зоны гипергенеза играют разнообразные генетические типы почвенного покрова, кора выветривания и зона окисления, механические и химические осадки, биогенные продукты аккумуляции, геохимические ландшафты и связанные с ними химические элементы.

С зоной гипергенеза связаны крупные месторождения бокситов, каолинов, железа, марганца, никеля, кобальта, редких элементов. В зоне гипергенеза формируются различные генетические и геохимические типы ландшафтов (зональные, региональные, элементарные).

Геохимический ландшафт это участок земной поверхности, отличающийся особенностями миграции химических элементов, обусловленных комплексом взаимосвязанных и взаимозависящих природных факторов и процессов. Главную роль при этом играют поверхностный и подземный сток, почвообразовательные процессы, биогенные аккумуляции и т.д.

В природных условиях ландшафты представлены разными категориями: огромными зонами (тайга, степь, пустыня); крупными областями, обусловленными тектоническими нарушениями и характером рельефа; местными ареалами т.д. Различные генетические типы и разновидности почв (лессы, чернозем, суглинки, супеси и т. д.) наиболее ярко отражают геохимические ландшафты, т.к. однородность почвы должна соответствовать определенному составу растительности, однородному составу почвообразующей породы, определенному макро- и микроклимату. Элементы, активно мигрирующие в почвах и природных водах и определяющие характерные черты ландшафта в данной области, районе, участке рельефа

получили название «типоморфных». К главным типоморфным элементам и ионам относятся: Si, Al, Fe, H, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> и другие, миграция которых в ландшафтах накладывает отпечаток на почвы, природные воды, растительный покров и связывает все черты ландшафта крепкой причинной связью. Так, в степной зоне характерное для ландшафтов сочетание элементов – Ca, Mg, углекислота, образующих карбонаты; в меньшей степени – Na, Cl, H, сульфатный анион. Для пустынной зоны важнейшими мигрантами в ландшафтах являются катионы и анионы, ведущие к образованию хлоридных, сульфатных и в меньшей степени карбонатных солей.

Выделяются следующие геохимические показатели ландшафта:

- 1) количество живого вещества, ежегодно продуцирующегося в ландшафте;
- 2) общее количество живого вещества, содержащегося в ландшафте;
- 3) качество живого вещества, т.е. специфика отдельных видов организмов и органических соединений (белки, углеводы, лигнин и др.);
- 4) интенсивность разложения мертвых органических остатков;
- 5) количество и качество мертвого органического вещества, накапливающегося в ландшафте (гумус, торф и т.д.);
- 6) количество минеральных элементов почвы, ежегодно вовлекаемых в биологический круговорот;
- 7) ряды биологического поглощения (избирательная способность организмов к поглощению элементов);
- 8) коэффициенты миграции элементов;
- 9) типоморфные химические элементы и ионы;
- 10) геохимические особенности природных вод;
- 11) минеральные соединения, накапливающиеся в почвах или коре выветривания;
- 12) важнейшие обменные катионы почв, ила, коры выветривания;
- 13) редкие и рассеянные элементы;
- 14) геохимическое сопряжение и геохимическая контрастность ландшафта в пространстве и во времени.

Совокупность этих геохимических показателей может дать более или менее полное представление о: 1) составе элементов и их соединений в конкретном ландшафте; 2) миграции, рассеянии и концентрации элементов в коре выветривания и ландшафтах; 3) биологической, биогеохимической активности организмов; 4) тенденции и направленности геохимических процессов, а затем геохимических поисков.

Выделяются три основных типа ландшафтов: элементарные, геохимические, межбарьерные.

*Элементарный ландшафт* (по Б.Б.Полынову) «в своем типичном проявлении должен представлять один определенный тип рельефа, сложенный одной породой или наносом и покрытый в каждый момент своего существования растительным сообществом. Все эти условия создают определенную разность почв, свидетельствуя об одинаковом на протяжении элементарного ландшафта развитии взаимодействия между горными породами и организмами». Одной из особенностей элементарного ландшафта является обязательное отсутствие внутренних причин, ограничивающих площадь их распространения. Так можно считать элементарным ландшафтом пятно солончака, а вот болотную кочку или муравейник – нельзя. У одинаковых элементарных ландшафтов должны быть аналогичные геоморфологические условия, одинаковые разности почв, одинаковая растительность, одинаковый состав грунтовых вод, одинаковые почвоподстилающие коренные породы (при этом учитывается состав горных пород, а не коры выветривания).

Для характеристики элементарных ландшафтов используются такие понятия как площадь выявления и мощность ландшафта. Под площадью выявления понимают наименьшую площадь, на которой представлены все части данного элементарного ландшафта. Мощность ландшафта определяют расстоянием от зоны распространения пыли в тропосфере до горизонта грунтовых вод. По вертикали элементарные ландшафты

неоднородны и разделяются на отдельные ярусы. Основные из них – надземная часть ландшафта, в которой выделяется ярус надземного живого вещества, почва, почвоподстилаящая кора выветривания с материнскими горными породами, водоносный горизонт (рисунок 4.1).

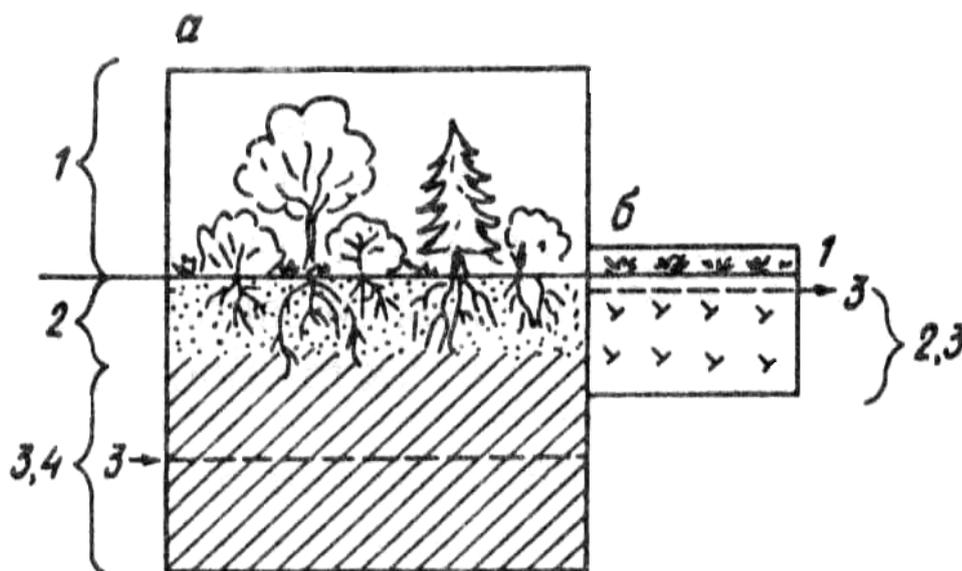


Рисунок 4.1 – Вертикальный профиль а) лесного и б) болотного ландшафтов. По Н.К.Чертко.

1 – наземная часть ландшафта; 2 – почва; 3 – водоносный горизонт; 4 – кора выветривания, коренные породы.

*Геохимический ландшафт* – по определению А.И. Перельмана – «это парагенетическая ассоциация сопряженных элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов». Наибольшее значение для осуществления связей между элементарными ландшафтами, составляющими единый геохимический ландшафт, имеют поверхностный и подземный сток. Для характеристики геохимических ландшафтов кроме мощности и площади выявления введены такие понятия как геохимическое сопряжение и местный ландшафт. *Геохимическое сопряжение* представляет собой закономерное для каждого геохимического ландшафта сочетание образующих его элементарных ландшафтов. Совокупность же элементарных ландшафтов, свойственных определенной геоморфологической структуре геохимического ландшафта, получила название *местного ландшафта*. Геоморфологической структурой, объединяющей элементарные ландшафты в местный, может быть водораздел, склон, терраса, лог и т.д.

*Межбарьерным ландшафтом* называется совокупность элементарных ландшафтов, характеризующихся единым видом миграции элементов и расположенным между двумя геохимическими барьерами одного класса. Выделение таких ландшафтов связано с определенным видом миграции и определенной формой нахождения элементов в миграционном потоке. Так объединение в одну группу элементарных ландшафтов, составляющих межбарьерные ландшафты между механическими барьерами (Рисунок 4.2), обусловлено процессом механической миграции элементов в минеральной форме в миграционном потоке (в данном случае воды реки). Элементарные ландшафты, расположенные между сероводородными барьерами, объединяет миграция элементов, находящихся в форме водных растворов, заканчивающаяся на сероводородных барьерах, где эти элементы переходят в минеральную форму (в трудно растворимые сульфиды).

Обычно миграция элементов идет одновременно в нескольких разных формах и на одном участке можно выделить несколько межбарьерных ландшафтов, взаимно перекрывающих друг друга (рисунок 4.2). Выделение межбарьерных ландшафтов

необходимо для установления положения месторождения или загрязнителя окружающей среды определенными элементами, мигрирующими в интересующей нас форме. Для этого проводится детальное опробование участков, представляющих собой геохимические барьеры.

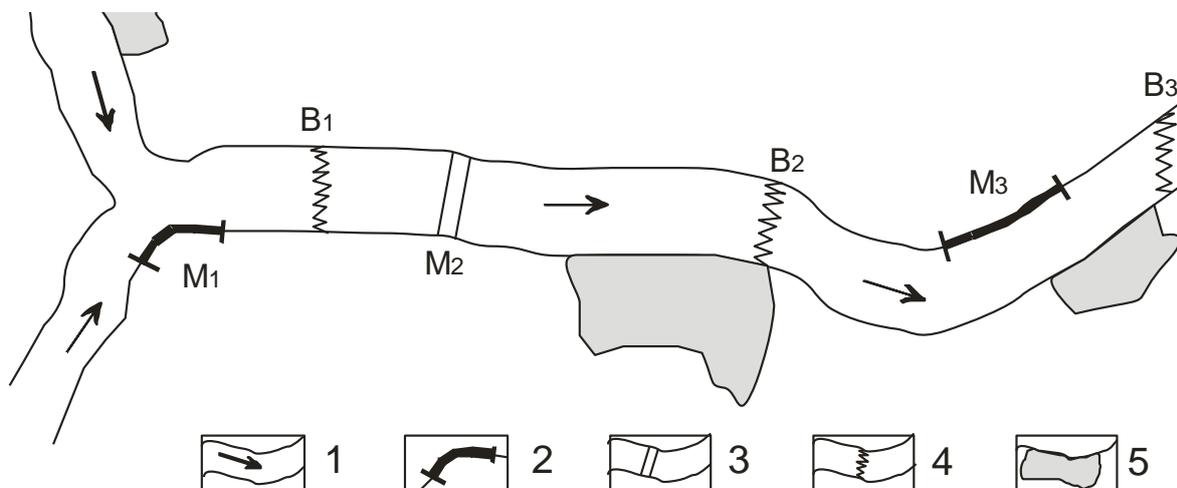


Рисунок 4.2 – Межбарьерные ландшафты на реке

1 – река и ее направление течения; 2-4 – барьеры (2 – механический природный; 3 – механический техногенный; 4 - сероводородный); 5 – населенные пункты.

Если повышенная концентрация Pb и Zn отмечается только на третьем механическом барьере, то источник поступающий в реку минеральной взвеси с повышенным содержанием этих металлов находится в пределах межбарьерного ландшафта, ограниченного вторым (M<sub>2</sub>) и третьим (M<sub>3</sub>) механическими барьерами.

Точно также, если повышенной концентрацией Mo и U характеризуется лишь третьей сероводородный барьер, то источник этих металлов, мигрирующих в форме растворов в водах реки, должен существовать между вторым (B<sub>2</sub>) и третьим (B<sub>3</sub>) сероводородными геохимическими барьерами.

Аналогичным образом можно определять природные источники элементов, т.е. использовать межбарьерные ландшафты при геохимических поисках. Ощутимый эффект рассматриваемая методика может дать при поисках по потокам рассеяния и при шлиховых поисках.

#### Классификация ландшафтов

Классификация по уровням позволяет систематизировать имеющиеся многочисленные данные о состоянии окружающей среды, составлять карты геохимических ландшафтов различных масштабов и таким образом решать важнейшие прикладные задачи, связанные с проблемами окружающей среды и поисков месторождений полезных ископаемых.

##### *Первый классификационный уровень*

На первом (самом высоком) таксонометрическом уровне А.И. Перельманом предложено учитывать основные формы движения материи. В соответствии с этим, на рассматриваемом уровне ландшафты в зависимости от преобладания в них основного вида миграции можно разделить на: абиогенные, биогенные и техногенные.

Основная отличительная черта *абиогенных* ландшафтов – отсутствие биогенной миграции элементов, а, следовательно, биологического круговорота элементов. К таким ландшафтам относятся центральные части Антарктиды и Гренландии, а также хребты и вершины гор, покрытые ледниками. В пределах этих ландшафтов преобладают механическая и физико-химическая миграция элементов. Кроме того, в абиогенные ландшафты все больше попадает элементов за счет процессов техногенеза.

В биогенных (природных) ландшафтах всегда существует биологический круговорот элементов, а ведущим видом миграции элементов обычно является биогенные. Механическая и физико-химическая миграции в этих ландшафтах, как правило, играют подчиненную роль. Следует отметить, что все большая часть биогенных ландшафтов испытывает постоянно растущее антропогенное (техногенное) воздействие.

В техногенных ландшафтах биологический круговорот элементов в значительной степени нарушен, а определяющим видом является техногенная (социальная) миграция, аналогов которой по комплексу элементов свойственных их техногенным соединениям и дальности их перемещения в природе практически нет.

Выявляется общая тенденция к постепенному переходу биогенных ландшафтов в техногенные и к всё возрастающей скорости формирования ноосферы.

#### *Второй классификационный уровень*

На втором классификационном уровне деление биогенных ландшафтов базируется на особенностях биогенной миграции элементов, оценка которых включает учет количественной роли биогенной миграции и скорости перехода элементов в форму, соответствующему основному виду миграции (в природных ландшафтах это – скорость перехода элементов из водных растворов, газовых смесей и минеральной формы в биогенную). Кроме того, в определенной мере учитывается и скорость обратного перехода, связанного в биогенных ландшафтах с разложением растений (их отдельных частей), поступающих после опада и отмирания в почву. Основными показателями для такого учета служат величины общей биомассы (Б) и ежегодной продукции (П). По изменению отношения биомассы к ежегодной продукции среди биогенных ландшафтов выделяют пять групп: 1) леса; 2) степи (луга, саванны); 3) пустыни; 4) тундры и верховые болота; 5) примитивные пустыни. Их формирование и обычная зональность размещения в основном определяются климатом. Группы в свою очередь подразделяются на типы в зависимости от изменения отношения  $\lg П \setminus \lg Б$  (коэффициент К).

Так содержание цинка в листьях бука почти в три раза выше, чем в листьях граба, отличающихся более высокой концентрацией стронция. В таблице 4.1 приводятся содержания элементов в различных растениях, произрастающих в одинаковых ландшафтно-геохимических условиях Западного Кавказа.

Таблица 4.1 - Содержание элементов в различных растениях

Растение	Mn	Ni	Cu	Ti	V	Zr	Ba	Sr	Pb	Zn
Пихта	386	6.4	6.0	111.5	1.6	3.1	62	33	1.9	9.5
Граб	692	5.0	6.4	19.5	1.9	5.0	71	43.3	1.8	5.5
Бук	500	5.4	8.4	83	1.0	3.0	68	24	1.4	15.1
Дуб	975	9.4	8.6	204	2.1	6.5	100	17	2.4	8.5

Примечание: Среднее содержание ( $n \cdot 10^{-3}$ , %) некоторых элементов в золе хвои и листьев деревьев, произрастающих в одинаковых ландшафтно-геохимических условиях Западного Кавказа.

Техногенные ландшафты на втором уровне также как и биогенные, следует классифицировать с учетом ведущего вида миграции, в данном случае – биогенной.

Исходя из этого, техногенные ландшафты разделяются на: сельскохозяйственные, промышленные, лесотехнические, ландшафты населенных пунктов (селитебные), искусственных водоемов и дорожные ландшафты. В сельскохозяйственных ландшафтах значительная роль принадлежит биогенной миграции. При изучении сложного процесса миграции элементов в с/х ландшафтах, кроме их вывоза с урожаем, необходимо учитывать и процесс постоянного техногенного поступления в почвы целого ряда элементов, которые связаны, в основном, с внесением удобрений. Элементы, вносящиеся техногенным путем в сельскохозяйственные ландшафты, в основном находятся в минеральной форме и в виде соединений, часто не имеющих природных аналогов.

#### *Третий классификационный уровень*

Все ландшафты разделяются в зависимости от особенностей миграции химических элементов непосредственно в почвах, т.к. в почвах природных ландшафтов наблюдается наибольшее напряжение геохимических процессов, при этом, максимум характерен для гумусового горизонта, который можно считать своеобразным геохимическим центром.

Кроме того почвы – это важнейшее звено, связывающее почвоподстилающие породы и воды (т.е. постоянные и основные природные источники элементов, поступающих в ландшафт) с приземной атмосферой и живыми организмами.

Перемещение элементов в почвах во многом определяется такими факторами как режим кислорода и серы (окислительные и восстановительные обстановки), щелочно-кислотные условия и набор типоморфных минералов.

В различных ландшафтных условиях выделяются три окислительно-восстановительных обстановки: 1) окислительная со свободным кислородом; 2) глеевая, восстановительная без свободного кислорода и без сероводорода; 3) сероводородная.

Щелочно-кислотные условия несколько условно разделяются на: сильнокислые (рН) – меньше 3х; кислые и слабо кислые (рН-3-6,5); нейтральные и слабо щелочные (рН – 6,5-8,5); сильно щелочные (рН – более 8,5).

#### *Четвертый классификационный уровень*

На этом уровне биогенные и техногенные ландшафты разделяются с учетом особенностей воздушной (атмосферной) миграции элементов. Выделяются следующие ландшафты: 1) подверженные воздушной эрозии; 2) не подверженные воздушной эрозии; 3) с современным отложением эолового материала.

#### *Пятый классификационный уровень*

На этом уровне ландшафты подразделяются с учетом геоморфологических особенностей района. При проведении мелкомасштабных исследований, охватывающих большие территории, а также при работе в горных условиях рекомендуется выделять ландшафты: 1) равнинных областей; 2) низкогорья и среднегорья; 3) высокогорных областей. Эти ландшафты отличаются по интенсивности процессов миграции, определяющейся в основном силами гравитации.

#### *Шестой классификационный уровень*

На этом уровне деление ландшафтов происходит с учетом изменения состава коренных горных пород, на которых и под влиянием которых происходит формирование почв. Для выделения различных ландшафтов необходимо в первую очередь классифицировать осадочные породы, карбонатно-терригенные и терригенные. Такое разделение обусловлено их большим влиянием на карбонатность и щелочность почв.

Магматические породы при классификации ландшафтов разделяются на кислые и основные. Выделяются интенсивно метаморфизованные породы.

Мелкомасштабное ландшафтно-геохимическое районирование территории весьма важно для обоснования методики геохимических поисков рудных месторождений. В задачу его, в частности, выделение районов, в которых производство наземных литохимических является не эффективным и должно быть заменено на гидро-, -атмо-, -или биогеохимическое либо выполняться в варианте глубинных поисков.

#### **Геохимические съемки (цель, задачи, условия проведения)**

Исследования геохимического поля с целью поисков месторождений полезных ископаемых ведутся методами геохимических съемок. В основе геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых лежат четыре важнейших *положения геохимии*, имеющие первостепенное прикладное значение и подтвержденные бесспорными опытными данными: а) *повсеместное распространение* химических элементов во всех геосферах – что подтверждается результатами химических анализов любых горных пород, минералов, природных вод, органических образований. Даже в оптически прозрачном монокристалле кварца обнаруживаются содержания Fe, S, Pb, Cu, As, Au, Ag, Na, K, Mg и других элементов непредусмотренных формулой минерала –SiO<sub>2</sub>, присутствие которых не может быть объяснено с позиций изовалентного или гетеровалентного изоморфизма. Отражением

всеобщей распространенности элементов служат цифры их Кларков (по В.И.Вернадскому). В таблице 4.2 приведены сведения о содержании элементов в различных геосферах.

Таблица 4.2 - Сведения о содержании элементов в геосферах

Геосферы	Главнейшие элементы	Число химических элементов	Сумма Кларков, %
Литосфера	O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti	9	99.48
Гидросфера	O, H, Cl, Na, Mg	5	99.58
Атмосфера	N, O, Ar	3	99.94
Биосфера	O, C, H, Ca, K, N, Si, Mg, P, S	10	99.96

б) *непрерывная миграция* элементов во времени и пространстве находит отражение как в гигантских тектоно-магматических процессах, преобразующих земную кору, так и в тончайших химических реакциях, протекающих в живом веществе, в непрерывном поступательном развитии окружающего мира. Как мы уже знаем – миграция химических элементов определяется многочисленными внутренними и внешними факторами. Различия в миграционной способности химических элементов приводят к их дифференциации и возникновению природных образований с различными количественными соотношениями между элементами. Результатом этого являются, при качественном единообразии, различия и непостоянство содержаний элементов в любых точках земного пространства. Процессы концентрации и рассеяния химических элементов характеризуют две взаимосвязанные и взаимно-противоположные стороны единого процесса миграции элементов. в) *многообразие видов и форм* существования элементов в природе – находит отражение во множестве тех природных химических соединений, механических смесей и растворов, которые они образуют в различных агрегатных состояниях, и многообразии физико-химических связей между элементами. Наряду с минеральной формой существования элементов, насчитывающей около 3000 видов, широко проявлены - безминеральные формы, которые для гидросферы, биосферы и атмосферы служат основной формой существования большинства химических элементов (N, H, Ar, Cl, F, B). Характерное для литосферы нахождение элементов в форме диагностируемых минералов дополняется их присутствием в форме нераспознаваемых собственных субмикроскопических минералов, в виде разнообразных изоморфных и неизоморфных твердых растворов, водных внутривидовых молекулярно-плечных растворов или внутрикристаллических газовой-жидких включений, а также в состоянии сорбции (гидрозоли, гидрогели, коллоиды). Нахождение элементов в безминеральной форме в виде неопределенных, переменных по составу примесей к минералам, не предусмотренных их формулами и стехиометрическими соотношениями – это прямое следствие повсеместного распространения химических элементов; г) *преобладание рассеянного состояния* элементов над концентрированным, особенно для рудообразующих элементов. В процессе миграции химических элементов, с учетом многообразия видов и форм их существования, возможно возникновение природных образований, с практически любым (весьма низким или очень высоким) содержанием конкретного элемента. Противоречащими закону В.И.Вернадского являются содержания элемента равные -0 или 100 %. При этом нельзя установить какую-либо объективную границу между низкими содержаниями элемента, отвечающими его рассеянному состоянию и высокими содержаниями, соответствующими концентрированному состоянию. Поэтому уместно ограничиться определением двух крайних состояний, понимая под рассеянным состоянием элемента содержания, близкие к его Кларку (Ск), а под концентрированным – близкие к его содержаниям в полезных ископаемых, из которых этот элемент извлекается в промышленных целях (Ср). Рассеянное состояние элементов -это их естественное,

нормальное состояние, а концентрированное состояние – отклонение от нормы или аномальное.

В основе геохимических съемок лежит систематическое измерение содержаний химических элементов вдоль заранее выбранных направлений – профилей или маршрутов. Система таких профилей геохимического опробования, распространенных по площади (или на глубину), образуют участок поисковой геохимической съемки, а выявленные при этом геохимические аномалии рассматриваются в качестве объектов, подлежащих оценке. В зависимости от опробуемого вещества, по наименованию исследуемых геосфер различаются: литохимические, гидрохимические, атмохимические (газовые) и биогеохимические методы поисков и одноименные им виды геохимических съемок.

По условиям производства различают наземные (пешеходные и автомобильные), воздушные (самолетные и вертолетные) и подземные геохимические съемки. Геохимические съемки выполняются с отбором и без отбора проб (замеры приборами), с точечными или непрерывными определениями содержаний химических элементов по профилям. При литохимических съемках опробуются горные породы на дневной поверхности, горные выработки, скважины, продукты современного или древнего выветривания горных пород и почв. При поисковых литохимических съемках в пробах определяются содержания до 35-45 иногда до 55 химических элементов. В настоящее время еще нет контактных или дистанционных методов одновременного определения многих элементов, но уже ведутся съемки без пробоотбора на какой либо один химический элемент (Be, В, F, Hg) или сумму нескольких элементов (Pb, Zn, Cu) – прибор «Поиск». Наибольшее и весьма эффективное применение получили гамма-спектральные – пешеходные, автомобильные и особенно аэрогеохимические съемки, при которых одновременно определяются содержания урана (по радону), тория и калия (по радиоактивному изотопу  $K^{40}$ ). При гидрохимических съемках в поисковых целях опробуются природные поверхностные и подземные воды. Атмохимические съемки обычно выполняются путем опробования подземной атмосферы (почвенного воздуха), реже исследуется состав приземной атмосферы. Поисковые биохимические съемки ведутся путем исследования химического состава растительности.

По целевому назначению геохимические съемки делятся на: 1) рекогносцировочные, при необходимости выполняемые в масштабе 1:1000000 и мельче; 2) собственно поисковые, последовательно выполняемые на всей территории горнорудных районов в масштабе 1:200000, а затем в масштабе 1:50000; 3) детальные (поисково-оценочные) в масштабе 1:10000 на выборочных участках; 4) разведочные в масштабе 1:1000 и крупнее в пределах рудных полей.

Для отнесения геохимических съемок к определенному масштабу плотность наблюдений должна составлять не менее 1 точки на 1 см<sup>2</sup> отчетной карты. Плотность наблюдений при проведении литохимических съемок сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 - Плотность наблюдений при проведении литохимических съемок

Масштаб	Расстояние между профилями	Шаг опробования	Плотность точек наблюдения	
			на 1 км <sup>2</sup>	на 1 см <sup>2</sup> карты
1:50 000	500	50-100	40-20	10-5
1:10 000	100	20-45	500-400	5-4
1:5 000	50	10-20	2000	5
1:2 000	25	10	4000	2-3

Рудные месторождения могут сопровождаться одновременно несколькими аномалиями (литохимическими, гидрохимическими, атмохимическими, биохимическими). Однако из соображений целесообразности геохимические поиски должны проводиться только одним, в редких случаях двумя методами. Накопленный опыт показывает, что в широком диапазоне геологических условий преимущества для поисков рудных месторождений имеют литохимические исследования. Это положение сохранится, по-

видимому, до тех пор, пока промышленная добыча металлов будет ориентироваться на их извлечение из литосферы. С ростом требований к глубинности поисков и прогрессом в методике атмосферических съемок, увеличится роль газовой съемки, поскольку именно в газовой фазе миграция химических элементов протекает наиболее активно.

Использовать нужно тот из видов геохимических съемок, который в данных геологических ландшафтах и других условиях даст наибольший геолого-экономический эффект.

*Основная литература:* [1] с. 81-110; [2] с. 68-88; [3].

*Дополнительная литература:* [11], [12], [15].

*Контрольные вопросы*

1. Дать характеристику геохимическому ландшафту.
2. Как подразделяются ландшафты?
3. Дать классификацию ландшафтов.
4. Каковы основные положения, лежащие в геохимических методах поисков?
5. Как подразделяются геохимические съемки по условиям производства?
6. Как делятся геохимические съемки по целевому назначению?

**Лекция 9. Первичные ореолы рудных месторождений. Оценка первичных ореолов. Зональность первичных ореолов. Оценка продуктивности первичных ореолов и прогноз скрытого оруденения.**

Каждая залежь полезного ископаемого на периферии промышленных содержаний ценных компонентов окружена областью их убывающих (некондиционных) содержаний, постепенно приближающихся к местному фону.

Эта зона повышенных содержаний рудных или сопутствующих элементов в окологрудных (коренных) породах, образованная одновременно с рудным телом в результате тех же процессов эндогенного, экзогенного (первично-осадочного) или метаморфогенного рудообразования называется его первичным ореолом.

Граница между рудным телом и его первичным ореолом часто имеет не геологический, а только временный, экономический смысл, отделяя промышленные руды от забалансовых. При пересмотре требований к среднему содержанию металла в рудах и, следовательно, нижнего промышленного (бортового) содержания форма рудного тела в его границах с первичным ореолом соответственно изменится.

Однако, понятие о первичном геохимическом ореоле месторождения или рудного тела значительно шире существующего понятия о «забалансовых рудах», внешний контур которых определяется только более низким, чем бортовое, содержанием ценного металла, и которые в недалекой перспективе могут стать предметом промышленной отработки.

Первичный ореол включает зону рудовмещающих пород с содержаниями металлов, лишь в самой незначительной степени превышающих местные фоновые содержания, а также зоны аномальных содержаний элементов-спутников оруденения, не являющихся ценными компонентами залежи.

По периферии первичного ореола содержания рудных элементов постепенно приближаются к фоновым, что определяет сложную конфигурацию и условный характер его внешней границы.

В простейшем случае первичный ореол основного рудного элемента повторяет в расширенных границах форму рудного тела.

Контур первичных ореолов элементов-спутников могут существенно отличаться от формы рудных тел.

В основном, методы поисков месторождений по их первичным ореолам рассматриваются на примере рудных месторождений, хотя основные положения этой

методики применимы к поискам любых твердых полезных ископаемых, а в принципе и месторождений нефти и газа.

Литохимическую аномалию в рудовмещающих породах допустимо называть «первичным ореолом» только при условии доказанного или предполагаемого ее развития, вокруг или около рудного тела или месторождения.

Поскольку образование первичных ореолов обязано рудоотложению, т.е. процессам концентрации химических элементов, то не следует называть их «ореолами рассеяния», оставляя этот термин для обозначения вторичных (гипергенных) геохимических ореолов, возникающих в процессе ликвидации (рассеяния) ранее сформированных месторождений.

Первичный ореол основного рудного элемента в границах нижнего аномального содержания, в первом приближении, воспроизводит в расширенном виде контур рудного тела, с отступлениями, подчиняющимися структурно-тектоническому, магматическому или литолого-стратиграфическому контролю оруденения.

Граница между рудным телом и его первичным ореолом часто имеет не геологический, а только временный экономический смысл, отделяя промышленные руды от забалансовых. Первичный ореол включает зону рудовмещающих пород с содержаниями металлов, лишь в самой незначительной степени превышающими фоновое содержание. Контуры первичных ореолов иногда повторяют форму рудного тела, а иногда существенно отличаются от формы рудного тела. (Рисунок 5.1).

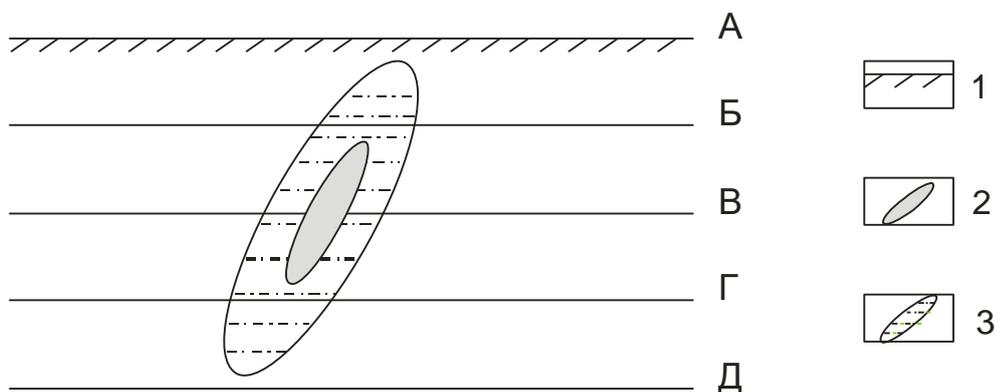


Рисунок 5.1 – Уровни среза рудного тела и первичного ореола

- Уровень А – отвечает условиям слепого залегания рудного тела, сопровождаемого слепым первичным ореолом;
- Уровень Б – вскрывает надрудный первичный ореол, сопровождаемый слепым рудным телом;
- Уровень В – вскрывает рудное тело и примыкающий к нему первичный ореол;
- Уровень Г – отвечает условиям, когда рудное тело уже уничтожено денудацией, сохранился лишь подрудный интервал первичного ореола;
- Уровень Д – отвечает стадии полной ликвидации гипергенными процессами коренного месторождения и его первичного ореола.

Аномальные содержания рудных элементов, образованные не одновременно с рудным телом, в результате других процессов, не могут именоваться его первичным ореолом.

Литохимические аномалии вслед за их обнаружением требуют оценки. Эта задача смещается в область методики разведки, если скважина, канава или шурф вскрыли богатое или мощное рудное тело, хотя и в этом случае геохимические исследования играют существенную роль.

Важнейшую геолого-поисковую задачу, в решении которой геохимическим методам принадлежит основная роль, составляет оценка непромышленных проявлений рудной минерализации, допускающих предположение об их принадлежности к числу первичных ореолов скрытых рудных тел (Рисунок 5.2).

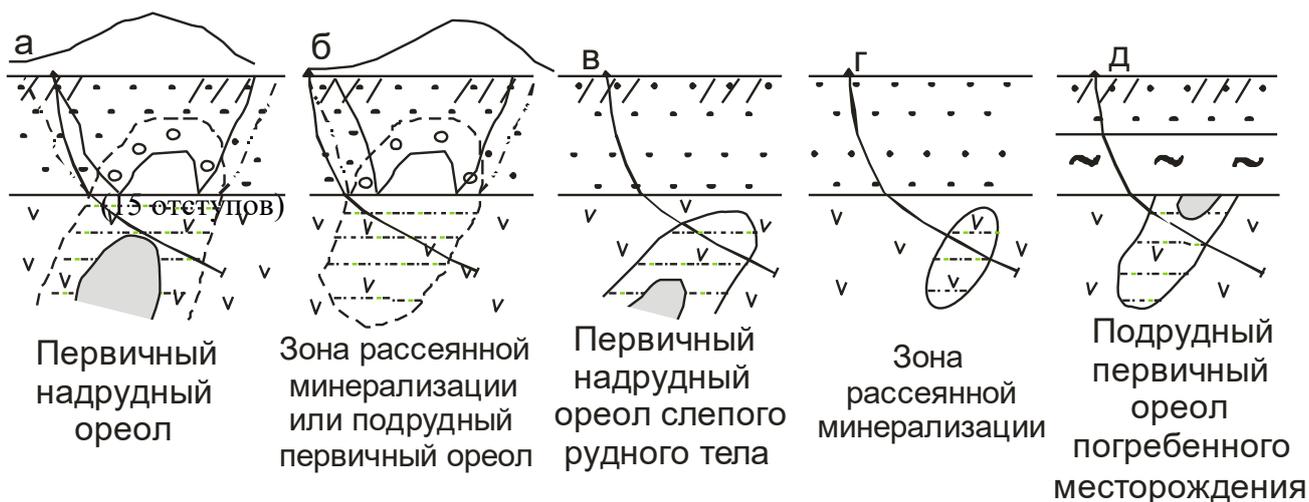


Рисунок 5.2 – График содержания свинца в первичных ореолах рассеяния

Все пять скважин пересекли зону минерализации, но только в случаях *а* и *в* не промышленная минерализация заслуживает *разведки на глубину*.

Решение о принадлежности выявленной аномалии к надрудному ореолу или к другим горизонтам рудной зоны принимается на основе анализа ее устойчивых геохимических характеристик с учетом генетического типа оруденения.

Рудное тело и его первичный ореол должны рассматриваться в качестве единой, сложно построенной литохимической аномалии – зона рудной минерализации с условным внешним контуром и определенными внутренними закономерностями пространственно-упорядоченного распределения химических элементов.

Изолированное, в отрыве от рудного тела изучение геохимических характеристик первичного ореола *недопустимо* и может привести к неверным выводам.

Закономерности внутреннего строения рудных зон выявляются путем геохимического изучения различных по генезису, структурно-геологической и литолого-стратиграфической приуроченности хорошо разведанных месторождений главнейших промышленных типов.

Численные величины параметров, характеризующих ореольные и рудные сечения эталонных месторождений, служат критериями оценки литохимических аномалий при поисках. Успешное ведение литохимических исследований по первичным ореолам немислимо без понимания закономерностей процессов рудообразования. В свою очередь, исследования первичных геохимических ореолов обогащают учение о рудных месторождениях дополнительными данными.

Наиболее полно исследованы первичные ореолы эндогенных месторождений. Наибольшее внимание было уделено изучению первичных ореолов гидротермальных месторождений.

Это работы Н.И. Сафронова, С.В. Григоряна, Л.Н. Овчинникова, В.З. Фурсова, Н.А.Озеровой, Н.М. Страхова.

Общепринятыми являются представления о гидротермальном рудообразовании в результате выпадения металлов из горячих газовой-жидких высокоминерализованных растворов, движущихся в горных породах вдоль ослабленных зон, в направлении из глубины к поверхности.

Перенос металлов гидротермами предполагается в форме галоидных комплексов, преимущественно хлоридов типа  $\text{Na} [\text{MeCl}_4]$  или  $\text{Na} [\text{MeCl}_3]$ , иногда фторидов, при участии гидросульфидных комплексов и  $\text{CO}_2$ . Осаждение рудных минералов из гидротерм происходит вследствие падения  $T$  и  $P$ , в результате взаимодействия растворов с боковыми породами а также водами, изменения  $\text{pH}$  и  $Eh$  и др. условий нарушающих фазовые равновесия в системе *раствор-порода*.

*Многокомпонентный состав* гидротерм и различия в условиях осаждения отдельных компонентов раствора определяют минералогическую и химическую зональность оруденения.

Максимально первичные ореолы распространяются вдоль предполагаемых направлений напорного течения (инфильтрации) растворов – по восстанию и простиранию рудных тел, по которым эффективные размеры ореолов могут достигать многих сотен метров.

Более ограничены околорудные первичные ореолы, возникающие в результате диффузии растворов по направлению вкост простирания рудных зон, в отдельных случаях их эффективные размеры составляют только первые метры.

Однако, чаще околорудные ореолы месторождений формируются в результате сочетания инфильтрации и диффузии растворов, захватывая обширную зону постепенно затухающей трещиноватости боковых пород.

Вследствие этого первичные ореолы гидротермальных месторождений в сечении нередко имеют сложную форму, характеризуюсь чередованием резко аномальных (инфильтрация) и повышенных околофоновых (диффузия) содержаний рудных элементов.

В отличие от одного двух, реже 3-4 металлов, обычно являющихся полезными компонентами рудных месторождений, геохимические исследования во всех случаях обнаруживают полиэлементный состав гидротермального оруденения.

В первичных ореолах и рудах гидротермальных месторождений до 30-35 и более элементов образуют аномальные концентрации, отчетливо указывая на их участие в процессе рудообразования.

Первичными ореолами месторождения являются также зоны околорудных гидротермально измененных пород. Их оконтуривание обычно ведется визуально (по окраске), реже по данным химических анализов на К, Na, Si, Al, Mg, Fe и др. петрогенные элементы, привнос или вынос которых происходит при серицитизации, окварцевании, доломитизации, гематитизации и других процессах, сопровождающих рудоотложение.

Однако, обширные зоны измененный пород возникают и вне связи с оруденением или в до рудную стадию и служат только косвенными поисковыми признаками.

Прямое поисковое значение имеют аномальные содержания рудных элементов, которые по изоконцентрамам первичного ореола способны указать положение эпицентра слепой рудной залежи.

**Зональность первичных ореолов.** Важнейшее значение для методики геохимических поисков имеет зональность рудоотложения, т.е. закономерное изменение соотношений между двумя или несколькими компонентами оруденения по простиранию, падению и мощности рудной зоны (рисунок 5.3).

Эммонс установил ряды зональности отложения рудных элементов (по направлению падения температуры и глубины): Sn, W, As, Bi, Au<sub>(1)</sub>, Cu, Zn, Pb, Ag, Au<sub>(2)</sub>, Sb, Hg.

Наиболее полно вертикальная зональность первичных ореолов гидротермальных сульфидных месторождений была освещена в работах С.В. Григоряна и Л.Н. Овчинникова (1981-83 гг.), которые в результате изучения более 300 различных месторождений дают обобщенный ряд зональности отложения элементов (снизу-вверх): W<sub>(1)</sub> – Be – As<sub>(1)</sub> – Sn<sub>(1)</sub> – Au<sub>(1)</sub> – U – Mo – Co – Ni – Bi – W<sub>(2)</sub> – Au<sub>(2)</sub> – Cu<sub>(1)</sub> – Zn – Pb – Sn<sub>(2)</sub> – Ag – Cd – Au<sub>(3)</sub> – Cu<sub>(2)</sub> – Hg, As<sub>(2)</sub>, Sb – Ba, справа этот ряд можно дополнить – Te, J. Среди 35-40 главнейших элементов-индикаторов оруденения Л.Н.Овчинников выделяет: 8 «сквозных» элементов – Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Sn, Mo, Ba, формирующих первичные ореолы эндогенных месторождений большинства генетических типов; 7 элементов – Sc, Ti, Cr, V, Sr, Y, Zr – характерные компоненты первичных ореолов месторождений литофильных металлов (редкометалльные пегматиты, грейзеновые, апогранитовые и др.) и сидерофильных металлов; 5 элементов - Be, Na, K, Bi, W – участвуют в образовании первичных ореолов литофильных месторождений (золоторудных, редкометалльных, флюоритовых).

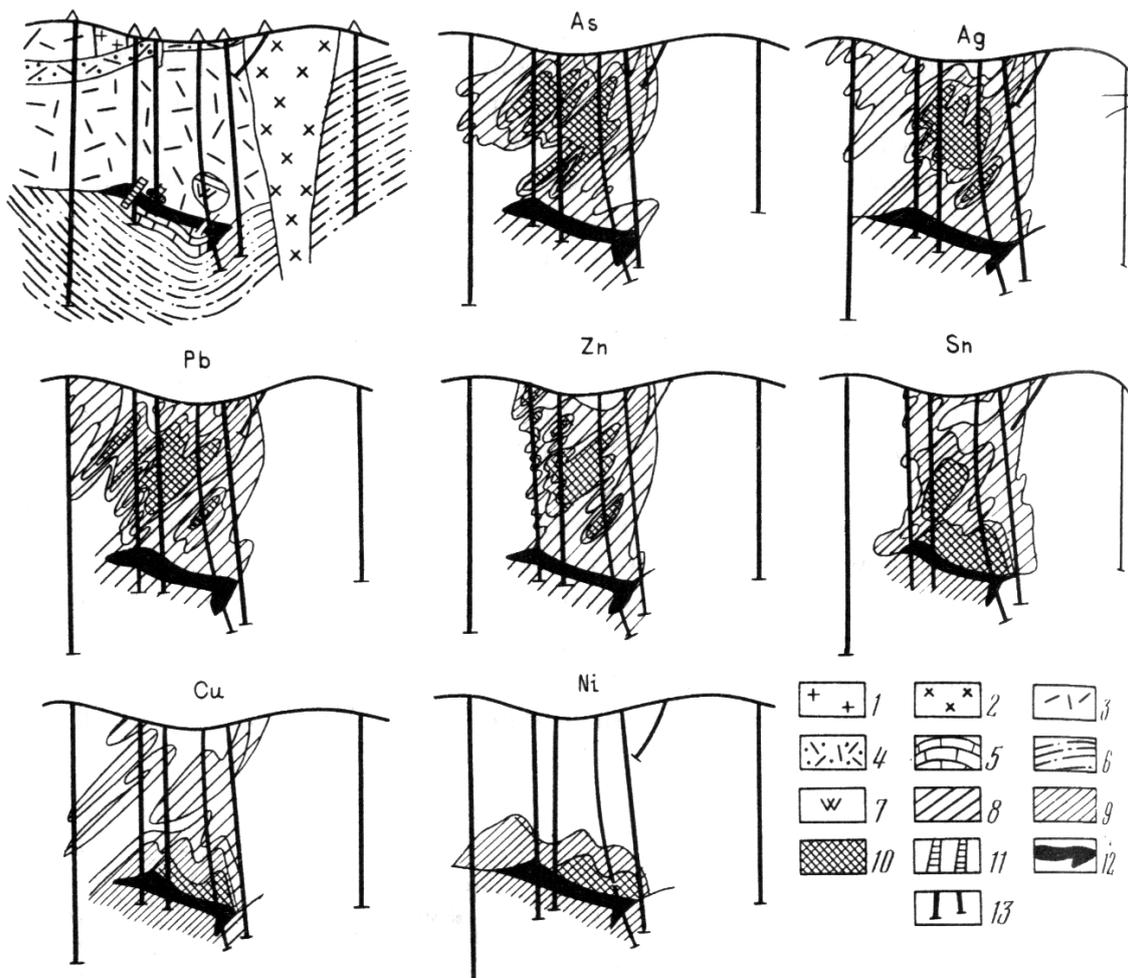


Рисунок 5.3 – Первичные геохимические ореолы месторождения Николаевского

1 – кварцевые порфиры; 2 – габбро-диориты; 3 – туфы и туфобрекчии кварцевых порфиров; 4 – туффиты; 5 – известняки; 6 – алевролиты, песчаники; 7 – кремнистые породы; 8,9 – первичные ореолы (8 – менее интенсивные, 9 – более интенсивные); 10 – поля максимальных концентраций; 11 – дайки порфиров; 12 – рудные тела; 13 – скважины.

Из ореолов многих месторождений возможен вынос Fe с образованием зон осветления, а также элементов группы железа - Ti, V, Cr, Sc и др.

Анализируя представленные ряды зональности, Л.Н. Овчинников предложил для характеристики гидротермального оруденения пользоваться понятиями о «высокотемпературных» (Sn, W, Mo, Co и др.), «среднетемпературных» (Ni, Cu, Zn, Pb) и «низкотемпературных» (Ag, As, Sb, Hg, Ba и др.) элементах и ассоциациях.

Рассмотрим обобщенную модель первичных ореолов эндогенных месторождений (рисунок 5.4).

1. Вокруг крутопадающего тела полиметаллических руд основные рудные элементы (Pb, Zn, Cu, Au ...) образуют первичные ореолы условно повторяющие его форму.

2. Более низкотемпературные элементы-спутники (Ag, As, Hg, ...) образуют первичные ореолы, смещенные по восстанию относительно рудного тела; в надрудном пространстве обособляются ореолы легколетучих элементов (Cl, Br, J, Li, F).

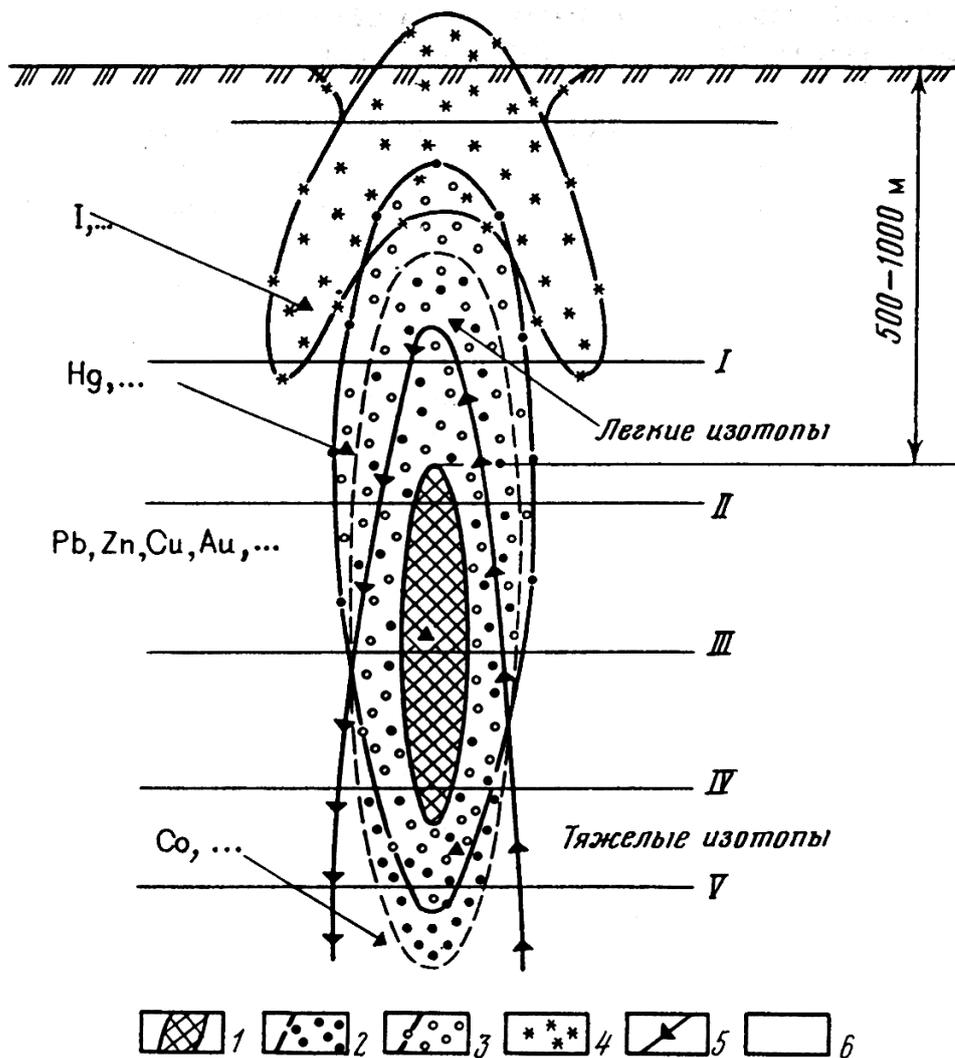


Рисунок 5.4 – Обобщенная схема первичного ореола гидротермального месторождения

1 – рудное тело; 2 – ореол свинца; 3 – ореол ртути; 4 – ореол йода; 5 – ореол кобальта; 6 – современная денудационная поверхность. Римскими цифрами обозначены номера горизонтов (рисунок 5.1).

Эту картину дополняют смещенные по падению от центра р.т. ореолы элементов высокотемпературной ассоциации (W, Mo, Co, ...).

Для других типов гидротермальных месторождений основными рудными элементами могут быть Sn, W, Mo, Be, непромышленными элементами-спутниками - Cu, Pb, а роль легколетучих компонентов надрудного ореола может принадлежать F и Li.

*По ассоциации элементов на определенном горизонте можно судить об эрозионном срезе месторождения.*

В условиях глубокого залегания слепого рудного тела (до 500 – 1000 м) на современной дневной поверхности и в ближайших к ней горизонтах рудовмещающих пород первичный ореол может образовывать только йод (J). На уровне I (надрудного) горизонта тот же йод может образовать две изолированные аномалии, располагающиеся по обе стороны от ореолов ртути и свинца (Pb). Бедные ореольные содержания Hg, Pb могут быть одинаково характерны и для (I), и для (V) горизонтов рудной зоны. Поэтому по абсолютным содержаниям элементов типоморфного комплекса невозможно различать надрудный (I) и

подрудный (V) интервалы первичного ореола, эта задача решается только по соотношениям между содержаниями элементов, путем построения графиков отношений между количествами двух элементов, характеризующих их взаимное положение в зональном ряду.

Помимо закономерного тяготения более низкотемпературных и легколетучих элементов к верхним горизонтам рудной зоны, надрудные ореолы могут обогащаться легкими изотопами элементов, а соответственно – нижние горизонты – тяжелыми изотопами за счет их различной диффузионной подвижности.

Общая протяженность надрудных первичных ореолов гидротермальных месторождений над верхней кромкой промышленных руд может достигать 300 – 500 и более 1000 метров.

Для анализа первичных ореолов месторождений удобнее рассматривать величину  $1/\lambda$  – имеющую «смысл» - миграционная способность элементов – или геохимическая подвижность.

Величина  $1/\lambda_1$  – характеризует подвижность химического элемента в инфильтрационном надрудном и подрудном первичном ореоле;  $1/\lambda_2$  – подвижность элемента в диффузионном околорудном ореоле;  $1/\lambda_3$  – подвижность элемента в магматогенном надрудном ореоле.

С численной стороны параметр  $1/\lambda$  соответствует средней величине пути (в м), пройденного атомами рудного элемента, участвовавшими в процессе рудообразования:

$$\frac{1}{\lambda} = K \cdot \text{Ctg} \alpha; \quad K = \frac{Y}{10nl}; \quad 10nl = 2.303 = \text{const}$$

$K$  – коэффициент учитывающий соотношения масштабов по осям координат

$$M = \Delta x (\sum C_x - n C_\phi)$$

$M$  – линейная продуктивность

$Y$  – принятый по оси ординат модуль десятичных логарифмов содержания элементов, выраженный в линейной мере масштаба оси абсцисс;

$\alpha$  – угол, образованный усредняющей прямой с осью абсцисс.

Можно подсчитать количество металла в  $M$  % ( $M$  – линейная продуктивность) по формуле

$$M = \Delta x (\sum C_x - n C_\phi),$$

где  $\Delta x$  – шаг отбора проб в м;

$C_x$  - содержание элемента в пробе, %;

$n$  - число замеров;  $C_\phi$  - фоновое содержание, %.

*Основная литература:* [1] с. 111-175; [2] с. 88-130; [3].

*Дополнительная литература:* [9], [15], [21].

*Контрольные вопросы*

1. Дать определение первичного ореола рудного тела.
2. Охарактеризуйте морфологию первичных ореолов.
3. Каковы основные элементы-индикаторы собственно-магматических месторождений?
4. Каковы основные элементы-индикаторы гидротермальных месторождений?
5. Назовите основные отличия первичных ореолов эндогенных и экзогенных месторождений.
6. Каковы основные особенности первичных ореолов стратиформных месторождений?
7. Каковы основные факторы, обуславливающие геохимическую зональность постмагматических месторождений?
8. Дайте обобщенную схему первичного ореола гидротермального месторождения.

## Лекция 10. Вторичные ореолы месторождений полезных ископаемых. Классификация вторичных ореолов месторождений. Поиски месторождений по вторичным ореолам.

Выветривание и денудация ведут к появлению на поверхности суши различных по типу и мощности рыхлых образований, развивающихся как за счет подстилающих горных пород, так и за счет перемещенных продуктов выветривания, перекрывающих коренные породы в пониженных участках рельефа. Эффективность литохимических поисков рудных месторождений по их вторичным ореолам рассеяния в основном зависит от генезиса рыхлых пород и их взаимоотношений с породами субстрата.

В условиях выровненного рельефа и в начальной стадии выветривания образуется *элювий* – оставшиеся на месте своего образования продукты выветривания коренных пород. По своему составу элювий отражает состав коренных пород и наличие в них оруденения с теми изменениями, которые вносят химическое выветривание и биогенные процессы. *Делювием* принято обозначать рыхлые новообразования любого петрографического состава, покрывающие склоны возвышенностей и представляющие собой продукты выветривания коренных пород, перемещенные действием силы тяжести и атмосферных осадков. Делювий, образуя сплошной покров у основания склона, достигает водораздела, где сливается с близким к нему по составу элювием. В результате рыхлые образования покрывают всю местность, образуя слабо волнистый элювиально-делювиальный покров.

При литохимических поисках месторождений по их вторичным ореолам рассеяния чаще всего приходится иметь дело именно с элювиально-делювиальными покровами т.е. со слабо перемещенными продуктами выветривания, по своему составу и местоположению еще сохраняющими отчетливую связь с материнскими коренными породами. Мощность элювиально - делювиальных отложений в большой степени зависит от скорости денудации, обычно колеблясь от 0,5-2 до 10-12 метров, редко более. Состав элювио-делювия в данной точке отражает состав коренных пород, расположенных гипсометрически выше по склону. По вертикальному разрезу элювиально-делювиальные отложения на глубине сменяются элювием, в свою очередь переходящим в плотную коренную породу. В составе элювиально-делювиальных отложений рудоносных пород выветривание непрерывно создает, а денудация непрерывно обновляет литохимические ореолы рассеяния месторождений, рудные тела которых выведены на уровень денудационного среза (Рисунок 5.1, уровни Б, В, Г). Этот процесс, стремящийся к регулярному режиму, обеспечивает существование вторичных литохимических ореолов рассеяния месторождений в качестве устойчивых геологических образований зоны гипергенеза, подчиняющимся вполне определенным закономерностям.

Вследствие многообразия и сложности процессов рассеяния появилась необходимость создания классификации ореолов рассеяния, которую предложил еще в 1936 году Н.И.Сафронов и которая с некоторыми поправками, сохранилась до настоящего времени.

По фазовому состоянию вторичные ореолы рассеяния разделяются на механические, солевые и газовые.

*В механическом ореоле рассеяния* его минеральные компоненты присутствуют в форме твердых веществ, устойчивых в зоне гипергенеза или вторичных минералов и рудных обломков. Основными горизонтами развития механических ореолов рассеяния являются современные элювиально-делювиальные отложения и древние остаточные коры выветривания рудовмещающих толщ. Механические ореолы рассеяния образует абсолютное большинство рудных месторождений, в первую очередь – золота, платины, касситерита, хромита и многих других минералов.

*В солевом ореоле рассеяния* минеральные компоненты месторождения присутствуют в форме растворенных или сложно связанных с породами воднорастворимых соединений. Образование вторичных солевых ореолов обязано движению, диффузии, капиллярному

подъему и испарению минерализованных вод, образующихся в результате растворения рудных минералов, чаще всего на стадии их гипергенных изменений. Участвуя в формировании (механических и солевых) ореолов в элювио-делювии, солевое рассеяние может развиваться уже на стадии слепого залегания рудных тел и их первичных ореолов за счет омывания подземными водами верхних горизонтов оруденения (Рисунок 5.1, уровень А). Компоненты солевого ореола могут усваиваться корневой системой растений, образуя биогеохимические ореолы в живой растительности. Последующая минерализация растительного опада образует биогенную составляющую сложного литохимического ореола. Солевые ореолы рассеяния образуют, в частности, месторождения медноколчеданных руд, плавикового шпата и в той или иной мере все другие типы рудных месторождений.

*Образование газовых ореолов рассеяния* обязано диффузии и эффузии газовых компонентов. Газовые ореолы рассеяния характерны для месторождений радиоактивных руд, а также они образуются над ртутными месторождениями, т.к. пары ртути обладают высокой упругостью уже при обычных температурах земной поверхности.

Таким образом, вторичные литохимические ореолы рассеяния рудных элементов образуются в основном в твердой фазе, меньшее значение имеет солевое рассеяние и очень малую роль играет рассеяние в газовом состоянии.

По условиям образования вторичные ореолы рассеяния делятся на остаточные и наложенные.

*Остаточные ореолы рассеяния* образуются за счет интервалов рудного тела или его первичного ореола, существовавших в профиле коренных пород до выветривания.

В контурах *наложенных ореолов* до развития вторичных процессов рассеяния первичная рудная минерализация отсутствовала. Важнейшая особенность вторичных остаточных ореолов рассеяния – это пропорциональность их линейной (М) и площадной (Р) продуктивностей тем же параметрам исходного коренного оруденения (М<sub>р</sub> и Р<sub>р</sub>).

По признаку доступности для обнаружения различаются *открытые ореолы рассеяния*, т.е. выходящие на современную дневную поверхность и *закрытые ореолы*, выявляемые только на некоторой глубине от поверхности.

Каждый из рассмотренных классификационных признаков характеризует основные особенности формирования вторичных ореолов рассеяния в конкретном районе, а различные сочетания этих признаков определяют их возможные типы. В основу выделения типов положены классификационные признаки, определяющие генетический тип ореола (остаточный, наложенный) и его доступность для обнаружения, а также некоторые дополнительные характеристики их природы (диффузионный, выщелоченный и т. д.) или положение относительно коренного оруденения. При этом заранее допускается формирование литохимических ореолов рассеяния с одновременным или отдельным участием твердых, растворимых и газообразных компонентов, а роль каждой из фаз уточняется при описании отдельных типов. Признаки, определяющие тип ореола, рассматриваются на ближайшем к дневной поверхности горизонте, на котором он проявлен: открытые ореолы характеризуются на уровне дневной поверхности, а закрытые – на минимальной глубине их надежного развития. В практике геохимических поисков этот уровень получил наименование «представительного горизонта для опознания».

*Первый тип.* Наибольшее поисковое значение имеют открытые остаточные ореолы рассеяния месторождений. Ореолы этого типа образуют месторождения любых генетических типов, залегающие в верхнем структурном этаже, во всех активно денудированных районах. В подобных условиях на поверхности рудовмещающих пород развиты только их собственные продукты элювио-делювиального выветривания. Формирование остаточных ореолов в основном обязано механическому рассеянию. Наиболее благоприятны для их образования горные районы и этот признак подчеркивается наклоном дневной поверхности при изображении ореолов первого типа.

## Классификация вторичных литохимических ореолов рассеяния

Выделяются следующие семь главнейших типов вторичных литохимических ореолов рассеяния (рисунок 6.1).

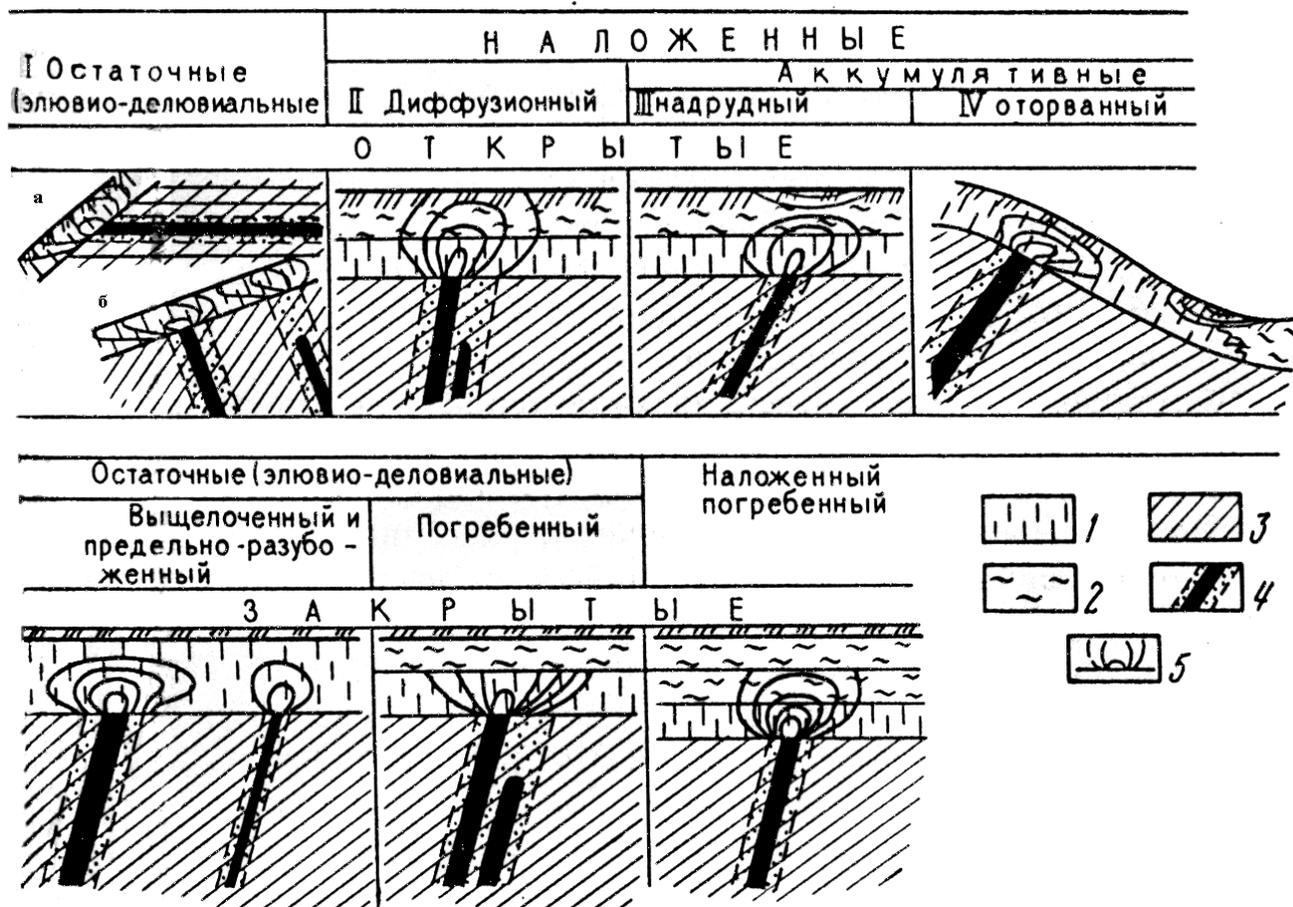


Рисунок 6.1 – Главнейшие типы вторичных литохимических ореолов рассеяния

1 – элювиоделювий; 2 – перекрывающие отложения; 3 – рудовмещающие породы; 4 – рудные тела и их первичные ореолы; 5 – вторичные ореолы.

Однако не исключена возможность их образования в элювиальных ландшафтах денудационных равнин и плоских водоразделов. Открытия новых промышленных месторождений цветных, редких металлов и золота в СССР и за рубежом обязаны результатам геохимических поисков по вторичным ореолам рассеяния именно этого типа. В общем случае форма вторичных остаточных ореолов рассеяния в плане повторяет в увеличенном размере контуры выхода оруденения на поверхность коренных пород. В условиях расчлененного рельефа, открытые остаточные ореолы рассеяния могут образовывать горизонтально залегающие месторождения осадочного генезиса или древней коры выветривания (рисунок 6.1, тип Ia), хотя главнейшее значение ореолы этого типа имеют для поисков крутопадающих эндогенных и осадочно-метаморфогенных месторождений (рисунок 6.1, тип Ib). По таким остаточным ореолам рассеяния были открыты на глубинах 200-300 метров месторождение медноколчеданных руд на Южном Урале и полиметаллических руд в Ачисае.

*Второй тип.* Открытые, наложенные, диффузионные ореолы рассеяния характерны для равнинных районов с покровом аллохтонных (дальнеприносных) отложений, ограниченной мощности, главным образом, в умеренно влажной и аридной зонах. В этих ореолах резко преобладают процессы солевого рассеяния рудных элементов, в отдельных случаях наблюдались наложенные механические ореолы рассеяния устойчивых рудных минералов. Между формой наложенных диффузионных ореолов рассеяния и коренным ору-

денением возможны самые различные соотношения. За счет переменной мощности аллохтонных отложений ореолы этого типа могут по простиранию переходить в погребенное состояние (типы VI и VII), сочетаться с интервалами открытого остаточного ореола (тип I) или сменяться наложенными надрудными ореолами (тип III). Теоретическая дальность диффузии безгранична.

*Третий тип.* Образование надрудных (тип III) и оторванных наложенных ореолов рассеяния происходит в условиях, когда солевое рассеяние сочетается с противоположной тенденцией единого процесса миграции рудных элементов – их гипергенной аккумуляцией. Открытые наложенные аккумулятивные ореолы надрудного типа (тип III) отличаются от наложенных диффузионных наличием на глубине горизонта аллохтонных отложений в котором с применением существующих технических средств ореолы не прослеживаются по вертикали. Надрудные ореолы трудно отличить от ландшафтных геохимических аномалий, возникающих на различных геохимических барьерах в результате гипергенной аккумуляции металлов из окружающей среды и не связанных с наличием коренного оруденения на глубине. Здесь рудный элемент аккумулируется у дневной поверхности (экранизация), часто такие ореолы образуются над месторождениями Mo, W, U в ландшафтах сухих степей Северного Казахстана. Характерно, что три метра чехла является предельной мощностью для образования открытых наложенных ореолов рассеяния.

*Четвертый тип.* Оторванные аккумулятивные ореолы близки к описанным выше надрудным ореолам, отличаясь от них образованием при отсутствии аллохтонных отложений и отчетливым смещением от рудных тел в сторону современного стока. В этих условиях месторождения образуют открытые ореолы рассеяния (тип I) и только рудные элементы, обладающие в данной ландшафтно-геохимической обстановке высоким коэффициентом водной миграции (F, Cl, Br, B, S, J) могут образовывать выщелоченные с поверхности закрытые ореолы (тип V). За счет последующей аккумуляции рудных элементов с контрастной миграционной способностью (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, V, Mo, Se) в зоне гипергенеза в изменившейся геохимической обстановке возникают вторичные оторванные солевые ореолы, наложенные на местные элювиально-делювиальные и аллювиально-пролювиальные отложения. Эти ореолы могут непосредственно переходить в солевой (литохимический) поток рассеяния. Такие оторванные ореолы Mo и U были отмечены в горно-таежных районах Забайкалья. Аналогичные аккумуляции рудных элементов (например Cu) имеют место при переходе от низких значений pH зоны сернокислого выветривания к нейтральной или слабо щелочной окружающей среде.

*Пятый тип.* Выщелоченные и предельно разубоженные ореолы образуются в элювио-делювии и принадлежат к классу остаточных ореолов. Они сходны по своей характеристике, однако причины для их превращения в закрытые ореолы различны. Образование закрытых выщелоченных с поверхности остаточных ореолов, как уже указывалось, характерно для элементов активных водных мигрантов (J, B, F, Cl) в районах гумидной зоны при замедленной денудации. Закрытые предельно разубоженные ореолы образуются в результате закономерного протекания процесса рассеяния в сторону наиболее полного выравнивания концентраций элементов. Если при этом исходное количество металла в сечении рудной зоны (Mr, m%) было относительно мало, максимальные содержания металла в верхних горизонтах ореола могут не отличаться от обычных колебаний местного геохимического фона. В силу убывания с глубиной интенсивности гипергенного рассеяния, остаточный ореол такой рудной зоны обнаруживается только на некоторой глубине от поверхности и поэтому называется «закрытым». Закрытые ореолы этих типов называют еще «ослабленными у поверхности». Образование таких «закрытых» ореолов наиболее характерно для рудопроявлений незначительного масштаба, в частности, для первичных ореолов слепых рудных тел.

*Шестой тип.* Погребенные остаточные ореолы рассеяния являются аналогами современных элювио-делювиальных ореолов, отличаясь от них образованием в палеогеографических условиях и последующим перекрытием более молодыми осадками. Ореолы этого

типа характерны для рудных районов, претерпевших длительное континентальное развитие в период, предшествовавший накоплению молодых осадков, в которых на пенепленизированной (выровненной) поверхности складчатого фундамента сохранилась древняя кора выветривания.

В вертикальном разрезе коры выветривания погребенные ореолы имеют грибообразную, часто ассиметричную форму, определяющуюся элементами залегания рудных тел и направлением палеостока (рисунок 6.2).

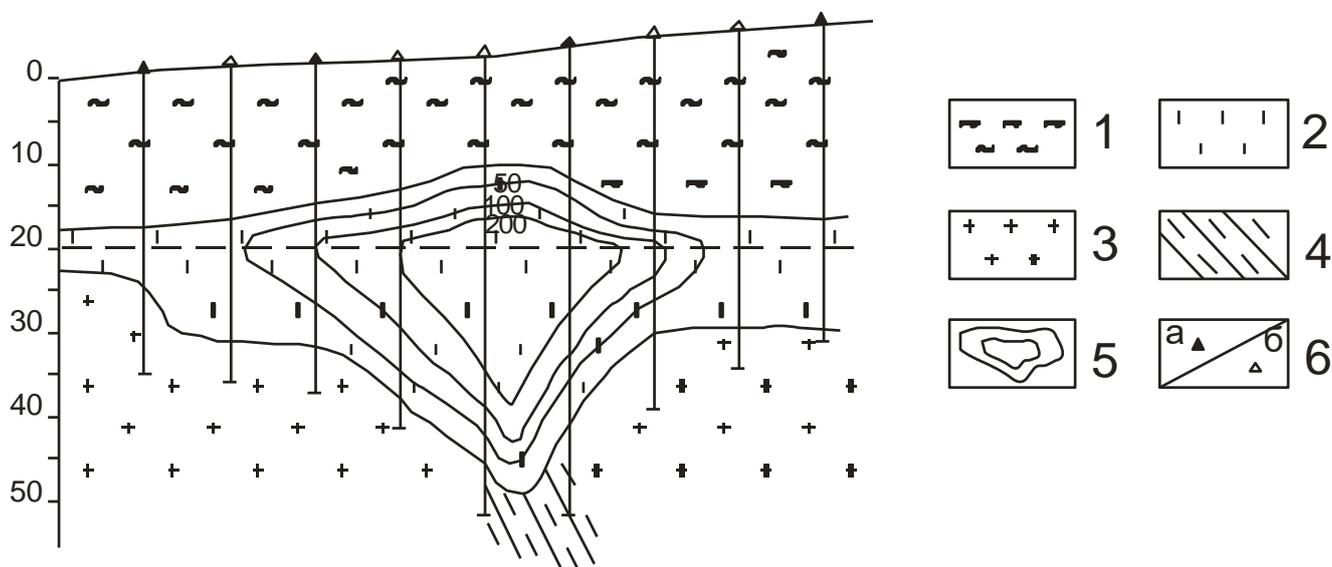


Рисунок 6.2 – Вертикальный разрез коры выветривания погребенного ореола

1 – суглинки N-Q; 2 – Т-Ж кора выветривания; 3 – рудовмещающие граниты; 4 – зона дробления; 5 – изоконцентраты рудного элемента; 6 – скважины (а – поисковые, б – разведочные).

Максимальное площадное развитие эти ореолы имеют на уровне пестроцветной коры выветривания, являющейся в данном случае представительным горизонтом для опоскования. В перекрывающих кору выветривания отложениях ореолы этого типа не прослеживаются. Наличие таких погребенных остаточных ореолов рассеяния предопределило создание методики глубинных литохимических поисков в закрытых равнинных районах.

*Седьмой тип.* Погребенные наложенные ореолы рассеяния, в свою очередь, являются палеогеографическими аналогами современных открытых наложенных ореолов (тип II), которые были перекрыты позднейшими осадками.

#### Параметры вторичных литохимических ореолов рассеяния

Параметрами, объективно характеризующими вторичный ореол рассеяния, связанное с ним коренное оруденение и местную геохимическую обстановку, являются:

$St_{max}$  – максимальное содержание металла в ореоле, в (%);

$\sigma$  – коэффициент гипегенного рассеяния в (м);

$M$  – линейное количество металла в ореоле по профилю в (м%);

$M_r$  – линейное количество металла в рудном теле по профилю в (м%);

$C_r$  – содержание металла в рудном теле в (%);

$P$  – полумощность коренного оруденения, послужившая образованию ореола в (м);

$2P$  – мощность рудного тела в (м);

$C_f$  – фоновое содержание элемента в (%);

$2a$  – ширина ореола в (м);

$\varepsilon$  – произвольный коэффициент пропорциональности;

$R$  – коэффициент остаточной продуктивности ( $R \leq 1$ ).

Для Казахстана в целом по рудовмещающим породам коэффициент остаточной продуктивности меньше единицы. В таблице 4.1 приведены значения коэффициентов остаточной продуктивности и произвольных коэффициентов пропорциональности для различных рудовмещающих пород разных геохимических ландшафтов.

Параметр ( $M$ ) – суммарное (линейное) количество рудного вещества (металла) в ореоле, распределенное вдоль оси  $X$ , равное его количеству ( $M_p$ ) в том же сечении рудного тела до начала выветривания.

В идеальном ореоле рассеяния существует зависимость:

$$M=M_p=C_p x^2 P \quad (1)$$

При  $C_p=0$ , величина  $M$  характеризует площадь, ограниченную графиком ореола  $C_x=f(x)$  и осью абсцисс.

$C_{max}$  – максимальное содержание металла в центральной точке остаточного ореола рассеяния

$$C_{max} = \frac{M}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

где  $M = C_{max} \sigma \sqrt{2\pi}$

Параметр  $\sigma$  – коэффициент гипергенного рассеяния, определяет тот или иной вид графика концентрации металла в ореоле. Приведен график (Рисунок 6.3) вторичных ореолов рудной жилы для различных значений коэффициента гипергенного рассеяния.

Из рисунка 6.3 видно, что с увеличением коэффициента гипергенного рассеяния при постоянной величине  $M$  форма вторичного остаточного ореола становится все более полой, что отражает постепенное рассеяние частиц полезного ископаемого в массе продуктов выветривания вмещающих пород. Величина коэффициента гипергенного рассеяния измеряется в метрах, характеризуя среднее квадратическое удаление рудных частиц в процессе гипергенного рассеяния от первоначального положения в рудном теле.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\varepsilon T}{\mu}}, \text{ где } \varepsilon = \xi F \quad (3)$$

$$\sigma = \xi \sqrt{\frac{FT}{\mu}} \quad (4)$$

$T$  – продолжительность выветривания;

$F$  – сила выветривания;

$\xi$  – безмерный (численный) множитель;

$\mu$  – коэффициент вязкости горных пород.

Значения  $F$ ,  $T$  и  $\mu$  – определяются местными ландшафтно-геохимическими условиями, характеризуясь конкретными величинами в пределах данного полиминерального ореола рассеяния.  $\xi$  – отражает индивидуальные свойства рудных элементов в процессе гипергенного рассеяния (т.е. подвижность рудных частиц в зависимости от формы, размера, плотности и т.д.).

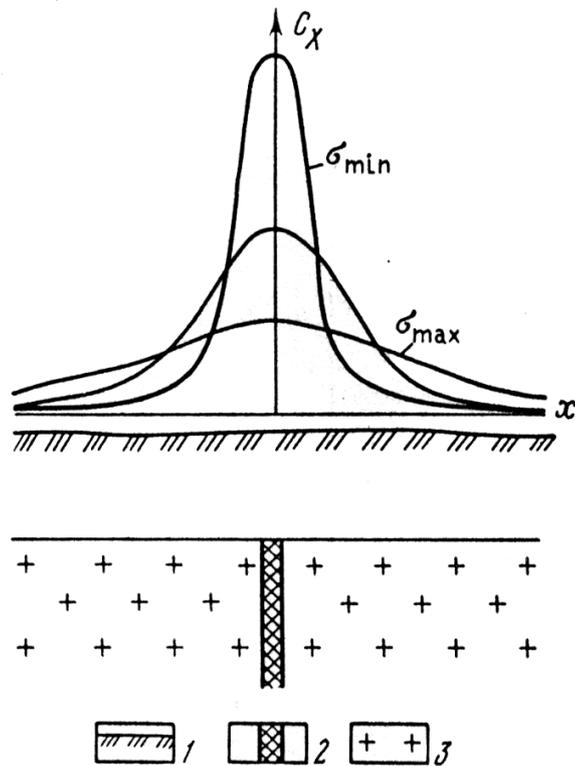


Рисунок 6.3 – График вторичных остаточных ореолов рассеяния рудной жилы для различных значений  $\sigma$

1 – элювиоделювий; 2 – рудная жила; 3 – вмещающие породы.

В пределах одного ореола рассеяния значения ( $\xi$ ) для различных металлов и минералов могут существенно различаться.

Величины  $F$ ,  $T$  и  $\mu$ , определяющие значение коэффициента рассеяния ( $\sigma$ ), изменяются с глубиной, что вызывает изменение величины  $\sigma$  по вертикальному разрезу рыхлых образований.

Величина коэффициента вязкости горных пород ( $\mu$ ) зоны выветривания минимальна вблизи дневной поверхности, соответственно их наиболее рыхлому состоянию, и – максимальна на уровне плотных коренных пород в начальной стадии выветривания.

Величина действующей силы ( $F$ ) – убывает с глубиной, соответственно быстрому уменьшению амплитуды колебаний температуры и воздействия внешних динамических факторов под покровом вышележащей толщи.

Величина продолжительности выветривания ( $T$ ) также убывает с глубиной и на границе коренных пород  $T=0$ . Зависимость ее ( $T$ ) от координаты  $Z$  однозначно определяется из выражения:

$$T = (h-z)/h \quad (5)$$

для случая динамического равновесия между выветриванием и денудацией.

Если  $F$  и  $T$  убывают с глубиной, а коэффициент вязкости ( $\mu$ ), хотя и возрастает с глубиной, однако в выражении (4), он стоит в знаменателе, следовательно, коэффициент рассеяния ( $\sigma$ ) от  $max$  величины на поверхности ( $\sigma_0 = \sigma_{max}$ ) должен убывать с глубиной и на уровне коренных пород принимать значение  $\sigma_h = 0$ . С учетом этих граничных значений, без каких-либо дополнительных предположений о характере функциональных зависимостей  $\mu$ ,  $F$ ,  $T$  от  $Z$ , можно допустить, что коэффициент рассеяния является линейной функцией  $Z$ , подчиняясь зависимости:

$$\sigma_z = \sigma_0 \frac{h-z}{h} \quad (6)$$

$Z$  – направление по падению рудного тела, по нормали к дневной поверхности (глубина в метрах).

$h$  – мощность элювио-делювиальных образований (в метрах).

Многочисленные исследования вертикальных разрезов остаточных ореолов рассеяния эту зависимость достаточно хорошо подтверждают.

Численные значения коэффициента рассеяния по графикам детальных литохимических съемок, зрительно сходных с их теоретическим видом для тонкого рудного тела определяются «методом трех уравнений» (Рисунок 6.4).

Зная значение  $C_{max}$  для ореола, можно получить значения  $\sigma_x$  на трех уровнях, выведенных расстояний: 1) между абсциссами точек с ординатами  $Cx=0.607x(C_{max}-C\phi)$  для теоретической кривой равной  $2\sigma$ ; 2) между абсциссами для ординат  $Cx=0.325x(C_{max}-C\phi)$  для теоретической кривой равной  $3\sigma$ ; 3) между абсциссами точек для ординат  $Cx=0.135x(C_{max}-C\phi)$  для теоретической кривой равной  $4\sigma$ . В результате получим:

$$2\sigma = 0.607x C_{max};$$

$$3\sigma = 0.325x C_{max};$$

$$4\sigma = 0.135x C_{max}.$$

Это дает возможность по ширине ореола на уровне этих трех значений  $Cx$  получить три независимых определения величины коэффициента рассеяния. Если найденные по графику ореола три значения  $\sigma$  совпадают между собой в пределах погрешности от  $\pm 10$  до  $\pm 15\%$ , то приходим к выводу об удовлетворительном совпадении наблюдаемых данных с теоретической формулой:

$$Cx = \frac{M}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + C\phi \quad (7)$$

Если найденные значения  $\sigma$ , закономерно уменьшаются с увеличением интервала графика, по которым они определялись, т. е. наблюдается соотношение  $\sigma$  (по  $0.607x C_{max}$ )  $>$   $\sigma$  (по  $0.325x C_{max}$ )  $>$   $\sigma$  (по  $0.135x C_{max}$ ), это соответствует рудному телу большой мощности, тогда определение величины  $\sigma$  следует проводить с помощью палетки Дубова.

Зависимость (I)  $M = M_p = C_p x 2P$ , верная для тел любой мощности, позволяет уточнить понятие о «тонком» рудном теле, для которого:

$$C_p \cdot 2P = C_{max} \cdot \sigma \sqrt{2\pi} \quad (8)$$

Случайная подвижность частиц направлена к выравниванию концентраций и поэтому максимальное содержание  $C_{max}$  металла во вторичном ореоле рассеяния не может превысить исходного содержания в рудном теле, или  $C_p \geq C_{max}$ , отсюда:

$$2P \leq \sigma \sqrt{2\pi} \approx 2.5\sigma \quad (9),$$

следовательно, «тонкими» могут считаться рудные тела с полумощностью равной

$$p \leq 1.25\sigma \quad (10)$$

Распределение рудных частиц в остаточном литохимическом ореоле рассеяния тонкой вертикальной жилы за вычетом фона подчиняется закону нормального распределения

с параметрами  $M$  и  $\sigma$ , зависящими от характеристики оруденения и местных условий. При значениях  $C\phi=0$ ,  $M=1$ ,  $\sigma=1$ ;

$$M_{\text{теор}} = C_{\text{max}} \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi} = C_{\text{max}} \cdot 2.5\sigma \quad (11)$$

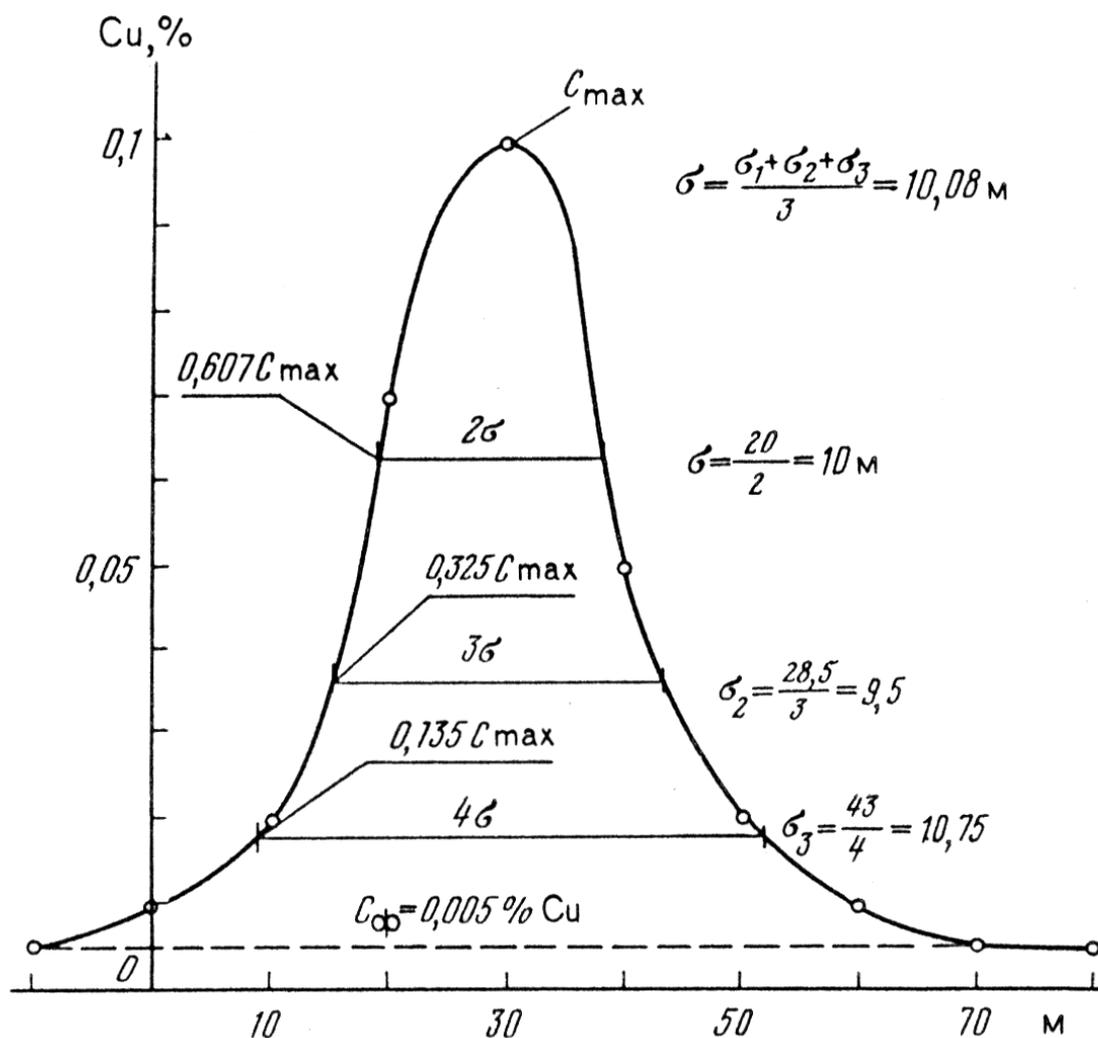


Рисунок 6.4 – Пример определения коэффициента гипергенного рассеяния методом «трех уравнений»

Согласно уравнениям (3) и (6), максимальное содержание металла в центральной точке остаточного ореола рассеяния при постоянных параметрах коренного оруденения ( $M_p$ ), зависит от величины местного коэффициента рассеяния, т.е. от миграционной способности или геохимической подвижности элементов при гипергенном ореолообразовании.

$$M_{\text{теор}} = (C_{\text{max}} - C_{\phi}) \cdot 2.5\sigma \quad (12)$$

Завершается геологическая, геохимическая и физико-математическая интерпретация вторичных ореолов рассеяния оценкой выявленных объектов в цифрах прогнозных ресурсов металла, которые определяют эффективность поисковых работ. Решающее значение для этих оценок имеет анализ генетического типа и геолого-структурных условий локализации оруденения.

Рассмотрим случай, когда по геолого-структурным условиям характеристика масштаба оруденения на поверхности рудовмещающих пород отвечает его промышленной оценке. К числу таких объектов относятся рудопроявления и месторождения относительно простой формы, вскрытые современным или более древним эрозионным срезом на уровне промышленных горизонтов оруденения (не слепого) – пластового, линзообразного, жильного или штокверного типа.

Выходы рудных тел на поверхность рудовмещающих пород, как правило, частично или полностью перекрыты продуктами выветривания, затрудняющими или исключаящими их прямую оценку.

Объективным показателем оценки масштаба коренного оруденения служит площадная продуктивность его элювио-делювиального ореола рассеяния  $R_m^{\%}$ . Зная величину местного коэффициента остаточной продуктивности  $R$ , можно еще до производства горных работ оценить количество металла в т/м в коренном оруденении:

$$q_{рудн} = (1/R)q \quad (13)$$

где  $q_{рудн}$  – количество металла в коренном оруденении для слоя в 1 м, в т;  
 $q$  – количество металла в ореоле рассеяния для слоя в 1 м, в т.

Исходя из этого прогнозные ресурсы могут быть подсчитаны на глубину ( $H$ ) в соответствии с геологическими представлениями о вероятной форме, уровне эрозионного среза и условиях залегания рудного тела.

$$Q_n = (1/R)qH \quad (14)$$

Количество металла в остаточном ореоле  $R$  в  $m^{\%}$  или  $q$  т/м характеризует выход рудной зоны на видимую мощность в плоскости наблюдения.

Прогнозные ресурсы, подсчитанные по параметрам вторичных остаточных ореолов рассеяния, в зависимости от масштаба литохимических съемок и геологической изученности выявленного оруденения, подлежат отнесению к категориям –  $P_2$  или  $P_1$ .

*Основная литература:* [1] с. 195-242; [2] с. 167-210; [3] с. 57-86.

*Дополнительная литература:* [9], [15], [16], [20], [22].

*Контрольные вопросы*

1. Что представляют собой продукты гипергенного разрушения месторождений?
2. Перечислите основные факторы, определяющие особенности вторичных ореолов?
3. Как делятся вторичные ореолы рассеяния по фазовому состоянию?
4. Как делятся вторичные ореолы рассеяния по условиям образования?
5. Как делятся вторичные ореола по признаку доступности для обнаружения?
6. Охарактеризуйте особенности классификации вторичных ореолов.

**Лекция 11. Литогеохимические потоки рассеяния. Геохимические методы поисков по потокам рассеяния.**

### **Литохимические потоки рассеяния**

Часть земной коры, образующая сушу, во все периоды геологической истории Земли являлась ареной развития взаимосвязанных процессов выветривания и денудации, формируя гипергенное поле рассеяния месторождений полезных ископаемых. Эти процессы определяют развитие важнейших для практики поисков вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния месторождений. Масштабы денудационных процессов, под которыми понимаются удаление, и перенос продуктов выветривания в зону осадконакопления характеризуются многочисленными данными геологии, физической географии и гидрологии.

Рельеф земной поверхности непрерывно преобразуется. Силы, формирующие рельеф земной поверхности, по своей природе весьма разнообразны – это и внутренние процессы, происходящие в земле - перемещения блоков, тектоника, и внешние – силы расчленяющие, разрушающие и переносящие вещество и отлагающие его во впадинах – ветер, вода, солнечная энергия.

На поверхности суши ежегодно выпадает в виде атмосферных осадков больше влаги, нежели расходуется на испарение. Этот избыток, составляющий 36 тыс. км<sup>3</sup>, образует сток с суши.

Сток атмосферных осадков ведет к денудации суши вследствие растворяющей деятельности воды и перемещения ею частиц горных пород в сторону понижения рельефа.

Реки земного шара переносят огромное количество твердого вещества в виде тончайшей взвеси и влекомых по дну наносов, объединяемых под названием «твердый сток».

Образование литохимических потоков рассеяния месторождений полезных ископаемых протекает на поверхности суши за счет живой силы и растворяющей способности воды в результате закономерного размещения продуктов выветривания силами гравитации в сторону понижения рельефа и в зону осадконакопления (рисунок 6.5).

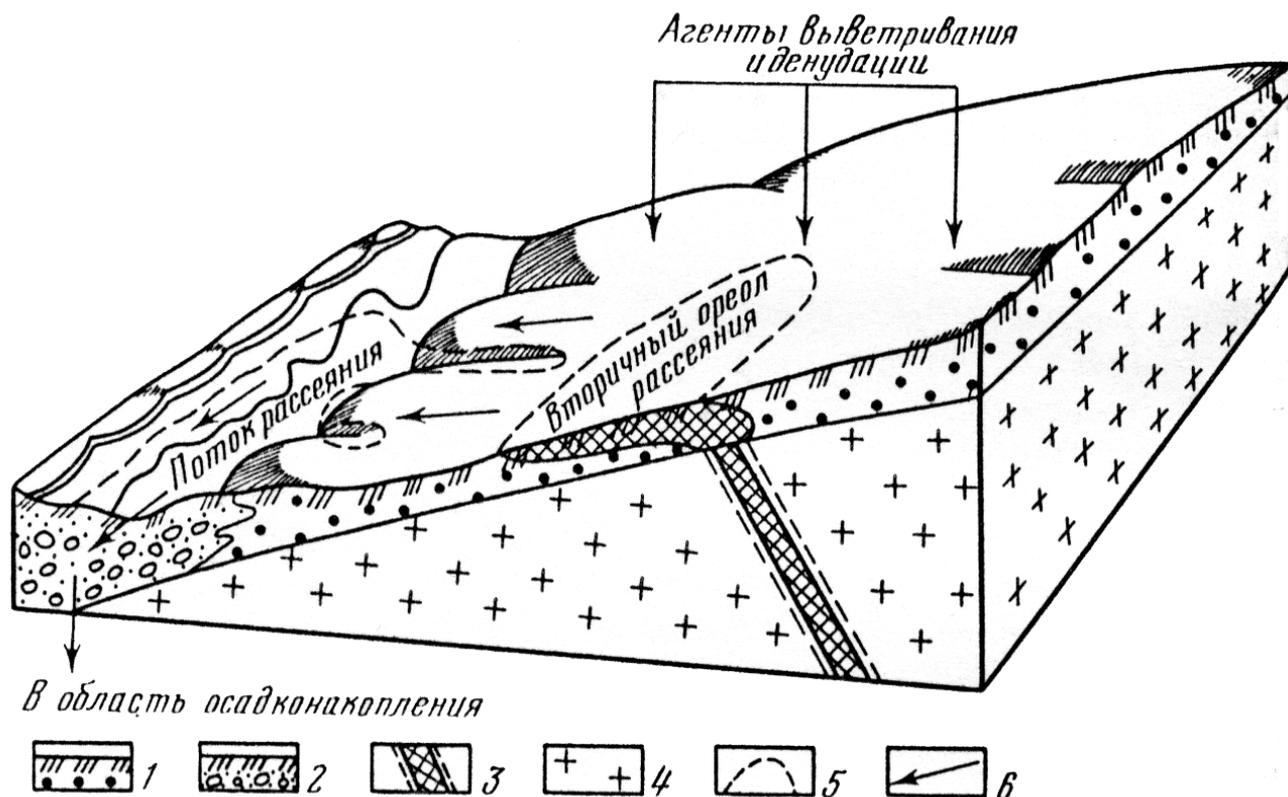


Рисунок 6.5 – Блок-диаграмма гипергенного поля рассеяния

1 – элювиоделювий; 2 – аллювий; 3 – рудное тело и его первичный ореол; 4 – рудовмещающие породы; 5 – контур аномальных содержаний рудных элементов в продуктах выветривания, в речной воде и в растительности; 6 – направление стока.

Подчиненное значение имеет деятельность современных ледников. Однако в климатические эпохи прошлого в северных районах европейских стран, Канады и Аляски роль ледниковых процессов была очень велика и следы ее сохранились до наших дней.

В высокогорных районах заметную роль в формировании поля рассеяния играют осыпи, камнепады и каменные потоки.

Транспортирующая сила ветра, за очень редкими исключениями; не способна образовать отчетливых литохимических потоков рассеяния.

Преобладание литохимических форм рассеяния рудных элементов и подчиненная роль гидрохимических процессов особенно отчетливо проявляются при формировании потоков рассеяния большинства рудных месторождений. Распределение химических элементов между растворимой и твердой фазой стока характеризуют их коэффициенты водной миграции  $K_x$  и талассофильности  $\tau_x$ :

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a C_x},$$

где  $m_x$  - содержание элемента в воде, г/л;

$C_x$  - содержание элемента в горной породе, %;

$a$  - общая миграция воды, г/л.

$$\tau_x = \frac{C_{K_r}}{C_{K_l}},$$

где  $\tau_x$  - коэффициент талассофильности

$C_{K_r}$  - кларк элемента в гидросфере;

$C_{K_l}$  - кларк этого же элемента в литосфере.

Кроме кислорода (О) и водорода (Н) кларки океанической воды превышают таковые литосферы только по трем элементам - Cl, S и Br.

Все остальные элементы не проявляют способности к накоплению в гидросфере и основные их количества сосредоточены в продуктах твердого стока (литосфера).

В аллювиальном потоке рассеяния (нанос, камни), так же как по периферии элювио-делювиального (смывы со склонов) ореола рудного месторождения, преобладание литохимических форм рассеяния определяется следующими факторами:

1) направленностью обменных химических реакций в водной среде в сторону образования наиболее труднорастворимых и слабодиссоциирующих соединений;

2) выпадением из раствора гидроксидов большинства тяжелых металлов уже при значениях  $pH < 5,5$ , в то время как воды ручьев и рек горных районов имеют обычные значения  $pH \geq 7$ ;

3) сорбцией (поглощение) катионов металлов минеральными и органическими коллоидами тонкодисперсных илисто-глинистых фракций аллювия.

Старейшим методом исследования механических потоков рассеяния в поисковых целях является шлиховая съемка. Однако применимость ее ограничена поисками месторождений, минералы которых по своей высокой плотности  $> 4$  г/см<sup>3</sup>, а также химической и механической устойчивости способны к концентрации в шлихах. Это заставило, вслед за созданием методов литохимических поисков ореолов рассеяния рудных месторождений, обратиться к разработке методики поисков потоков рассеяния тех месторождений цветных и редких металлов, минералы которых не принадлежат к типично шлиховым (Cu, Ni, Co, Ag, Pb, As, Sn, Mo, U и др.). Целесообразность исследования с этой целью именно продуктов твердого стока быстро подтверждалась. Н.М.Страховым было доказано, что общее соотношение между суммой влекомых и взвешенных наносов рек и стоком растворенных веществ для горных стран составляет 7.66:1.0. Преобладает растворимый сток только в равнинных реках (Нева, Волга, нижнее течение Лены), в районах которых поиски рудных месторождений по потокам рассеяния не проводятся. Рассмотрим перенос в реках основных компонентов осадков (рисунки 6.6)

В целом, механическая и химическая денудации максимальны в районах гумидного (влажного) климата со средней годовой  $T > +100$  и прямым образом зависит от степени расчленности рельефа и тектонической активности района.

При этом у горных рек в ряде случаев механический транспорт Fe, Mn, P и малых элементов (V, Cr, Ni, Co, Cu и другие) «вообще становится единственно значимой формой» переноса. Этим самым доказывается преобладание твердой фазы в потоках рассеяния рудных месторождений.

Существенная роль переноса реками в растворенном состоянии отмечалась для As и Mo в Забакайкалье, она значительна и для B, F, Sr и Li; в форме сульфат-иона, мигрирует в речных водах сера сульфидных месторождений.

Таким образом, проводя геохимические поиски рудных месторождений по их потокам рассеяния в гидросети, необходимо опробовать твердый материал горных пород, берега и дно ручьев, рек и родников.

Произведем расчет содержаний металла в литохимическом потоке рассеяния для произвольного месторождения, вторичный остаточный ореол рассеяния которого подвергается современной денудации на горном склоне какой-либо долины.

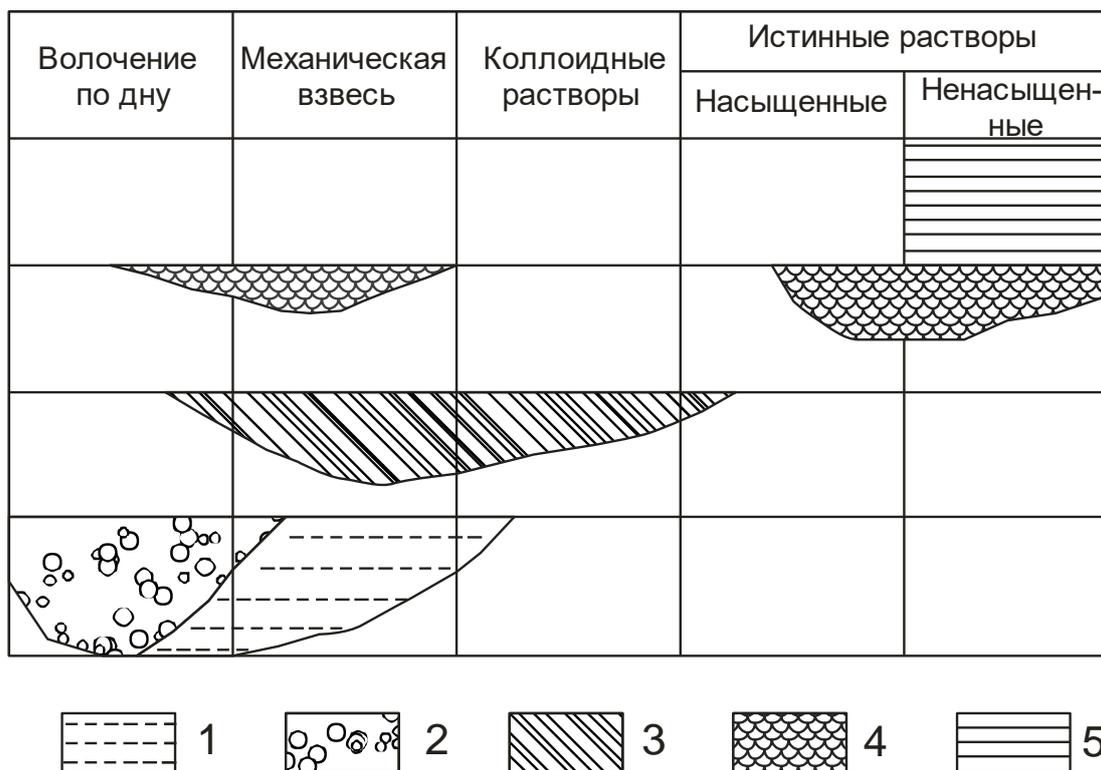


Рисунок 6.6 – Перенос в реках основных компонентов осадков

- 1 – минералы глин;
- 2 – минералы алевролитов и песков;
- 3 – Fe, Mn, P, большая часть микроэлементов (V, Cr, Ni, Co, Cu);
- 4 – карбонаты Ca, Mg;
- 5 – хлориды и сульфаты K, Na, Ca, Mg.

Будем именовать потокам первого порядка любую реку (ручей, долину), не имеющую боковых притоков. Согласно этой классификации, две реки первого порядка сливаясь, образуют реку второго порядка; две реки второго порядка сливаясь, образуют реку третьего порядка.

Бассейны водосборов русел первого порядка чаще всего имеют грушевидную форму, и площадь их  $S_x$  для любой точки русла возрастает пропорционально квадрату расстояния  $x$  от вершины водораздела 0 (Рисунок 6.7):

Пусть на склоне этой долины расположен вторичный остаточный ореол рассеяния с площадной продуктивностью  $P$  м<sup>2</sup> %. Задача заключается в установлении зависимости

содержаний металла  $C'x$  (то, что относится к потокам рассеяния берется со «штрихом») в русловых отложениях от координаты точки опробования:

$$C'x = f(x) = f(P, Sx),$$

где  $P$  – площадная продуктивность в м<sup>2</sup> %;

$Sx$  – площадь водосбора.

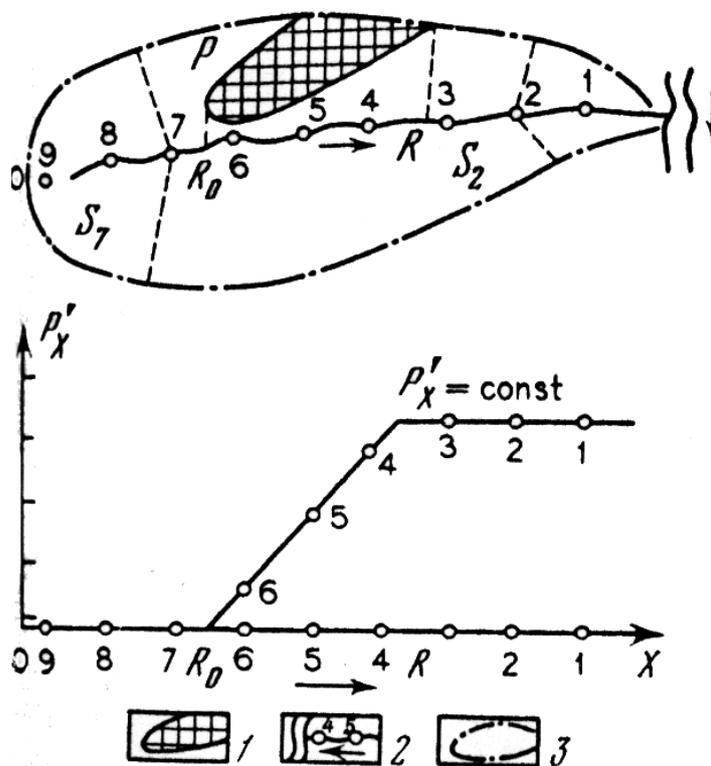


Рисунок 6.7 – К выводу уравнений идеального потока рассеяния

1 – вторичный ореол; 2 – точки отбора проб; 3 – граница водосбора.

Формирование потока рассеяния определяется твердым стоком. В русле ручья, следует различать три интервала: первый, расположенный выше точки  $R_0$ , в которой рудный материал из ореола рассеяния не поступает; второй- между точками  $R_0$  и  $R_1$  на протяжении, которого сносимый в русло с левого склона «ореольный» элювио-делювий определяет появление аномальных содержаний металла в аллювии и третий, ниже точки  $R_1$  на котором этот аллювий наполняется только материалом, сносимым с обоих безрудных склонов, в результате чего аномальные содержания металла постепенно падают.

I. Во всех точках опробования в первом интервале русла содержания металла, очевидно, остаются фоновыми:

$$C'x = C'ф$$

Аллювиальные отложения в первом приближении представляют собой природную среднюю пробу, характеризующую все разнообразие горных пород и наличие рудных тел в бассейне денудации данного водотока.

II. В третьем интервале русла содержания металла в аллювии будут превышать фоновое на величину:

$$\Delta C'_x = \frac{q_{me}}{q_{ГП}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

где  $q_{me}$  – дополнительное количество металла, поступающего в русло за счет денудации ореола рассеяния;

$q_{ГП}$  - общее количество материала горных пород, сносимых за тот же отрезок времени со всей площади водосбора  $S_x$ , отвечающий точке опробования на расстоянии  $X$  от вершины водораздела. Обозначая средний слой денудации  $\Delta h$ , имеем:

$$q_{me} = P \cdot \Delta h \cdot d$$

$$q_{ГП} = S \cdot \Delta h \cdot d$$

где  $d$  – объемная масса сносимого в русло элювио-делювия.

$$\text{Отсюда } \Delta C'_x = \frac{P}{S_x}$$

$$C'_x = \frac{P}{S_x} + C'_\phi, \quad (16)$$

III. Во втором интервале в русло будут поступать различные количества металла, зависящие от продуктивности  $P_x$  той части ореола рассеяния, которая участвует в формировании твердого стока точки опробования  $X$ . Считая для простоты, что линейная продуктивность ореола на всем интервале  $R-R_0$  остается постоянной имеем:

$$\frac{P_x}{P} = \frac{(x - R_0)}{(R - R_0)} - \text{отсюда, } \frac{P_x}{P} = \frac{x - R_0}{R - R_0} \text{ согласно (16)}$$

$$C'_x = \frac{P_x}{S_x} + C'_\phi = \frac{P(x - R_0)}{S_x(R - R_0)} + C'_\phi \quad (17)$$

Тождество (15) и уравнения (16) и (17) характеризуют распределение содержаний металла в идеальном литохимическом потоке рассеяния. Каждое из этих уравнений отвечает определенному интервалу русла и аналитически они несовместимы.

Решая уравнение (16) относительно  $P$ , имеем:

$$C'_x = \frac{P}{S_x} + C'_\phi, \quad (2) \quad P = S_x(C'_x - C'_\phi) \quad (18)$$

Равенство (18), характеризуя идеальный поток рассеяния, в природных условиях заменяется пропорциональной зависимостью. Обозначая правую часть выражения (18) символом  $P'$  и именуя ее, по аналогии с такими же параметрами ореолов и рудных тел, продуктивность потока рассеяния, можно написать:

$$P' = S_x(C'_x - C'_\phi) = R'P = const \quad (19)$$

где  $R' \geq 1,0$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от местных орографических условий и индивидуальных свойств, химических элементов, в частности, от реальных соотношений между твердым и растворимым стоком.

Если относительная величина общего стока элементов породообразующих минералов превышает относительный сток рудного элемента по сравнению с их соотношениями в элювио-делювии, аллювий обогащается рудным элементом и объем его стока пропорционально возрастает.

Уровень содержаний металла в аллювии  $C'_x$ , на котором достигается динамическое равновесие между его приходом и расходом, определяет величину  $R' > 1,0$ .

Если вследствие малой плотности, способности к переизмельчению или высокой растворимости рудных минералов, общий сток рудного элемента опережает сток петрогенных элементов, местный коэффициент пропорциональности приобретает значение  $R' < 1,0$ .

В любом идеальном литохимическом потоке рассеяния можно выделять:

- 1) интервал фоновых содержаний рудного элемента  $x \leq R_0$ , в котором для всех точек продуктивность потока рассеяния  $P'_x$  тождественно равна нулю;
- 2) интервал аномальных содержаний металла  $R_0 < x \leq R$ , обязанных его поступлению со склона в русло, в котором продуктивность потока непрерывно возрастает;
- 3) интервал  $x > R$ , в котором аномальные содержания металла падают, приближаясь к фону, а продуктивность потока рассеяния остается постоянной (таблица 6.1).

Таблица 6.1 - Сводная таблица

Интервал значений $X$	Содержание металла в потоке рассеяния $C'_x$	Продуктивность потока рассеяния $P'_x = S_x (C'_x - C'_\phi)$
I. $0 \leq x \leq R_0$	$C'_x - C'_\phi$ (фоновое)	$P'_x = 0$
II. $R_0 \leq x \leq R$	$C'_x = \frac{P}{S_x} \frac{(x - R_0)}{(R - R_0)} + C'_\phi$ (аномальное – возрастает и убывает)	$P'_x$ - возрастает
III. $x > R$	$C'_x = \frac{P}{S_x} + C'_\phi$ (аномальное – убывает, приближаясь к фону)	$P'_x = R'P = const$

По графикам  $C'_x = f(x)$  и признаку  $C'_x \geq C'_A$  определяется только положение точки  $R_0$  – начало поступления рудного элемента из ореола рассеяния в русло. Однако – определить положение точки  $R$ , указать число рудных тел или оценить сравнительный масштаб оруденения в бассейне водосбора по графикам содержаний металла нельзя.

Согласно выражению (19), продуктивность потока рассеяния в третьем интервале русла теоретически остается постоянной (Рисунок 6.7), с общей тенденцией к убыванию в реальных потоках рассеяния. Поэтому на графике продуктивности потока рассеяния по принципу прекращения роста  $P'_x$  можно определить положение точки  $R$ , а по величине  $P'_x = const$  с учетом местного значения  $R'$  – можно оценить площадную продуктивность вторичных ореолов рассеяния, развитых в пределах данного водосборного бассейна.

Это имеет прямое значение для оценки масштаба ожидаемого коренного оруденения, по формуле:

$$P_p = \frac{1}{R' + R} \cdot P' \quad (20)$$

$R'$  и  $R \geq 1,0$  – местные коэффициенты пропорциональности, определяемые из опыта работ.

В долинах горных рек всегда имеется валунно-глыбовый, песчано-галечный и глинисто-илистый материал, из которого при литохимических съемках отбирается проба мелкозема.

Отложение аллювиального материала, естественно, не ведет к постепенному заполнению русел горных рек. В течение длительных геологических периодов эрозионное развитие горных стран протекает в режиме динамического равновесия между поступлением материала со склона в русло и его выносом.

При формировании литохимических потоков рассеяния русло реки является не только областью перемешивания и транспорта рыхлого материала, но и временным базисом денудации, то есть областью его отложения.

При этом в местном аллювии преувеличенную роль по сравнению с идеализированной картиной играет материал ближайших склонов.

Вследствие этого в интервале ( $R_0 - R$ ) приноса в русло рудного материала со склонов вычисленная по (4)  $P'x = Sx(C'x - C'\phi)$  продуктивность превышает истинное значение продуктивности потока рассеяния, а ниже по течению, взамен приобретения постоянных значений,  $P'x$  быстро падает.

Поэтому значение продуктивности, вычисленное по формуле (18) – называют кажущейся продуктивностью потока рассеяния:

$$P'_{уст} = \lambda' P'_{max} \quad (21)$$

$$a' = \frac{\ell q \left( \frac{C'_R - C'_\phi}{C'_x - C'_\phi} \right)}{\ell q \left( \frac{S_x}{S_R} \right)} \geq 1 \quad (22)$$

где  $P'_{max}$  – максимальное значение кажущейся продуктивности;

$\lambda'$  – поправочный множитель для оценки истинной продуктивности литохимического потока рассеяния.

Поправочный множитель  $\lambda'$  зависит от местного значения  $a'$  и соотношения между размерами площадей водосборов в точках начала  $S_{R_0}$  и конца  $S_R$  поступления металла со склона в русло:

$$P'_{уст} = P'_{max} \cdot \left( \frac{1 - \frac{S_{R_0}}{S_R}}{1 - \left( \frac{S_{R_0}}{S_R} \right)^{a'}} \right) = \lambda' \cdot P'_{max} \quad (23)$$

Для определения этого поправочного множителя  $\lambda'$ , зависящего от местного значения  $a'$  и соотношения между размерами площадей водосборов в точках начала  $S_{R_0}$  и конца  $S_R$

поступления металла со склона в русло построена номограмма (Рисунок 6.8) на основе формулы (23):

Рассмотрение этой номограммы показывает, что при  $S_{R_0} = 0$  или  $a' = 1$  имеем  $\lambda' = 1$  и соблюдается условие:

$$P'_x = const$$

Если на всем протяжении русла  $a' = 1,0$  и потока рассеяния подчиняются условию  $P'_i = const$ , оценка суммарной продуктивности всех аномалий определяется нижней по течению (максимальной) величиной ее устойчивых значений. При этом продуктивность каждой отдельной аномалии определяется как разность между двумя смежными, устойчивыми значениями:  $(P_i)_{ист} = (P)_{набл} - (P'_i - 1)_{набл}$ .

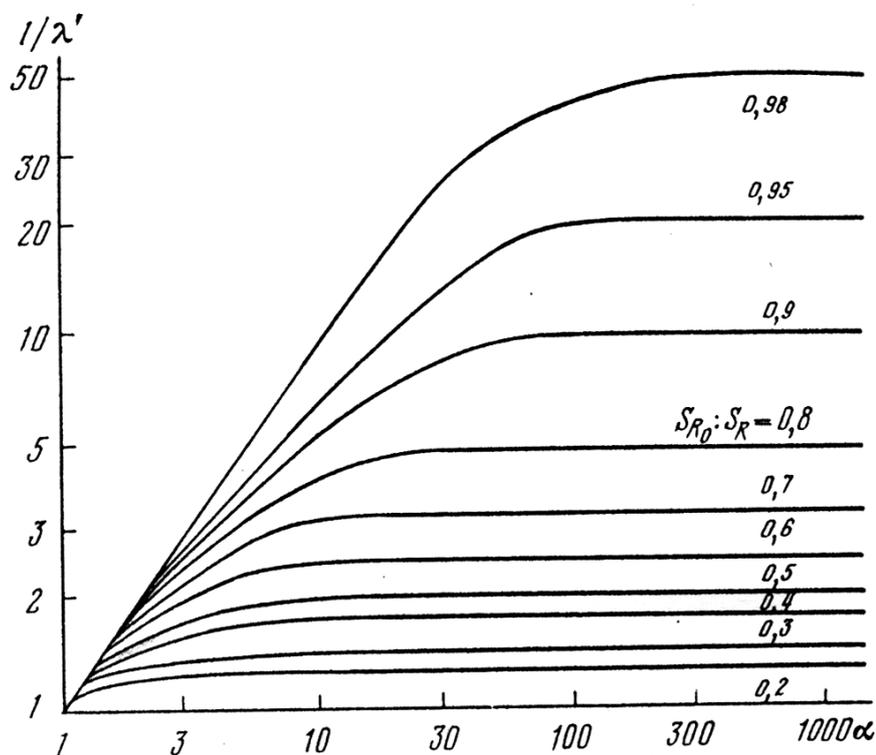


Рисунок 6.8 – Номограмма для оценки  $\lambda'$  по значениям  $a'$  и  $\frac{S_{R_0}}{S_R}$

Основная литература: [1] с. 195-242; [2] с. 167-210; [3] с. 57-86.

Дополнительная литература: [9], [15], [16], [20], [22].

Контрольные вопросы

1. Понятие геохимические параметры, дать характеристику.
2. Перечислите основные геохимические параметры вторичных ореолов рассеяния.
3. Что определяет коэффициент рассеяния?
4. Что представляет собой метод «трех уравнений»?
5. Что представляют собой потоки рассеяния?
6. Факторы, определяющие геохимические особенности потоков рассеяния?
7. Что определяет коэффициент водной миграции?
8. Что определяет коэффициент талассофильности?
9. В каком масштабе могут эффективно проводиться поиски по потокам рассеяния?

## Лекция 12. Литогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.

### **Методы поисков месторождений полезных ископаемых: литохимические, гидрохимические, биогеохимические, атмохимические**

Литохимические методы поисков полезных ископаемых проводятся как по первичным ореолам, так и по потокам рассеяния, и по вторичным ореолам, характеризуясь при этом (в каждом отдельном случае) специфическими особенностями и условиями проведения.

Поиски по первичным ореолам могут проводиться на всех стадиях геолого-разведочных работ, но их эффективность на каждой стадии зависит от ряда геологических, ландшафтных и экономических факторов. Основными факторами надежности проведения поисков является: наличие определенных пород и тектонических структур; характер эпигенетических преобразований пород.

В зависимости от масштаба работ все литохимические исследования по выявлению и изучению первичных ореолов можно разделить на региональные, поисковые и разведочно-эксплуатационные.

**Региональные литохимические исследования** проводятся одновременно с составлением геологических карт масштабов 1:200 000 – 1:50.000 и региональными геофизическими работами. Для составления сводного геолого-геохимического разреза проводится опробование коренных пород по профилям, расположенным вкрест простирания пород. При геологической съемке масштаба 1:50.000 проводятся поиски по первичным ореолам в пределах обнаженных и особо перспективных для обнаружения месторождений участков. Опробование коренных пород при геологической съемке масштаба 1:50 000 позволяет по комплексам элементов выделить толщи, потенциально перспективные для обнаружения в них залежей Pb, Zn, Cu, Au, W. На этой же подстадии возможно установление потенциальной рудоносности изверженных горных пород. Обязательному опробованию на этом этапе подвергаются коренные породы в горных выработках и керн буровых скважин.

**Собственно поисковые работы** для выявления месторождений по первичным литохимическим ореолам проводятся в масштабах 1:25 000 – 5000. Исследования в масштабе 1:25 000 проводятся при опробовании крупных аномальных участков или рудопроявлений. Основу же рассматриваемого этапа исследований составляют поиски в масштабах 1:10 000 – 1:5 000. В связи с тем, что детальные и поисково-оценочные исследования выполняются с использованием дорогостоящих буровых и горных работ, то результаты площадных литохимических поисков должны в обязательном порядке учитываться при заложении буровых и горных выработок. Сами выработки необходимо опробовать по мере их проходки для выявления первичных ореолов оруденения. Полученные данные используются для корректирования направления работ, выбора мест заложения выработок второй очереди.

**Разведочно-эксплуатационные исследования** проводятся в масштабе 1:5 000 – 1:2 000 и направлены на оценку перспектив развития оруденения на глубину и на фланги разведываемых месторождений и рудопроявлений. Не менее важной задачей является установление закономерностей распределения элементов-примесей в рудах. Кроме того решаются вопросы касающиеся «увязки» рудных тел, подсеченных на глубине, уточнение их морфологии, а также корректирование направления разведочных работ; установление очередности заложения разведочных выработок и т.д. Опробование производится из горных выработок и по керну буровых скважин, а в случае необходимости переопробуются естественные обнажения. В тех районах, где ранее не проводились поиски по первичным ореолам, необходимо начинать работу с постановки опытно-методических исследований. При этом следует решать следующие основные вопросы: определение геохимического фона и аномальных содержаний элементов-индикаторов для различных типов пород; выявление морфологических особенностей первичных ореолов различных элементов; установление

формы нахождения элементов-индикаторов в ореоле (минеральной, изоморфной и др.); установление зональности оруденения и т.д.

Удобнее всего местный геохимический фон пород определять на участках, удаленных от месторождений. Для изучения геохимических и морфологических особенностей первичных ореолов необходимо выбирать хорошо разведанные (эталонные) месторождения. Более надежно проводить изучение особенностей ореолов путем опробования горных выработок и скважин, расположенных в одном разрезе, так чтобы опробовались и рудные тела, и рудовмещающие породы. Как правило, опробование ведется по профилям, ориентированным вкост простирания ожидаемых рудных зон. Расстояния между профилями и точками отбора проб в профиле зависят от масштаба исследований: так при работах в масштабе 1:50 000, расстояние между профилями равно 500 м, а между пробами в профиле – 50-20 м; при работах в масштабе 1:10 000 – 100x10 м, при разведочно-эксплуатационных исследованиях расстояние между пробами чаще всего зависит от обнаженности и колеблется от 10 м до сплошного опробования пунктирной бороздой. Отобранные при литохимических поисках по первичным ореолам пробы, при подготовке к спектральным и химическим анализам, подвергается измельчению, перемешиванию, сокращению, механическому истиранию (вес проб 50-100 гр.).

Результаты литохимических поисков по первичным ореолам изображаются в виде графиков и карт. Графики составляются по результатам анализов проб, отобранных по отдельным геологическим разрезам. На один график можно наносить содержания нескольких элементов, при этом за единицу измерения принимается значение местного геохимического фона ( $C\phi$ ), на этот же график выносятся аномальные содержания элементов ( $C_A$ ), рассчитанные для каждого типа пород. При изображении результатов анналов поисков по первичным ореолам наиболее важной операцией является выделение аномалий. Как правило, используются результаты вариационно-статистической обработки данных анализов, при этом каждая единичная проба с содержанием элемента выше аномального заслуживает внимания.

$$C_A = C\phi - 3s$$

где  $C_A$  – аномальное содержание элемента;

$C\phi$  – фоновое содержание элемента;

$s$  – стандартное отклонение (средне квадратическое).

На кальку-накладку геологической карты с вынесенными линиями профилей и точками опробования выносятся определенные спектральным анализом значения содержаний элемента, причем такие кальки строятся для каждого элемента, затем методом изолиний строятся аномалии. В дальнейшем делается одна сводная калька накладка, на которой кроме отдельных аномалий различных элементов (выделенных разным цветом) выделяются аномальные зоны. Они представляют собой участки с пространственно сближенными аномалиями, образование которых может быть вызвано одними и теми же причинами.

Выделенные геохимические аномалии характеризуются определенными геохимическими параметрами:

1) линейной продуктивностью ореола ( $M$ );

$$M = \sum_{iml}^n m_i (C_i - C\phi)$$

где  $m_i$  – длина интервала опробования (м);

$C_i$  – содержание элемента в пробе (%);

$C\phi$  – фоновое содержание элемента (%).

2) площадной продуктивностью ореола ( $P$ ) в рассматриваемом сечении.

$$P = \Delta x L \left( \sum_{x=1}^N C_x - N C_{\phi} \right)$$

- где  $\Delta x$  – шаг отбора проб в профиле (м);  
 $L$  – расстояние между профилями (м);  
 $\sum C_x$  – сумма содержаний элемента в ореоле (аномалии);  
 $C_{\phi}$  – фоновое содержание элемента в ореоле;  
 $N$  – число проб, вошедших в подсчет.

Эти расчеты мы будем делать на лабораторных занятиях.

Литохимические поиски проводятся как по потокам рассеяния, так и по вторичным ореолам; в зависимости от масштаба работ они подразделяются на: региональные, собственно поисковые, детальные.

*Региональные работы* проводятся в масштабах 1:200 000 и 1:100 000 и в зависимости от рельефа местности имеют свои особенности: в слабо расчлененных районах аридной зоны проводятся литохимические исследования по вторичным ореолам; в горных активно денудированных районах литохимические исследования ведутся по потокам рассеяния; целесообразно их сочетать со шлиховой съемкой; в районах гумидной зоны со сглаженными формами рельефа исследования ведутся по потокам рассеяния совместно с гидрохимической съемкой.

Основной задачей исследований является выяснение геохимической характеристики и металлогенических особенностей района, а также обнаружение потоков и ореолов рассеяния выветривающихся месторождений.

*Собственно поисковые работы* проводятся в масштабах 1:50 000 и 1:25 000 на участках, давших положительные результаты при региональных работах. Поиски по потокам рассеяния проводятся в расчлененных районах и условиях пенеплена, прорезанного балками и оврагами, вскрывающими коренные породы. В равнинных условиях проводятся поиски по вторичным ореолам. Основной задачей литохимических поисков на этой стадии является обнаружение месторождений и установление общих закономерностей их размещения.

*Детальные исследования* проводятся в масштабах 1:10 000, 1:5 000, 1:2 000 на участках положительно оцененных предыдущей стадией. Основной задачей этой стадии является обнаружение, оконтуривание и оценка ореолов рассеяния, а по возможности, самих тел полезных ископаемых или отдельных зон. На этой стадии выделяются конкретные участки для проведения заверочных работ путем проходки горных выработок и буровых скважин. Сеть отбора проб в зависимости от масштаба поисков приводится в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Масштабы литохимических поисков по вторичным ореолам

Масштаб	Расстояния (м) между		Число точек отбора проб на	
	профилями	точками отбора	1 см <sup>2</sup> карты	1 км <sup>2</sup> площади
<i>Региональные исследования</i>				
1:200 000	2000	100-200	10-20	2-5
1:100 000	1000	100-50	10-20	10-20
<i>Собственно поисковые исследования</i>				
1:50 000	500	50	10	40
1:25 000	250	50-40	5-7	80-100
<i>Детальные исследования</i>				
1:10 000	100	20-25	5-4	500-400
1:5 000	50	20-10	2.5-4	1000-2000
1:2 000	25	10	1.6	4000

При литохимических поисках по потокам рассеяния в пробу отбирается илисто-глинистое или песчаная фракция массой 50 гр. Начинается отбор с устьев рек (с заходом в боковые протоки) и доходит до их вершин. В боковых протоках первые пробы отбираются в приустьевой части, расположенной выше уровня половодья реки, в которую впадает приток. Широкие заболоченные долины с плохо выраженным руслом опробуются по обоим бортам.

При литохимических поисках по вторичным ореолам в пробу отбирается песчано-глинистая фракция. Одновременно с отбором проб производится их документация и составляется абрис. При этом обязательно отмечаются по маршруту реки, дороги, горные выработки, особенности рельефа, характер рыхлых отложений.

Следует отметить и некоторые особенности обработки отобранных литохимических проб на различных стадиях работ: так при региональных исследованиях обязательному определению в пробах спектральным методом подлежат следующие элементы – В, Ве, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, La, Pb, W. Следует учитывать элементные ассоциации: например, при высоких содержаниях Pb и Zn необходимо определять Ag, Ga, Cd, Ge.

При региональных работах целесообразно определение магнитной восприимчивости рыхлых отложений на предмет выявления титаномагнетитовых и магнетитовых месторождений.

При проведении собственно поисковых работ число элементов, определяемых спектральным анализом, сокращается до 10-15, в зависимости от металлогенических и геологических особенностей изучаемого района.

При детальных литохимических исследованиях спектральным анализом определяются только элементы, являющиеся прямыми или косвенными индикаторами оруденения, кроме того, сюда же необходимо включать и элементы, образующие надрудные первичные ореолы (I, В, Br).

Результаты, полученные в процессе проведения литохимических поисков, обрабатываются следующим образом: в самостоятельные выборки объединяются пробы, отобранные только в одинаковых ландшафтно-геохимических условиях, затем для них рассчитываются фоновые и аномальные содержания. Для каждого элемента составляются отдельные карты, на которых (при поисках по потокам рассеяния) результаты анализов проб изображаются в виде линий, параллельных опробуемому руслу. Их толщина соответствует (в масштабе) содержанию элемента в потоке, а длина – протяженности потока с данным содержанием элемента. Кроме того, составляется сводная карта, на которой каждому элементу соответствуют линии своего цвета.

Результаты поисков по вторичным ореолам изображаются как в виде карт фонов и аномалий, так и в виде различных графиков, построенных по профилям отбора проб. Карты фонов составляются отдельно для каждого элемента, при этом учитывается отнесение опробуемых рыхлых отложений к тому или иному геохимическому ландшафту. Карты фонов наглядно показывают влияние ландшафтно-геохимических условий на распределение элементов в опробуемых отложениях, помогают понять природу геохимических аномалий и правильно их оценить. После составления карт аномалий отдельных элементов составляется сводная карта, на которой выделяются аномальные зоны.

Выявленные при отрисовке аномалии проверяются на местности, при этом необходимо уяснить: 1) характер и мощность рыхлых образований, рельеф участка, состав коренных пород; 2) отсутствие техногенных факторов образования аномалий (отвалы, пути транспортировки руды и т.д.); 3) отсутствие геохимических барьеров, дающих возможность образования ложных аномалий; 4) целесообразность дальнейшего изучения аномалий.

Количественным показателем вторичных ореолов и потоков рассеяния служит продуктивность, вычисление которой мы будем проводить на лабораторных занятиях.

## Лекция 13. Гидрогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.

### Гидрохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых

Этот метод основан на исследовании химического состава природных поверхностных и подземных вод.

Принципиальную основу этого метода составляют: 1) способность воды к растворению горных пород, 2) ее активное участие в химических превращениях минералов и 3) свойства воды как подвижной среды.

Связь между химическим составом воды и наличием вблизи водоисточника залежей полезных ископаемых не вызывает сомнений и является одной из причин возникновения гидрохимических аномалий, имеющих поисковое значение.

Способность воды к перемещению из глубоких горизонтов к земной поверхности и ее всепроникающие свойства издавна привлекали внимание к опробованию природных вод в поисковых целях.

Наиболее благоприятными объектами для гидрохимических методов поисков являются месторождения минеральных вод – различных природных хлоридов и сульфатов. Суммарное содержание этих соединений в природных рассолах может превышать 350 г/л, и они способны устойчиво сохраняться в растворах определяя в конечном счете солевой состав океанической воды ( $\Sigma$  солей 35,6 г/л)

Учитывая, что общая минерализация природных пресных вод, в том числе речных, обычно составляет 1,0-0,5 г/л, легко можно оценить тот большой диапазон, в котором могут лежать аномальные содержания солей в поверхностных и подземных водах суши.

Эффективное применение гидрохимических методов возможно при поисках минеральных источников, в частности промышленных бромных вод и месторождений боратов. В числе других активных водных мигрантов (вместе с Cl, Br, B, I) эти элементы характеризуются повышенными величинами коэффициентов талассофильности (Br -30, B - 0,4.)

Активное развитие гидрохимических методов поисков рудных месторождений началось в начале 50-х годов.

Среди рудных месторождений наиболее благоприятными объектами гидрохимических поисков являются сульфидные, в первую очередь колчеданно-полиметаллические и особенно богатые дисульфидами медноколчеданные месторождения. Природные воды обогащаются рудными элементами главным образом при гипергенном окислении сульфидных руд, в ходе которого труднорастворимые, но неустойчивые сульфиды до превращения в устойчивые и труднорастворимые вторичные минералы проходят стадию легкорастворимых сульфатов.

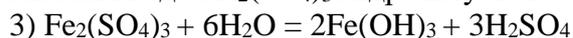


(процесс окисления пирита)

В присутствии свободного кислорода закисный сульфат железа неустойчив и окисляясь, переходит в сульфат окиси.



В слабокислых водах  $\text{H}_2(\text{SO}_4)_3$  гидролизуеться освобождая серную кислоту.



$2\text{Fe}(\text{OH})_3$  – гидроксид железа переходит в устойчивый (вторичный) минерал лимонит  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Образование свободной серной кислоты имеет также место при окислении ряда других сульфидов. Присутствие серной кислоты определяет кислую реакцию среды и резкое понижение pH у зеркала грунтовых вод вблизи рудного тела.

Так, например, в водах зоны окисления медноколчеданного месторождения Блява содержание аниона  $\text{SO}_4^{-2}$  достигало 123 г/л, а значения pH падали до 1-2,0.

В водах разведочных скважин на Гайском месторождении (медноколчеданном) отмечались значения рН 3,2-4,0.

Однако эти низкие значения рН, чаще сохраняются только в непосредственной близости к рудному телу, обычно не выходя за его контуры.

Взаимодействие с вмещающими породами приводит к нейтрализации кислых вод с образованием сульфатов Са, К, Na, Mg, Al. В результате уже в непосредственной близости к рудному телу рН быстро повышается и наличие сильно кислых вод по периферии месторождений сульфидных руд является сравнительно редким случаем. Интенсивность нейтрализации кислых вод зоны окисления особенно велика в карбонатных породах. В подземных водах, омывающих окисляющееся сульфидное месторождение, образуются гидрохимические ореолы и потоки рассеяния рудных элементов и сульфат-иона.

Содержания рудных элементов в кислых рудничных водах активно окисляющихся колчеданных залежей могут достигать огромной величины (в мг/л): Cu – 45600; Zu – 50300; Ni-30000). Однако в результате взаимодействия с окружающими водами и минералами горных пород, обменных химических реакций, соосаждения и сорбции рудные элементы из растворов переходят в твердую фазу и содержания их быстро падают, вплоть до фоновых.

Несмотря на все перечисленные процессы «самоочищения» природных вод от содержаний рудных элементов, их повышенные, аномальные концентрации сохраняются в речных и подземных водах на расстояниях до 500-1000м, иногда до нескольких километров от месторождения.

Благодаря различной скорости «растворения» минералов соотношение элементов в гидрохимических ореолах рассеяния значительно отличается от соотношения элементов в рудных телах и их первичных ореолах.

Так, для сульфидных руд характерно возрастание скорости окисления («растворения») в ряду сульфидов – пирит – халькопирит – галенит – молибденит – арсенопирит – пентландит – сфалерит, в связи с чем медно-никелевые или медно-молибденовые руды будут сопровождаться гидрохимическими ореолами Ni или Mo и резко ослабленным ореолом меди.

Для водных ореолов рассеяния характерна геохимическая зональность, обусловленная последовательной сменой аномальных концентраций химических элементов в соответствии с их миграционной способностью в данной среде, разбавлением окружающими фоновыми водами, процессами ионного обмена, гидратации, сорбции и соосаждения.

Подвижность химических элементов в природных водах зависит главным образом от их солевого состава, кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных свойств, основными показателями которых являются -  $O_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ , Eh и рН.

Интенсивность водной миграции того или иного химического элемента в природных водах может быть выражена коэффициентом, представляющим собой отношение содержания химического элемента в сухом остатке воды к его содержанию в водовмещающих горных породах.

$$K_x = \frac{Mx \cdot 100}{a \cdot Cx} \quad (\text{коэффициент водной миграции})$$

Химические элементы, находящиеся в водах, и геохимические параметры вод, значения которых претерпевают изменения под влиянием рудных тел, а также их первичных и вторичных ореолов, называются гидрохимическими элементами – индикаторами и имеют значение поисковых признаков.

К числу прямых поисковых признаков относятся рудообразующие и некоторые сопутствующие элементы, наиболее характерные для данного типа месторождений, образующие контрастные аномальные концентрации в ореольных водах. К числу косвенных - относятся, зависмые от контакта с рудными телами изменения состава солевых компонентов (калий, сульфат-ион, хлор-ион и другие), а также изменения величин рН и Eh вод.

Формирование и особенности проявления ореолов рассеяния рудных тел в поверхностных и подземных водах зависят от многих природных факторов и в первую очередь от гидрогеологических и геоморфологических условий залегания рудных тел; в этом отношении можно выделить среди водных ореолов 4 типа (рисунок 7.1):

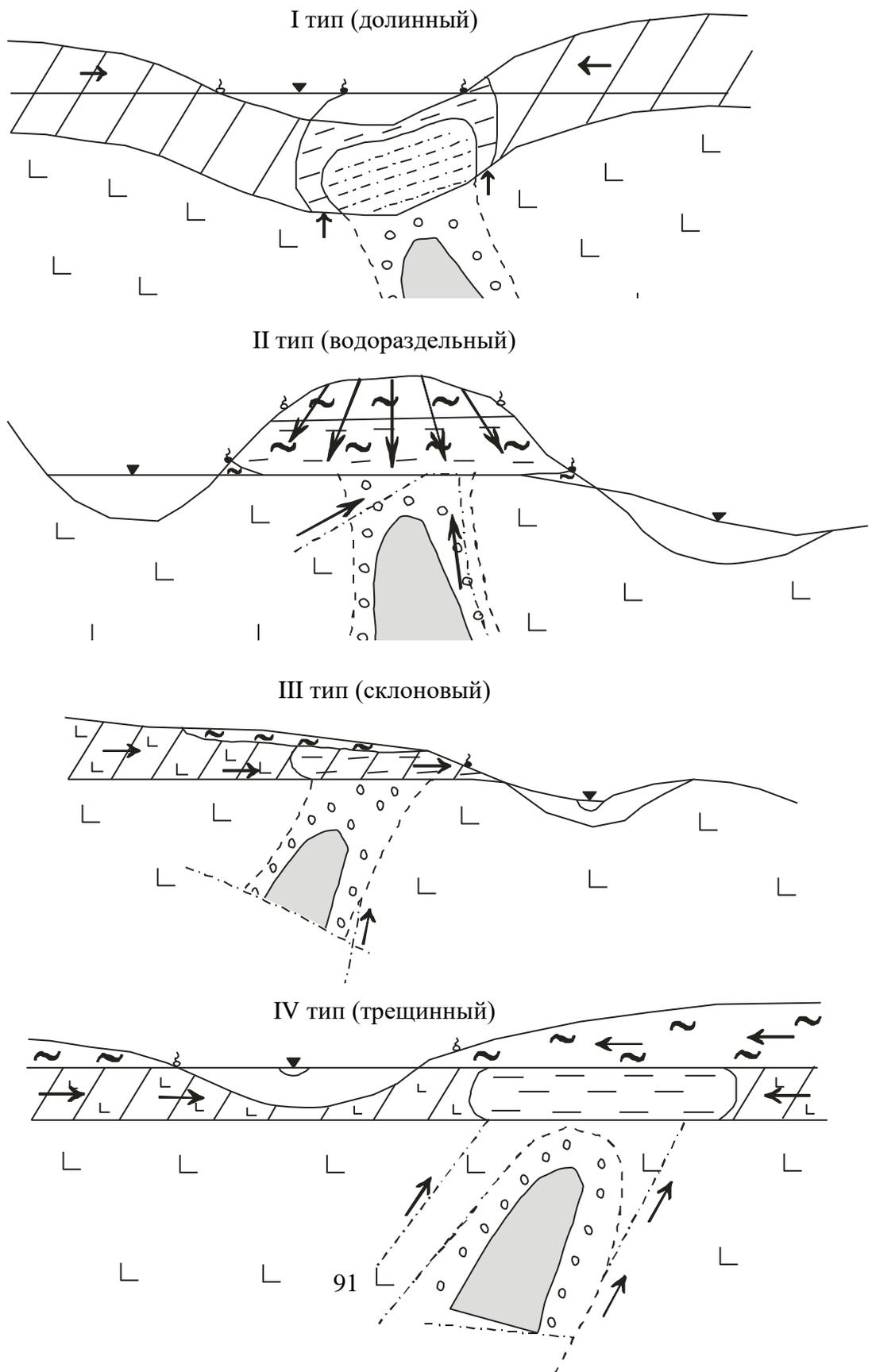


Рисунок 7.1 – **Водные ореолы рассеяния открытого типа** (условные обозначения см. рисунок 7.2).

I тип – залегающие ниже местных базисов эрозии в долинах рек под маломощным покровом, водопроницаемых аллювиальных отложений в зоне слабого водообмена (долинный тип I);

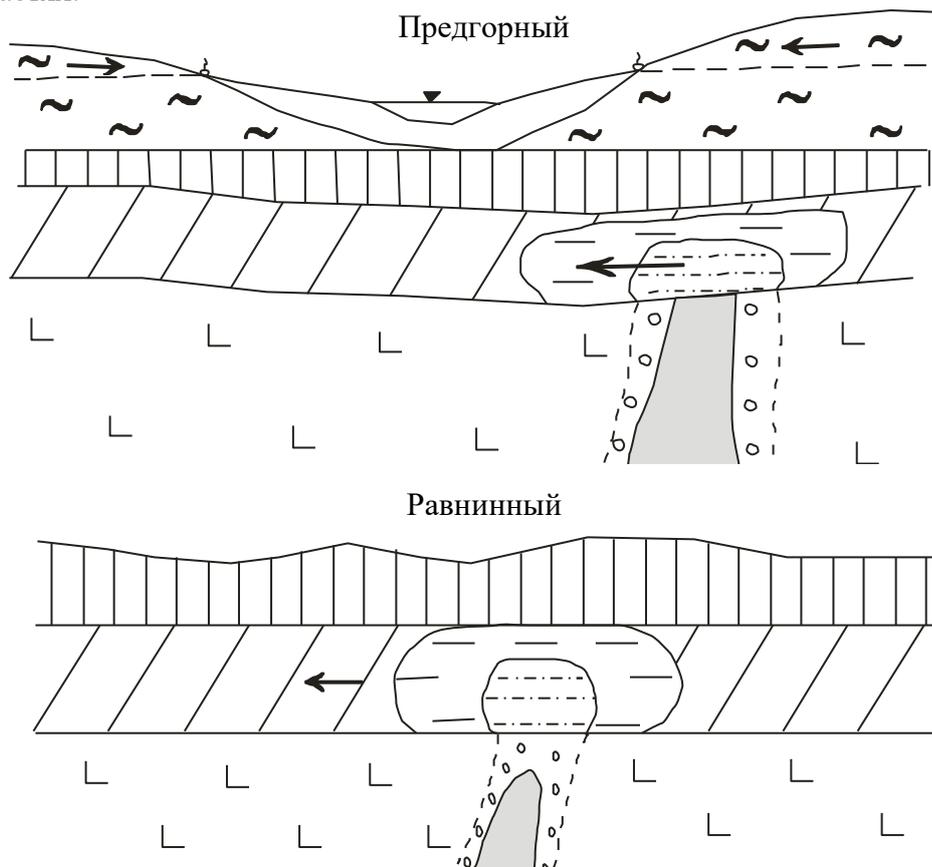
II тип – водные ореолы, расположенные на водоразделах выше местных базисов эрозии в условиях интенсивного водообмена;

III тип – водные ореолы, залегающие под элювиально- делювиальными образованиями на склонах водоразделов;

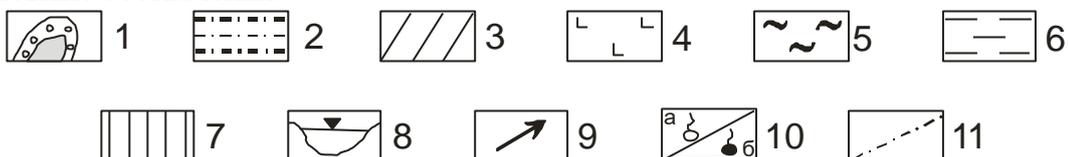
IV тип – водные ореолы глубоко скрытые в толще рудовмещающих пород значительно ниже местных базисов эрозии под покровом рыхлых аллохтонных отложений, обводняющиеся глубокими трещинно-жильными и пластово- трещинными водами.

Открытые водные ореолы рассеяния проявляются на поверхности земли в виде разнообразных очагов разгрузки грунтовых и напорных глубоких вод (родники, заболоченные участки, источники трещинных вод и т.д.)

Закрытые водные ореолы рассеяния (Рисунок 7.2) окаймляют рудные тела, располагающиеся ниже местных базисов эрозии в слаборасчлененных предгорных и равнинных областях.



Условные обозначения:



### Рисунок 7.2 – Закрытые водные ореолы

1 – Рудное тело и его первичный ореол; 2 – вторичный ореол рассеяния; 3 – кора выветривания; 4 – рудовмещающие породы; 5 – осадочные водоносные породы; 6 – водный ореол рассеяния; 7 – водоупорный горизонт; 8 – местный базис эрозии; 9 – направление движения воды; 10 – открытые очаги разгрузки (а – фоновых вод, б – ореольных вод); 11 – тектонические нарушения.

Открытые водные ореолы (тип I-IV) с успехом могут быть обнаружены в процессе литохимического опробования и применение гидрохимических методов поисков в этих условиях, возможно, не целесообразно.

Напротив, для обнаружения закрытых водных ореолов – гидрохимическое опробование подземных вод, возможно, является наиболее надежным методом поисков скрытого оруденения.

Гидрохимические аномалии формируются в результате сложного процесса, в котором решающая роль принадлежит растворяющему действию и восходящему движению подземных вод, что создает возможность обнаружения месторождений, залегающих ниже современного базиса эрозии.

В задачу гидрохимических поисков входит локализация интервала подземных вод, в котором происходит смена окислительных условий на восстановительные, сопровождаемая снижением содержания урана в водах (для поисков урановых месторождений в зонах пластового окисления)

Гидрохимический метод незаменим при поисках гидрогенных месторождений молибдена и селена, отложение которых происходит на восстановительном барьере (при смене валентностей).

Необходимо при проведении 1:50 000 съемки с общими поисками все бурящиеся скважины подвергать после промывки и откачки гидрохимическому опробованию с помощью специальных пробоотборников.

Поверхностные водоисточники опробуются все без исключения, путем отбора пробы воды в количестве одного литра в стеклянные или полиэтиленовые бутылки с пробкой и отправкой их в стационарные лаборатории для определения микроэлементов в высушенном сухом остатке.

Непосредственно у водоисточника определяется pH,  $\sum \text{Cu, Pb, Zn}$  («сумма металлов»),  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$  и  $\text{HCO}_3^-$ .

Для осаждения Li, Rb и Cs применяются ионно-обменные смолы.

При прямом лабораторном анализе водных проб, определяются общая минерализация воды (M), Eh, pH, содержание  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Fe общ.,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{CO}_2$ .

### Лекция 14. Биогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.

#### **Биогеохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых**

Они основаны на исследовании химического состава живого вещества, как правило, состава растений.

Современные биогеохимические поиски связаны с химическим анализом вещества.

Наблюдения над видовым составом и морфологическими особенностями растительности составляют предмет геоботанических исследований (они к геохимическим не относятся). Развитием биогеохимического метода поисков рудных месторождений занимались С.М. Ткалич, А.П.Виноградов, В.В. Поликарпочкин, А.Л. Ковалевский и др. В результате исследований неизменно подтверждалось наличие биогеохимических аномалиях в химическом составе растений, произрастающих над месторождениями Cu, Zn, Pb, U, Mo, Ni, V, Au и др. полезных ископаемых.

Обычно эти биогеохимические съемки проводились путем опробования одного или нескольких господствующих видов растений, озоления растительного вещества и спектрального анализа полученной золы.

Связь между химическими составами почвы и произрастающей на ней растительности имеет сложный характер. В составе земной биомассы общий объем животных организмов весьма незначителен, а кларки биосферы достаточно близко характеризуют средний химический состав растительности. Согласно химическому составу геосферы (мы это записывали в таблице – химический состав геосфер) – 10 элементов (O, C, H, Ca, K, Na, Si, Mg, P, S) – в сумме составляют – 99,96% биосферы, а первые 3 макроэлемента – O, C, H составляют 98,5% всей биомассы. На долю всех остальных 82 микроэлементов приходится всего 0,04% живого вещества. Более 50% массы живого вещества составляет вода, в которой связаны значительные количества кислорода и водорода.

*Газообразные* элементы биосферы, заимствованные из атмосферы, возвращаются в неё в процессе биологического круговорота вещества.

Для характеристики геологической роли биогенной миграции микроэлементов Б.Б. Полюнов предложил величину отношения между содержаниями элемента в золе растения и в почве, на которой оно произрастает. Этот показатель получил название коэффициента биологического поглощения и обозначается  $A_x$ ;

$$A_x = \frac{C_2}{C_1}$$

где  $C_2$  – содержание элемента в золе растения в %;

$C_1$  – содержание элемента в почве в %.

**Таблица 7.2 - Содержание элементов в золе растений и коэффициенты биологического поглощения**

	Элемент	$C_2 \cdot 10^{-4} \%$	$A_x$	элемент	$C_2 \cdot 10^{-4} \%$	$A_x$
1	Mn	4800	6,86	Mo	12	9,23
2	Zn	1000	19,6	Sn	5	1,85
3	Ti	650	0,2	As	3	1,58
4	Cu	200	9,09	Be	2	0,80
5	Pb	50	3,73	Ag	0,6	12,5
6	Ni	40	1,54	Hg	0,25	7,58
	Co	20	2,74	Sb	0,10	0,50

Из таблицы 7.2 видно, что для рудных элементов, кроме Ti, Be, Sb коэффициент  $A_x$  – больше 1, что указывает на их способность к накоплению в верхних горизонтах почв в результате минерализации ежегодного растительного опада.

В золе растений, произрастающих над рудными телами, на старых рудничных отвалах при высоких содержаниях металлов в почвах отмечались содержания рудных элементов, в десятки и в сотни раз превышающие их средний уровень.

К наибольшей концентрации металлов способны определенные виды растений, в золе которых содержания отдельных металлов могут достигать нескольких %: более 20% Zn, до 8% Ni, более 1% Cu, Pb, As, Be. Однако такие растения – концентраторы не имеют повсеместного распространения, и как правило, мало пригодны для проведения биогеохимических поисков.

Наилучших результатов поисковых биогеохимических съемок следует ожидать при опробовании таких видов растений, зола которых в области биогеохимического фона характеризуется устойчиво низкими, но определяемыми содержаниями элементов-индикаторов, быстро возрастающими до аномальных вблизи месторождений.

Это определяет необходимость тщательной оценки параметров местного фона  $C\phi$ ,  $\varepsilon$  (стандартного множителя – величина, которого зависит от технической точности

геохимических исследований) и  $C_A$  (нижнего аномального содержания рудных элементов) в золе местных видов растений, а также выбора одного-двух из них для поискового опробования.

Зависимость между содержаниями рудных элементов в среде обитания и в золе растений определяется их видовой принадлежностью, она изменяется для различных органов растения в связи с возрастом и вегетативными фазами развития.

Установлены два основных типа этих зависимостей (рисунок 7.3). Первый тип отвечает приблизительно линейному возрастанию содержаний рудного элемента в золе растения, пропорциональному увеличению его содержания в почве. Эти растения благоприятны для опробования при биогеохимических поисках месторождений данного элемента.

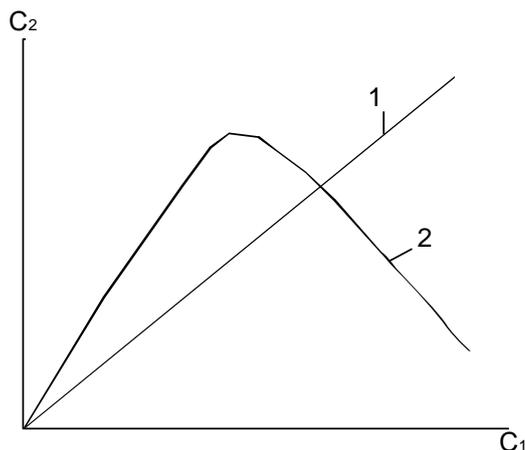


Рисунок 7.3 – График зависимости содержания рудных элементов в золе растений ( $C_2$ ) от их содержания в почве ( $C_1$ ).

- 1 – пропорциональное биологическое поглощение;
- 2 – наличие биологического барьера.

Второй тип характеризуется пропорциональной зависимостью между содержанием металла в почве и в золе растения только при его малых содержаниях. При аномально высоких содержаниях металла в почве наступает прогрессивное снижение коэффициента биологического поглощения ( $A_x$ ), вплоть до отрицательной корреляции  $C_1$  и  $C_2$ . Эта зависимость объясняется наличием у таких растений защитных физиологических барьеров, препятствующих избыточному поступлению тех или иных химических элементов в организм.

Растения, у которых такие барьеры обнаруживаются уже вблизи фоновых содержаний рудных элементов, *непригодны* для проведения биогеохимических поисков.

Уровень повышенных содержаний металлов, при котором проявляется существование биохимического барьера, различен для отдельных видов и органов растений, он ниже для листьев и веток и существенно выше для коры и корней растений.

Вторым признаком, определяющим возможную эффективность биогеохимического метода поисков, является глубина, на которую развивается корневая система растений. Как правило, эта глубина минимальна в районах устойчивой мерзлоты, имеет умеренную величину в условиях гумидного климата и максимальна в районах аридной зоны, изменяясь от 0,2-1,0 м в северной зоне до 20 м в южной. Для отдельных видов растений с глубокопроникающими корнями она достигает больших величин, например, у песчаной полыни 25 м, у саксаула 37 м, у верблюжьей колючки 40 м.

Согласно действующей «Инструкции по геохимическим методами поисков» (М., 1985г.) проведение биогеохимических методов поисков рудных месторождений в горных активно денудированных районах любых климатических зон, а также в других районах, для

которых характерны выходящие на поверхность первичные и вторичные литохимические ореолы – не целесообразно.

Нецелесообразны биогеохимические съемки в закрытых районах, где мощность аллохтонных отложений, перекрывающих рудоносный субстрат, заведомо превышает глубину проникновения корневой системы растений.

Согласно «Инструкции» применение биогеохимического метода целесообразно в закрытых районах гумидной зоны с мощностью чехла 2-10 м.

Применение биогеохимического метода поисков предпочтительно в закрытых рудных районах в ландшафтах пустынь и полупустынь аридной зоны. Глубокая корневая система, растений и разреженный растительный покров позволяют предположить разрыв между содержаниями рудных элементов в золе растений и в верхних горизонтах дальнеприносных отложений, опробуемых при наземных литохимических съемках. При мощности чехла до 40-50 м и фоновых содержаниях металлов в литохимических пробах возможно появление над погребенными рудными месторождениями отчетливых биогеохимических аномалий.

Открыто было это месторождение в результате поисковых литохимических съемок по вторичному остаточному ореолу рассеяния Pb, оконтуривающего выход рудного тела к современной дневной поверхности.

Преобладающая часть рудной зоны перекрыта на 40-50 м неоген-четвертичными отложениями на поверхности, которых вторичный наложенный ореол рассеяния при стандартных литохимических съемках не был обнаружен.

Литохимический ореол рассеяния оконтуривает только небольшую южную часть залежи, где чехол аллохтонных отложений отсутствует.

Биогеохимический ореол рассеяния по изоконцентрате 0,005% Pb оконтуривает всю залежь, при этом над погребенной северо-западной частью месторождения содержание Pb в биогеохимических пробах составило 0,07% при фоновых содержаниях в почве около  $2 \cdot 10^{-3} \%$ .

Площадь биогеохимической аномалии в 5-6 раз превышает общую площадь выхода рудного тела на поверхность коренных пород.

Максимальное содержание Pb в биогеохимическом ореоле рассеяния в открытой части литохимического ореола составило 1% (при 1,25% Pb в почве)

В поисковых целях опробовалась полынь, озоление проводилось в муфеле при T-500-550°.

Наиболее часто применяемыми (безбарьерными) биообъектами являются *корни* древесных, кустарниковых и травянистых растений: низшие растения – мхи и лишайники, а так же внешние слои коры (корка) в нижних удобных для опробования частях стволов древесных растений.

Для доказательства применимости биогеохимического метода поисков рудных месторождений часто указывают на сильную положительную корреляцию между аномальными содержаниями металлов в почве и растениях. Между тем, именно этот признак говорит о нецелесообразности применения биогеохимического метода, поскольку те же более надежно интерпретируемые поисковые данные с меньшими затратами могут быть получены литохимическим методом.

Таким образом, следует считать, что основным критерием эффективности биогеохимических поисков является отсутствие статистически значимой корреляции между аномальными содержаниями металлов в растениях и пробах наземной литохимической съемки над погребенными рудными месторождениями.

Такие условия могут возникать в закрытых рудных районах, в частности, в ландшафтах аридной зоны: на заболоченных территориях: при наличии морено-ледниковых отложений и др. особых случаях.

За последние годы этот метод хорошо себя зарекомендовал в рудных районах Бурятии и Сибири, где большая часть территории покрыта эоловыми отложениями (перенесенные

ветром) мощностью от 2 до 50 м. По ландшафтным условиям район относится к горно-таежной зоне.

Поисковые биогеохимические съемки в Бурятии проводились в масштабе 1:50000 по сети 500x500 м, частично 200x200 м; опробовались кора и шишки сосны; спектральный анализ растительных проб выполнялся после их озоления.

В результате проверки одной из биогеохимических аномалий при содержании Мо в золе 0,01% было выявлено месторождение молибденовых руд (штокверковое Жарчихинское месторождение), проведенная до этого литохимическая съемка отметила незначительную аномалию, которая легко могла быть пропущена.

При биогеохимических съемках пробоотбор должен быть стандартизирован по признакам постоянства вида, органа и фенологической фазы опробуемых растений. Биообъекты выбираются из числа наиболее распространенных видов, с глубокой корневой системой и «безбарьерных» к содержаниям рудных элементов в корнеобитаемом слое.

Таблица 7.3 - Типы минерализации Жарчихинского месторождения (Бурятия)

Тип минерализации	Элементы-индикаторы	Тип минерализации	Элементы индикат.	Тип минерализации	Элементы индикат.
Молибденитовая (с зонами окислено)	молибден	Кварц-молибденитовая	молибден	Турмалиновая	Бор
Полиметаллическая (в известняках)	Pb, Zn	Вольфрамитовая шеелитовая	вольфрам	Золотая (с крупными Au в россыпях)	золото
Золото-сульфидная (дисперсными Au)	золото	Золото-турмалиновая (с дисперсным Au)	золото	Киноварная, касситеритовая платиновая в россыпях.	Hg, Sn, Pt, др.
Боратовая, датолитовая	бор	Фенакитовая (берилловая)	бериллий		
Урановая	радий				
Гельвиновая	Be				

Масса воздушно-сухих проб растительности обычно устанавливается 30-40 г, что обеспечивает выполнение спектрального анализа после их озоления.

Разработана градация типов руд по применимости биогеохимических методов поисков: весьма благоприятные, благоприятные, неблагоприятные, биохимические аномалии отсутствуют.

Лекция 15. Атмогеохимические методы поисков. Условия применения. Масштабы поисков. Отбор геохимических проб.

#### **Атмохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых**

Атмохимические (газовые) поиски месторождений полезных ископаемых основаны на исследовании состава подземной атмосферы т.е. химического состава газов, насыщающих горные породы вблизи дневной поверхности.

Если газовый пробоотбор ведется с малой глубины (1-3м.), принято говорить об исследовании подпочвенного воздуха.

Современные газовые съемки выполняются с глубиной пробоотбора 20-600м. Реже исследуется газовый состав приземной атмосферы, хотя именно в этом варианте существенно возрастает оперативность атмохимической съемки.

Земную атмосферу в основном слагают три газа - азот (около 78%), кислород (≈21%) и аргон (≈ 1%), в сумме составляющие 99-94% ее массы. В переменных количествах в

атмосфере присутствуют пары воды; содержание  $\text{CO}_2 \approx 0,03\%$ , содержание остальных газов  $10^{-4} - 10^{-6}\%$  и менее. Низкий геохимический фон и высокая подвижность химических элементов в газовой фазе создают исключительно благоприятные условия для формирования атмохимических ореолов рассеяния любых месторождений полезных ископаемых.

Возникновение атмохимического метода поисков относится к началу 30-х годов и связано с именем В.А. Соколова. Это были поиски месторождений нефти и газа путем определения содержаний углеводородных газов в пробах подпочвенного воздуха. В это же время был разработан метод эманационной съемки, при которой в поисковых целях в почвенном воздухе определялись содержания радона и торона. В последствии эманационная съемка вошла в состав радиометрических методов поисков радиоактивных руд, составляющих самостоятельную, хорошо разработанную область прикладной геохимии.

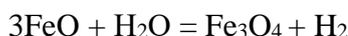
В 50-60 –е годы был разработан Е.А. Сергеевым газо-ртутный метод поисков рудных месторождений. В это же время В.З. Фурсовым, И.И. Степановым и другими были начаты исследования по применению атмохимического метода к поискам рудных месторождений по косвенным газам – индикаторам ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ).

Известно три группы газов, формирующих атмохимические ореолы рассеяния рудных месторождений.

Первая группа – первичные газы – компоненты процесса рудообразования. Для гидротермальных процессов это углекислый газ, аргон, сероводород, метан, водород, летучие соединения галогенов и ряд других элементов. Наличие их в рудных телах доказано исследованиями состава газовой-жидких включений в минералах. Углекислый газ и водород, заключенные в рудных минералах, являются продуктами химических реакций, протекающих в магме, их образование происходит в результате взаимодействия углерода с парами воды:



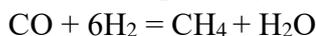
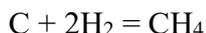
Образование водорода происходит также при взаимодействии водяного пара с оксидами Fe:



Повышенные содержания водорода характерны для высокотемпературных гидротермальных месторождений. Образование метана в глубинных частях Земли может протекать при взаимодействии диоксида углерода с молекулярным водородом в соответствующих физико-химических условиях ( $T=600^\circ\text{C}$ ,  $P - 104 \text{ кПа}$ ). В присутствии катализаторов реакция может идти при  $T - 475^\circ\text{C}$



Возможны и другие схемы реакций



Приведенные реакции описывают образование углекислого газа, водорода и метана в магматических и гидротермальных процессах. К этой же группе относятся газообразные органические соединения, возникновение которых происходит при термометаморфизме органического вещества осадочных пород в процессе рудообразования. Выделение газовых компонентов из рудных месторождений происходит в течение всего времени их эволюции. Высвобождение гипогенных газовых компонентов, законсервированных в рудном веществе, происходит непрерывно по мере вскрытия газовой-жидких включений при процессах выветривания, динамометаморфизма и прочих внешних воздействиях.

Вторую группу составляют газы, поступающие с глубины по зонам разрывных нарушений, в которых могут быть локализованы рудные тела. Эти газовые компоненты (углекислый газ, гелий, водород, углеводородные газы, аргон, пары ртути) являются продуктами дегазации мантии, а также химических и ядерных реакций, протекающих в земных недрах.

Интенсивные выделения газа, состоящего из  $\text{CH}_4$  (метан) – 99% и  $\text{CO}_2$  (1%) имели место при разработке Cu – Ni месторождений Норильского района. Длительное газирование

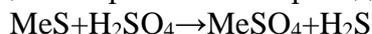
(6-7 лет) отдельных разведочных скважин имело место на Урупском медноколчеданном месторождении (при этом газовый поток с высокими содержаниями углекислого газа, метана, гелия и сероводорода в течение всего периода газовой выделении практически не изменил своего состава). На Джульфинском месторождении при разработке аурипигментных руд ( $As_2S_3$ ) отмечалось обильное выделение  $H_2S$  совместно с  $CO_2$  и  $AsH_3$ .

На Надеждинском золоторудном месторождении отмечалось истечение газа, состоящего (в %) из  $CO_2 - 67,9$ ;  $CH_4 - 8,6$ .

К третьей группе относятся газовые компоненты ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $S$ ,  $O_2$  и другие), образующиеся в результате процессов, протекающих в зоне гипергенеза рудных месторождений.

Наиболее активно физико-химические преобразования рудных минералов протекают в зоне окисления сульфидных месторождений. Образующиеся при этом свободная серная кислота и кислые сульфаты металлов при наличии карбонатов или карбонатных вод вступают в реакции с выделением свободного углекислого газа.

Взаимодействие серной кислоты с рядом сульфидных минералов (пирит, халькопирит, галенит, сфалерит и другие) при низком парциальном давлении кислорода приводит к образованию сероводорода по формальной схеме:



Реакция окисления сульфидов требует больших затрат свободного кислорода. Было подсчитано, что при полном окислении до  $Fe(OH)_3$  и  $H_2SO_4$  на глубину 1мм пиритового тела площадью  $1m^2$  связывается до  $3,5m^3$  свободного кислорода.

Столь большое потребление кислорода приводит к заметному понижению его содержания в почвенном воздухе над окисляющимися сульфидными месторождениями.

Это можно видеть из рисунка 7.4, где по результатам атмосферической съемки по профилю, пересекающему зону пиритизации, над которой в почвенном воздухе фиксируется аномально повышенные содержания  $CO_2$  и пониженные содержания  $O_2$ .

Атмосферические поиски ведутся как по сорбированным, так и по свободным газам.

В первом случае с заранее выбранной глубины, обычно не превышающей первых 10метров, в герметически закрывающиеся емкости отбираются пробы перекрывающих отложений, из которых в лабораторных условиях извлекаются и анализируются сорбированные газы.

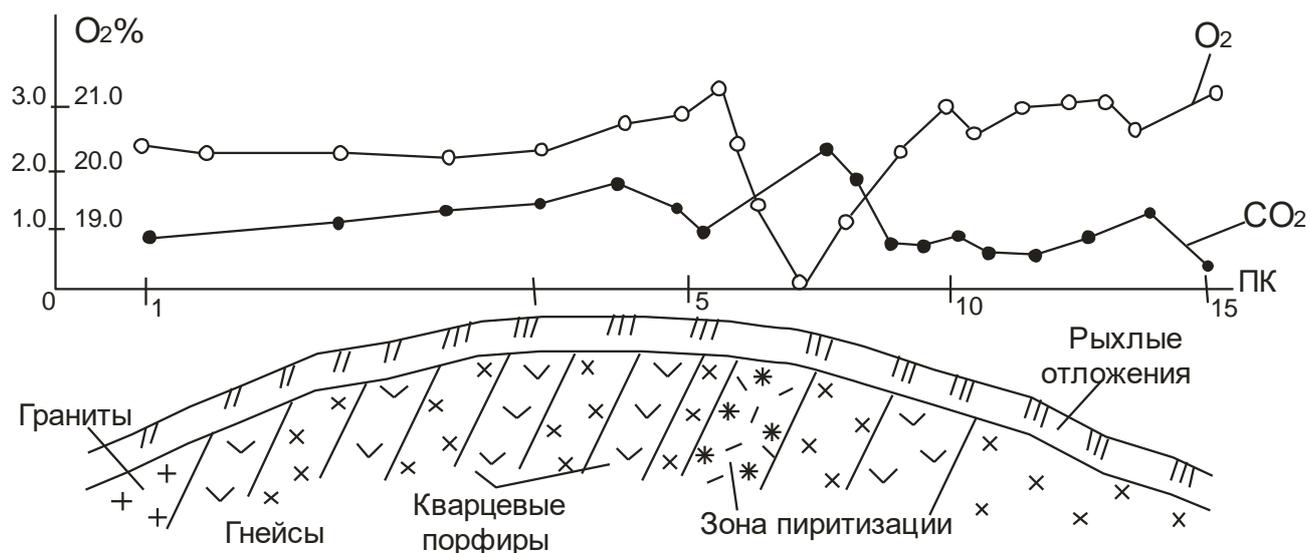


Рисунок 7.4 – Газовый ореол над зоной пиритизации (глубина отбора проб 1.5м)

1 – граниты; 2 – гнейсы; 3 – кварцевые порфиры; 4 – зона пиритизации; 5 – рыхлые образования.

Во втором случае из специально пробуренных скважин отбираются пробы подпочвенного воздуха для полевого и (или) лабораторного анализа. Полевой анализ является более оперативным, позволяет быстрее выделять аномальные области для постановки на них детальных работ.

Прямой отбор газовых проб применяется для выявления газовых ореолов ртути, гелия, углекислого и сернистых газов.

Атмохимические поиски в целом являются косвенными, однако тщательный анализ физико-химических условий образования газовых ореолов рассеяния часто дает достаточные основания для уверенной геологической интерпретации выявленных аномалий и установления их связи с месторождениями.

К достоинствам атмохимических методов относится их значительно большая, чем возможная в принципе для других геохимических методов, глубинность.

Газы всех трех групп в сумме определяют многокомпонентную сложную смесь атмохимических ореолов рассеяния, которая наследует газовый состав месторождений при их формировании и в последующие периоды, когда физико-химические и биологические процессы, особенно в зоне гипергенеза меняются, усиливают или возобновляют действие атмохимических источников.

Газовые ореолы рассеяния могут состоять из химических элементов, неорганических, органических и элементарно-органических соединений.

Эти ореолы в отличие от литохимических являются динамической (подвижной) системой, на которую могут оказывать существенное влияние термодинамические и физико-химические условия среды и состояние источника (месторождения).

Газовые ореолы рассеяния существуют с момента образования месторождения и до полного его разрушения эрозионными процессами.

В настоящее время при атмохимических поисках используются только некоторые из газов: углекислый газ, углеводороды, водород, сероводород, сернистый газ, кислород, гелий, аргон, радон.

Однако источником аномальных концентраций перечисленных газов являются не только рудные месторождения, но и многие химические, биохимические и радиоактивные процессы, происходящие на поверхности и вблизи поверхности земли и не имеющие отношения к формированию и существованию рудных месторождений. Это существенно осложняет интерпретацию результатов атмохимических поисков и требует привлечения других методов, прежде всего литохимических.

Наиболее универсальный газовый компонент рудных месторождений – углекислый газ, который тесно связан с процессом рудообразования. В зоне гипергенеза он же является основным продуктом окисления сульфидных руд и разложения карбонатов.

СО<sub>2</sub> – тяжелее воздуха, вследствие чего в меньшей степени, чем другие газы, улетучивается в атмосферу и образует в поверхностных отложениях четкие и устойчивые во времени аномалии.

Углекислый газ выделяется также в процессе жизнедеятельности организмов в почве.

Большие количества СО<sub>2</sub> возникают в результате окисления органического вещества кислородом вблизи поверхности; он является основным компонентом вулканических газов, тесно ассоциирует с гидротермально-измененными породами и эндогенными месторождениями. Существенно аномальные концентрации СО<sub>2</sub> наблюдаются в газовых потоках, мигрирующих из глубин Земли по зонам разломов.

Среди углеводородов наибольшее значение при изучении газовых ореолов имеет метан (СН<sub>4</sub>). Он содержится в почвах и болотах, образуется при биохимических процессах, а также в результате воздействия интрузии, эффузий и гидротермальных растворов на осадочные породы при взаимодействии водорода или паров воды с углеродом, его окисью или двуокисью.

Водород широко распространен в вулканических газах, газах рудных месторождений и залежах калийных солей. Много водорода выделяется при термальном воздействии интрузий и гидротермальных растворов на органическое вещество. Термокаталитическое разложение воды на глубине также приводит к образованию водорода.

Сероводород – в приповерхностных условиях образуется за счет биохимических процессов и в результате окисления сульфидных руд. Он часто встречается и в вулканических газах.

Гелий – постоянно образуется в земной коре на больших глубинах в результате радиоактивного альфа-распада и различных ядерных реакций. В повышенных количествах он присутствует в газах многих месторождений.

Аргон – фиксируется в природных газах обычно в больших количествах, чем гелий. Образуется при радиоактивном распаде. Он характерен для галогенных пород.

Появление в подпочвенном воздухе повышенных концентраций углекислого газа, сернистых газов, а также пониженное содержание кислорода может быть использовано в качестве индикаторов перекрытых сульфидных руд.

Атмохимические методы с успехом могут применяться для решения следующих основных задач:

1) выявления и прослеживания разрывных структур в районах с широким развитием покровных отложений во всех климатических и ландшафтных условиях;

2) выявления и локализации рудных зон, в частности перспективных на скрытое оруденение;

3) поисков месторождений нефти и газа;

4) поисков месторождений ртути.

В настоящее время практически используются три самостоятельных атмохимических метода: 1) поиски по газовым компонентам в подпочвенном воздухе; 2) газортутные поиски по парам ртути и 3) поиски по водно-гелиевым ореолам.

Газортутный метод наиболее успешно развивается, с помощью его выделяются прямые поисковые признаки ртутных и ртуть содержащих рудных месторождений.

Известно, что повышенные содержания газов и паров ртути, источником которых являются рудные месторождения, фильтруются и диффундируют по трещинам и микротрещинам по направлению к поверхности Земли.

При этом часть газов и паров ртути сортируется перекрывающими отложениями и растворяется в подземных водах, а остальная – идет на формирование атмохимических ореолов рассеяния в окружающих породах в подпочвенном пространстве, почвах и приземной атмосфере.

Источниками газортутных аномалий (ореолов) являются: 1) зоны минерализации, рудопроявления, рудные тела и месторождения; 2) зоны глубинных разломов. Аномалии первых источников, как правило, отличаются от последних большей локальностью.

Первичные ореолы ртути наиболее интенсивны в надрудных горизонтах (мы это рисовали при модели первичных ореолов) сульфидных месторождений, где их продуктивность в 3-8 раз выше, чем в околорудных и подрудных, это необходимо учитывать при интерпретации результатов газортутных поисков.

Отбор проб при газортутных съемках ведется с помощью специального зонда с золотым (поглотитель) сорбентом. После прокачки заданного объема почвенного воздуха проводится возгонка (очистка) поглощенной ртути путем нагрева сорбента электрическим током и полевой анализ ее содержаний.

С появлением современных методов хроматографического анализа газов открылись перспективы широкого использования атмохимических съемок при поисках разнообразных полезных ископаемых.

При хроматографическом анализе (Рисунок 7.5) поток инертного газа – носителя с постоянной скоростью пропускается через разделительную колонку, заполненную сорбентом (очистители, поглотители загрязнений, вредных примесей). С помощью шприца-дозатора в

поток вводится анализируемая газовая смесь в объеме 2-5 см<sup>3</sup>. Разделение пробы на составляющие ее компоненты А, Б и В происходит вследствие различий в их физико-химических свойствах и многократного повторения элементарных актов сорбции (поглощения) и десорбции (отделение поглощенных твердым кристаллическим или жидким веществом газов, паров в окружающую среду или раствор).

В результате компоненты смеси с разной скоростью передвигаются вдоль разделительной колонки и раздельно поступают к детектору. Горючие компоненты смеси определяются по теплоте сгорания или ионизационному эффекту, негорючие – по теплопроводности или оптическим свойствам, ток в сети детектора регистрируется самопишущим регистратором.

Дальнейшее совершенствование методики атмохимических поисков, в первую очередь месторождений нефти и газов, связано с переходом на лазерные газоанализаторы метана и других компонентов, в том числе при аэро- и автомобильных съемках с исследованием приземной атмосферы.

Специальные гелиевые съемки выполняются с применением портативных магниторазрядных приборов ИНГЕМ-1.

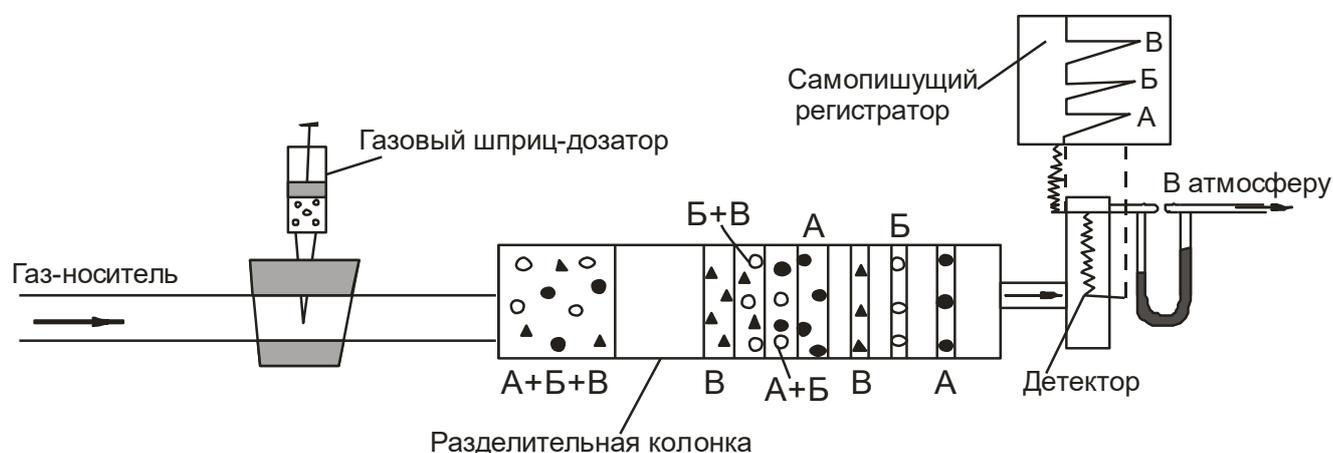


Рисунок 7.5 – Схема хроматографического анализа газов

Новые перспективы открываются перед атмохимическими поисками рудных месторождений в связи с последними работами чешских геохимиков по определению в почвенном воздухе содержания Zn, Pb, Cu и F.

Несомненно, что основной областью применения атмохимического метода по-прежнему останутся поиски месторождений нефти и газа.

Однако, атмохимические методы поисков рудных месторождений в закрытых районах имеют реальные перспективы быстро опередить по объему гидрохимические и биогеохимические методы поисков.

*Основная литература:* [1], с 291-302, с. 305-307; [2] с. 262-268; [4] с. 57-80, с.116-118; [5] с. 115-170.

*Дополнительная литература:* [9], [12], [14], [17], [18], [19].

*Контрольные вопросы*

1. В каких условиях применяются поиски по потокам и ореолам рассеяния?
2. Как подразделяются поиски в зависимости от масштаба работ?
3. Какие решаются задачи при проведении опытных работ?
4. Как производится отбор проб по потокам рассеяния?
5. Как производится отбор проб по ореолам рассеяния?
6. Как производится обработка проб?
7. Как изображаются результаты поисков?
8. Как оцениваются выявленные аномалии?

9. Что составляет принципиальную основу гидрохимического метода поисков?
10. Какие наиболее благоприятные объекты исследования?
11. В чем выражается геохимическая зональность гидрохимических ореолов?
12. Приведите классификацию водных ореолов
13. Каковы основные задачи гидрохимических методов поисков?
14. Как производится отбор проб?
15. Как изображаются результаты гидрохимических поисков?
16. Где целесообразно проводить биогеохимические методы поисков?
17. Как подразделяются поисковые работы в зависимости от масштаба исследований?
18. Как производится отбор проб?
19. Что такое «биологический» барьер и как он учитывается при поисках?
20. Как обрабатываются пробы?
21. Как изображаются результаты поисков?
22. Как оцениваются выявленные аномалии?
23. Для поисков каких месторождений в основном используется атмосферический метод?
24. Что изучается этим методом в зависимости от глубины исследования?
25. Какие из рудных элементов фиксируются этим методом?
26. Как производится отбор проб?
27. Какой из газов является универсальным компонентом рудных месторождений?

### **План лабораторных занятий**

**Задание 1.** Построение геохимических ореолов по данным опробования

*Основная литература:* [1] 17-22 с., [2] 14-18 с.

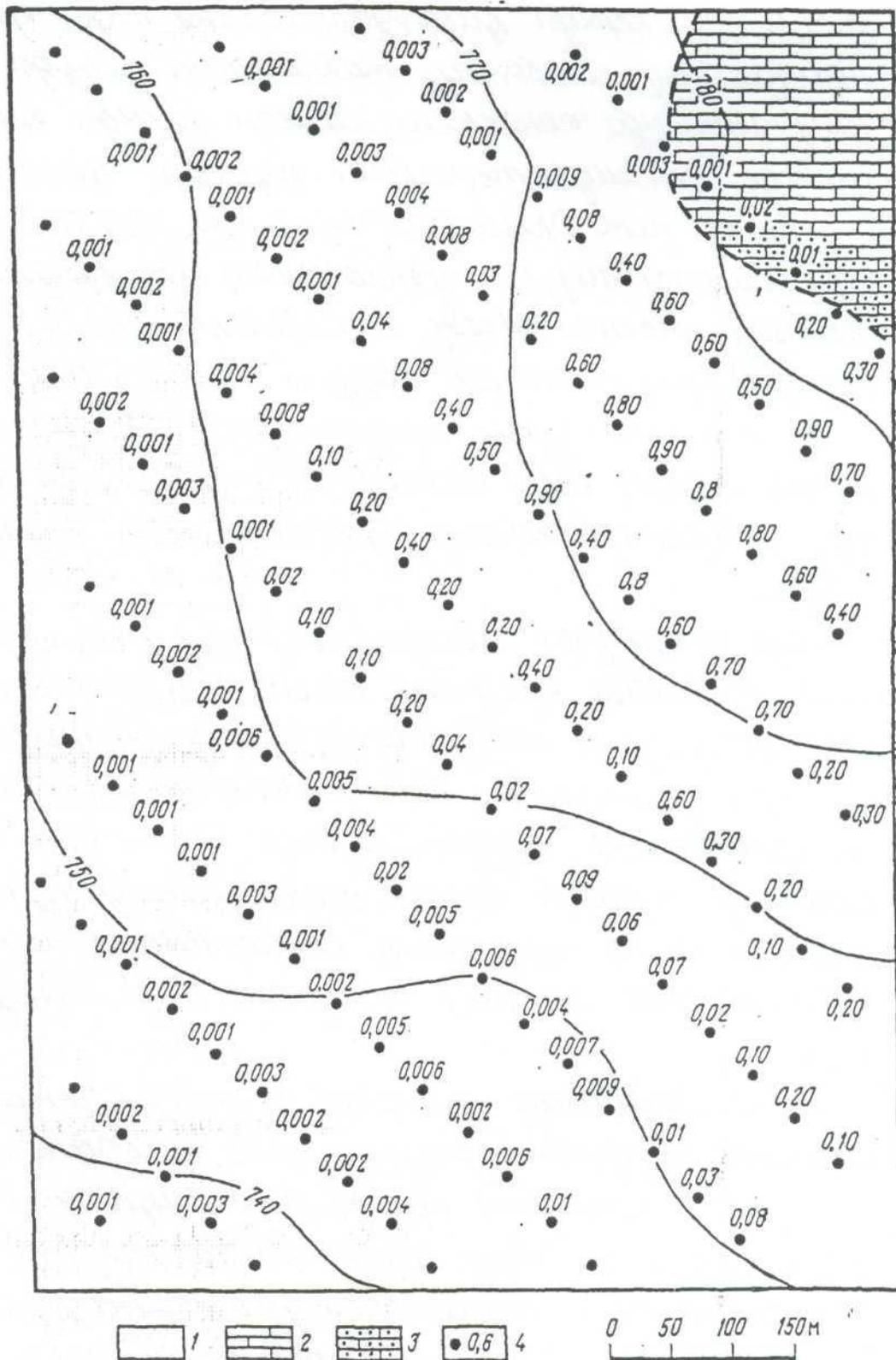
*Дополнительная литература:* [9].

*Контрольные вопросы*

1. Что такое кларковое содержание элемента?
2. Что означает фоновое содержание элемента?
3. Что собой представляет геохимическая аномалия?

**Задание:**

1. Построить ореолов рассеяния свинца (0.002%, 0.1%, 0.6%, 0.7%, 0.8%)
2. Рис. 1 Определить перспективную площадь свинца.



Ри

с. 1. Карта геохимических поисков

1 Рыхлые элювиально-делювиальные отложения, 2-известняки, 3- доломитизированный известняк, 4-места металлотрических опробований свинца в процентах.

**Задание 2.** Определение систематических и случайных погрешностей при обработке данных литохимических съемок

### **Определение систематических и случайных погрешностей при обработке данных литохимических съемок.**

В основе геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых лежат представления о геохимическом поле, под которым понимается геологическое пространство, характеризующее количественными содержаниями химических элементов. Согласно закону Вернадского о всеобщем рассеянии и миграции химических элементов в геосферах, в любой точке геохимического поля *содержания всех элементов* больше нуля, зависят от пространственных координат и непостоянны во времени, или

$$C_x = f(x, y, z, T) > 0. \quad (1.1)$$

В соответствии с резким преобладанием в доступных для изучения геосферах рассеянного состояния элементов над концентрированным в абсолютном большинстве точек геохимического поля содержания рудных элементов близки к цифрам их кларков ( $C_k$ ) и только в редких случаях приобретают значения, существенно отклоняющиеся от этого уровня. Для характеристики этих взаимосвязанных участков геохимического поля используются аксиоматические понятия о геохимическом фоне и явных аномалиях. Единственным критерием для выделения явных геохимических аномалий служит коллективный геологический опыт. Местный геохимический фон ( $C_f$ ) определяется средним (модальным) содержанием химического элемента в пределах однородного участка, в удалении от явных аномалий. Критерии для выделения слабых геохимических аномалий определяются параметрами местного геохимического фона. Частным случаем геохимических аномалий являются промышленные рудные месторождения, в которых *содержание полезных компонентов*  $C_p \gg C_k$ . кларков ( $C_k$ ).

В геохимическом поле вблизи промышленных месторождений содержания рудных и сопутствующих им элементов отличаются от местного геохимического фона. Это позволяет поиски рудных месторождений проводить путем выявления геохимических аномалий, с целью последующего вскрытия полезного ископаемого горными выработками и скважинами. В соответствующих геологических условиях самая слабая геохимическая аномалия, соизмеримая с колебаниями геохимического фона, может отвечать крупному промышленному месторождению. В то же время общее число геохимических аномалий заведомо и многократно превышает число возможных промышленных месторождений. В итоге важнейшими вопросами методики геохимических поисков являются принципы выделения и оценки геохимических аномалий.

Геохимические поиски месторождений полезных ископаемых проводятся путем изучения содержаний химических элементов в геохимическом поле, в дискретных точках или прерывно, с отбором проб или без пробоотбора, вдоль заранее выбранных криволинейных или ломаных маршрутов, системе прямолинейных параллельных профилей или вдоль горных выработок и скважин. Соответственно по условиям производства наблюдений различают воздушные, наземные и глубинные геохимические съемки.

Взаимосвязанность и взаимообусловленность геохимических аномалий в различных геосферах позволяют поиски месторождений полезных ископаемых проводить литохимическим, гидрохимическим, атомохимическим и биогеохимическим методами. Рудные месторождения залегают в литосфере, выявляемые при поисках литохимические аномалии характеризуются наиболее тесными, простыми связями с оруденением, и принципы количественной интерпретации литохимических аномалий разработаны достаточно полно. Поэтому важнейшим методом геохимических поисков рудных месторождений являются литохимические съемки.

Доброкачество поисковых геохимических съемок определяется воспроизводимостью их результатов при двукратных независимых наблюдениях по случайно выбранным профилям и точкам (3%). При этом средние систематические  $\Delta_{\text{сист}}$  и случайные  $\Delta_{\text{случ}}$  расхождения между результатами первичных и повторно-контрольных

съежек не должны превосходить установленных допусков.

Спектральный анализ основан на принципах сравнения во сколько раз содержания определяемого элемента в данной пробе отличаются от его содержаний в эталонных пробах. Соответственно этому вычисление погрешностей геохимических съежек ведется для логарифмов содержаний:

$$\Delta_{\text{сист}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\lg C_{i1} - \lg C_{i2}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \left( \frac{C_{i1}}{C_{i2}} \right) \quad (1.2)$$

$$\Delta_{\text{сист}} = \frac{\Sigma(+)(-)}{n} \quad (1.2.1)$$

где n-число точек, подвергающихся контролю; C<sub>i1</sub>, C<sub>i2</sub>-содержания химического элемента соответственно по результатам первичной и повторно-контрольной съежек.

Антилогарифм этой величины  $\delta_{\text{сист}} = \text{antlg} \Delta_{\text{сист}}$  расхождения самих содержаний.

При значениях ( $\delta_{\text{сист}}$ ) от 0,95 до 1,05 считается, что систематическая ошибка отсутствует. Если ( $\delta_{\text{сист}}$ ) выходит за пределы 0,9-1,1, то систематическое расхождение подлежит исключению путем алгебраического вычитания ( $\delta_{\text{сист}}$ ) из всех lgC<sub>i1</sub>. По этим исправленным данным вычисляется случайная ошибка геохимической съежки.

$$\Delta_{\text{случ}} = \frac{1}{n\sqrt{2}} \sum_{i=1}^n |\lg C_{i1}^* - \lg C_{i2}| = \frac{1}{n\sqrt{2}} \sum_{i=1}^n \lg \left( \frac{C_{\text{ибольш}}}{C_{\text{имень}}} \right) \quad (1.3)$$

Величина ( $\delta_{\text{случ}}$ )= $\text{antlg} \Delta_{\text{случ}}$ , согласно требованию инструкции, не должна превышать 1,6. Это означает, что измеренные содержания элементов в геохимическом поле в среднем могут отличаться от истинных не более чем в 1,6<sup>+1</sup> раза. При большой величине случайной погрешности съежки считаются браком.

#### **Задание:**

1. Определить величины средних систематической ( $\delta_{\text{сист}}$ ) и ( $\delta_{\text{случ}}$ ) погрешностей литохимической съежки на медь участка Ботакара, Актогай путем сопоставления результатов первичной и повторно-контрольной съежки, приведенных в таблице 1 и 2

2. Пользуясь заранее подготовленной таблицей значений  $\lg \left( \frac{C_1}{C_2} \right)$  и используя формулы

(1 и 2), данные из таблицы определить величины средних систематической ( $\delta_{\text{сист}}$ ) и ( $\delta_{\text{случ}}$ ) погрешностей литохимической съежки на медь участка Ботакара, Актогай.

3. Собрать  $\Sigma$  (+) и (-) значений поотдельности; используя формулу (1.2.1) Определить величины средних систематической ( $\delta_{\text{сист}}$ )

*Основная литература:* [1] 64-78 с., [2] 54-66 с.

*Дополнительная литература:* [13].

*Контрольные вопросы*

2. Как оцениваются выявленные аномалии при литохимических поисках?

3. Как производится отбор литохимических проб?

4. Как изображаются результаты литохимических съежек?

**Задание 3. Определение твердого и растворимого стока химических элементов**

**Определение твердого и растворимого стока химических элементов**

**Задание:**

1. Поиски рудных месторождений по их вторичным литохимическим потокам рассеяния в аллювиально-пролювиальных отложениях современной гидросети проводятся на ранних стадиях работ (масштаба 1:100000, 1:50000). Наиболее перспективны эти съежки в хорошо расчлененных, активно денудированных горных районах.

Сведения о модулях твердого и растворимого стока с суши, с учетом коэффициентов водной миграции элементов или сведения о ежегодном слое денудации и количестве атмосферных осадков, с учетом средних содержаний элементов в горных породах и водах, дают возможность путем расчетов оценить сравнительную роль литохимических (главным образом механических) и гидрохимических (солевых) форм миграции для каждого элемента.

2. Определить коэффициент водной миграции твердого и растворимого сноса с суши.

3. Определить вторичные литохимические потоки рассеяния в рыхлых отложениях

Определение производится по следующим формулам:

Долю гидрохимического стока ( $\delta_{\text{гидрохим}}$ ) элемента можно оценить из выражения

$$\delta_{\text{гидрохим}} = \frac{q_{\text{раств.}} \cdot C_{\text{с.о.}}}{q_{\text{тв}} \cdot C_{\text{г.п.}} + q_{\text{ТК}} + q_{\text{раств.}} \cdot K_x} = \frac{q_{\text{раств.}} \cdot K_x}{q_{\text{тв}} + q_{\text{раств.}} + K_x}$$

$q_{\text{тв}}$ ,  $q_{\text{раств}}$  – соответственно модули твердого и растворимого стока т/км<sup>2</sup>/год для данного бассейна денудации;

$C_{\text{с.о.}}$  и  $C_{\text{г.п.}}$  – содержания данного элемента соответственно в сухом остатке и в горных породах, с которыми эта вода находится в контакте;

$K_x$  – коэффициент водной миграции;

$(\delta_{\text{гидрохим}}) = 1 \cdot (\delta_{\text{гидрохим}})$ ;

$$\Psi = \frac{\delta_{\text{больше}}}{\delta_{\text{меньше}}}$$

$\psi$  – показатель стока, указывающий во сколько раз одна форма миграции рудного элемента преобладает над второй.

#### Задание 1

Оценить соотношения между твердым в растворимым стоком серебра, меди и цинка в бассейне р.Колымы, исходя из следующих данных: модуль твердого стока 19,4 т/км<sup>2</sup>/год; модуль растворимого стока 10,1 т/км<sup>2</sup>/год. Коэффициенты водной миграции  $K_x$  для Ag=0,035;  $K_x$  для Cu - 0,003;  $K_x$  для Zn=0,04.

*Основная литература:* [1] 212-217 с.

*Дополнительная литература:* [15], [16], [20]

*Контрольные вопросы*

1. Что представляют собой потоки рассеяния?
2. Что характеризует коэффициент водной миграции?
3. Что характеризует коэффициент талассофильности?

**Задание 4. Определение миграционной способности элементов и линейной продуктивности в сечении первичного ореола**

*Основная литература:* [1] 111-175 с., [2] 88-130 с.

*Дополнительная литература:* [9], [15], [21]

*Контрольные вопросы*

1. Что такое миграция элементов?
2. Какие Вы знаете типы и виды миграции элементов?
3. Дайте характеристику первичного ореола рудного месторождения.

**Задание 5. Количественная интерпретация вторичных литохимических ореолов рассеяния**

**Количественная интерпретация вторичных литохимических ореолов рассеяния**

Необходимость решения геохимических задач в поисково-разведочной практике

возникает преимущественно на стадии детальных литохимических съемок масштаба 1:10000 в крупнее, выполняемых в пределах геохимических аномалий.

Для интерпретации вторичных ореолов рассеяния необходимо установление численных значений различных геохимических показателей и местных коэффициентов, а именно: содержание металла в ореоле (М), уровень местного геохимического фона (Сф), величина гипергенного рассеяния ( $\sigma$ ), ширина ореола рассеяния (2а в границах С<sub>А</sub> рациональный шаг отбора проб ( $\Delta x$ ), длина первой разведочной канавы (2р).

Основная цель количественной интерпретации вторичных ореолов рассеяния – решение так называемой «обратной задачи поисковой геохимии» -характеристика ожидаемого коренного оруденения по параметрам выявленной аномалии и, в конечном итоге, подсчет по геохимическим данным прогнозных запасов металла.

Количественная обработка геохимических данных начинается с построения графиков содержаний элементов-индикаторов по профилям и оконтуривания аномалий в плане путем построения карт изоконцентраций. Затем по графикам и картам (за вычетом местного геохимического фона) различными графическими и аналитическими способами производится оценка соответствующих геохимических показателей.

### **Задание 6-7**

Построить график литохимической съемки по результатам спектрального анализа проб (таблица 1).

Оценить графически уровень местного геохимического фона (Сф); подсчитать суммарное количество металла в ореоле (М); определить методом «трех уравнений» величину коэффициента гипергенного рассеяния ( $\sigma$ ); оценить ширину ореола (2а в границах С<sub>А</sub>); определить рациональный шаг отбора проб по профилю ( $\Delta x$ ) и целесообразную длину первой разведочной канавы.

С<sub>А</sub>- принять =  $6 \cdot 10^{-3}$  % Рb . Расстояние между пикетами 20 м.

#### **Ход решения**

По результатам спектрального анализа (таблица 1) проб необходимо построить два графика (рисунок 1): первый для оценки геохимического фона и эффективной ширины ореола с вертикальным масштабом 0,5 см – 210 % Рb, а второй для оценки ореола в масштабе 1 см = 0,02% Рb. Горизонтальный масштаб принимаем 0,5 см=20 к.

*Основная литература: [1] 195-242 с., [2] 167-210 с, [3] 82-86 с.*

*Дополнительная литература: [9], [15], [16], [22].*

*Контрольные вопросы:*

1. Что означает коэффициент гипергенного рассеяния?
2. Что такое геохимические параметры?
3. Как делятся вторичные ореолы рассеяния по фазовому состоянию?
4. Как подразделяются вторичные ореолы рассеяния по условиям образования?

**Задание 8.** Подсчет прогнозных ресурсов в литохимических ореолах

*Основная литература: [3] 239-247 с.*

*Дополнительная литература: [15]*

*Контрольные вопросы*

1. Дайте характеристику прогнозных ресурсов?
2. В каких единицах измеряется продуктивность ореолов?

### **2.4 Самостоятельная работа студентов под руководством преподавателя (СРСП)**

Не все лабораторные работы, предусмотренные планом, вкладываются в отведенные часы. Поэтому приведенная ниже тематика СРСП существенно дополняет их, давая возможность завершить невыполненные задания под руководством преподавателя. Кроме того, на занятиях СРСП предусматривается разбор тем интересующих студентов, с привлечением новой дополнительной литературы.

**Задание 1.** Вклад советских и зарубежных ученых в становление геохимии как науки, изучающей процессы концентрации и рассеяния химических элементов в земной коре – 2 часа.

Методические рекомендации: Вклад М.В.Ломоносова, Д.И.Менделеева, В.И.Вернадского и зарубежных ученых- Кларка, Гольдшмидта в становление геохимии.

Форма проведения – дискуссия.

*Литература:* [6], [10].

**Задание 2.** Охарактеризовать основные формы нахождения химических элементов в земной коре, назвать типы и виды миграции элементов – 2 часа.

Методические рекомендации: самостоятельные минеральные виды, изоморфные смеси, водная, биогенная формы, техногенные и др.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [3].

**Задание 3.** Вывести ряды последовательного осаждения ионов при их свободной миграции с учетом ЭК (энергетический коэффициент) и размеров ионных радиусов. Влияние «летучести» элементов – 2 часа.

Методические рекомендации: Геохимическая классификация элементов; устойчивость элементов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [8].

**Задание 4.** Влияние на миграцию химических элементов внутренних и внешних факторов. 2 часа.

Методические рекомендации: гравитационные свойства, свойства связи, химические свойства, температура, давление- как факторы миграции элементов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [3].

**Задание 5.** Типы и классы геохимических барьеров, принципы классификации физико-химических барьеров, определение контрастности барьеров и концентрации на нем элементов – 2 часа.

Методические рекомендации: барьеры гипергенной и гипогенной зон миграции, классификация барьеров.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [9].

**Задание 6.** Элементарные, геохимические и межбарьерные ландшафты. Основные этапы и стадии ландшафтно-геохимических исследований – 2 часа.

Методические рекомендации: показатели ландшафтов; типы ландшафтов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [3].

**Задание 7.** Литохимические потоки рассеяния. Факторы, определяющие геохимические особенности потоков рассеяния – 2 часа.

Методические рекомендации: формирование потоков рассеяния; шлиховая съемка.

Форма проведения: Дискуссия.

*Литература:* [1], [2],[3], [20].

**Задание 8.** Геохимические аномалии (региональные и локальные, перспективные, неперспективные, ложные) – 2 часа.

Методические рекомендации: аномалии природные и техногенные.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [13].

**Задание 9.** Вторичные литохимические ореолы рассеяния, классификация, параметры. Метод «трех уровней» – 2 часа.

Методические рекомендации: факторы, формирующие вторичные ореолы рассеяния; механические, солевые, газовые ореолы.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2],[3],[9], [15], [22].

**Задание 10.** Охарактеризовать морфологию первичных ореолов, назвать основные элементы-индикаторы следующих типов месторождений – магматических, пегматитовых, скарновых, грейзеновых, гидротермальных, колчеданных – 2 часа.

Методические рекомендации: Понятие о первичном ореоле. Зональность первичных ореолов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [9], [15], [21].

**Задание 11.** Основные факторы, обуславливающие геохимическую зональность постмагматических месторождений – 2 часа.

Методические рекомендации: вертикальная и латеральная зональность первичных ореолов; обобщенная схема первичного ореола гидротермального месторождения.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [15].

**Задание 12.** Последовательность проведения полевых и камеральных работ при литохимических поисках по первичным ореолам – 2 часа.

Методические рекомендации: региональные, собственно-поисковые, разведочно-эксплуатационные исследования, их задачи, методы и масштабы проведения.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [4],[12].

**Задание 13.** Основные особенности гидрогеохимических ореолов. Чем определяется формирование микрокомпонентного состава вод – 2 часа.

Методические рекомендации: основы метода, условия проведения, применение. Типы водных ореолов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [17].

**Задание 14.** Теоретические основы микробиологических и геоботанических поисков месторождений – 2 часа.

Методические рекомендации: условия проведения, применение. Биохимические барьеры.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [14].

**Задание 15.** Что представляет собой атмохимические, шликтогеохимические и шликтозрывные ореолы – 2 часа.

Методические рекомендации: основы метода, условия проведения, применение, изображение результатов.

Форма проведения: дискуссия.

*Литература:* [1], [2], [19].

### **Самостоятельная работа студентов (СРС)**

**Задание 1.** Вклад русских и зарубежных ученых в становление геохимии как науки о химическом составе и поведении элементов в земной коре – 2 часа.

Методические рекомендации: вклад русских ученых М.В.Ломоносова, Д.И.Менделеева, В.И.Вернадского и зарубежных – В.Н.Гольдшмидта, Ф.У.Кларка в становлении геохимии как науки.

*Литература:* [1], [6], [10]

**Задание 2.** Важнейшие формы нахождения элементов в земной коре – 2 часа.

Методические рекомендации: изоморфные смеси, биогенная форма, самостоятельные минеральные виды.

*Литература:* [1], [2],[3].

**Задание 3.** Миграция химических элементов в земной коре. Классификация элементов по их миграционной способности. Сущность геохимических барьеров – 2 часа.

Методические рекомендации: влияние «летучести» на процессы миграции, устойчивость элементов.

*Литература:* [1], [2], [8].

**Задание 4.** Внутренние факторы миграции химических элементов (5 факторов), внешние факторы миграции элементов (4 фактора) – 2 часа.

Методические рекомендации: гравитационные свойства, свойства связи, химические свойства, температура, давление как факторы миграции элементов.

*Литература:* [1], [3].

**Задание 5.** Виды геохимических аномалий (региональные, локальные, перспективные, неперспективные, ложные и т.д.) – 2 часа.

Методические рекомендации: аномалии природные и техногенные.

*Литература:* [1], [2], [13].

**Задание 6.** Виды геохимических ландшафтов (элементарные, геохимические, межбарьерные). Классификация ландшафтов – 2 часа.

Методические рекомендации: показатели ландшафтов, типы ландшафтов.

*Литература:* [1], [2], [3].

**Задание 7.** Особенности формирования первичных рудных ореолов различных генетических типов месторождений – 2 часа.

Методические рекомендации: понятие о первичном рудном ореоле.

*Литература:* [1], [2], [9], [15], [21].

**Задание 8.** Геохимическая зональность первичных рудных ореолов. Ряды зональности по типам месторождений – 2 часа.

Методические рекомендации: примеры зональности различных типов месторождений.

*Литература:* [1], [9], [15].

**Задание 9.** Формирование вторичных литохимических ореолов рассеяния. Классификация вторичных ореолов – 2 часа.

Методические рекомендации: механические, газовые, солевые вторичные ореолы.

*Литература:* [1], [3], [9], [22].

**Задание 10.** Параметры для расчета вторичных ореолов рассеяния (коэффициент гипергенного рассеяния, длина ореола, продуктивность и т.д.) – 2 часа.

Методические рекомендации: характеристика основных параметров вторичных ореолов рассеяния.

*Литература:* [3], [9], [22].

**Задание 11.** Образование и основные особенности литохимических потоков рассеяния – 2 часа.

Методические рекомендации: формирование потоков рассеяния, шлиховая съемка.

*Литература:* [1], [2], [20].

**Задание 12.** Условия проведения, задачи литохимических поисков (определение геохимического фона, установление формы нахождения элементов-индикаторов в ореоле, установление зональности и т.д.) – 2 часа.

Методические рекомендации: задачи, методы и масштабы проведения поисков.

*Литература:* [1], [4], [12].

**Задание 13.** Особенности проведения гидрогеохимических поисков (участки резкорасчлененного рельефа, участки перекрытые мощным чехлом приносных отложений) – 2 часа.

Методические рекомендации: типы водных ореолов, условия проведения, применение.

*Литература:* [1], [2], [17].

**Задание 14.** Условия проведения, задачи, отбор проб, обработка проб, оценка аномалий при биогеохимическом методе поисков – 2 часа.

Методические рекомендации: биохимические барьеры, условия проведения метода.

*Литература:* [1], [2], [14].

**Задание 15.** Атмохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых (условия проведения, задачи, отбор проб, оценка аномалий) – 2 часа.

Методические указания: основы метода, применение.

*Литература:* [1], [2], [9].

**Экзаменационные вопросы по пройденному курсу**

1. Что является предметом изучения геохимии?
2. Каковы заслуги В.М.Ломоносова в становлении геохимии?
3. Значение открытия Д.И.Менделеева для геохимии.
4. Кто из зарубежных ученых внес весомый вклад в развитие геохимии как науки?
5. Дайте определение «форма нахождения элементов».
6. Каковы основные формы нахождения элементов в земной коре?
7. Какие выделяются типы и виды миграции химических элементов?
8. Что собой представляет ряд последовательного осаждения ионов при их свободной миграции?
9. Что такое «летучесть» и как она влияет на положение элементов в ряду осаждения?
10. Какие существуют типы и классы геохимических барьеров?
11. Как определить контрастность барьера?
12. Как определить на барьере концентрацию элементов?
13. Каковы важнейшие внутренние факторы миграции элементов?
14. Как влияют внутренние факторы на миграцию элементов в земной коре?
15. Как влияют на миграцию элементов температура, давление и степень электролитической диссоциации?
16. Каково влияние окислительно-восстановительной обстановки и жизнедеятельности организмов на миграцию элементов?
17. Что собой представляет геохимическая аномалия?
18. Как подразделяются геохимические аномалии по размерам?
19. Как классифицируются геохимические аномалии?
20. Что такое «ассоциация элементов» и чем она обусловлена?
21. Что такое геохимический ландшафт?
22. Как подразделяются ландшафты?
23. Приведите классификацию ландшафтов.
24. Основные положения геохимических методов поисков.
25. Как подразделяются геохимические съемки по условиям проведения?
26. Как делятся геохимические съемки по целевому назначению?
27. Дайте характеристику первичных ореолов рудных месторождений.
28. Чем отличаются первичные ореолы эндогенных и экзогенных месторождений?
29. Каковы основные особенности первичных ореолов стратиформных месторождений?
30. Каковы основные факторы, обуславливающие геохимическую зональность первичных ореолов постмагматических месторождений?
31. Какова обобщающая схема первичного ореола гидротермального месторождения?
32. Что представляют собой продукты гипергенного разрушения месторождений?
33. Каковы основные факторы, определяющие особенности вторичных ореолов рассеяния?
34. Как делятся вторичные ореолы рассеяния по фазовому состоянию?
35. Как подразделяются вторичные ореолы рассеяния по условиям образования и по признаку доступности для обнаружения?
36. Что такое геохимические параметры?
37. Каковы основные геохимические параметры вторичных ореолов рассеяния?
38. Что характеризует коэффициент рассеяния?
39. Что представляет собой метод «трех уравнений» и где он используется?
40. Что представляют собой потоки рассеяния?

41. Каковы факторы, определяющие геохимические особенности потоков рассеяния?
42. Что характеризуют коэффициенты водной миграции и талассофильности?
43. В каком масштабе могут эффективно проводиться поиски по потокам рассеяния?
44. В каких условиях применяются поиски по потокам и ореолам рассеяния?
45. Как подразделяются литохимические поиски в зависимости от масштаба работ?
46. Как производится отбор проб при литохимических поисках по потокам рассеяния и по ореолам рассеяния?
47. Как производится обработка литохимических проб?
48. Как изображаются результаты литохимических поисков?
49. Как оцениваются выявленные аномалии по литохимическим поискам?
50. Основные задачи гидрохимических методов поисков.
51. Каковы наиболее благоприятные объекты гидрохимических исследований?
52. Дать классификацию водных ореолов.
53. Как производится отбор проб воды? Как изображаются результаты гидрохимических поисков?
54. Где целесообразно проводить биогеохимические методы поисков?
55. Что такое «биологический» барьер и как он учитывается при поисках месторождений полезных ископаемых?
56. Как изображаются результаты биогеохимических методов поисков?
57. Для поисков каких месторождений используется атмосферический метод?
58. Какие рудные элементы фиксируются атмосферическим методом поисков?
59. Как производится отбор проб при атмосферических методах поисков?
60. Как проводится подсчет прогнозных ресурсов по литохимическим ореолам?

## Глоссарий

*Аномалия* – отклонение от нормы, от общей закономерности: геохимическая аномалия- значительно повышенное (или пониженное) по сравнению с фоном содержание элементов.

*Атмосферический (газовый) метод* поисков основан на выявлении газовых ореолов в горных породах, почвах, в припочвенной атмосфере.

*Барьеры (геохимические)* – участки земной коры, где на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация.

*Барьеры (природные)* – на которых смена факторов миграции, а следовательно и смена одной геохимической обстановки другой обуславливается природными особенностями участка биосферы.

*Барьеры (техногенные)* – в которых смена геохимических обстановок происходит в результате антропогенной деятельности.

*Биогеохимический ореол* – участок земной коры с повышенным содержанием элементов в среде, питающей растения и обогащающей их корневую систему, ствол, листья этими элементами.

*Вторичный ореол рассеяния* – локальная зона повышенных содержаний ценных или сопутствующих компонентов залежи, прилегающая к рудному телу и его первичному ореолу, образованная в результате их гипергенного разрушения.

*Геохимическое поле* – земное пространство, охарактеризованное содержанием химических элементов или их соединений, как функциями пространственных координат и времени -  $C_x = f(x, y, z, T) > 0$ .

*Геохимические провинции* – геохимически однородные области с определенными ассоциациями химических элементов, находящихся в повышенных концентрациях.

*Геохимические щиты* – это устойчивые древние платформы с резким преобладанием собственно магматических горных пород.

*Геохимические пояса* – это тектонически подвижные области, примыкающие непосредственно к щитам.

*Геохимические узлы* – это районы, испытавшие наложение нескольких геохимических циклов.

*Геохимические эпохи* – периоды специфической концентрации определенных элементов.

*Геохимические индикаторы* – элементы (их соединения), по изменению особенностей распределения которых в различных геологических объектах ведутся поиски полезных ископаемых геохимическими методами.

*Гидрогеохимический ореол* – локальный участок с повышенным аномальным содержанием рудных элементов поверхностных и подземных водах.

*Кларк* – среднее содержание химического элемента в геосферах Земли.

*Кларк концентрации* – отношение содержания элемента в конкретном объекте к его кларку.

*Ландшафт* – представляет собой часть земной поверхности, в которой за счет солнечной энергии осуществляется миграция химических элементов и возникают кора выветривания коренных пород, зона окисления рудных тел, покров континентальных осадочных образований и приуроченные к нему ореолы рассеяния рудных месторождений, почвенный покров (по А.И.Перельману, 1966г).

*Ландшафты (элементарные)* – участки биосферы, не имеющие внутренних причин, ограничивающих их площадное распространение, характеризующиеся развитием одинаковых разностей почв, растительности, горных пород и аналогичными внешними условиями миграции и концентрации химических элементов.

*Ландшафты (геохимические)* – парагенетическая ассоциация сопряженных элементарных ландшафтов, связанных между собой миграцией элементов.

*Ландшафты (межбарьерные)* – совокупности элементарных ландшафтов, связанных единым видом миграции элементов и расположенных между двумя геохимическими барьерами одного класса.

*Миграция химических элементов* – перемещение и перераспределение химических элементов в земной коре, ведущее к рассеянию или концентрации.

*Первичный ореол рудного тела (месторождения)* – это окружающая рудное тело зона вмещающих коренных пород с повышенным содержанием главных или сопутствующих элементов, образованная одновременно с рудным телом.

*Потоки рассеяния* – области повышенных содержаний компонентов залежи, возникающие на путях твердого, жидкого и газообразного стока с суши.

*Фон (геохимический)* – среднее содержание элемента в однородном участке в удалении от явной аномалии.

*Шлиховые ореолы* – участки с высоким содержанием минералов, поступающих из разрушающихся в гипергенных условиях тел полезных ископаемых и околорудно-измененных пород.