

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора по УМР

 В.К. Бернатонис

« 12 » ноября 2008 г.

**Е.Г. Язиков**

## **МИНЕРАЛОГИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Методические указания по курсу «Минералогия редких и радиоактивных элементов» для магистрантов, обучающихся по направлению 130100 «Геология и разведка полезных ископаемых», специализации «Геология, поиски и разведка руд редких и радиоактивных элементов»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 550.42: 549(076.5)

ББК 24.13:26.31я73

Я40

**Язиков Е.Г.**

Я40 Минералогия радиоактивных элементов: методические указания по курсу «Минералогия редких и радиоактивных элементов» для магистрантов, обучающихся по направлению 130100 «Геология и разведка полезных ископаемых», специализации «Геология, поиски и разведка руд редких и радиоактивных элементов» / Е.Г. Язиков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 38 с.

УДК 550.42: 549(076.5)

ББК 24.13:26.31я73

ISBN 5-98298-231-8

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры ГЭГХ ИГНД 20 декабря 2007 г.

Зав. кафедрой ГЭГХ

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор



*Л.П. Рихванов*

Председатель

учебно-методической  
комиссии



*Н.Г. Квеско*

*Рецензент*

Доктор геолого-минералогических наук, профессор ТГАСУ

*А.В. Мананков*

ISBN 5-98298-231-8

© Язиков Е.Г., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Лабораторная работа № 1	
ДИАГНОСТИКА ПЕРВИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ УРАНА .....	6
1.1. Цель и задачи .....	6
1.2. Схема исследования рудного штуфа и аншлифа .....	6
1.3. Содержание и оформление отчета .....	11
1.4. Список рекомендуемой литературы .....	12
Лабораторная работа № 2	
ДИАГНОСТИКА ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ УРАНА .....	13
2.1. Цель и задачи .....	13
2.2. Схема исследования рудного штуфа .....	13
2.3. Содержание и оформление отчета .....	27
2.4. Список рекомендуемой литературы .....	28
Лабораторная работа № 3	
ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....	29
3.1. Цель и задачи .....	29
3.2. Схема исследования рудного штуфа .....	29
3.2.1. Минералы редких элементов .....	30
3.2.2. Минералы редкоземельных элементов (по Е.И. Семёнову, 1963) .....	30
3.3. Содержание и оформление отчета .....	36
3.4. Список рекомендуемой литературы .....	37

## ВВЕДЕНИЕ

Минералогия урана имеет почти двухвековую историю. Первые описания минералов урана – настурана (урановой смоляной руды) и торбернита – относятся к XVIII в. Около 20 минералов было обнаружено в XIX в. Однако большая часть минеральных видов и разновидностей открыта уже в XX веке – веке особого внимания к урану как энергетическому сырью. Отечественная и зарубежная литература насчитывает большое число публикаций по отдельным разделам минералогии урана и тория. Работами А.Г. Бетехтина, В.Г. Мелкова, В.И. Герасимовского, В.В. Щербины, Л.Н. Беловой, Г.А. Сидоренко, Е.С. Макарова, Я.Д. Готмана, Ю.М. Дымкова, П. Рамдора и др. внесен большой вклад в минералогии радиоактивных элементов. Полные сводные работы представлены справочником «Минералы урана» М.В. Соболевой и И.Л. Пудовкиной, ставшим настольной книгой геологов, и «Руководством по определению урановых минералов» Р.В. Гецевой и К.Т. Савельевой. Из зарубежных работ наиболее значима монография К. Фронделя и Э. Хейнриха.

Со времени издания основной справочной литературы по минералогии урана и тория прошло около тридцати лет. За эти годы в печати появились многочисленные публикации о вновь открытых минералах, об уточнениях и дополнениях характеристик известных минералов. Значительно пополнились сведения о химическом составе, кристаллохимических структурах, плотности, оптических свойствах и условиях образования.

Урановые и ториевые минералы характеризуются сложным и переменным химическим составом, что обуславливает изменчивость их физических свойств. Многие из этих минералов имеют сходные внешние признаки и оптические свойства, метамиктны и рентгеноаморфны, легко подвергаются преобразованиям под воздействием наложенных процессов (метастабильны), находятся в тонких сростаниях с другими минералами. Оценка внешних свойств и признаков, даже дополненная оптической характеристикой, для отдельных минералов может оказаться недостаточной. В таких случаях диагностика и характеристика минералов проводятся на основе комплекса современных методов анализа.

Собственные минералы урана часто подразделяют на минералы четырехвалентного урана, которые традиционно относят к так называемым первичным, и минералы шестивалентного урана, называемые вторичными. Данными терминами обычно стремятся подчеркнуть преимущественно эндогенный генезис первой группы минералов и экзогенный – второй группы. Очевидно, что такое деление по генезису условно, имеет исключения, но удобно при практическом изучении минералогии урана.

Создание методических указаний по курсу «Минералогия радиоактивных элементов» вызвано необходимостью изложения последовательности диагностики первичных и вторичных минералов урана, основанных на их различных физических и химических свойствах. Правильная последовательность выполнения исследований позволит более грамотно использовать имеющийся потенциал методов исследований для диагностики минералов. Универсального метода диагностики не существует, поэтому у каждого метода есть свои положительные и отрицательные моменты, которые позволяют в совокупности решать вопросы диагностики минералов.

Важным обстоятельством явилось и то, что диагностика минералов с использованием простейших методов позволяет геологу в полевых условиях правильно сориентироваться и наметить дальнейший порядок проведения исследований. Современные методы исследования с использованием электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа не всегда доступны в короткий срок и требуют более длительного интервала времени. Соответственно и специалисты должны получать оперативную информацию и быть готовыми к ее применению в практической деятельности.

В основу методических указаний положен курс лекций по минералогии радиоактивных элементов и материалы практических исследований, которые осуществлялись автором в течение многих лет работы на кафедре полезных ископаемых и геохимии редких элементов Томского политехнического университета для студентов по специальности «Геологическая съемка, поиски и разведка полезных ископаемых». При обучении студентов, а также в процессе выполнения студентами курсовых работ, автор приходил к мысли о необходимости создания методических указаний. При обучении геологов-«уранщиков» крайне важно ознакомить их с практикой проведения различных видов исследований при диагностике минералов радиоактивных элементов.

В процессе подготовки методических указаний автор пользовался литературными источниками, которые приводятся в конце каждой работы. Автор благодарен И.Н. Нойбауэр и И.А. Титовой за помощь в техническом оформлении работы.

# Лабораторная работа № 1

## «ДИАГНОСТИКА ПЕРВИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ УРАНА»

### 1.1. Цель и задачи

Цель предлагаемой работы – закрепить теоретические знания, которые были изложены в курсе «Минералогия радиоактивных элементов», глубже разобраться в процессах образования урановых руд и научиться правильно применять необходимые методы исследования радиоактивного сырья.

Материал по теме «Диагностика первичных минералов урана» предлагается для решения в виде задачи, в которую входит штуф руды и один-два аншлифа. Работа выполняется с использованием реальных материалов и представляет собой самостоятельное исследование природного объекта.

### 1.2. Схема исследования рудного штуфа и аншлифа

#### I этап

1. Определение общей радиоактивности штуфа и природы радиоактивности.
2. Изучение люминесценции вторичных минералов урана в образце.
3. Макроскопическое исследование штуфа с использованием бинокулярной лупы.

#### II этап

1. Исследование аншлифа методом макрорадиографии (на рентгеновской плёнке или фотобумаге) с целью определения характера распределения радиоактивных минералов.
2. Выявление урановой минерализации с возможным предварительным определением отдельных минералов методом отпечатка.

#### III этап

1. Микроскопическое исследование аншлифа под рудным микроскопом.
2. Составление схемы минералообразования.

**На первом этапе** определяется мощность экспозиционной дозы (МЭД) образца гамма-радиометром СРП-68-01, затем уточняется природа радиоактивности (урановая, ториевая или смешанная) с помощью гамма-спектрометра РКП-305 или РКП-305М. В случае видимой вторичной минерализации изучается люминесценция минералов на приборе ЛСП-101. После этого под бинокулярной лупой МБС-2 или МБС-1 выполняется детальное микроскопическое описание штуфа. Устанавливаются текстурно-структурные особенности руды, её состав, взаимоотношения отдельных минералов и минеральных групп, количественное со-

отношение минералов и т. д. Производится предварительная диагностика минералов с помощью простейших физических свойств. На основании изучения указанных особенностей дается детальное описание штуфа.

**На втором этапе** изучается характер распределения радиоактивных минералов в аншлифе с помощью *макрорадиографического метода*. Для этого на лист рентгеновской пленки или фотобумаги при красном свете укладывается полированной поверхностью аншлиф. Фиксируют положение образца путём засвечивания светом неприкрытой части пленки, что необходимо для последующего сопоставления радиографий и аншлифа. Затем пленку или фотобумагу с аншлифом убирают в контейнер. Время экспозиции зависит от степени радиоактивности минералов и от чувствительности плёнки или фотобумаги. Обычно она колеблется от нескольких часов до 15 суток. Проявляют и закрепляют плёнку или фотобумагу обычным способом.

*Метод отпечатка* или контактный метод определения элементов в минералах детально разработан С.А. Юшко. Здесь он приводится с некоторым дополнением к способу определения урана. Этот метод прост, доступен и позволяет даже в полевых условиях обнаруживать урановые минералы в руде, определять характер их распределения и при необходимости может заменить радиографический метод.

Метод отпечатка основан на получении нерастворимого осадка соли уранила при действии на раствор проявителем. Растворителем являются минеральные кислоты различных концентраций, переводящие уран в раствор в виде уранилнитрата  $UO_2(NO_3)_2$ . Проявителем служит 5%-й раствор ферроцианида калия  $K_4[Fe(CN)_6]$ . Взаимодействуя с нитратом уранила, он дает не растворимый в воде красновато-коричневый осадок комплексной соли  $K_2UO_2[Fe(CN)_6]$ , фиксирующийся на фотографической, чертёжной или фильтровальной бумаге. На последней получают менее чёткие отпечатки, но она незаменима в полевых условиях, когда нужно определить распределение урановых минералов в штуфе без пришлифовки последнего.

Для получения отпечатка фильтровальную бумагу надо смочить растворителем, завернуть в нее штуф так, чтобы она плотно прилегала к его поверхности, подержать 2–3 минуты и, не разворачивая, покапать проявителем. Красновато-коричневые пятна, выступившие на фильтровальной бумаге, указывают на участки штуфа, содержащие урановые минералы. Этот способ помогает легко ориентироваться при отборе материала для изготовления шлифов.

Отпечаток с аншлифа (или пришлифовки) получают следующим образом: фотографическую (для удаления бромистого серебра фотобумага заранее обрабатывается раствором гипосульфита, промывается во-

дой и просушивается) или чертёжную бумагу смачивают азотной кислотой (10 %; 25 %; 50 % и конц.), излишки которой приблизительно через 1 минуту удаляют фильтром. Фотобумагу смачивают азотной кислотой, начиная с меньшей концентрации. К влажной поверхности бумаги при помощи прессы или руки прижимается аншлиф на время, продолжительность которого находится в прямой зависимости от растворимости испытуемого минерала (обычно 1–1,5 мин). Находящаяся в порах бумаги  $\text{HNO}_3$  растворяет урановые минералы, которые после проявления бумаги в 5–20%-м растворе желтой кровяной соли дают коричневый отпечаток, строго соответствующий их контурам. Отпечаток тщательно промывается в воде и высушивается. Последовательно опыт проводится с 25%-й, затем 50%-й кислотой, на основании чего определяют группу вторичных урановых минералов или фазу окисленности первичных окисных минералов урана.

Открытию урана мешают молибден и медь, которые дают несколько похожие цветные отпечатки. Влияние молибдена может быть устранено промывкой отпечатка в 20%-м растворе ацетата натрия ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ), от которого жёлто-бурое окрашивание молибдена исчезает, а красновато-коричневая окраска от урана сохраняется.

Отпечаток меди, входящей в состав вторичных минералов (малахит, халькозин и борнит), заметно отличается от отпечатка урана своим фиолетово-розовым тоном на фотобумаге и розовато-бурым – на чертёжной бумаге. Медь, содержащаяся в халькопирите и не растворимая в азотной кислоте, в условиях опыта отпечатка не даёт. В отдельных случаях, когда затруднительно дать однозначный ответ, необходимо сделать проверку на медь. Для этого полученный отпечаток промывают в 20%-м растворе йодида калия или 5%-м растворе едкого калия, в результате чего окраска от меди в первом случае сильно темнеет, а во втором случае переходит в голубую. Красновато-коричневая окраска от урана сначала остаётся без изменения, а через некоторое время становится более светлой. Этим методом можно проводить фазовый анализ с целью выявления разновидностей настурана.

Практически установлены следующие оптимальные условия получения отпечатков для различных разновидностей уранинита и настурана.

1. Наиболее окисленный, разрушенный настуран, богатый шестивалентным ураном, а также урановые черни дают чёткие отпечатки при растворении их азотной кислотой слабой (5%-й) концентрации.

2. Менее окисленные минералы окислов урана в зависимости от степени окисления дают чёткие отпечатки с азотной кислотой обычно 10–20%-й, реже 50%-й, концентрации. Такие минералы обладают средней твердостью и отражательной способностью, а также характеризу-

ются наличием примерно равного количества закиси и окиси урана.

3. Минералы окислов урана, характеризующиеся высокой твердостью и отражательной способностью, обогащённые четырехвалентным ураном, чёткие отпечатки дают только с концентрированной азотной кислотой.

**На третьем этапе** проводится детальное микроскопическое исследование аншлифа. Микроскопическое изучение препарата проводится с помощью рудного (ПОЛАМ Р-312) и бинокулярного (МБС-2, МБС-1) микроскопов. Диагностируются все минералы, представленные в аншлифах. Параллельно с диагностикой минералов следует изучать текстурно-структурные особенности руд, описывать и делать зарисовки установленных взаимоотношений минеральных агрегатов и отдельных минералов. Определяются размеры выделений (агрегатов), отдельных минералов (группы минералов), и оценивается количественное соотношение минералов в штуче (в %).

Из окислов урана наиболее интересными и промышленно ценными являются минералы групп уранинита и настурана. Окислы урана, ради временного удобства их описания и систематики, В.Г. Мелков предлагает рассматривать как члены тройной системы  $[\text{ThO}_2 - \text{UO}_2 - \text{UO}_3]$ , состав их изображать (учитывая и находящийся в них свинец) эмпирической формулой общего вида:  $k(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2 \cdot n\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$ . Главной составной частью окислов урана являются закись ( $\text{UO}_2$ ) и окись ( $\text{UO}_3$ ) урана. Как для минералов группы уранинита, так и для минералов группы настурана величина молекулярного отношения  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$  представляет собой функцию времени существования минерала. Для упрощения эту величину заменяют величиной атомного отношения кислорода к урану, называемой *кислородным коэффициентом*  $x$ .

Общая формула минералов окислов урана, выраженная через кислородный коэффициент, может быть представлена в виде  $\text{UO}_x$ , где значение  $x$  для искусственных соединений колеблется от 2,00 до 3,00, а для известных природных соединений – от 2,17 до 2,92. Такая формула окислов урана является наиболее простой и удобной.

В минералах группы уранинита молекулярное отношение  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$ , по Мелкову, колеблется в пределах от 4,0 до 0,1. При этом по мере увеличения содержания  $\text{ThO}_2$  в минерале диапазон вариации молекулярного отношения  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$  сокращается. Так, например, в брёггерите при содержании  $\text{ThO}_2$  от 7,8 до 11,4 молекулярное отношение  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$  колеблется от 2,7 до 1,3. Если величину молекулярного отношения  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$  пересчитать на кислородный коэффициент, то получим, что химический состав уранинита колеблется от  $\text{UO}_{2,20}$  до  $\text{UO}_{2,91}$ , а брёггерита – от  $\text{O}_{2,28}$  до  $\text{UO}_{2,50}$ .

Минералы группы настурана, в отличие от уранинита, почти не содержат  $\text{ThO}_2$  или, в редких случаях, содержат его до 1–1,5 %. Являясь преимущественно бесториевыми кислородными соединениями, эти минералы могут рассматриваться как члены одной из частных двойных систем  $[\text{UO}_2 : \text{UO}_3]$  общей тройной системы  $[\text{ThO}_2 - \text{UO}_2 - \text{UO}_3]$ . Химический состав минералов этой группы может быть выражен такой же общей эмпирической формулой ( $k\text{UO}_2 \cdot n\text{UO}_3 \cdot m\text{PbO}$ ), как и бесториевый уранинит. Величина молекулярного отношения  $\text{UO}_2 : \text{UO}_3$  в минералах группы настурана колеблется в более широких пределах, чем в минералах группы уранинита, – от 0,08 до 5,00, что в переводе на кислородный коэффициент соответствует соединениям от  $\text{UO}_{2,16}$  до  $\text{UO}_{2,92}$ .

Сходный по химическому составу и основным физическим свойствам настуран отличается от уранинита по форме выделения. Последнее, обусловленное, по-видимому, генетическими особенностями этих минералов, и послужило основанием для отдельного их описания.

Общим для минералов группы уранинита является кристаллическая форма их выделений. Наиболее распространённые формы: кубы, октаэдров, ромбододекаэдров. Размеры кристаллов: от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Встречаются чаще в виде неравномерной вкрапленности, реже – агрегатов или сплошных выделений неправильной формы. В последних при наблюдении под микроскопом обнаруживается обычно агрегатное строение, выявляемое иногда лишь при травлении.

Уранинит известен как минерал различных пегматитовых жил. Значительным распространением он пользуется также в контактово-метаморфических и метасоматических породах. Часто его присутствие отмечается в гидротермальных жилах высоких, реже – средних температур. За последнее время отмечаются находки уранинита в низкотемпературных гидротермальных жилах. Экспериментально установлено, что выпадение уранинита из растворов возможно при температуре 500 °С.

Ниже приводятся некоторые примеры парагенетического комплекса минералов. В мусковитовых пегматитах уранинит встречается в ассоциации с дымчатым кварцем, микроклином, клевеландитом, турмалином, бериллом, сподуменом, колумбитом. В полевошпатовых пегматитах уранинит ассоциирует с альбитом, кварцем, мусковитом. В микроклиноплагноклазовых пегматитах он находится вместе со слюдой (биотит, мусковит, флогопит) и часто бывает замещён вторичными урановыми минералами. Нередко наблюдается в виде включений в кварце или полевошпате и характеризуется хорошей сохранностью. Редко образует тесное срастание с тухолитом.

Минералы группы настурана образуются, главным образом, в гидротермальных месторождениях средних и низких температур. За последнее время они обнаружены в метаморфических и осадочных месторождениях. В отличие от уранинита настуран наблюдается преимущественно в виде почек и неправильных форм. Выполняя трещинки, он часто образует в породе самостоятельные прожилки мощностью от 1 мм до нескольких сантиметров. Иногда цементирует зёрна породообразующих минералов или неравномерно распределяется в цементе в виде неправильных форм или тончайших «шариков»-стяжений, образующих часто сплошные участки. В отдельных случаях образуют петельчатую структуру выделения, обволакивая отдельные зёрна минералов вмещающих пород. Нередко настуран образует богатые рудные скопления, имеющие важное промышленное значение.

По результатам микроскопического исследования самостоятельно составляется схема последовательности минералообразования. Приводится описание процесса рудообразования с анализом фактического материала и использования литературных источников.

### 1.3. Содержание и оформление отчета

После выполнения лабораторной работы представляется отчёт. Рукописный текст помещается на стандартных листах (297x210 мм). Объём текста – 10–15 страниц.

Работа включает следующие разделы:

1. Введение.
2. Общая радиоактивность штуфа и природа радиоактивности. Макроскопическая характеристика штуфа.
3. Методы исследования радиоактивного вещества
4. Минеральный состав и микроскопическая характеристика образца. Схема последовательности минералообразования.
5. Генезис руд.
6. Список литературы.

**Во введении** необходимо указать цель работы, исходный материал и основные задачи исследования.

**Во втором разделе** первоначально следует определить радиоактивность (мощность экспозиционной дозы) образца и его природу, а затем изучить общую люминесценцию штуфа. Описать породу: цвет – структуру – текстуру. Перечислить все минералы, причём для каждого рудного минерала следует дать детальное его описание по схеме: распространённость минерала (количество в штуфе, %), характер агрегатов (выделений), форма зерен (кристаллов).

**В третьем разделе** указывается цель применения определенного метода исследования радиоактивного вещества, излагаются поочередно полученные результаты и дается их интерпретация.

**В четвертом разделе** приводятся результаты диагностики минералов с использованием различных методов и микроскопического исследования. В этом случае для каждого рудного минерала приводится детально его описание по схеме: распространенность минерала в аншлифе (в %), характер распределения, размеры выделений и характерные диагностические свойства, размеры зерен. Отражаются текстурные особенности руд, агрегативное состояние отдельных минералов, взаимоотношения между минералами, причём всё это иллюстрируется рисунками (фотографиями). Описываются результаты структурного травления. Приводятся данные микрoхимических испытаний с приложением отпечатков.

На основании всего имеющегося материала составляется схема последовательности минералообразования.

**В пятом разделе** приводятся соображения об условиях образования объекта. Они делаются на основе изложенного выше материала. Указывается промышленный тип оруденения.

**В конце работы** приводится список литературы, использованной в процессе выполнения задачи.

Выполненная работа сдаётся для проверки преподавателю в срок, указанный в календарном плане. Образец оформления титульного листа стандартен.

#### **1.4. Список рекомендуемой литературы**

1. Бурьянова Е.З. Определитель минералов урана и тория. – М.: Недра, 1972. – 51 с.
2. Галюк В.А. Руководство к лабораторным занятиям по курсу «Минералогия и геохимия радиоактивных элементов». – М.: Высшая школа, 1964. – 137 с.
3. Гецева Р.В., Савельева К.Т. Руководство к определению урановых минералов. – М.: Госгеолтехиздат, 1956. – 254 с.
4. Соболева М.В., Пудовкина И.Л. Минералы урана. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 408 с.
5. Текстуры и структуры урановых руд эндогенных месторождений. – М.: Атомиздат, 1977. – 207 с.
6. Текстуры и структуры урановых руд экзогенных месторождений. – М.: Атомиздат, 1977. – 201 с.
7. Минералогия и геохимия редких и радиоактивных металлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 257 с.
8. Девиво Б., Ипполито Ф. и др. Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождений урана. – М.: Мир, 1988. – 330 с.

## **Лабораторная работа № 2**

### **«ДИАГНОСТИКА ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ УРАНА»**

#### **2.1. Цель и задачи**

Цель работы – закрепить теоретические знания, которые были изложены в курсе «Минералогия радиоактивных элементов», более детально разобраться в процессах образования вторичных урановых минералов и получить навык правильного применения необходимых методов исследования для изучения гипергенных урановых минералов.

Материал по теме «Диагностика вторичных минералов урана» предлагается для решения в виде задачи, в которую входит штуф руды. Лабораторная работа выполняется на реальных материалах.

#### **2.2. Схема исследования рудного штуфа**

##### **I этап**

1. Определение общей радиоактивности (мощности экспозиционной дозы) штуфа и природы радиоактивности.
2. Изучение люминесценции вторичных минералов урана в образце.
3. Макроскопическое исследование штуфа и отбор мономинеральных фракций под бинокулярной лупой.

##### **II этап**

1. Определение природы радиоактивности минералов (урановая или ториевая).

##### **III этап**

1. Растворимость в кислотах.
2. Определение химического состава группы минералов с выделением подкласса.
3. Определение катионного и анионного состава минералов.

##### **IV этап**

1. Микроскопическое исследование зёрен минерала под микроскопом.
2. Составление модели месторождения с её специфической зоной окисления.

**На первом этапе** определяется общая радиоактивность (МЭД) образца гамма-радиометром СРП-69-01, а затем уточняется природа радиоактивности (урановая, ториевая или смешанная) с помощью гамма-спектрометра РКП-305 или РКП-305М. Люминесценция минералов изучается на приборе ЛСП-101. При изучении люминесценции минералов следует обратить внимание на интенсивность и цвет люминесценции, по свойствам которой выделены следующие группы:

- I. Люминесцирующие очень сильно**  
а) голубовато-зелёное свечение (тип шрёкингерита)  
лигибит (ураноталлит)
- II. Люминесцирующие очень сильно**  
а) голубовато-зелёное свечение (тип шрёкингерита)  
шрёкингерит  
андерсонит  
б) желтовато-зелёное свечение (тип отенита)  
отенит  
уранопилит  
ураноспинит  
урансодержащий гиалит
- III. Люминесцирующие умеренно**  
а) желтовато-зелёное свечение (тип отенита)  
смешанные слюдки медно-кальцитовые  
урансодержащий гиалит  
б) желтоватое свечение  
уранопилит
- IV. Люминесцирующие слабо**  
а) голубовато-зелёное свечение (тип шрёкингерита)  
раббитит  
швартцит  
б) желтовато-зелёное свечение (тип отенита)  
урансодержащий гиалит  
в) буровато-жёлтое свечение  
соддиит  
бергенит
- V. Люминесцирующие очень слабо**  
а) грязно-желтовато-зелёное свечение (типа уранофана)  
склодовскит  
уранофан  
циппеит  
карнотит  
б) тускло-зелёное свечение  
болтвудит  
виксит

В данной классификации (Бурьянова, 1972) приведены только наиболее распространённые минералы. Для получения более яркого спектра люминесценции используется жидкий азот. В этом случае образец погружается в сосуд с жидким азотом, выдерживается несколько минут до полного охлаждения (температура жидкого азота  $-197\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а затем

наблюдается свечение. При работе с жидким азотом необходимо соблюдать технику безопасности, чтобы жидкость не попала на открытые части тела.

Макроскопическое исследование образца проводится под бинокулярной лупой МБС-2 или МБС-1. Устанавливаются агрегаты минералов, их габитус и форма выделений, процентное содержание. Приводится описание породы с её диагностикой. При макроскопическом исследовании проводится также отбор мономинеральных фракций для последующих микрохимических реакций.

**На втором этапе** производится определение природы радиоактивности с помощью качественных реакций на уран и торий.

### **Реакции на уран**

1. *Реакция с  $K_4Fe(CN)_6$  + KJ + гипосульфат.* Каплю солянокислого раствора уранового минерала помещают на полоску фильтровальной бумаги, прибавляют каплю водного раствора жёлтой кровяной соли, при этом фильтр окрашивается в бурый цвет вследствие выпадения железисто-синеродистого уранила. В присутствии железа, меди, молибдена и других элементов, мешающих этой реакции, каплю крепкого раствора KJ помещают на полоску фильтровальной бумаги, прибавляют каплю испытуемого раствора. Бумага окрашивается в тёмно-коричневый (до черного) цвет за счёт воды. Затем каплей гипосульфата обеспечивают густо окрашенное пятно. Последующее прибавление раствора  $K_4Fe(CN)_6$  при наличии урана даёт красно-бурое окрашивание (выпадение железисто-синеродистого уранила). Рекомендуется использовать минимальное количество реактивов, так как избыток их может привести к неясному результату.

2. *Реакция с жёлтой кровяной солью.* Наиболее простая и широко распространённая реакция проводится следующим образом: в фарфоровый тигель или чашечку помещают несколько крупинок минерала, затем добавляют до полного растворения 50%-ю азотную кислоту. После этого прибавляют 2–3 капли 5–20%-й жёлтой кровяной соли. Наличие урана, а также элементов (медь, титан, хром, молибден) вызывает образование красно-бурого осадка или красно-бурое окрашивание раствора. Дальнейшая диагностика бурого ферроцианида должна производиться разложением его слабым раствором едкой щёлочи (NaOH). При этом все бурые осадки разлагаются: ферроцианид урана переходит в жёлтый осадок биураната натрия, медь – в голубоватую гидроокись, молибден – в бесцветный раствор, титан – в белый студенистый осадок гидроокиси, хром – в зелёный раствор щелочного хромита.

3. *Реакция с перекисью водорода.* Несколько зёрен испытуемого минерала растворяют на часовом стекле в 3–5 каплях концентрированной HCl, затем добавляют несколько крупинок Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> до полной нейтрализации раствора (прекращения шипения). Влажный остаток растворяют в 3–5 каплях воды и прибавляют 1–2 капли H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Наличие урана вызывает жёлтое окрашивание раствора. Открытию урана мешают ванадий и редкие земли, которые в случае необходимости высаживаются фосфорнокислым натрием.

### **Реакция на торий**

1. *Реакция с тороном.* К слабокислому раствору минерала или раствору сплава минерала с содой прибавляют 1–2 капли 0,05–0,1%-го водного раствора реактива *торон*. В случае присутствия тория и в зависимости от его количества раствор приобретает розовую окраску или выпадает малиново-красный осадок. Реакцию рекомендуется вести в фарфоровом тигле или крышке.

### **На третьем этапе**

1. *Растворимость в кислотах.* Растворимость урановых минералов имеет большое значение при их определении и позволяет делать предварительные выводы о характере минерального соединения.

Относительно легкая растворимость главной массы урановых минералов в кислотах положена в основу микрохимического метода определения урана и метода отпечатка.

Все соединения шестивалентного урана растворимы в минеральных кислотах, даже в разбавленных (5–10%-х), причём степень растворимости различных химических групп минералов различна. Соединения четырёх- и шестивалентного урана полностью растворимы только в азотной кислоте, причём растворению предшествует окисление U<sup>IV</sup> до U<sup>VI</sup>.

При определении урановых минералов, в частности при проведении качественных химических реакций, нужно учитывать следующие данные о растворимости минералов:

1. Некоторые сульфаты (например, иоганнит, частично уранопилит и отдельные разновидности циппеита) растворимы в воде, другие – в разбавленной соляной кислоте.

2. Шрёкингерит (сульфаткарбонат) частично растворим в воде и полностью в соляной кислоте слабой (5%-й) концентрации. При растворении в кислоте выделяются многочисленные пузырьки углекислоты.

3. Карбонаты легко растворимы в разбавленной соляной кислоте и при её воздействии выделяют многочисленные пузырьки углекислоты.

4. Фосфаты, арсенаты и ванадаты растворяются в слабой соляной и других минеральных кислотах. При воздействии концентрированной соляной кислоты на ванадаты раствор окрашивается в густой вишнёво-красный цвет.

5. Простые и сложные гидроокислы урана растворяются в разбавленной соляной кислоте при подогревании с выделением редких пузырьков хлора.

6. Силикаты разлагаются в разбавленной соляной кислоте при слабом нагревании с переходом урана в раствор и выделением геля кремнезема.

7. Окислы урана растворяются в минеральных кислотах, причём степень растворимости их находится в прямой зависимости от содержания в них шестивалентного урана и редких земель.

8. Титанаты, танталониобаты и торосиликаты лишь частично растворяются при длительном кипячении с серной кислотой, некоторые из них разлагаются только с поверхности. Перевод этих соединений в растворимое состояние осуществляется главным образом сплавлением с пиросульфатом калия, фторидом натрия или калия, селитрой (пять весовых частей  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и одна часть  $\text{KNO}_3$ ).

2. *Определение химического состава группы минералов с выделением подкласса.* Проводится определение химического состава группы минералов с выделением подкласса. Для этого используется свойство растворимости урановых минералов с кислотами. Выделяются следующие подклассы минералов:

1. **Карбонаты.** Минералы растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$  с бурным вскипанием. Реакция с  $\text{BaCl}_2$  на  $\text{SO}_4$  – отрицательная. Реакция с  $\text{BaCl}_2$  на  $\text{SO}_4$  – положительная – сульфаткарбонаты.

2. **Силикаты.** Минералы растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$  обычно с медленным выделением пузырьков, при растворении выделяются хлопья или студенистый кремнезём.

3. **Фосфаты.** Минералы легко и полностью растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ . Азотнокислый раствор с молибденово-кислым аммонием даёт обильный жёлтый осадок. Реакция на мышьяк – отрицательная.

4. **Арсенаты.** Минералы легко и полностью растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ . Азотнокислый раствор с молибденово-кислым аммонием даёт обильный жёлтый осадок. Реакция на мышьяк – положительная.

5. **Ванадаты.** Минералы легко и полностью растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ . Солянокислый раствор +  $\text{H}_2\text{O}_2$  даёт красное окрашивание.

6. **Сульфаты.** Минералы легко и полностью растворяются в  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ . Солянокислый раствор +  $\text{BaCl}_2$  даёт выпадение нерастворимого обильного белого осадка  $\text{BaSO}_4$ .

7. **Молибдаты.** Минералы растворяются в HCl и HNO<sub>3</sub> при нагревании. Солянокислый раствор + ксантогенат калия дают малиновое окрашивание.

8. **Селениты.** Минералы растворяются в HNO<sub>3</sub> с выделением красного порошка селена. При нагревании в закрытой трубке дают возгон селена вишнево-красного цвета.

9. **Теллуриды.** Минералы растворяются в концентрированной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, окрашивая раствор в пурпурный цвет.

10. **Оксиды, гидрооксиды и уранаты.** Минералы растворяются в HCl и HNO<sub>3</sub> с медленным выделением пузырьков. Все испытания на анионы отрицательные.

11. **Сложные оксиды с титаном.** Минералы в кислотах почти не растворимы, после сплавления с содой дают положительную реакцию на титан.

12. **Органические соединения.** Минералы в кислотах почти не растворимы, чёрные минералы дают золу при прокаливании.

### 3. *Определение катионного и анионного состава минералов*

#### **Определение анионов**

Для выяснения принадлежности минерала к определенной химической группе (например, силикатов, арсенатов и т. д.) следует определить анионную часть минерала. Реакции проводятся с тщательно отобранным минералом.

**Определение кремнезема.** Зерно минерала размером около 1–2 мм осторожно обрабатывают на часовом стекле несколькими каплями разбавленной соляной кислоты при подогревании. Реакция считается положительной, если минерал обесцвечивается и при этом остается бесцветный скелет кремнезема, сохраняющий первоначальную форму минерала. Можно также обрабатывать минеральный порошок в пробирке, наблюдая затем при встряхивании белые хлопья, а иногда при большей навеске после выпаривания – студень кремнезема.

**Определение фосфора.** Открытие фосфора с молибдатом аммония и бензидином основано на получении в кислом растворе жёлтой комплексной соли фосфорно-молибденовой кислоты H<sub>7</sub>[P(Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>6</sub>]. Последняя легко окисляет бензидин с образованием синих продуктов восстановления молибденовой кислоты и окисления бензидина. Одно-два зерна минерала растворяют в нескольких каплях концентрированной азотной кислоты на часовом или предметном стекле. Затем на фильтровальную бумагу наносят каплю этого раствора, каплю молибдата аммония и каплю уксуснокислого раствора бензидина, после чего её держат некоторое время над склянкой с аммиаком. По мере нейтрализации ки-

слоты пятно окрашивается в синий цвет, указывающий на присутствие фосфора. Интенсивность окраски зависит от количества фосфора, присутствующего в растворе. Реакция очень чувствительна. Приготовление раствора бензидина: 0,05 г основного или солянокислого бензидина растворить в 10 мл концентрированной уксусной кислоты и добавить воды до 100 мл. Приготовление раствора молибдата аммония: 5 г молибдата аммония растворить в 100 мл дистиллированной воды, добавить в раствор 35 мл  $\text{HNO}_3$  (уд. вес 1,2) и 2,6 г винной кислоты.

**Определение фосфора с молибдатом аммония.** Два-три зерна минерала растворяют в соляной кислоте, и к полученному раствору добавляют кристаллик молибдата аммония. Присутствие фосфора вызывает образование жёлтого осадка фосфоромолибдата аммония.

Аналогичную реакцию с молибдатом аммония могут давать арсенаты и силикаты. Прибавление винной кислоты к раствору молибдата препятствует образованию синей окраски от мышьяка и кремнезема. В присутствии указанной кислоты реакция характерна только для фосфора.

**Определение мышьяка** производится при помощи следующих реакций: 1) с азотнокислым серебром и металлическим цинком; 2) хлористым оловом; 3) молибдатом аммония. Последняя реакция не специфична потому, что соединения мышьяка так же, как и соединения фосфора, дают в этом случае жёлтый кристаллический осадок (см. «Определение фосфора»).

*1. Определение мышьяка с азотнокислым серебром и металлическим цинком* основано на выделении чёрного осадка металлического мышьяка при восстановлении мышьяковых солей металлическим цинком в кислой среде.

Два-три зерна минерала растворяют в соляной кислоте в стеклянной чашечке, которую затем ставят на кусок фильтровальной бумаги, смоченной крепким раствором азотнокислого серебра. В чашечку опускают кусочек металлического цинка, и все покрывают небольшой перевернутой стеклянной воронкой с запаянным концом. Потемнение фильтровальной бумаги указывает на присутствие в растворе мышьяка. Последний в виде тяжёлого газообразного мышьяковистого водорода, образовавшегося при взаимодействии освобождённого цинком водорода соляной кислоты с ионом  $(\text{AsO}_4)^{3-}$ , находящимся в растворе, восстанавливает бесцветное азотнокислое серебро до металлического (чёрного) цвета. Реакция очень чувствительная, с ее помощью открывают даже незначительное количество мышьяка.

*2. Определение мышьяка с хлористым оловом* основано на выделении чёрного осадка металлического мышьяка.

Одно-два зерна минерала растворяют в нескольких каплях концентрированной соляной кислоты при нагревании, прибавляют 10–15 капель свежеприготовленного раствора хлористого олова и кипятят в течение 1–2 мин. Благодаря присутствию мышьяка раствор окрашивается в бурый цвет, и из него постепенно выпадает чёрный осадок. Раствор хлористого олова должен быть свежеприготовленным, так как при хранении он окисляется. Приготовление: 0,5 г металлического олова растворяют при нагревании в 10 см<sup>3</sup> концентрированной соляной кислоты.

**Определение сульфатной серы.** К минералу, растворённому в соляной кислоте, прибавляют несколько капель водного раствора хлористого бария. Появление белого кристаллического осадка сернокислого бария указывает на присутствие сульфатной серы.

**Определение ванадия.** Реакция на ванадий с перекисью водорода основана на образовании розовой надванадиевой кислоты ( $HVO_4$ ) в кислом растворе. Одно-два зерна минерала растворяют в соляной кислоте при слабом нагревании, прибавляют 2–3 капли перекиси водорода. Появление розовой окраски указывает на присутствие пятиоксида ванадия. Реакция чувствительная. При воздействии крепкой соляной кислоты на некоторые ванадаты (карнотит) непосредственно в штупфе появляется густое вишнёво-красное окрашивание образца.

**Определение тантала и ниобия.** Большая часть тантало-ниобатов трудно или совсем не растворяется в кислотах, поэтому разложение их производится путем сплавления с пиросульфатом калия ( $K_2S_2O_7$ ) или едким калием (KOH). Наиболее надёжным методом открытия тантала и ниобия в минералах является реакция с таннином.

С шестикратным количеством пиросульфата калия в фарфоровом тигле сплавляют 1–2 мг тонко растёртого минерала. После охлаждения сплав растворяют в 1 мл горячей 5%-й серной кислоты, содержащей 1 % таннина, и раствор нагревают до кипения. Земельные кислоты с таннином образуют хлопьевидный окрашенный осадок: в случае присутствия ниобия – киноварно-красного цвета, при наличии соединений тантала – серно-жёлтого цвета. При одновременном присутствии тантала и ниобия цвет осадка зависит от соотношения этих элементов. Реакцию необходимо проводить в горячем растворе. При охлаждении и продолжительном стоянии образуется бурая муть или выпадает небольшой грязно-бурый осадок, даже в отсутствии тантала и ниобия.

Открытие земельных кислот мешают вольфрам, образующий с таннином буро-чёрный осадок, и небольшое количество кремнезема, гидролиз которого может маскировать окраску осадка ниобия и тантала.

В присутствии вольфрама определение ниобия и тантала может быть проведено после предварительного отделения вольфрама путём обработки материала насыщенным раствором углекислого аммония.

### Определение катионов

После отнесения минерала по его анионной части к соответствующей химической группе производится определение катионов.

**Определение урана.** Для обнаружения шестивалентного урана пользуются следующими реакциями: 1) с ферроцианидом калия; 2) реактивом *уранон-1*; 3) ализаринсульфонатом натрия. Однако все эти реакции недостаточно специфичны на уран. Наиболее чувствительной является реакция с ферроцианидом калия.

1. *Определение урана с ферроцианидом калия*  $K_4[Fe(CN)_6]$ . Минерал или пробу измельчённого образца помещают в маленькую фарфоровую чашечку (тигель), на часовое или предметное стекло, растворяют в 3–5 каплях соляной кислоты, иногда при лёгком подогревании. На фильтровальную бумагу наносят каплю 5%-го ферроцианида калия, а затем в центр образовавшегося пятна опускают каплю испытуемого раствора. При наличии урана образуется красновато-коричневое пятно с той или иной степенью интенсивности. При малых содержаниях урана в исследуемом образце для повышения концентрации элемента рекомендуется добавить еще одну каплю ферроцианида калия и испытуемого раствора или раствор несколько подогреть.

Реакцию можно провести также непосредственно в чашечке или на предметном стекле, вводя осторожно в раствор 2–3 капли ферроцианида калия. Образование красновато-коричневого осадка или окрашивание раствора (в случае небольшого содержания элемента) указывает на присутствие урана. Пользуясь этой реакцией, можно обнаружить уран даже при наличии его в минимальном (0,1 %) количестве.

Открытию урана с ферроцианидом калия мешают железо, медь и молибден, дающие в аналогичных условиях интенсивное окрашивание (железо – синий осадок берлинской лазури, медь – красно-бурый осадок и молибден – жёлто-бурое окрашивание раствора).

- *Определение урана в присутствии молибдена.* В случае присутствия в образце молибдена после прибавления к раствору ферроцианида калия необходимо прибавить 2–3 капли 20%-го раствора уксуснокислого натрия или 5%-го раствора едкого калия. Жёлто-бурое окрашивание раствора, обусловленное присутствием в образце молибдена, исчезает, а красно-коричневый цвет осадка, связанный с присутствием урана, со-

храняется. При этом чувствительность реакции значительно снижается (в 2–3 раза).

- *Определение урана в присутствии железа и меди.* Каплю раствора йодида калия помещают на фильтровальную бумагу, а когда раствор впитывается, то наносят каплю испытуемого раствора. На образовавшееся коричнево-чёрное пятно наносят ещё каплю йодида калия. Выделившийся при этом свободный йод обесцвечивается 20%-м раствором тиосульфата натрия, после чего на обесцвеченное пятно, ближе к периферии, наносят каплю раствора ферроцианида калия. Образовавшееся красновато-коричневое кольцо или пятно указывает на присутствие урана.

Эту реакцию можно проводить на часовом стекле или в фарфоровом тигле. К фильтрату добавить 1–2 капли раствора йодида калия с последующим введением тиосульфата натрия до исчезновения тёмно-бурой окраски йода. Каплю обесцвеченного раствора перенести на фильтровальную бумагу и добавить ферроцианид калия. Чувствительность реакции 0,5–1 %.

2. *Определение урана с раствором уранон-1 (ортооксиазоарсиновая кислота).* Реакция выполняется в нейтральном или очень слабо кислом растворе, так как избыток минеральной кислоты разрушает образующееся с уранилом соединение. Учитывая это обстоятельство, реакцию необходимо проводить в присутствии буферного раствора, в качестве которого употребляют уротропин. К слабокислому исследуемому раствору, находящемуся в фарфоровом тигельке или пробирке ёмкостью 2 мл, прибавляют 0,5 мл 25%-го раствора уротропина и после перемешивания – 1–2 капли 0,1%-го водного раствора реактива *уранон-1*. Присутствие урана вызывает переход красного цвета реактива в синий, а при очень малых количествах урана – в сине-фиолетовый.

3. *Определение четырёхвалентного урана с реактивом уранон-1.* Реакция основана на образовании комплексного соединения фиолетового цвета с реактивом *уранон-1* (шестивалентный уран в солянокислой среде не изменяет окраски реактива).

Тонко измельчённый порошок минерала с несколькими крупинками углекислого натра помещают в пробирку и растворяют при нагревании (вплоть до кипения) в 0,5 мл концентрированной соляной кислоты. Выделяющаяся при этом углекислота вытесняет воздух и предупреждает окисление четырёхвалентного урана. После этого добавляют 1 мл дистиллированной воды и несколько капель 0,1%-го водного раствора реактива *уранон-1*. При наличии четырёхвалентного урана жидкость окрашивается в фиолетовый цвет.

**Проверка реакции:** при добавлении одной капли 30%-й перекиси водорода фиолетовая окраска раствора переходит в розово-красную. В случае присутствия тория фиолетовый цвет сохраняется. Необходимо учитывать, что фиолетовую окраску вызывает цирконий, лиловую – алюминий. Однако чувствительность реакции на эти элементы значительно меньше – примерно в 20 раз. Сульфаты, фосфаты и арсенаты мешают образованию фиолетового соединения урана. Реакция с ализаринсульфонатом натрия малочувствительная.

**Определения тория.** Для обнаружения тория применяется специфичная реакция с реактивом *торон*. Минерал или пробу измельчённого образца растворяют в нескольких (3–5) каплях соляной кислоты и добавляют 1–2 капли 0,05–0,1%-го водного раствора реактива *торон*. В присутствии тория жёлто-оранжевая окраска реактива меняется на розовую, при высоком содержании тория осадок окрашивается в красно-малиновый цвет.

Для удобства сравнения меняющейся окраски реактива реакцию рекомендуется проводить на фарфоровой пластинке с двумя углублениями или на двух крышках тигля.

Часть урановых минералов, содержащих торий, может быть переведена в растворимое состояние путём сплавления с углекислым натром. Полученный сплав смачивают несколькими каплями воды и обрабатывают избытком концентрированной соляной кислоты, затем добавляют 1–2 капли азотной кислоты и упаривают почти досуха. Полученный остаток смачивают 2–3 каплями 10%-й соляной кислоты, добавляют 3–5 капель дистиллированной воды и слегка подогревают. К этому раствору добавляют реактив *торон*.

**Определение меди.** Урановые минералы, содержащие в своём составе медь, обычно окрашены в изумрудно- или серовато-зелёный цвет. Обнаружить медь в образце можно при помощи аммиака. К минералу, растворённому в нескольких каплях соляной кислоты, прибавляют 1–2 капли аммиака (до резкого запаха). Синее окрашивание раствора в результате образования комплексного аммиачно-медного соединения указывает на присутствие меди. Известная реакция на медь с ферроцианидом калия, основанная на образовании нерастворимого красно-бурого осадка, к медьсодержащим урановым минералам не применима, так как подобного цвета осадок образуется также с ураном.

**Определение бария.** 1. Барий в минерале можно обнаружить по окрашиванию пламени в зелёный цвет. Чистую платиновую проволоку в пламени горелки смачивают в химически чистой концентрированной соляной кислоте и погружают в порошок минерала. После этого вносят проволоку в несветящееся пламя горелки.

2. Определение бария с родизонатом натрия основано на образовании красного-бурого родизоната бария в нейтральной среде. Несколько зерен минерала растворяют в соляной кислоте на предметном или часовом стекле. Нейтрализуют раствор содой до слабокислой реакции и переносят каплю на фильтровальную бумагу. На сырое пятно наносят каплю родизоната натрия. Присутствие бария вызовет красное окрашивание. Это реакция неспецифична, так как соли стронция и тяжёлых металлов дают подобную реакцию.

3. Определение бария с серной кислотой. К минералу, растворённому в соляной кислоте, прибавляют несколько капель серной кислоты. Присутствие бария характеризуется образованием обильного тонкокристаллического осадка.

**Определение свинца с йодидом калия.** Несколько зёрен минерала растворяют в соляной кислоте, раствор выпаривают досуха. К сухому остатку прибавляют несколько кристалликов йодида калия и хорошо растирают стеклянной палочкой с оплавленным концом. Появление жёлтого окрашивания указывает на присутствие свинца. Для получения более чёткой реакции полезно обработать эту смесь каплей воды даже в том случае, если пожелтения не наблюдалось. После обработки водой заметно выступают золотистые блёстки йодида свинца.

**Определение марганца по окраске сплава.** Перл, полученный при сплавлении соды с селитрой в ушке платиновой проволоки, окрашивается в присутствии марганца в голубовато-зелёный цвет.

**Определение марганца с надсерноокислым аммонием.** Одно-два зерна минерала растворяют в нескольких каплях концентрированной серной кислоты, прибавляют 2–3 капли водного 10%-го раствора азотнокислого серебра  $\text{AgNO}_3$  и несколько мелких кристаллов надсерноокислого аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ . Все соли марганца окисляются с образованием иона  $\text{MnO}_4$ , окрашивающего раствор в фиолетовый цвет.

**Определение молибдена с ксантогенатом калия.** Одно-два зерна минерала сплавляют с содой в ушке платиновой проволоки. Затем сплав растворяют в 3–4 каплях соляной кислоты (1:1) и к полученному слабокислому раствору прибавляют один кристаллик ксантогената калия. Окрашивание раствора в красный цвет указывает на присутствие молибдена. Реакция очень чувствительная и специфичная.

**Определение калия.** Несколько зёрен минерала дважды обрабатывают серной кислотой. В отдельном тигле растирают несколько кристалликов сульфата кобальта с таким же количеством нитрата натрия ( $\text{NaNO}_2$ ) и получают смесь красно-оранжевого цвета. Минимальное количество смеси переносят в тигель, в котором обрабатывали минерал.

Переход окраски (после непродолжительного растирания) из красновато-оранжевой в желтовато-зелёную является указанием на присутствие калия.

**Определение титана.** Простой и хорошей для открытия титана является реакция с перекисью водорода в кислой среде.

В фарфоровом тигле сплавляют 1–2 мг тонко растёртого минерала с 10- или 15-кратным количеством пиросульфата калия ( $K_2S_2O_7$ ). После охлаждения сплав растворяют в 0,5 мл разбавленной (5%-й) серной кислоты. Если раствор окрашен в жёлтый цвет (от присутствия железа), прибавляют 2–3 капли концентрированной фосфорной кислоты для обесцвечивания. К полученному раствору добавляют несколько капель 3%-го раствора перекиси водорода. Образование надтитановой кислоты жёлтого или оранжево-красного цвета указывает на присутствие титана. Цвет раствора зависит от концентрации титана.

Открытию титана мешают хром, ванадий, молибден. Для отделения этих элементов минерал сплавляют со смесью соды и селитры. Сплав растворяют в небольшом количестве воды, причем все эти элементы переходят в раствор, а титан остаётся в осадке. Его отфильтровывают, промывают водой, растворяют в серной кислоте и добавляют несколько капель 3%-го раствора перекиси водорода.

**На четвёртом этапе** проводится детальное микроскопическое исследование зёрен минералов с помощью микроскопов (ПОЛАМ С-111). В этом случае для каждого минерала приводится характеристика его оптических свойств, плеохроизм, цвет интерференции, осьность, удлинение положительное или отрицательное, угол  $2V$  и показатель преломления. Проводят замеры зёрен, устанавливают взаимоотношения минералов. Наиболее характерные и показательные кристаллы, взаимоотношения минералов иллюстрируют рисунками.

На данном этапе очень важным в теоретическом плане является составление модели месторождения с её специфической зоной окисления. Данное обобщение имеет элементы самостоятельных научных исследований, которые базируются на анализе полученного фактического материала, а также изучении литературных источников. По результатам исследования проводится реконструкция месторождения с её характерными условиями образования минералов и зоной окисления. Определяется химизм процесса, который позволил образовываться тем или иным минералам.

Учитывая особенности состава первичных руд урановых месторождений, Г.С. Грицаенко, Л.Н. Беловой, Р.В. Гецевой и К.Т. Савельевой разработана и предложена классификация типов зон окисления. На собственно урановых месторождениях зоны окисления представлены гидро-

кисдно-силикатным типом или собственно силикатным. На сульфидно-урановых месторождениях зоны окисления подразделяются на типы: силикатно-слюдковый, слюдко-лимонитовый и собственно лимонитовый.

**Гидроксидно-силикатный тип** образуется при превращении настурана в гидронастуран и далее в гидроксид шестивалентного урана. Дальнейшее присоединение свинца, меди или висмута приводит к образованию, соответственно, кюрита, ванденбрандеита и ураносферита. Несколько позже под воздействием щелочных грунтовых вод, обогащенных обычно кремнекислотой, образуются силикаты: уранофан, бета-уранотил, казолит и реже яхимовит (купроскладовскит). Преобладает уранофан. Возможно образование и урановых слюдок – отенита, редко – метацейнерита и ураноспинита. Установлено, что гидроксидно-силикатный тип зон окисления на месторождениях мало распространен. Существенно гидроксидные зоны окисления отмечаются в пегматитовых и уран-карбонатных месторождениях, залегающих в породах, не способствующих быстрому обогащению вод кремнеземом.

При условии обогащения вод кремнеземом зоны окисления собственно урановых месторождений всё более сдвигаются в сторону силикатной составляющей. Силикатные зоны окисления значительно более распространены.

**Собственно силикатный тип** зоны окисления характеризуется преобладанием силикатов: уранофана, казолита, складовскита, соддиита, яхимовита и др. Этот тип зоны окисления развивается на урановых месторождениях, содержащих все же некоторое количество сульфидов. Их обычно недостаточно для создания «кислых» вод.

**Силикатно-слюдковый тип** – зоны окисления образуются над сульфидно-урановыми месторождениями, в которых содержание сульфидов еще невелико (в особенности пирита). Уранофан в этом типе окисления продолжает играть важную роль, но столь же существенно распространен отенит, а в некоторых случаях (в зависимости от состава сульфидов в первичных рудах) торбернит и ренардит – уранофосфаты меди и свинца. При наличии в первичных рудах арсенопирита или мышьяксодержащей блеклой руды, в зоне окисления образуются урано-арсенаты: ураноспинит, новачекит, метацейнерит и др.

**Собственно слюдовый тип** зоны окисления типичен для месторождений, содержащих в составе первичных руд большое количество пирита, арсенопирита, халькопирита, молибденита и других сульфидов. Образующаяся при окислении дисульфидов серная кислота растворяет фосфорсодержащие минералы вмещающих пород (прежде всего апатит) и способствует обогащению вод зоны окисления фтористо-водородной и соляной кислотами.

При окислении и растворении арсенопирита и других мышьяксо-держащих минералов (например, теннантита) растворы обогащаются анионами мышьяковой кислоты. Эти условия благоприятны для образования урановых слюдок, состав которых зависит от наличия в водах меди, кальция, свинца и других катионов. Типичными в слюдковой зоне являются метацейнерит, торбернит, бассетит, отенит, ураноспинит, ураноцирцит.

*Слюдково-лимонитовый и собственно лимонитовый типы* образуются при преобладании в первичных рудах сульфидов. При этом важно, чтобы среди сульфидов был значительно распространен пирит, а среди жильных образований и во вмещающей породе – немного минералов (нейтрализаторов кислот). В процессе развития данных типов зон окисления значительное количество урана выносится, но часть его сохраняется в связи с образованием торбернита или отенита, частично уран сорбируется лимонитом. Однако обедненная ураном зона окисления характеризуется обычно высокими уровнями гамма-излучения, обусловленного связанным сульфатами радиобаритом.

Преобладание сульфидов над первичными минералами урана может привести к полному уничтожению вторичных минералов урана и образованию собственно лимонитовой зоны окисления.

Замещение урановых слюдок лимонитами может проходить с образованием своеобразных псевдоморфоз: лимониты не только сохраняют форму слюдок, но и приобретают специфический бронзовый оттенок.

Перечисленные типы зон окисления урановых месторождений обычно связаны между собой развитием зон промежуточного, переходного вида.

### **2.3. Содержание и оформление отчета**

После выполнения лабораторной работы представляется отчёт. Рукописный или печатный текст помещается на стандартных листах формате А4. Объём текста – 10–15 страниц.

Работа включает следующие разделы:

1. Введение.
2. Общая радиоактивность штуфа. Его макроскопическая характеристика.
3. Исследование радиоактивного вещества.
4. Микроскопическая характеристика образца. Схема зоны окисления.
5. Генезис минералов.
6. Список литературы.

**Во введении** необходимо указать цель работы, исходный материал и основные задачи исследования.

**Во втором разделе** первоначально следует определить радиоактивность образца, затем изучить люминесценцию минералов. Описать породу: цвет, структуру, текстуру и название. Перечислить все минералы, причём для каждого минерала следует дать детальное его описание по схеме: распространённость минерала (количество в штуфе, %), характер агрегатов (выделений), форма и размеры зёрен (кристаллов).

**В третьем разделе** указывается цель применения определённого метода исследования радиоактивного вещества, излагаются поочерёдно полученные результаты и даётся их интерпретация.

**В четвёртом разделе** приводятся результаты микроскопического исследования. В этом случае для каждого минерала приводится детальное его описание: плеохроизм, цвет, интерференция, осьность, удлинение положительное или отрицательное, угол  $2V$ , показатели преломления. Приводятся размеры кристаллов (выделений), характер распределения и диагностические свойства. Отражаются текстурные особенности минералов, взаимоотношения между минералами, причём всё это иллюстрируется рисунками. Приводятся данные микрохимических реакций на катионы и анионы.

На основании всего имеющегося материала составляется модель месторождения с её специфической зоной окисления.

**В пятом разделе** приводятся выводы об условиях образования минералов. Они делаются на основе вышеизложенного материала. Указывается значимость минерала в качестве промышленного источника урана.

**В конце работы** приводится список литературы, использованной в процессе выполнения задачи.

Выполненная работа сдаётся для проверки преподавателю в срок, указанный в календарном плане. Образец оформления титульного листа стандартен.

#### **2.4. Список рекомендуемой литературы**

1. Белова Л.И. Зоны окисления гидротермальных урановых месторождений. – М.: Недра, 1975. – 157 с.
2. Бурьянова Е.З. Определитель минералов урана и тория. – М.: Недра, 1972. – 51 с.
3. Галюк В.А. Руководство к лабораторным занятиям по курсу «Минералогия и геохимия радиоактивных элементов». – М.: Высшая школа, 1964. – 137 с.
4. Рафальский Р.П. Физико-химические исследования условий образования урановых руд. – М.: Госатомиздат, 1975. – 147 с.
5. Сидоренко Г.А., Горобец Б.С., Дубинчук В.Т. Современные методы минералогического анализа урановых руд: методическое пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 183 с.

## **Лабораторная работа № 3**

### **«ДИАГНОСТИКА МИНЕРАЛОВ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ»**

#### **3.1. Цель и задачи**

Цель предлагаемой работы – закрепить теоретические знания, которые были изложены в курсе «Минералогия радиоактивных элементов» и получить практические навыки диагностики редкометалльных и редкоземельных промышленных минералов по характерным свойствам.

Задачей данной работы является освоение методов исследований и приобретение навыков правильного их использования для диагностики минералов редких и радиоактивных элементов.

Материал по теме «Диагностика редких и редкоземельных минералов» предлагается для решения в виде задачи, в которую входит штуфф руды. Лабораторная работа выполняется с использованием реальных материалов.

#### **3.2. Схема исследования рудного штуфа**

##### **I этап**

1. Определение общей радиоактивности штуфа и природы радиоактивности.
2. Изучение люминесценции минералов.
3. Выявление растворимости минералов и проведение качественных микрохимических реакций на элементы.

##### **II этап**

1. Макроскопическое исследование минерала с использованием бинокулярной лупы.
2. Расшифровка рентгенограммы и точная диагностика минерала.
3. Лазерный микроанализ.
4. Электронная микроскопия.

##### **III этап**

1. Определение промышленного типа оруденения и описание генетических условий формирования месторождения.

Прежде чем приступить к описанию характерных этапов исследования, необходимо привести следующий перечень основных промышленных минералов редких и редкоземельных элементов, которые рассматриваются в курсе.

### **3.2.1. Минералы редких элементов**

#### *Минералы тантала и ниобия*

1. Пирохлор
2. Микролит
3. Танталит-колумбит
4. Гатчеттолит

#### *Минералы лития*

1. Лепидолит
2. Сподумен
3. Петалит

#### *Минералы бериллия*

1. Фенакит
2. Берtrandит
3. Берилл
4. Хризоберилл
5. Гельвин

#### *Минералы циркония и гафния*

1. Циркон
2. Бадделеит

#### *Минералы рубидия и цезия*

1. Поллуцит

#### *Минералы скандия*

1. Тортвейтит

### **3.2.2. Минералы редкоземельных элементов (по Е.И. Семёнову, 1963)**

#### *Окислы*

1. Лопарит
2. Фергюсонит
3. Самарскит
4. Эвксенит

#### *Карбонаты*

1. Бастнезит
2. Паризит
3. Синхизит
4. Иттрофлюорит

### *Фосфаты*

1. Монацит
2. Ксенотим
3. Рабдофанит
4. Черчит

### *Силикаты*

1. Бритолит
2. Ортит
3. Ринколит
4. Гадолинит
5. Ловчоррит

*Группа минералов, в состав которых входят редкие и редкоземельные элементы*

1. Перовскит
2. Нефелин

## **Этапы исследования<sup>1</sup>**

### **На первом этапе**

1. Общая радиоактивность (МЭД) определяется с помощью гамма-радиометра СРП-68-01, а природа радиоактивности – гамма-спектрометра РКП-305 или РКП-305М.

Значительной радиоактивностью обладают многие редкоземельные минералы, особенно групп окислов (фергюсонит, самарскит), фосфатов (монацит, меланоцерит, рабдофанит), силикатов (ортит, чевкинит, стенструпин и др.). Эта радиоактивность обусловлена высоким содержанием урана и тория в силу того, что они изоморфно замещаются редкими землями. Преимущественно ториевой активностью обладают цериевые фосфаты и силикаты. Ураном в основном обогащены иттриевые минералы группы окислов. Фториды, некоторые карбонаты и фосфаты редких земель обычно не содержат радиоактивных элементов.

2. Люминесценция изучается на приборе ОЛ-1 или ЛСР-101. Люминесценция в ультрафиолетовых лучах очень характерна для циркона (от бледно-жёлтого до ярко-жёлтого и оранжевого) и сподумена (жёлтоватый или розовый).

Редкие земли являются одними из характерных люминогенов, вызывающих люминесценцию ряда минералов: флюорита, апатита, шеелита, циркона, а также, вероятно, барита, гипса, кальцита, церуссита, пиро-

---

<sup>1</sup> Свойства приводятся преимущественно для металлов редкоземельных элементов.

морфита. Под действием катодных ультрафиолетовых и рентгеновских лучей трёхвалентные Sm, Eu, Tb, Dy, Gd интенсивно люминесцируют с характерным линейчатым спектром в видимой части. Двухвалентные самарий и европий дают сплошные спектры в видимой части.  $\text{Sm}^{2+}$  вызывает красное свечение минерала,  $\text{Eu}^{2+}$  – голубое, а  $\text{Yb}^{2+}$  – зеленое.

Из собственно TR-минералов иногда отмечается фиолетовая люминесценция для флюоцерита и зеленая – для иттрофлюорита. Отсутствие люминесценции для многих других редкоземельных минералов может быть объяснено концентрационным гашением.

3. Растворимость и качественные микрохимические реакции на элементы. По степени растворимости минералов можно выделить три группы:

I. Легкорастворимые – бастнезит, паризит, гадолинит, гелвин, лопарит, синхизит.

II. Труднорастворимые – колумбит, монацит, танталит, циртолит.

III. Нерастворимые – бадделейт, ксенотим.

Минералы труднорастворимые, особенно нерастворимые, сплавляются с содой ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), пиросульфатом калия ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ ), бурой ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) или со смесью соды и селитры (5 весовых частей  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и одна часть  $\text{KNO}_3$ ). Иногда в качестве плавня употребляется KOH или NaOH. Для быстроты и надежности выполнения операции исследуемый минерал нужно предварительно растереть в ступке вместе с плавнем. Плавление производится в платиновой проволочке на спиртовке. Соотношение количества плавня к количеству исследуемого минерала составляет 6:1 или 8:1. Растворение минералов сопровождается окрашиванием раствора, выделением газовых пузырьков, шипением, вскипанием и выпадением осадка. Одни из них явления стойкие и длительные, другие – мгновенные. Одни – заметны невооруженным глазом, другие фиксируются только под биноклем.

### **Минералы редких элементов**

**Пирохлор** – в порошке с трудом растворяется в HCl, но разлагается в конц.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и HF, легко разлагается при сплавлении с  $\text{KHSO}_4$ .

**Колумбит** после сплавления с KOH и обработки разбавленной HCl или  $\text{H}_2\text{SO}_4$  дает прочную синюю окраску при прибавлении металлического цинка.

**Танталит** после сплавления с  $\text{KHSO}_4$  и обработки HCl дает желтый раствор и тяжелый белый осадок, ярко синеющий при прибавлении металлического цинка и исчезающий при разбавлении водой.

## Минералы редкоземельных элементов

**Карбонаты** – наиболее легко разлагаются с бурным выделением пузырьков  $\text{CO}_2$  в кислотах водные карбонаты TR (лантанит, тенгерит), а также карбонаты TR, Ba, Sr (кордилит, анкилит). В ряду *бастнезит–паразит–синхизит* наиболее легко разлагаются в кислотах существенно кальциевые члены ряда. Гипергенный бастнезит, находящийся в виде охристых рыхлых агрегатов, растворяется лучше, чем крупнокристаллический гидротермальный бастнезит.

**Фосфаты TR** – хорошо растворимы флоренсит, рабдофанит, черчит, тогда как для разложения монацита обычно используют кипящую  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

**Силикаты TR** – гадолинит, ортит, ринколит, бритолит – в кислотах легко растворяются. Из них легче разлагаются минералы, обогащенные натрием и кальцием, а также минералы, находящиеся в метамиктном состоянии.

**Оксиды TR** – фергюсонит, самарскит, эвксенит, эшинит – наиболее трудно разлагаются. Лопарит, обогащенный натрием и кальцием, растворяется в концентрированной  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

### Качественные микрохимические реакции на элементы

**Бериллий.** Реакция с трёхокисью мышьяка. Измельченный минерал помещается в пробирку, прибавляется серная кислота (одна часть серной кислоты на 5–7 частей воды) с таким расчётом, чтобы покрыть пробу. Затем прибавляется  $\text{NaS}_2\text{O}_3$  и раствор кипятится 1–3 мин. Раствор сливают, остаток несколько раз промывают водой и затем рассматривают под биноклем. Гельвин окрашивается в ярко-канареечно-жёлтый цвет, за счёт присутствия бериллия.

### Литий

1. Окрашивание пламени. Литиевый минерал при прокаливании порошка или мелких зёрен в петле платиновой проволоки окрашивает пламя в карминово-красный цвет.

2. Получение фосфорнокислого лития. Минерал сплавляют с содой и сплав растворяют в соляной кислоте. К раствору прибавляют фосфорнокислый натрий  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  и в случае положительной реакции получают белый цвет.

### Ниобий и тантал

Открытие ниобия и тантала с таннином. Минерал растирают в тонкий порошок, сплавляют с  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$  и растворяют в 1–2 см<sup>3</sup> горячего раствора щавелевокислого аммония. К раствору прибавляют 0,1 г хлористого аммония и 0,02 г сухого таннина и осторожно кипятят в пробирке. Минералы, содержащие тантал, выделяют жёлтый осадок, а содержащие ниобий дают оранжево-красный осадок.

### **Титан**

Реакция с  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Минерал сплавляют с  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ . Сплав растворяют в  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:1) и к раствору прибавляют каплю 3 %  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Образование жёлтой надтитановой кислоты указывает на присутствие титана.

### **Фосфор**

Очень характерна реакция на фосфаты TR (монацит, ксенотим, черчит, рабдофанит).

Получение фосфорно-молибденовокислого аммония. Минерал растворяют в азотной кислоте. К раствору прибавляют небольшое количество молибденовокислого аммония, который в присутствии фосфора образует фосфорно-молибденовокислый аммоний жёлто-канареечного цвета.

### **Цирконий**

Реакция определения циркония с ализарином. Минерал сплавляется с содой. Сплав растворяют в нескольких каплях 10 %  $\text{HCl}$ . Каплю раствора переносят на фильтровальную бумагу, прибавляют каплю раствора ализарина, получается красно-бурый хлопьевидный осадок, не исчезающий от прибавления капли 3 %  $\text{HCl}$ .

### **Церий**

Небольшой кусок минерала тщательно растирается в фарфоровой кюветке, переносится в маленький тигелёк, где обрабатывается 1–2 каплями концентрированной серной кислоты, которая нагреванием тигелька выпаривается досуха. По охлаждении от разложенного минерала отбирается маленькая порция, которая помещается в фарфоровую кюветку, к ней добавляются 3–4 кристаллика карбоната калия  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и смесь растирается, затем обрабатывается 1–2 каплями перекиси водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$ . В присутствии церия появляется желтая окраска. При малых содержаниях церия после прибавления  $\text{H}_2\text{O}_2$  кюветка подогревается, отчетливо желтая окраска выступает быстрее и интенсивнее.

### **На втором этапе**

#### *1. Макроскопическое описание и диагностика минералов*

Детальное изучение минералов проводится с помощью бинокля (МБС-2). Диагностируются по характерным кристалломорфологическим и другим макроскопическим свойствам (цвет и т. д.) все минералы, причём основной упор делается на редкометалльные и редкоземельные. Описываются агрегаты, габитус кристаллов, спайность, излом, цвет, цвет черты, твердость и т. д. Отбирают также монофракции минералов весом 100–200 мг на рентгеноструктурный анализ.

#### *2. Расшифровка рентгенограммы*

В данном случае ведут диагностику минерала по результатам рентгеноструктурного анализа, выполненного на установке ДРОН-3М. Диагностика заключается в расшифровке рентгенограммы каждого минерала. Проводится расшифровка согласно методическим указаниям, составлен-

ным специально для рентгеноструктурных исследований. Эта работа включает в себя элементы самостоятельных научных исследований.

### *3. Лазерный микроанализ*

Данное исследование выполняется с использованием ЛМА-10. Мелкий обломок минерала готовят для исследования на лазерном микроанализаторе. Получают спектрограмму минерала или нескольких минералов, а затем по преобладанию основного химического элемента или элементов проводят диагностику минералов. Проводится расшифровка спектрограммы согласно методическим указаниям, составленным специально для лазерного микроанализа.

### *4. Электронная микроскопия*

Современная электронная микроскопия (ЭМ) включает просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ), растровую электронную микроскопию (РЭМ) с микронзондовым анализом и электронную микроскопию – микронзондовый анализ (ЭММА), которые взаимно дополняют друг друга.

Приготовление препаратов – необходимая и составная часть электронной микроскопии. Существуют прямые и косвенные методы изучения в просвечивающем электронном микроскопе. Прямой метод изучения предусматривает приготовление препарата непосредственно из вещества объекта, который можно поместить в колонну микроскопа для исследования. Необходимое условие для препаратов в этом случае – прозрачность для электронов. Столь же существенно, чтобы строение тонкого образца, наблюдаемого с помощью электронного микроскопа, было характерно для минерала и в массивном состоянии, т. е. не изменялось в процессе приготовления.

Другое ограничение выбора образцов, пригодных для исследования, объясняется сложностью интерпретации микроструктуры при наличии слишком большого числа деталей в поле зрения. Это требует использования высовольтовой электронной микроскопии и стереосъемки для облегчения расшифровки строения ультратонкого препарата минерала.

В ЭМ минералов приготовление ультратонкого препарата решается несколькими способами: путем дезагрегации с помощью ультразвукового диспергатора минералов, обладающих идеальной спайностью. Таким путем получают препараты толщиной до 10 нм. Подобные препараты обладают минимальными деформационными искажениями и на них можно реализовать максимально возможное для ЭМ разрешение 0,1–0,5 нм, фактически увидеть кристаллическую структуру объекта. Для этой цели необходимое количество вещества составляет доли миллиграмм. Если образцы не имеют идеальной спайности или гетерогенны по фазовому составу, для получения препарата применяют методику ультратонких срезов с последующим удалением деформированных слоев ионным пучком. Ультратонкие срезы получают на специальных при-

борах ультрамикротомов с алмазными, сапфировыми и другими ножами. С целью приготовления препарата данным способом необходимы 1–2 зерна вещества размером в доли миллиметров.

*Метод ионного утонения* может самостоятельно применяться для получения ультратонкого препарата. Обычно для этой цели используются прозрачные минералогические шлифы. Этот способ получения препарата удобен тем, что представляется возможность изучения одних и тех же участков шлифа в оптическом микроскопе, микронзонде и электронном микроскопе.

К косвенным методам исследования в электронном микроскопе следует отнести *метод реплик*, заключающийся в том, что на свежесколотую поверхность минерала путем термического распыления наносится уголь или чистый металл, или вместе то и другое. Затем пленку (реплику) отделяют от объекта и просматривают в микроскопе. Так как реплика является лишь копией поверхности скола минерала, она не позволяет исследовать вещество, поэтому разработан *метод реплик с экстракцией*. Он предусматривает возможность извлечения на реплику частиц вещества минерала, чаще гетерогенных его участков, что обеспечивает исследование наряду с копией и самого вещества.

Для растровой электронной микроскопии способы приготовления препаратов несравнимо проще. Исследования проводятся непосредственно на минералогических объектах, на поверхность которых предварительно нанесен проводящий слой. Размер объекта лимитируется камерой объекта прибора.

**На третьем этапе** очень важным в теоретическом плане является обобщение результатов и выбор геолого-промышленного типа месторождения с характерными условиями минералообразования. Данные выводы имеют элементы самостоятельных научных исследований, которые базируются на анализе полученного фактического материала, а также изучении литературных источников [4, 5, 9].

### **3.3. Содержание и оформление отчета**

После выполнения лабораторной работы представляется отчет. Рукописный текст помещается на стандартных (297×210 мм) или нестандартных листах. Объем текста – 10–12 страниц.

Работа включает следующие разделы:

1. Введение.
2. Радиоактивность штуфа, люминесценция и растворимость минерала.
3. Макроскопическая характеристика.
4. Характеристика рентгенограммы.
5. Характеристика спектрограммы.
6. Генезис минералов и генетико-промышленный тип месторождения.

## 7. Список литературы.

**Во введении** необходимо указать цель работы, исходный материал и основные задачи исследования.

**Во втором разделе** первоначально следует определить радиоактивность образца и ее природу, затем изучить люминесценцию минералов, растворимость и провести качественные микрохимические реакции.

**В третьем разделе** приводится макроскопическая характеристика штуфа руды и детальное описание минералов.

**В четвертом разделе** ведется расшифровка рентгенограммы, полученной на ДРОН-3М. Дается точное название минерала.

**В пятом разделе** приводятся выводы об условиях образования минералов. Указывается значимость минерала в качестве промышленного источника определенного сырья. Определяется возможный промышленный тип месторождения и генетическая модель формирования.

**В конце работы** приводится список литературы, использованной в процессе выполнения задачи.

Выполненная работа сдается для проверки преподавателю в срок, указанный в календарном плане. Образец оформления титульного листа стандартен.

### 3.4. Список рекомендуемой литературы

1. Солодов Н.А., Семёнов Е.И., Бурков В.В. Геологический справочник по тяжёлым литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1987. – 438 с.
2. Солодов Н.А., Бурков В.В., Овчинников Л.Н. Геологический справочник по лёгким литофильным редким металлам. – М.: Недра, 1986. – 321 с.
3. Солодов Н.А. Минералогия литофильных редких металлов. – М.: Недра, 1978. – 106 с.
4. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. – М.: Наука. – Т. 1–3. – 1962, 1964, 1966. – 45 с.
5. Терехов В.Я., Егоров Н.И., Баюшкин И.М., Минеев Д.А. Минералогия и геохимия редких и радиоактивных металлов: учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 360 с.
6. Семёнов Е.И. Минералогия редких земель. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 412 с.
7. Минеев Д.А. Геохимия и минералогия редких металлов: учебное пособие. – М.: Изд-во МГРИ, 1982.
8. Атлас минералов и руд редких элементов / под ред. А.И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1977.
9. Баюшкин И.М., Железняк Н.Н. и др. Месторождения урана и редких металлов (практикум): учебное пособие для вузов. – М.: Атомиздат, 1976. – 288 с.

Учебное издание

ЯЗИКОВ Егор Григорьевич

## МИНЕРАЛОГИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Методические указания по курсу «Минералогия редких и радиоактивных элементов» для магистрантов, обучающихся по направлению 130100 «Геология и разведка полезных ископаемых», специализации «Геология, поиски и разведка руд редких и радиоактивных элементов»

Научный редактор  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор

*Л.П. Рихванов*

Редактор

*М.В. Пересторонина*

Верстка

*В.П. Аршинова*

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова*

*О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 14.11.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,21. Уч.-изд. л. 2,0.

Заказ 783 . Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.