

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**В. В. Михайлов, В. В. Гордиенко**

**ПРОСТЕЙШИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ  
ВЫДЕЛЕНИЯ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ**

*Учебно-методическое пособие*

Санкт-Петербург  
2012

УДК 550.84.02  
ББК 26.31в6  
М69

Рецензенты:

докт. геол.-минер. наук *С. В. Петров* (С.-Петербург. гос. ун-т),  
канд. геол.-минер. наук *И. К. Шулейко* (Ин-т геологии и геохронологии докембрия РАН)

*Печатается по постановлению  
Редакционно-издательского совета  
по направлениям «геология» и «менеджмент»  
Санкт-Петербургского государственного университета*

**В. В. Михайлов, В. В. Гордиенко**

М69 Простейшие лабораторные методы выделения мономинеральных фракций: учеб.-метод. пособие / В. В. Михайлов, В. В. Гордиенко. – СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2012. – 48 с.

Пособие содержит сведения, необходимые для правильной постановки задачи при проведении минералогического и геохимического изучения вещественного состава горных пород и руд, а также описание простейших приемов выделения мономинеральных фракций для приобретения навыков в практической работе студентов, аспирантов и исследователей-геологов. Оно может быть использовано в курсах лекций и практических занятий по дисциплинам геологического профиля.

Предназначено студентам и магистрантам геологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета по специальностям «Геохимия», «Полезные ископаемые», «Рациональное недропользование», «Основы геохимии микроэлементов» и др.

**УДК 550.84.02  
ББК 26.31в6**

© В. В. Михайлов,  
В. В. Гордиенко, 2012  
© Геологический факультет  
Санкт-Петербургского  
государственного  
университета, 2012

## **Введение**

Выделение мономинеральных фракций широко используется в геологии для решения разнообразных задач, как научных, так и чисто производственных. В первую очередь они необходимы для установления количественного минерального состава горных пород и руд, дальнейшего расчета баланса распределения элементов по составляющим породе минералам. Только на основе такого баланса Государственная комиссия по запасам (ГКЗ) принимала решения о рентабельности разработки месторождения полезных ископаемых и включения их в государственный реестр балансовых объектов минерального сырья.

В 60-х годах XX в. Министерством геологии СССР выпускалась малогабаритная обогатительная лаборатория (МОЛМ), оснащенная полным набором аппаратуры для выделения мономинеральных фракций, которая в миниатюре повторяла оборудование обогатительных фабрик горно-обогатительных комбинатов (ГОКов). Она была весьма удобна как для учебной работы со студентами, так и для выполнения научных исследований специалистами. К сожалению, ее оборудование полностью почти нигде не сохранилось, так же как и подробные инструкции по применению. В связи с этим настоящее учебно-методическое пособие в какой-то мере восполняет данный пробел в учебном процессе подготовки геологов широкого профиля.

Методы выделения мономинеральных фракций обычно используют различные физические свойства отдельных минералов, позволяющие отделять их друг от друга в процессах сепарации по плотности и размерности отдельных зерен, магнитности, электрическим свойствам, смачиваемости, окраске и др. Реже учитывают химические свойства минералов, основанные на их избирательной растворимости. В зависимости от поставленной задачи осуществляется разный подход к полноте извлечения минерала из пробы. Часто для ее решения требуется только чистота мономинеральной фракции (отсутствие в ней других минералов). Поэтому в таких случаях не предъявляются большие требования к полноте извлечения нужного минерала. Вполне достаточно знать, что в данной операции выделяется необходимое по весу его количество. Однако следует помнить, что механические методы сепарации минерала могут быть эффективными только в случае отсутствия его сростков в пробе. Потому особое значение приобретает подготовительная стадия обработки пробы – дробление и измельчение, осуществляемые в целях раскрытия зерен от срастания минералов друг с другом.

Особое значение имеет опыт работы исследователя по сепарации проб имеет в случае трудно разделяемых смесей; здесь важно выявить наиболее эффективный метод разделения. Рекомендации общего характера приводятся в настоящей работе, но в конкретных случаях они нуждаются в корректировке.

### **1. ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ИСХОДНЫХ ПРОБ И ОТБОР НАВЕСОК ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Опробование горных пород и руд, проводимое в процессе геологического картирования, поисковых и геологоразведочных работ, является необходимой опера-

цией для установления качества и количества полезного ископаемого, которое определяется по представительным пробам. Исходный вес отбираемого материала для представительной пробы очень широко варьирует – от нескольких сот грамм до сотен и тысяч килограмм, в зависимости от поставленной задачи и вещественного состава объекта опробования. В первую очередь вес представительной пробы зависит от максимального размера составляющих ее фрагментов и рассчитывается по формуле Г. О. Чечотта [1]

$$Q = K \cdot d^2,$$

где  $Q$  – исходный вес пробы (кг);  $d$  – диаметр наибольших частиц пробы (зерен минералов) (мм);  $K$  – коэффициент однородности пробы, зависящий от равномерности распределения полезного компонента в пробе.

Так, для большинства равномерно-зернистых гранитоидов, у которых максимальный размер зерен минералов (кварца или полевых шпатов) не превышает 3 мм, исходный вес представительной пробы составляет около 1 кг, в то время как для порфировидных гранитов с максимальным размером вкрапленников полевых шпатов до 1–2 см он увеличивается до 1–4 кг, а для овоидных гранитов рапакиви – до 250 кг. Вместе с тем вес лабораторных проб, сохраняющих свою представительность при химическом или количественном минералогическом анализе, сравнительно небольшой. Для анализов преобладающего большинства металлических и неметаллических полезных ископаемых считается достаточной навеска от 0,5 до 5–10 г. Для руд золота размер навески в зависимости от содержания металла в пробах принимается чаще всего от 50 до 100 г, для количественного спектрального анализа требуется навеска 50 мг, которая при этом сохраняет свою представительность.

Поэтому важнейшим методическим вопросом в практике обработки проб является определение оптимального веса сокращенных проб для каждой стадии обработки. Оптимальным весом пробы называется тот, до которого может быть сокращена проба данной руды, измельченная до конкретного размера частиц, при условии, что погрешность сокращения не выйдет за допустимые пределы ее представительности, согласно формуле Г. О. Чечотта (табл. 1).

Таблица 1. Значения коэффициента  $K$  в формуле  $Q = K \cdot d^2$  в зависимости от типа руд

Краткая характеристика однородности проб	$K$
Равномерное (руды черных металлов)	0,05
Неравномерные (разнообразное минеральное сырье и горные породы)	0,10
Весьма неравномерное (руды цветных металлов)	0,20–0,30
Крайне неравномерное (руды редких металлов)	0,40–0,50
Крайне неравномерные золотые руды с крупным (больше 0,6 мм) золотом	0,8–1,0

Обработка исходных представительных проб обычно включает следующие последовательные операции: 1) дробление (измельчение); 2) просеивание (грохочение); 3) перемешивание; 4) сокращение. Они могут производиться как вручную, так и при помощи различных механизмов. Выбор ручного или механического способа обработки проб определяется технико-экономическими соображениями. При этом главными факторами, подлежащими учету, являются объем и срок производства

работ. Значительный объем опробования требует полной механизации обработки проб или во всяком случае механизации ее наиболее трудоемкой операции – измельчения.

Дробление (измельчение) исходных проб большого веса (более 500 кг) производится на барабанных мельницах, где руда измельчается во вращающемся стальном цилиндре под ударами свободно падающих тел, какими являются дробильные шары (стальные или керамические) и крупные куски самой руды. Измельчение проб меньшего веса до нужного размера зерна осуществляется на валковых, щековых, шаровых и других лабораторных измельчителях (дробилках).

После дробления и просеивания пробы тщательно перемешивают на брезенте, плотном полотне, резине или клеенке перекачиванием. В дальнейшем они сокращаются квартованием. По методу «кольца и конуса» сокращаемая проба рассыпается ровным слоем, ограниченным кольцом, который при помощи крестовины, а при малых объемах – пластинки делится на четыре равные части (квадранта). Два противоположных квадранта отбрасывают, а два оставшихся подвергают дальнейшему квартованию. Операцию многократно повторяют, пока отобранная проба не будет сокращена до минимально допустимого веса при соответствующей крупности зерна породы, как показано в п. 5 и приложении 1 [2].

Квартование на делителе Джонса (рис. 1) позволяет значительно экономить время на сокращение проб. Выделение средней пробы производят на рифленом делителе плавным перемещением чашки с пробой поперек рифлей. Проба делится на две части, любая половина вновь делится пополам и далее, пока не будут получены 100- или 20–30-граммовые навески для последующего истирания до состояния пудры (0,01 мм).

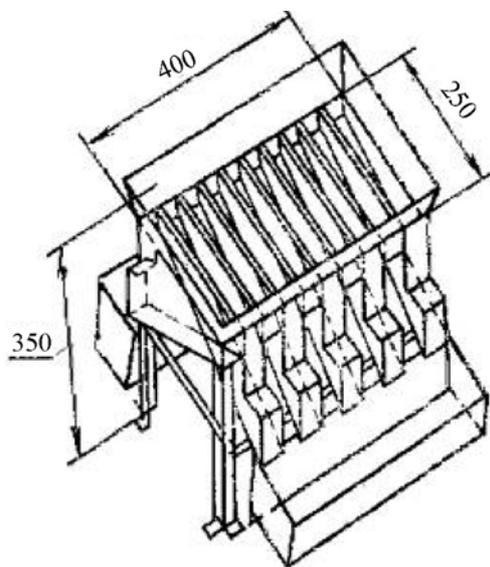


Рис. 1. Делитель Джонса  
Размер указан в миллиметрах.

Истирание измельченной пробы до тонкого порошка осуществляется на дисковых, вибрационных и конусных истирателях.

### 1.1. Дробление

Дробление обычно проводят на дробилках различных конструкций. Чаще применяется дробилка щековая ЛДЩ-60×100 (рис. 2), предназначенная для дробления хрупких материалов средней прочности. В лабораторных условиях она используется для обработки пород, керамики, огнеупоров, строительных материалов.

Комплектация поставки: дробилка в сборе, приемная емкость,  
дополнительное оборудование: пульт управления,  
быстроизнашивающиеся детали: брони, футеровочные пластины.



#### ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛДЩ-60×100

Размеры приемного отверстия, мм (ширина×длина) .....	60×100
Крупность исходного материала, мм, не более .....	50
Размер разгрузочной щели, мм .....	1–10
Крупность дробленого продукта, мм .....	2–15
Производительность (в зависимости от свойств и крупности перерабаты- ваемого материала), кг/ч .....	до 150
Мощность двигателя, кВт .....	1,1
Габаритные размеры, мм:	
длина .....	650
ширина .....	330
высота .....	580
Масса, кг .....	133

Рис. 2. Дробилка щековая ЛДЩ-60×100

Щековая дробилка выдает материал крупностью 2–15 мм и мельче. Поэтому пробу следует пропускать через дробилку многократно, постепенно уменьшая зазор щек до минимума, и просеивать после каждой операции.

### 1.2. Измельчение

Проба с размером зерен меньше 15 мм может измельчаться на дисковом истирателе. Попадая между двумя дисками, один из которых вращается, а другой неподвижен, зерна растираются. Истиратель дисковый ИД-175 (рис. 3) предназначен для измельчения хрупких материалов средней прочности в непрерывном режиме сухим способом.

Комплектация поставки: истиратель в сборе (с приемной емкостью),  
дополнительное оборудование: пульт управления,  
быстроизнашивающиеся детали: диски.

**ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА ИД-175**

Крупность исходного продукта, мм, не более .....	6
Крупность готового продукта, мм ....	0,08–5
Диаметр дисков, мм .....	175
Размер рабочей щели, мм .....	0–5
Производительность (в зависимости от размера рабочей щели и свойств перерабатываемого материала), кг/ч ...	30–100
Мощность двигателя, кВт .....	1,5
Габаритные размеры, мм	
длина .....	570
ширина .....	270
высота .....	445
Масса, кг .....	74



*Рис. 3. Истиратель дисковый ИД-175*

После работы дискового истирателя получается материал размером до 0,1 мм и мельче. Пробу также необходимо просеивать, чтобы избежать ее перетирания.

**1.3. Истирание**

Измельченная проба от 3 мм и отквартованная до определенной навески может быть подвергнута истиранию до состояния пудры (0,05 мм) на следующих агрегатах:

- истиратель вибрационный 75Т-ДРМ (рис. 4) предназначен для доистирания проб в периодическом режиме сухим способом,
- комплектация поставки: истиратель в сборе,
- дополнительное оборудование: пульт управления,
- быстроизнашивающиеся детали: размольная гарнитура;

**ТЕХНИЧЕСКАЯ  
ХАРАКТЕРИСТИКА 75Т-ДРМ**

Количество стаканов, шт. ....	4
Навеска истираемой пробы в одном стакане, г, не более .....	50
Максимальная крупность исходного продукта, мм .....	3
Крупность готового продукта (зависит от времени истирания), мм .....	0,05
Мощность двигателя, кВт .....	0,6
Габаритные размеры, мм	
длина .....	1160
ширина .....	570
высота .....	1160
Масса, кг .....	177



*Рис. 4. Истиратель вибрационный 75Т-ДРМ*

истиратель дисковый лабораторный ЛДИ-65 (рис. 5) предназначен для истирания проб сухим способом в периодическом режиме,  
 комплектация поставки: истиратель в сборе,  
 дополнительное оборудование: пульт управления,  
 быстроизнашивающиеся детали: диски (возможна поставка дисков из металла или корунда);



Рис. 5. Истиратель дисковый лабораторный ЛДИ-65

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛДИ-65	
Крупность исходного продукта, мм, не более .....	2
Крупность готового продукта, мм .....	0,05
Диаметр дисков, мм .....	65
Масса загружаемой пробы, кг, не более .....	0,3
Производительность (в зависимости от размера рабочей щели и свойств перерабатываемого материала), кг/ч, не менее .....	80 проб по 10 г
Мощность двигателя, кВт .....	0,37
Габаритные размеры, мм	
длина .....	340
ширина .....	235
высота .....	230
Масса, кг .....	17

конусная инерционная дробилка КИД-60 шифр 234ДР (рис. 6) предназначена для измельчения хрупких материалов различной прочности в непрерывном режиме,  
 комплектация поставки: дробилка в сборе, пульт управления, ключ торцовый,  
 быстроизнашивающиеся детали: брони.

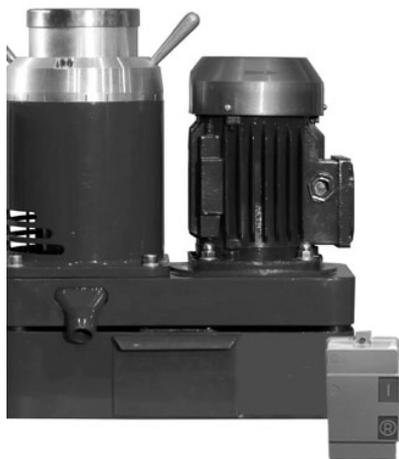


Рис. 6. Конусная инерционная дробилка КИД-60 шифр 234ДР

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КИД-60	
Диаметр основания дробящего конуса, мм .....	60
Наибольший размер исходных кусков, мм .....	5
Производительность (в зависимости от размера рабочей щели и свойств перерабатываемого материала), кг/ч .....	до 10
Крупность дробленого продукта, мм .....	0,2
Мощность привода, кВт .....	0,55
Габаритные размеры, мм	
длина .....	350
ширина .....	230
высота .....	380
Масса, кг .....	30

Полученная после истирания валовая проба квартуется, и нужная навеска отправляется для дальнейших лабораторных исследований.

Кроме названных истирателей в настоящее время существует и много других их конструкций различных фирм и производителей, использующих и иные способы измельчения, например ультразвуковое воздействие, гидродинамический удар и др., способствующие раскрытию зерен минерала без его разрушения.

#### **1.4. Отмучивание**

Отмучивание необходимо, чтобы избавиться от тонкого материала (пыли), который мешает эффективной сепарации минерала. Проба высыпается в емкость, заливается водой в соотношении 1:5 и осторожно размешивается. Взвесь сливается, и так несколько раз, пока вода не будет прозрачной. Пробу просушивают. Во время отмучивания следует аккуратно сливать воду, чтобы не упустить слюду и некоторые дисперсные или плохо смачиваемые минералы. Обесшламленный материал, расситованный по крупности зерен, в дальнейшем подвергается разнообразным операциям для выделения отдельных минералов.

## **2. ПОДГОТОВКА ПРОБ К ВЫДЕЛЕНИЮ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ**

При выделении мономинеральных фракций из пород необходимо убедиться, что нужный минерал в пробе присутствует; следует также в ходе выделения контролировать распределение этого минерала по продуктам обогащения.

Наиболее приемлемым видом контроля являются минералогические определения. Они должны предшествовать выделению мономинеральных фракций. Для этого из типичных образцов пробы изготавливаются шлифы. Просматривая их, устанавливают наличие в пробе тех или иных минералов, характер вкрапленности рудных минералов и степень их взаимного срастания. В ходе макроскопического просмотра образцов и при изучении шлифов под микроскопом может быть в общих чертах определена схема подготовки пробы к обогащению и намечен порядок обработки пробы различными методами сепарации. В некоторых случаях уже на стадии предварительного минералогического анализа может быть выявлена бесполезность обогатительной обработки пробы для получения мономинеральной фракции. Признаками невозможности выделения чистого минерала являются: а) эмульсионная вкрапленность минерала, исключающая его раскрытие в ходе дробления и измельчения; б) взаимное тонкое прораствание минералов, например сульфидов друг в друге; в этом случае речь может идти о получении коллективного сульфидного концентрата, а не отдельных минералов или же о применении избирательного растворения в кислотах или щелочах; в) широкое развитие вторичных процессов, изменивших первоначальный характер строения и состава минерала: выветрелость, глубоко прошедшее поверхностное окисление и т. д.

В лабораторной практике используется комплекс методов предварительной пробоподготовки, применяющихся обычно в следующей последовательности:

1) определение минерального состава визуальным и микроскопическим наблюдением образцов;

2) дробление и измельчение пробы до максимальной крупности 0,5 и 0,25 мм с учетом свойств твердости, хрупкости и ковкости минералов;

3) расситовка пробы на отдельные фракции по крупности;

4) просмотр под биноклем полученных фракций, точная диагностика минералов и выявление их характерных свойств, способствующих выделению в мономинеральные фракции;

5) разработка схемы выделения минералов.

Пробоподготовка начинается еще в поле, где отбирается представительная проба из однородных по зерности, минеральному составу и структуре образцов, вес которых определяется по формуле Г. О. Чечотта. После дробления и измельчения исходной пробы до фракции 0,5 мм, реже 0,25 мм, квартованием отбирается ее представительная часть различного веса в зависимости от дальнейших задач по изучению пробы. Если предполагается проводить количественный минералогический анализ пробы и соответственно выделение мономинеральных фракций, то необходимо произвести ее отмучивание. Для определения химического состава породы пробу следует дотереть до состояния пудры, причем такая навеска отквартовывается до отмучивания.

### 3. СЕПАРАЦИЯ МИНЕРАЛОВ ПО ИХ ФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

Разделение минералов на монофракции реализуется благодаря различию их разнообразных физических свойств, зависящих прежде всего от химического состава: плотности (удельного веса), магнитной восприимчивости, структурным особенностям, механическим свойствам (твердости, упругости, формы и размерности минеральных зерен), свойствам поверхности зерен, оптическим свойствам (окраске и особенностям люминесценции) и др. Все это разнообразие физических свойств минералов используется при обогащении руд и получения промышленных концентратов в больших объемах на обогатительных фабриках ГОКов. В зависимости от конкретных свойств отдельных минералов, способов их разделения и применяемых для этого технических устройств выделяются следующие методы сепараций:

*гравитационная сепарация*, использующая разную скорость движения частиц зерен различных минералов в гравитационном поле. Разделение минералов происходит по их плотности, размерам частиц и их механическим свойствам. Соответственно выделяются такие виды сепарации:

разделение в тяжелых средах (тяжелых жидкостях и суспензиях),

отсадка,

концентрация на сотрясательных столах,

разделение на активных поверхностях,

разделение на винтовых сепараторах и в гидроциклонах;

*магнитная сепарация*, применяющая различную магнитную восприимчивость разных минералов, мало зависящая от других их физических свойств;

*электрическая сепарация*, основанная на различии электрических свойств минералов (электропроводности и диэлектрической проницаемости);

*флотационная сепарация*, использующая электростатические свойства поверхности зерен разных минералов в водной среде – их гидрофильность либо гидрофобность;

*фотометрическая сепарация*, основанная на индивидуальных свойствах минералов поглощать, излучать или отражать излучение в широком спектре длин волн – от инфракрасного до рентгеновского спектра;

*химическая сепарация*, применяющая избирательное отношение минералов к различным активным химическим реагентам;

*термохимическая сепарация*, основанная на избирательном изменении свойств минералов при нагревании;

*биохимическая сепарация*, использующая избирательное воздействие на минералы живых организмов (главным образом бактерий и грибов).

Общая схема процессов обогащения на производственных обогатительных фабриках ГОКов и их последовательность представлены в табл. 2.

**Таблица 2. Общая схема процессов обогащения, применяемая на ГОКах (по [3])**

Этапы	Стадии	Процессы и их последовательность
I. Рудоподготовка	1. Дробление	
	2. Предварительное концентрирование	а) Тяжелосреднее обогащение б) Радиометрическая сепарация в) Спектрометрическая сепарация г) Винтовая сепарация д) Промывка
	3. Усреднение	Усреднение
	4. Измельчение	а) Измельчение б) Классификация
II. Обогащение	1. Гравитационная сепарация	а) Отсадка б) Концентрация на столах, шлюзах и т. п. в) Гидроциклонирование
	2. Магнитная сепарация	а) Мокрая магнитная сепарация б) Сухая магнитная сепарация
	3. Электрическая сепарация	а) Электростатическая б) Трибоадгезионная (прилипание)
	4. Флотация и флокуляция (образование хлопьев)	а) Коллективная сепарация б) Селективная сепарация в) Пенная сепарация г) Селективная флокуляция
III. Доводка	1. Флотация	а) Флотационная доводка
	2. Магнитная сепарация	б) Полиградиентная сепарация
	3. Химическое обогащение	а) Выщелачивание б) Сорбция в) Экстракция г) Ионный обмен д) Ионная флотация*, электрофлотация**
	4. Биологическое обогащение	
	5. Обезвоживание	а) Сгущение б) Фильтрация в) Сушка

Этапы	Стадии	Процессы и их последовательность
IV. Утилизация	1. Водооборот	а) Сгущение б) Флокуляция в) Ионная флотация и электрофлотация г) Водоподготовка и кондиционирование воды
	2. Утилизация и складирование хвостов	а) Намыв дамб и складирование хвостов б) Производство закладки (ПВП) в) Производство цемента, извести, кирпича и других стройматериалов г) Выщелачивание отвалов

\*Ионная флотация – извлечение ионов металлов в растворах с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ). Они образуют с ионами (коллигенд) соединение (сублат), которое концентрируется в пузырьках и уходит в пену. Характерен маломощный слой неустойчивой пены, в верхней части пены «пенка», где в основном концентрируется сублат. Ионная флотация используется для очистки воды и извлечения микрокомпонентов из растворов (Mo, W, Sc, Ge, Re, Au и др.).

\*\*Электрофлотация – образование пузырьков при гидролизе воды (H<sub>2</sub>) и (O<sub>2</sub>).

В лабораторных условиях, когда не требуется получать монофракции минералов большой массы, а более важной задачей является полнота выделения минерала из представительной пробы для определения количественного минерального состава исследуемого объекта, в повседневной практике используются далеко не все из указанных выше методов. При этом последовательность применения разных методов сепарации также заметно отличается.

После операций пробоподготовки, завершающихся отмучиванием и сушкой обесшламленных проб трех фракций крупности: 0,5–0,25; 0,25–0,15; 0,15–0,06 мм, можно приступить непосредственно к выделению фракций отдельных минералов или их групп в последовательности (см. табл. 2), начав с сухой магнитной сепарации.

### 3.1. Сепарация минералов по магнитным свойствам

**Общие сведения.** Все минералы по магнитным свойствам принято делить на следующие группы:

1) сильномагнитные минералы (притягивающиеся обычным постоянным магнитом): магнетит, пирротин;

2) среднемагнитные минералы (отделяющиеся на электромагните при небольшой силе тока): ильменит, алмадин, хлорит, биотит, гиперстен, амфибол, диопсид, ксенотим;

3) слабомагнитные минералы (отделяющиеся на электромагните при большой силе тока): халькопирит, монацит, рутил, пирит (после прокаливания);

4) немагнитные минералы: касситерит, флюорит, барит, кварц, полевые шпаты, кальцит, циркон.

Для разделения минералов по магнитным свойствам применяются простые магниты, универсальные постоянные магниты системы Сочнева, электромагниты системы Окунева, типа БИТ, электромагнитные сепараторы типа СИМ, СЭМ 138Т и др.

Универсальный магнит А. Я. Сочнева марки С-5 (рис. 7) имеет четыре рабочих

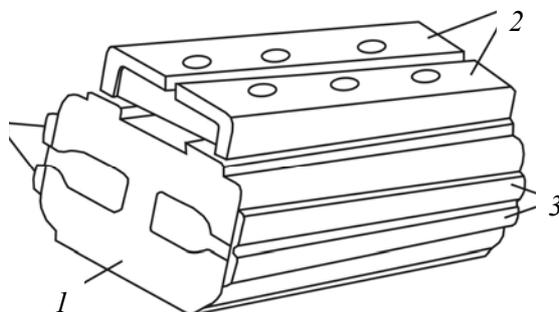


Рис. 7. Ручной магнит А. Я. Сочнева  
 Полусы для выделения фракции: 1 – сильномагнитной, 2 – среднемагнитной,  
 3 – слабомагнитной, 4 – очень слабомагнитной.

зоны (полюса) и позволяет выделять четыре магнитные фракции: сильномагнитную (магнетитовую), среднемагнитную (ильменитовую), слабомагнитную (гранат-вольфрамитовую) и очень слабомагнитную (монацитовую). Для разделения минералов их рассыпают тонким слоем на стекле или листе бумаги. Магнит прокладывают калькой или целлофаном и поочередно каждым полюсом, начиная от самого слабого, выделяют минералы различной магнитной восприимчивости.

Магнитная сепарация в лабораториях может проводиться механически на сепараторах различной конструкции.

**Электромагнитная сепарация.** Наиболее удобен роликовый электромагнитный сепаратор, который создает магнитное поле напряженностью до 12 тыс. эрстед. Магнитное поле регулируется изменением силы тока в оболочке электромагнита; кроме того, величина зазора между лотком и роликом может изменяться.

СЕПАРАТОР ЭВС-10/5 шифр 281СЭ (рис. 8) предназначен для разделения

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭВС-10/5	
Магнитная индукция в рабочей зоне на выступах валка, Тл .....	1,7
Диаметр рабочей части валка, мм .....	100
Длина рабочей части валка, мм .....	50
Крупность исходного материала, мм, не более .....	2
Мощность привода валка, кВт .....	0,18
Мощность, потребляемая электромагнитной системой, кВт, не более ...	0,5
Частота вращения валка, об/мин .....	70
Габаритные размеры, мм	
длина .....	540
ширина .....	340
высота .....	570
Масса, кг .....	75



Рис. 8. Сепаратор ЭВС-10/5

слабомагнитных руд и нерудных материалов на магнитные и немагнитные фракции в непрерывном режиме сухим способом.

Комплектация поставки: сепаратор в сборе, пульт управления.

Проба засыпается в бункер и идет разделение на сильно-, средне-, слабо- и немагнитную фракции. При этом следует постоянно просматривать получаемый материал под бинокуляром.

Изодинамический магнитный сепаратор СИМ-1 (рис. 9) в основном предназначен для электромагнитного разделения грубых концентратов перед работой с ними в тяжелых жидкостях или для флотации, а также тонкой дополнительной электромагнитной чистки после этих операций.

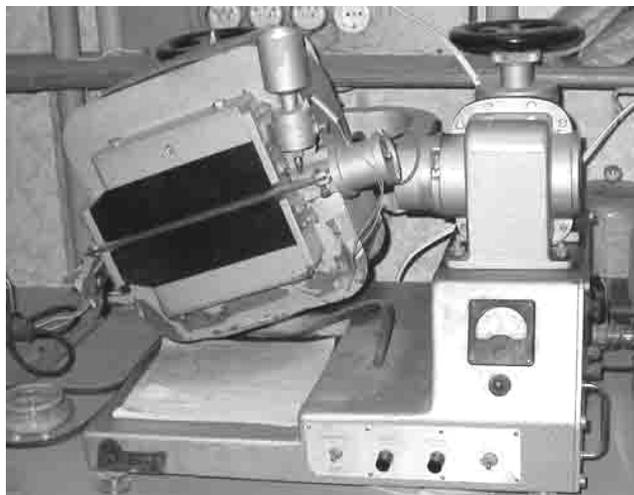


Рис. 9. Электромагнит СИМ-1

### 3.2. Сепарация минералов гравитационными методами

В лабораторных условиях используются далеко не все из вышеперечисленных методов гравитационной сепарации, применяющиеся на обогатительных фабриках ГОКов. В зависимости от поставленных задач они заметно различаются. Для количественного минералогического анализа пробы и последующего расчета баланса распределения химических элементов по минеральным фазам применяется метод разделения минералов в тяжелых жидкостях. При этом разделению подвергается небольшая по весу представительная проба (50–200 г). Для получения монофракций редких или второстепенных по распространенности (обычно «рудных») минералов значительной массы, достаточной для последующего изучения состава и физических свойств таких минералов, используются методы предварительного обогащения: концентрация на сотрясательных столах, винтовых сепараторах, разделение на активных поверхностях, реже отсадка.

### 3.2.1. Разделение минералов в тяжелых жидкостях

**Общие сведения.** Разделение минералов в тяжелых жидкостях (в тех случаях, когда оно оказывается выполнимым) отличается от всех других методов разделения, применяемых при выделении мономинеральных фракций, высокой эффективностью разделения, чистотой получаемых фракций, сравнительной простотой и несложной аппаратурой. В связи с дороговизной тяжелых жидкостей считается, что минералы следует подвергать разделению на доводочной стадии, когда основная масса ненужных минералов уже удалена из пробы, или в том случае, когда другие методы разделения не дают эффекта.

Разделение минералов в тяжелых жидкостях производится по их удельным весам (плотности). Минералы плотнее жидкости тонут, а менее плотные всплывают. Практически в результате разделения навески в тяжелой жидкости получают два продукта – легкую и тяжелую фракции. Однако иногда небольшая часть зерен навески имеет удельный вес, равный удельному весу жидкости, в результате чего эти зерна равномерно распределяются по всему объему жидкости и частично загрязняют потонувшую и всплывшую фракции. Количество такой третьей фракции в большинстве случаев настолько незначительно, что при подсчете результатов разделения им пренебрегают.

В зависимости от вязкости жидкости, размера и удельного веса зерен разделение происходит с различной скоростью. Скорость осаждения зерен в тяжелых жидкостях прямо пропорциональна разности между удельным весом зерна и жидкости, силе, под действием которой происходит осаждение, и обратно пропорциональна вязкости жидкости. В зависимости от размера зерен, разности в удельных весах жидкости и разделяемых минералов, а также вязкости жидкости применяют разделение простым отстаиванием (в стаканах, делительных воронках и т. д.).

Набор тяжелых жидкостей, которые могут быть использованы в работе, довольно обширен, однако практическое применение в лабораторных условиях получили только некоторые из них (1–3 – органические; 4, 5 – неорганические). Все они в большей или меньшей степени ядовиты и требуют аккуратной работы.

1. Бромформ  $\text{CHBr}_3$ , плотность 2,89, разбавляется спиртом.

2. Йодистый метилен  $\text{CH}_2\text{I}_2$ , плотность 3,32, разбавляется диметилформамидом.

3. Жидкость Клеричи – водный раствор малоновокислого таллия  $\text{CH}_2(\text{COOTl})_2$  и муравьинокислого таллия  $\text{HCOOTl}$ , плотность 4,25, разбавляется водой. Эта жидкость особенно ядовита и требует предельной осторожности.

4. Жидкость Туле (раствор  $\text{HgI}_2 \cdot 2\text{KI}$ ), плотность 3,19, разбавляется водой.

Все работы с тяжелыми жидкостями необходимо проводить в вытяжном шкафу, вентиляционная труба которого должна находиться над поверхностью стола.

Для выделения минералов легкой (лейкократовой) фракции, состоящей обычно из кварца и полевого шпата, чаще всего используется бромформ. Подчеркнем, что для дальнейшего успешного выделения минералов лейкократовой фракции предпочтительно брать пробы размером 0,16–0,05 мм, что позволяет избавиться от минеральных сростков. При этом неэлектромагнитная фракция, полученная после ро-

ликого магнитного сепаратора, дополнительно пропускается через электромагнит СИМ-1, установленный на максимальную силу тока.

Подготавливаем бромформ нужной плотности (для чего используем реперы микроклина, плагиоклазов и кварца), разбавляя его чистым спиртом. Заливаем бромформ в делительную воронку или прозрачный лабораторный стакан. Засыпаем туда полученный концентрат и хорошенько размешиваем его стеклянным шпателем. Даем отстояться. Более «тяжелые» минералы опустятся на дно стакана, а на поверхности будет находиться монофракция более «легкого» минерала.

Делительную воронку можно сделать самому. На воронку натягивают кусочек шланга и перекрывают зажимом. Во время отсадки воронка должна быть прикрыта стеклом, иначе спирт, смешанный с бромформом, испарится и плотность раствора увеличится. Далее отпускаем зажим и аккуратно сливаем отсевиший материал («тяжелую» фракцию) на заранее подготовленный бумажный фильтр. Главное вовремя зафиксировать зажим, чтобы не попали минералы из более легкой фракции. Затем подобным образом сливаем полученную легкую фракцию. После проведенных процедур весь осевший материал следует тщательно промыть спиртом и высушить под сушильной лампой.

Тяжелая фракция после разделения пробы в чистом бромформе содержит подавляющую часть ее акцессорных минералов, требует тщательного просмотра под бинокляром и разделения вручную минералов, различающихся по внешним признакам (цвету, форме и др.). Для их диагностики целесообразно применять оптические определения в иммерсионных препаратах. Для оценки содержания минералов в пробе нужно провести следующую операцию. Из отквартованной части тяжелой фракции разобрать иглой под бинокляром дорожку, отделив разные минералы, взвесить каждый из них на аналитических весах и полученные данные использовать для дальнейшего расчета баланса химических элементов. Иногда бывает полезно продолжить разделение тяжелой фракции после бромформа в тяжелой жидкости большей плотности (йодистый метилен, растворы типа  $\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}) \times \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и др.). Аналогично можно поступить с концентратами, полученными другими методами гравитационного обогащения.

### ***3.2.2. Разделение минералов по плотности на концентрационно-сотрясательных столах***

В целях выделения акцессорных минералов в отдельный продукт из проб большого веса проводят их гравитационное обогащение на концентрационно-сотрясательных столах (рис. 10). Разделение исходной пробы производят на две части – одну с тяжелыми минералами (удельный вес более  $3 \text{ г/см}^3$ ) и другую – с более легкими. На столе выделяется также промежуточный продукт.

При обогащении проб на концентрационном столе разделение минералов по удельному весу происходит в результате действия двух сил: инерции зерен при движении вдоль стола (обеспечивается возвратно-поступательным движением деки стола) и поперечной смывной силы воды. Характер движения деки стола таков, что горизонтальное движение вперед осуществляется плавно, а возвратное – резко.

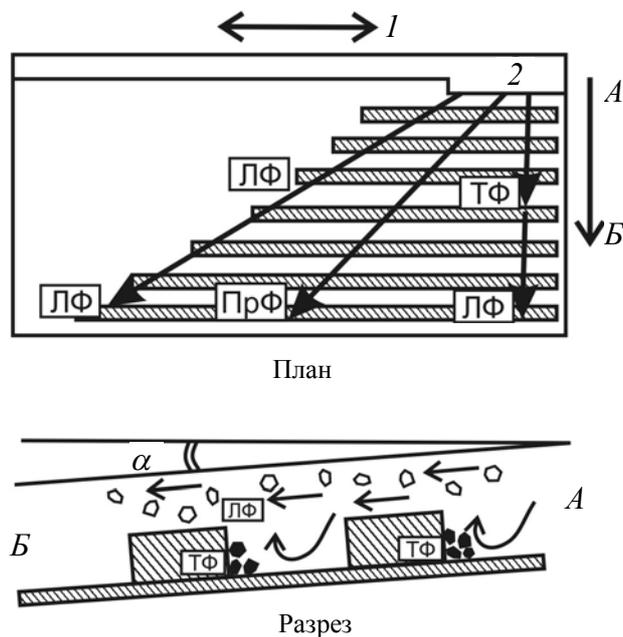


Рис. 10. Схема работы сотрясательного стола

План: 1 – возвратно-поступательное движение деки, 2 – приемник пульпы, стрелки показывают движение пульпы по наклонной плоскости в направлении А–В и сепарацию фракций: ТФ – тяжелой, ЛФ – легкой и ПрФ – промежуточной.

Разрез А–В: стрелки показывают движение пульпы: ЛФ – ламинарное с легкой фракцией; ТФ – турбулентное, между рифеями, где концентрируется тяжелая фракция;  $\alpha$  – угол наклона стола.

Этим обеспечивается непрерывное поступательное движение зерен вдоль нарифлений. Небольшой поперечный наклон стола и боковая подача воды вызывают более дальний снос более легких зерен, в результате под кромками стола, на приемниках, можно собрать в них тяжелую, среднюю и легкую фракции.

### 3.2.3. Разделение минералов на активной подложке по различной форме зерен (трению)

К данному способу сепарации относится метод выделения слюды на шероховатой поверхности за счет различной скорости движения по наклонной плоскости из-за трения. Разделению подвергаются пробы после электромагнитной сепарации. Предпочтительной является фракция 0,5–0,25 мм, менее результативно разделение фракций 0,25–0,15 мм.

Используя пластинчатую форму зерен слюды, возникающую за счет их совершенной спайности, на наклонной поверхности листа бумаги можно откатать от пластинок слюды изометрические зерна других минералов, получив, таким образом, слюдяной концентрат. Для удобства выполнения этой операции нетрудно изготовить своими руками простое устройство (рис. 11). Оно представляет собой

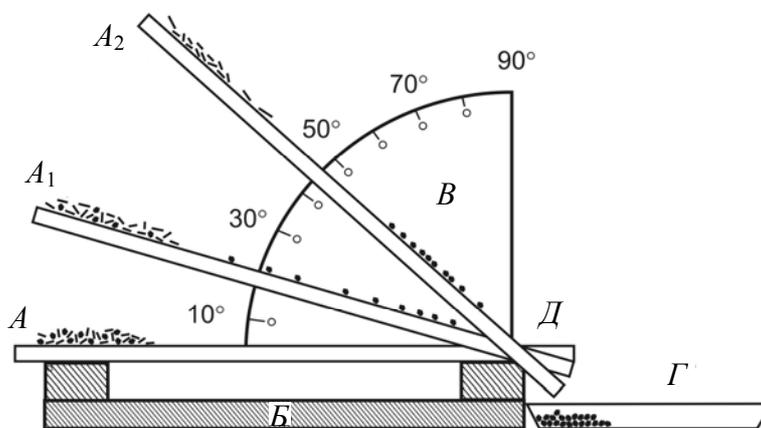


Рис. 11. Схема устройства для разделения минералов по форме зерен на шероховатой поверхности и его работа

*A* – дека с исходной пробой; *A*<sub>1</sub> – дека под углом 20° – частичное отделение слюды; *A*<sub>2</sub> – дека под углом 45°, полное отделение слюды; стрелки показывают направление ударов по деке и движение зерен.

*Б* – основание устройства; *В* – транспортер; *Г* – приемник; *Д* – петля для крепления подвижной деки.

подвижную плоскость (деку), закрепленную на основании, которой можно придавать углы наклона от 0 до 90°. На деку крепится лист шероховатой бумаги, который и служит активной подложкой. На нее ровной дорожкой (желательно в один слой) насыпается проба. Наклоняя деку под определенным углом, который устанавливается опытным путем, и осторожно постукивая по деке, легко добиться условия, когда пластинки слюды будут задерживаться на листе бумаги, а зерна других минералов иной формы – скатываться в приемник. Закончив откатку пробы, поднимаем деку почти вертикально и стряхиваем в другой приемник полученный концентрат слюды. Для оценки угла наклона деки целесообразно на устройстве закрепить транспортер и в дальнейшем пользоваться уже найденными значениями угла  $\alpha$ . Особенно эффективен такой метод разделения минералов, когда формы зерен одного минерала резко различаются, например округлые кристаллы граната от пластинок слюды. В этом случае первые продукты отряхивания являются практически мономинеральным концентратом граната, а конечные – чистым слюдяным концентратом. Так как между пластинками слюды часто встречаются зерна других минералов, для их отделения проводим следующую операцию. В фаянсовую ступку с шероховатой поверхностью засыпаем слюдяной концентрат, смачиваем водой (в некоторых случаях слюда не смачивается, тогда смачиваем спиртом) и аккуратно слегка растираем пестиком. Затем доливаем столько жидкости, чтобы при быстром перемешивании пестиком слюда находилась во взвешенном состоянии. При этом минералы вростков будут истираться. Проверить, что хрупкие минералы истерлись, можно медленным движением пестика – если не слышен характерный хруст, то операцию можно заканчивать. Жидкость и концентрат из ступки следует слить в

емкость, аккуратно отмутить пробу и поставить на просушку. Полученный материал пропустить через более мелкое сито. Если слюда оттягивается на электромагните, то ее необходимо почистить на электромагните типа БИТ. В противном случае доочистку произвести вручную под бинокляром.

### 3.3. Флотационное разделение минералов

Флотация (от англ. *to float* – плавать на поверхности) – процесс, основанный на различии в смачиваемости поверхности разделяемых минералов водой, в котором плохо смачиваемые частицы рудного минерала (гидрофобные) прилипают к вводимым в пульпу пузырькам воздуха и поднимаются на поверхность, образуя пену, а хорошо смачиваемые водой частицы (гидрофильные) остаются в объеме пульпы.

Флотация является основным методом, используемым при обогащении руд. В настоящее время более 95% руд цветных и редких металлов подвергается флотации.

Гидрофильность или гидрофобность зерен минералов возникает при его разрушении. Тогда на его поверхности появляются ненасыщенные оборванные химические связи, взаимодействующие с полярными молекулами воды. Если некомпенсированные связи сильные (ионные, металлические), смачиваемость минерала водой высокая, он обладает гидрофильными свойствами – любит воду – капля воды на поверхности минерала растекается. Если оборванные связи слабые (молекулярные, ковалентные), молекулы воды слабо взаимодействуют с поверхностью минерала, он плохо смачивается, обладает гидрофобными свойствами – не любит воду – капля воды на его поверхности сохраняет свою форму. Схему взаимодействия гидрофильного и гидрофобного минералов с водой иллюстрирует рис. 12, из которого хорошо видно, что у гидрофильного минерала (кварца –  $\text{SiO}_2$ ) поверхность покрывается пленкой воды, что не дает возможности пузырьку газа закрепиться на зерне.

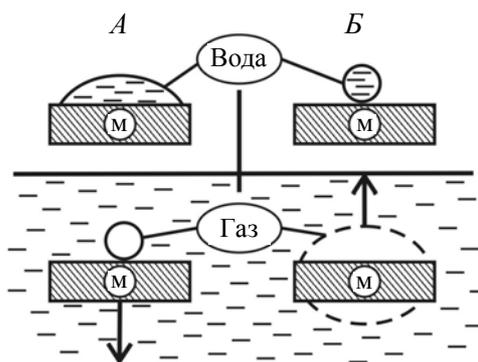


Рис. 12. Схема взаимодействия поверхности минералов (м) с гидрофильными (А, кварц) и гидрофобными (Б, молибденит –  $\text{MoS}_2$ ) свойствами  
Вверху – с водой в воздухе, внизу – с газовым пузырьком в воде. Стрелки показывают направление движения минеральных частиц в пульпе.

Поэтому гидрофильный кварц тонет. У гидрофобного минерала (молибденита –  $\text{MoS}_2$ ), который имеет слоистую структуру со слабыми межмолекулярными связями, пленка воды на поверхности минерала не возникает и не препятствует закреплению на ней газового пузырька, который поднимает пластинку молибденита на поверхность пульпы. Так рудный гидрофобный минерал флотируется в пену.

Отметим, что даже при большой гидрофобности минерала пузырьки воздуха в пене не способны вынести на поверхность его частицы большой массы. Поэтому хорошо флотируются только мелкие фракции (0,25–0,05 мм).

По способности к природной флотации все минералы разделяются на следующие группы:

1) сильногидрофобные (расположенные ниже по убывающей гидрофобности): каменный уголь, сера, графит, молибденит, реальгит, висмут, тальк, слоистые силикаты с совершенной спайностью (слюды), алмаз;

2) слабогидрофобные, минералы-полупроводники с ковалентно-металлическими связями, преимущественно сульфиды: энаргит –  $\text{Cu}_3(\text{AsS}_4)$ , халькозин –  $\text{Cu}_2\text{S}$ , кавелин –  $\text{CuS}$ , аргентит –  $\text{Ag}_2\text{S}$ , халькопирит –  $\text{CuFeS}_2$ , марказит и пирит –  $\text{FeS}_2$ , арсенопирит –  $\text{FeAsS}$ , пирротин, сфалерит, некоторые фосфаты (апатит и др.);

3) гидрофильные – большинство минералов-диэлектриков с некомпенсированными на поверхности зерен ионными и ионно-ковалентными связями – барит, кальцит, кварц, полевые шпаты, которые в рудах играют роль безрудных минералов, разубоживающих рудную массу.

Применение флотореагентов позволяет изменить (уменьшить) гидрофильность минералов, сделать их более гидрофобными, способными прикрепляться к пузырькам пульпы и концентрироваться в пенном продукте.

В зависимости от механизма действия во флотационном процессе все реагенты подразделяются на три группы: собиратели; пенообразователи; регуляторы (модификаторы).

*Собиратели* играют главную роль во флотационном процессе, поскольку именно они ослабляют гидрофильность минерала. Собиратели представляют собой поверхностно-активные органические соединения с гетерополярной структурой молекул, которые прикрепляются своим заряженным концом (+ или –) к оборванной связи минерала, «гасят» ее и тем самым создают вокруг гидрофильной частицы гидрофобную пленку. В зависимости от знака заряда активного участка собирателя различают катионные (+) и анионные (–) собиратели. Наиболее часто используются последние. К ним относятся: ксантогенаты – соли калия ксантогенатовой кислоты: этиловой –  $\text{K}[\text{C}_2\text{H}_5\text{OCSS}]$  и амиловой –  $\text{K}[\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OCSS}]$ ; жирные кислоты и их соли (олеиновая кислота –  $\text{C}_7\text{H}_{33}\text{COOH}$ ) и др. Олеиновая кислота обычно применяется для флотации кислородных соединений с сильной природной гидрофильностью: шеелита, гематита, барита, апатита. При этом расход реагента сравнительно небольшой – 100–600 г на тонну руды.

Катионные собиратели используются реже. Это различные амины (производные аммиака), которые применяются при флотации кварца, полевого шпата, слюд и других силикатов.

*Пенообразователи*, как следует из их названия, – вещества, способные образовывать устойчивые прочные пузырьки пены, поскольку сам процесс флотации довольно длительный (до 30 мин и более). По своему составу это разнообразные многоатомные спирты и эфиры. Наиболее употребительны терпинол (C<sub>10</sub>H<sub>17</sub>ОН) и сосновое масло, которые отличаются малым расходом реагента (10–50 г на тонну руды).

*Регуляторы* – их назначение заключается в усилении или ослаблении действия собирателей, что особенно важно для тонкой селективной флотации полиметаллических руд, состоящих из самых разнообразных сульфидов, заметно различающихся своей гидрофобностью. Регуляторы представлены разными неорганическими активными веществами – солями, кислотами, щелочами, которые регулируют химизм флотационной среды.

Вообще, флотация – очень тонкий процесс, на грани искусства. Во многом его реагенты и технология подбираются опытным путем, поскольку он сильно зависит не только от минерального состава руды, но и от вариаций состава одних и тех же минералов из различных месторождений. Флотация требует строгого соблюдения технологического режима, разработанного опытным путем для определенного типа руды месторождения. Имеет значение даже последовательность введения флото-реагентов в процесс. Так, вначале в пульпу вводятся регуляторы, затем собиратели и последними пенообразователи.

Техническим устройством для флотации служат флотационные машины.

**Флотационные машины серийного выпуска.** Флотационная машина (ФЛ) состоит из камеры, в которой вращается импеллер, укрепленный на валу, в подшипниках и стойке.

**ФЛОТАЦИОННАЯ МАШИНА** шифр 189ФЛ (рис. 13) предназначена для лабораторных испытаний руд цветных металлов методом пенной флотации при кислотности пульпы рН 2-12.

Комплектация поставки: машина флотационная в сборе.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА 189ФЛ	
Вместимость камеры, л	0,05; 0,1; 0,2; 0,3
Диаметр импеллера, мм	28
Частота вращения импеллера, с <sup>-1</sup>	31; 42,5; 50; 64,5
Количество воздуха, засасываемого импеллером при наибольшей частоте вращения, л/с, не менее	0,02
Частота вращения пеногона, с <sup>-1</sup>	0,25
Мощность двигателя привода импеллера, кВт	0,12
Габаритные размеры, мм	
длина	400
ширина	250
высота	600
Масса, кг	18,5



Рис. 13. Флотационная машина шифр 189ФЛ

Вращение мешалки – импеллера в камере осуществляется ременным приводом от мотора через ступенчатые шкивы и блоки. Направление вращения подбирается с таким расчетом, чтобы обеспечить циркуляцию пульпы по часовой стрелке. При этом пульпа из отстойной камеры, опускаясь вниз, проходит через нижнюю щель, насыщается воздухом в агитационном отделении и выбрасывается в отстойное отделение через верхнюю щель под козырьком. Воздушные пузырьки образуют слой пены, который по мере появления снимается скребком. Козырек служит для предохранения пены от разрушения струей пульпы.

*Основные факторы, определяющие результаты флотационного разделения*

1. Гранулометрическая характеристика материала. Чем более раскрыты зерна минералов в навеске, тем более высоки количественные и качественные результаты разделения. Однако улучшение раскрытия минералов не следует производить за счет переизмельчения.

2. Реагентный режим является наиболее важным фактором, влияющим на результаты флотации. Для разделения каждой данной смеси минеральных зерен должен применяться свой реагентный режим (набор флотореагентов, количество и порядок их дозировки, а также время, необходимое для перемешивания пульпы с реагентами).

3. Важное условие успешного разделения минералов во многих случаях – поддержание определенной щелочности (кислотности) пульпы, характеризуемой величиной рН.

4. Плотность пульпы необходимо поддерживать в интервале 25–30% твердого продукта, хотя в ряде случаев и более разжиженные пульпы могут дать хорошие результаты.

5. Аэрация пульпы (насыщение пульпы воздухом) в ряде случаев может значительно повлиять на результаты флотации. Для флотации некоторых минералов необходима повышенная аэрация пульпы, но такой минерал как ильменит, наоборот, требует интенсивного перемешивания без повышенного засоса воздуха.

6. Время флотации для разных реагентных режимов и флотируемых минералов отличается и колеблется от 3 до 30 мин и более. Чрезвычайно важно в ходе флотационного опыта последовательно собирать пену в различные приемники, поскольку, как правило, качество пенного продукта меняется во времени.

Вышеперечисленные факторы показывают насколько сложен, многообразен и капризен флотационный процесс. Поэтому в лабораторных условиях он сравнительно редко используется для получения мономинеральных фракций, тем более, что их вес, необходимый для дальнейших исследований, очень небольшой (граммы). Проще получить их другими методами сепарации минералов. Потому чаще всего лабораторная флотация ограничивается разделением кварца, альбита и калиевого полевого шпата.

*Режим флотации полевых шпатов*

Навеска 20–30 г немагнитной фракции, пропущенной через сита 0,16–0,05 мм.

Предварительно подготавливается раствор: 50 мл горячей дистиллированной воды (50–60 °С) залить в камеру и добавить 3–5 мл концентрированной плавиковой кислоты (HF) и перемешивать (агитировать) 10–15 мин при скорости 780 об/мин.

Раствор слить, долить горячей воды, добавить 2–3 капли раствора АНП и перемешивать 2–3 мин при скорости 1200–1300 об/мин.

Открыть подачу воздуха, увеличить скорость до 2000 об/мин, снимать пену с полевым шпатом. Флотопродукт и камерный (осадок) тщательно промыть.

При выделении слюды в пробах, где ее очень мало, можно применять ту же методику. Но обрабатывать HF 1–3 мин, иначе слюда может обесцветиться.

Флотационные методы разделения минералов в лабораторных условиях не всегда эффективны. Только в случае неэффективности использования других методов выделения мономинеральных фракций можно применить флотацию. (Детальнее см. [4].)

#### **4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ РАСТВОРИМОСТИ МИНЕРАЛОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕАКТИВАХ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ**

При тесном проращении одного минерала в другом, если механическими методами разделить их не удастся, а растворимость этих минералов в разных кислотах или щелочах различна, один из минералов смеси можно получить в чистом виде, растворив все другие. Растворимость зависит от природы минерала и растворителя. Она обычно повышается при увеличении температуры.

На разложение минерала кислотами большое влияние оказывает состояние получающихся в результате реакции продуктов. Разложение идет особенно хорошо в случае образования газообразной фазы ( $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $Cl_2$  и др.) и легкорастворимой соли металла (хлорида, сульфата и т. п.). Наоборот, появление в качестве конечного продукта труднорастворимой соли сильно затрудняет реакцию разложения. Выпадая в виде твердой фазы, осадок покрывает минерал труднорастворимой пленкой и изолирует его от дальнейшего действия реагента. Нередко происходит частичное разложение минерала, сопровождающееся одновременным выпадением новообразования в виде труднорастворимого осадка (например,  $SiO_2$ ,  $PbCl_2$ ,  $WO_3$  и др.), часто в коллоидном состоянии.

Для избирательного разложения минералов можно использовать сильные кислоты в виде как чистом, так и смесей, а также сильные щелочи (см. приложение 2).

#### **5. ДОВОДКА МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ**

Доводка мономинеральных фракций осуществляется отбором зерен-примесей под бинокуляром, что может обеспечить получение продукта, содержащего до 98–100% одного минерала. Существенным недостатком данной операции является ее низкая производительность.

Для отбора материал предварительно рассеивается на узкие классы. Эффективность отбора под бинокуляром возрастает с увеличением размера зерен. Отбор становится совсем малоэффективным для классов менее 50 мк. В некоторых случаях возникает необходимость в переочистке отобранной фракции повторной опера-

цией, которую целесообразно проводить в воде (или иной жидкости) на часовом стекле. В этом случае гораздо лучше заметны зерна минералов-примесей.

## **6. ПРИМЕРЫ СХЕМ ВЫДЕЛЕНИЯ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ**

Изложенные выше простейшие приемы выделения мономинеральных фракций из горных пород и руд с успехом можно рекомендовать для внедрения в тех случаях, когда не требуется работать со значительным количеством проб и большими исходными их объемами: в учебных лабораториях, отдельных подразделениях геологических факультетов вузов и небольших научных коллективах. В случае специализированных лабораторий, когда идет постоянная производственная работа по выделению мономинеральных фракций для решения разнообразных научных и прикладных задач, используются гораздо более сложные схемы и более разнообразные приборы и устройства для более экспрессного и совершенного их решения.

Приведем несколько таких схем.

### **6.1. Общая схема выделения мономинеральных фракций из горных пород, применяемая в минералогической лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН, С.-Петербург**

#### ***I. Пробоподготовка.***

1. Измельчение материала до фракции менее 0,5 мм путем многоступенчатого дробления с отсивкой мелкой фракции после каждого цикла дробления. Отквартровка и доизмельчение навески 50–70 г валовой пробы для аналитических исследований.

2. Отмучивание от пыли и сушка материала.

#### ***II. Электромагнитная сепарация на немагнитную и магнитную фракции (СЭМ138Т).***

#### ***III. Выделение акцессорных и породообразующих минералов из немагнитной фракции.***

1. Деление в бромформе на тяжелую и легкую фракции.

2. Работа с легкой фракцией:

А). Создание рабочей «размерной» фракции с минимальным количеством сростков и минеральных агрегатов (доизмельчение, ситование, шлихование).

Б). Электромагнитная чистка.

В). Создание рабочих минеральных концентратов (деление в тяжелых жидкостях, флотация и другие приемы).

Г). Доводка концентратов до мономинеральных фракций (см. п. V «Возможные дополнительные работы по доводке минеральных концентратов до монофракций»). Выход: главным образом полевые шпаты, плагиоклазы, кварц.

### 3. Работы с тяжелой фракцией:

А). Деление в тяжелых жидкостях для получения различных по плотности минеральных концентратов.

Б). Электромагнитная чистка и выделение концентрата слабоэлектромагнитных минералов (СИМ, БИТ).

В). Доводка концентратов до мономинеральных фракций (см. п. V «Возможные дополнительные работы по доводке минеральных концентратов до монофракций»). Выход: главным образом немагнитные сульфиды, силлиманит, дистен, апатит, циркон, бадделеит, возможны такие слабоэлектромагнитные минералы как сфен, монацит, рутил и др.

### ***IV. Выделение породообразующих минералов из магнитной фракции.***

1. Выделение сильномагнитных минералов ручным магнитом (РМЧ). Выход: магнетит, железо, титаномагнетит, пирротин и др.

2. Создание рабочей «размерной» фракции с минимальным количеством сростков и минеральных агрегатов.

3. Электромагнитная сепарация на слабомагнитную и среднемагнитную фракции.

4. Деление полученных фракций в тяжелых жидкостях на одинаковые по плотностям минеральные концентраты.

5. Разделение концентратов по электромагнитности на рабочие, обогащенные нужными минералами концентраты (СИМ, БИТ и др., минералогический контроль).

6. Доводка минеральных концентратов до монофракций (см. п. V «Возможные дополнительные работы по доводке минеральных концентратов до монофракций»). Выход: главным образом амфиболы, пироксены, гранаты, эпидот, шпинель, сфен, турмалин, халькопирит, биотит, хромит, ортит и другие электромагнитные минералы.

### ***V. Возможные дополнительные работы при доводке минеральных концентратов до монофракций*** (к пунктам III 2Г, III 3В, IV 6).

1. Создание размерных фракций без минеральных агрегатов, сростков, включений.

2. Доизмельчение рабочих фракций.

3. Ситование до нужного размера.

4. Откатка плоских минералов.

5. Деление по плотности в тяжелых жидкостях.

6. Ультразвуковая обработка на диспергаторе УЗ.

7. Флотация.

8. Электромагнитная чистка, тонкая сепарация.

9. Шлиховка в бромформе.

10. Кислотная обработка.

Многие работы по пунктам 1–9 могут неоднократно повторяться в различной последовательности.

#### ***VI. Дополнительный расход времени при выделении минералов.***

1. Макро- и микроскопическое изучение первичного материала.
2. Изготовление бумажных пакетиков для выделенных минералов и промежуточных фракций.
3. Микроскопический контроль выделяемых минералов.
4. Приготовление рабочих растворов жидкостей.

#### **6.2. Методика выделения мономинеральных фракций**

**Лаборатории аксессуарных минералов Института минералогии и геохимии АН РФ (ИМГРЭ), Москва**

Данная методика подробно описана в руководстве В. В. Ляховича (1981) [6], содержащем ценные сведения по практике использования предлагаемых схем обработки проб горных пород с учетом их валового минерального состава (рис. 14 и 15).

#### **6.3. Методика выделения мономинеральных фракций**

**Лаборатории минералогического анализа и минерального фракционирования Института геологии Карельского филиала АН РФ, Петрозаводск**

Эта методика опубликована в руководстве В. И. Кевлич и Н. Д. Сыромятиной (1985) [7], где приводится принятая лабораторией общая схема обработки меланократовых горных пород докембрия Карелии. Она принципиально не отличается от схемы ИМГРЭ, кроме некоторых деталей. Таблица, приведенная в [7], содержит очень подробные сведения по физическим свойствам 88 наиболее распространенных минералов, практически не встречающихся в минералогической литературе. Помимо этого в [7] имеются две таблицы, в которых систематизированы данные, определяющие выбор методов и аппаратуры при разработке конкретных схем выделения мономинеральных фракций (см. приложения 3 и 4).

### **7. БАЛАНС РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО МИНЕРАЛАМ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД**

Мономинеральные фракции, выделенные из представительных проб горных пород или руд, являются необходимым исходным материалом для определения процентного содержания химического элемента, приходящегося на каждый минерал породы, т. е. его долю в этом объекте. Баланс распределения позволяет решать целый ряд очень важных научных и чисто практических задач в области минералогии и геохимии и судить:

1) по погрешности баланса – о достоверности полученных цифровых исходных данных о химическом и минеральном составе породы, содержания исследуемых химических элементов в отдельных ее минералах;

2) по селективности распределения химических элементов в отдельных минералах – о форме их нахождения в объекте исследования (изоморфной, форме собственных минералов, атомного рассеяния и др.);

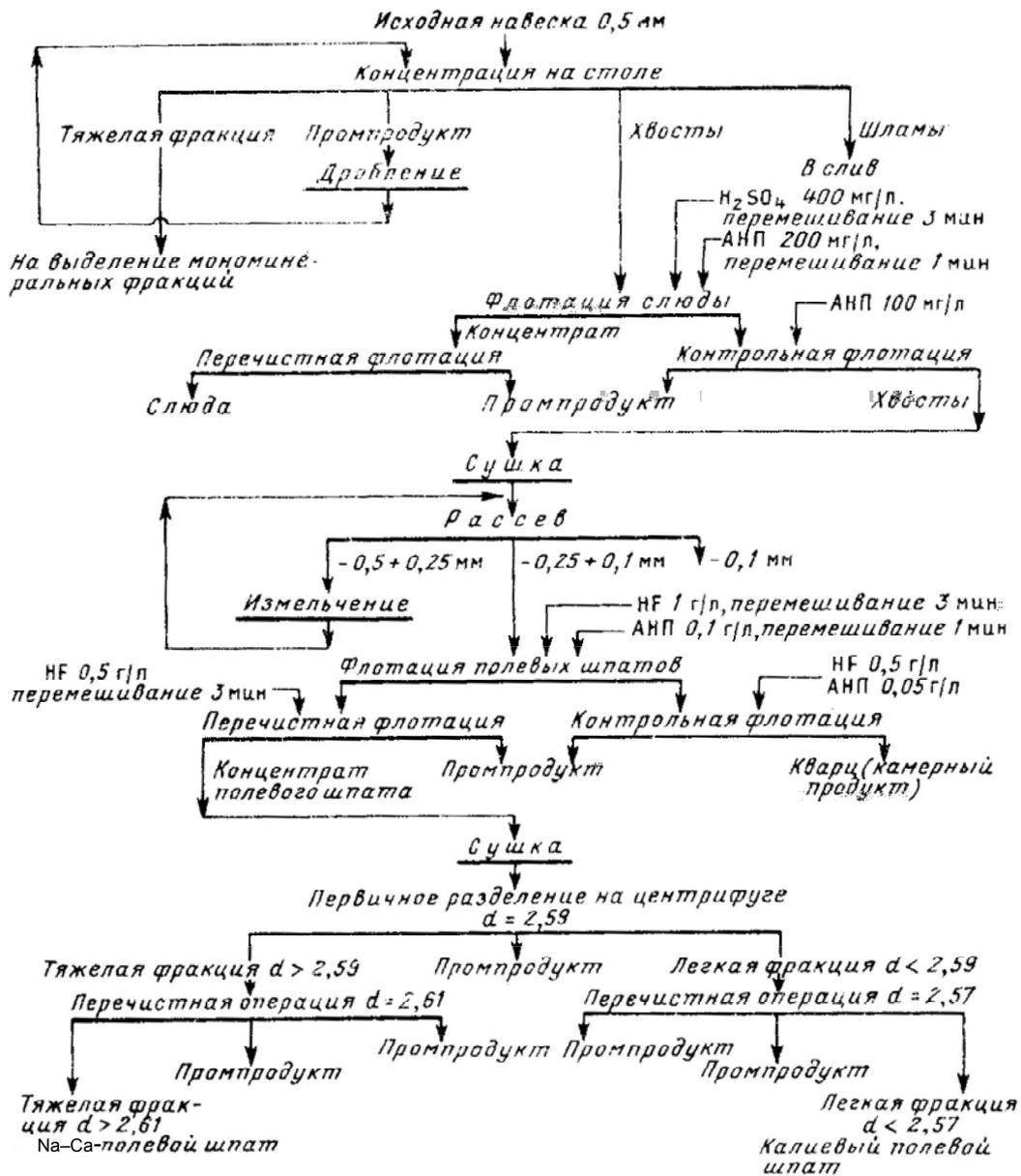


Рис. 14. Схема выделения слюды, кварца и полевых шпатов из мезо- и лейкократовых пород



3) по отрицательной погрешности баланса (более 30–50%) – не только о пропущенных при минералогическом анализе минералов-концентраторах редких элементов, но и о процентном содержании их в породе;

4) по результатам баланса – о максимальной доли возможного извлечения полезного компонента в процессе обогащения при эксплуатации месторождений минерального сырья.

Последняя задача является весьма важной и ответственной. Без ее решения результаты разведочных работ не принимаются ГКЗ.

Для расчета баланса распределения химических элементов в пробе необходимы следующие исходные данные:

*A* – содержание минерала в пробе (вес. %);

*B* – содержание химического элемента в каждом минерале пробы (вес. %);

*П* – содержание химического элемента в представительной пробе (вес. %).

Произведем расчет баланса распределения химического элемента в пробе на примере распределения Sr в щелочном базальтоиде из Приладожья (табл. 3).

Таблица 3. Баланс распределения стронция в ладогалите Северного Приладожья (по Д. А. Рыбакову, 1986 г.)

Минерал	<i>A</i> – содержание минерала в пробе, вес. %	<i>B</i> – содержание Sr в минерале пробы, вес. %	$B = A \times B / 100$	<i>Д</i> – доля Sr, %	$\Delta\%$
Микроклин	46,2	1,9	0,878	69,1	
Биотит	33,6	0,10	0,034	2,7	
Апатит	5,7	1,6	0,091	7,17	
Амфибол	9,2	0,33	0,030	2,4	
Сфен	0,37	0,29	0,001	0,08	
Ортит	0,56	0,78	0,004	0,31	
Пироксен	0,2	0,10	–	–	
Магнетит	3,8	< 0,01	–	–	
Циркон	< 0,01	0,063	–	–	
Эпидот	0,05	следы	–	–	
Гидроксилы Fe	0,2	следы	–	–	
Порода $\Sigma$	100,0	1,27	1,038	81,76	18,2
Стронцианит, SrCO <sub>3</sub>	0,35	59,36	0,208	16,4	
		$\Sigma$	1,246	98,13	1,9

Прежде всего рассчитаем долю элемента, приходящуюся на каждый минерал (*B*) по формуле

$$B = A \times B / 100.$$

Далее оценим его долю в процентах:

$$Д = 100B / П.$$

Суммой значений *B* определяется валовое (общее) содержание элемента в пробе, связанное с ее учтенными минералами ( $\Sigma B$ ). По разности между *П* и  $\Sigma B$  нахо-

дим абсолютную погрешность баланса ( $\Delta$ ), а по ней – погрешность баланса в процентах:

$$\Delta\% = (P - \sum B) 100 / P.$$

Если  $\sum B < P$  и составляет не более 20%, то такая отрицательная погрешность баланса считается допустимой, связанной с погрешностью исходных данных [8].

Отрицательная погрешность более 20% с большой вероятностью свидетельствует о присутствии в пробе неопределенного минерала-концентратора рассматриваемого химического элемента. В конкретном случае таким минералом может быть стронцианит –  $\text{SrCO}_3$ .

По абсолютной погрешности баланса  $\Delta = P - \sum B$ , составляющем 0,232% Sr, можно оценить содержание этого минерала в породе, исходя из следующих соображений: содержание Sr в рассматриваемом минерале составляет 59,36%, что позволяет составить следующую пропорцию –  $59,36 : 100 = 0,232 : X$ . Отсюда  $X = 0,39\%$ . Последующим анализом в породе было установлено присутствие стронцианита в количестве 0,35 вес.%, что привело к погрешности баланса 1,9%.

Положительная погрешность баланса (при  $\sum B > P$ ) указывает на отсутствие неучтенных минералов-концентраторов рассматриваемого элемента в породе и обычно бывает связана либо с заниженной оценкой содержания химического элемента в породе, либо с завышением его содержания в одном из минералов породы. При этом варианте баланса в первую очередь требуется проверка содержания элемента в валовом составе пробы [8]. Для грубой оценки правдоподобности расчета баланса при больших погрешностях рекомендуется использовать значения кларковых содержаний химических элементов в земной коре, общепринятых в зарубежной литературе (см. приложение 5).

## 8. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШАШЕК ДЛЯ МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА

Монтировать образцы в шашку можно следующим образом.

Минералы располагают на липкой ленте, на них ставят форму и все заливается эпоксидным компаундом.

Число зерен в одной шашке зависит от количества определяемых элементов. Если проводить анализ 10–15 элементов в основных породообразующих минералах, то достаточно помещать до 30 образцов, чтобы оператор мог проанализировать их за одну смену. Когда нужно определить два-три элемента, можно разместить и 100 зерен.

Перед тем как помещать минералы на липкую ленту, необходимо сделать трафарет (обычно миллиметровую бумагу). На бумаге надо начертить круг диаметром 24 мм и прилепить на предметное стекло или на фотопластинку (как фотография под стеклом). Полученным трафаретом можно пользоваться много раз. Составляется рабочая схема на листе писчей бумаги. Наносится круг диаметром 110 мм, чертится прямоугольная сетка, на которой отмечаются порядковые номера образцов. Нужно иметь в виду, что готовая шашка будет обратным изображением схемы, поэтому располагать образцы следует справа налево. На рабочей схеме пишутся

порядковые номера зерен, номер образца, название минерала и его описание (цвет, форма и т. д.).

Формы для заливки шашек изготавливают в Германии. В нашем случае можно использовать латунную или стеклянную трубку с внутренним диаметром 24 мм. Трубка разрезается на отрезки по 10 мм, торцы шлифуются.

Затем на подготовленном трафарете аккуратно закрепляют прозрачную липкую ленту клейким слоем наружу.

После того как все минералы размещены на липкой ленте, надо поставить форму, предварительно смазанную вазелином. Форма прижимается к липкой ленте и заливается компаундом, не достигая 2–3 мм до верхней кромки.

Когда эпоксидный компаунд затвердел, форму отделяют от предметного стекла и снимают липкую ленту, а также выдавливают шайбу из смазанной вазелином формы. Полученная шайба шлифуется и аккуратно полируется вручную, на стекле.

Следует помнить, что при шлифовке необходима предельная чистота. Препарат перед каждой последующей операцией должен тщательно промываться [9].

## **9. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Каждого студента допускают к выполнению лабораторных работ после ознакомления с правилами техники безопасности в лаборатории обогащения и записи в журнале о прохождении инструктажа и сдачи его преподавателю.

Необходимо соблюдать следующие правила безопасности:

1. Перед началом работы проверить наличие заземления у дробилок, электромагнитных сепараторов, концентрационных столов и флотомашин.
2. Включать оборудование можно только после того, как получено разрешение преподавателя.
3. При работе с пылящей рудой необходимо включать вентиляцию и работать в респираторе.
4. Дробление руды нужно проводить в защитных очках.
5. Категорически запрещается работать при снятых ограждениях с движущихся частей.
6. Выгружать камерный продукт после флотации следует только при остановленном импеллере.
7. Запрещается испытывать на вкус флотационные реагенты, выливать в раковины концентрированные растворы и хвосты флотации.
8. Необходимое количество реагента дозировать либо с помощью мерного цилиндра, либо пипеткой, на конец которой надета груша.
9. Запрещается засасывать ртом в бюретки и пипетки любые растворы реагентов и реактивов.
10. В помещении лаборатории запрещается курить и принимать пищу.
11. Не разрешается присутствие посторонних лиц в лаборатории.
12. Не допускается работа с тяжелыми жидкостями без резиновых перчаток.

## З а к л ю ч е н и е

Техника выделения мономинеральных фракций непрерывно совершенствуется. Описанные выше методы и аппаратура, применяемые для этих целей, еще не являются достаточно совершенными для выделения минералов из любой их смеси. Особые затруднения, которые не могут пока быть преодолены с использованием чисто механических методов, возникают при выделении минералов из тонкозернистых пород. Для таких случаев остается приемлемой только методика избирательного растворения отдельных минералов. Однако не всегда удастся подобрать избирательно действующий реактив. Трудно преодолимой остается проблема получения совершенно чистых минералов, хотя в ряде случаев при изучении вещественного состава именно к этому стремится исследователь. Для окончательной очистки мономинеральной фракции часто приходится прибегать (на заключительной стадии работы) к отбору посторонних зерен под биноклем. Однако данная операция очень трудоемкая и утомительная.

Задачей исследователей, работающих над усовершенствованием методов выделения мономинеральных фракций, является разработка способов тщательной очистки выделяемого минерала от зерен-примесей, способов, эффективных с точки зрения не только качества получаемого продукта, но и быстроты и наибольшей механизации операции.

Важными остаются работы по изысканию избирательных растворителей, поскольку они могут значительно снизить нижний предел крупности зерен минералов, выделяемых в настоящее время в мономинеральные фракции.

Сделано еще далеко не все возможное для создания мощных электромагнитных сепараторов, производительностью в несколько килограммов навески в час с тонкой регулировкой магнитного поля при напряженности последнего до 20 тыс. эрстед и более. Не используются свойства парамагнитных жидкостей, в которых при сильном магнитном поле всплывает медная пластинка.

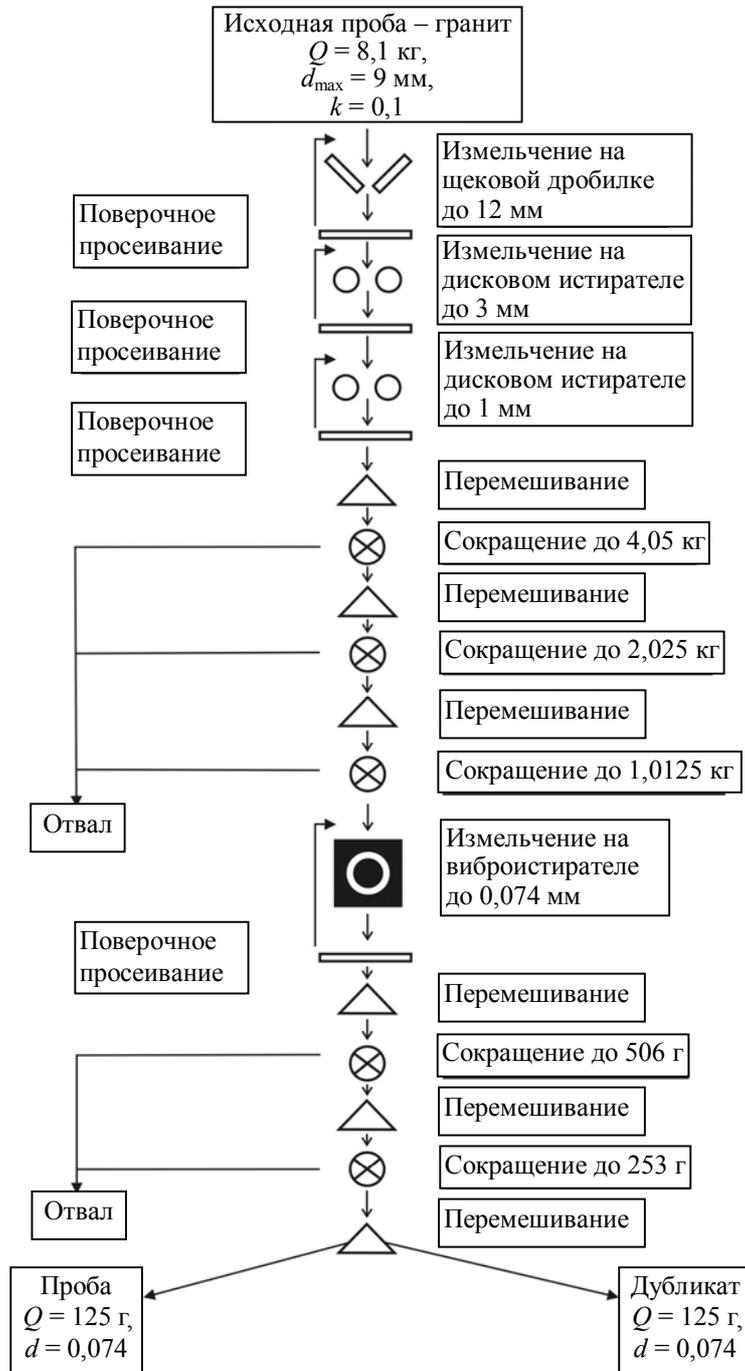
Лаборатории выделения мономинеральных фракций нуждаются в достаточно производительном оборудовании для сухого измельчения.

Следует полагать, что отмеченные недостатки в самое ближайшее время будут устранены, и российская геологическая наука получит возможность сделать еще один шаг вперед в деле комплексного изучения полезных ископаемых.

Авторы благодарят сотрудников Лаборатории физических свойств минералов Института геологии и геохронологии докембрия РАН за активное участие в выполнении настоящей работы.

## Приложения

### 1. Схема обработки и сокращения проб



## 2. Плотность и растворимость наиболее распространенных минералов

Название минерала	Удельный вес	Растворимость					
		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	KOH	NaOH
Авгит	3,3–3,6	+	—	—	+	—	—
Азурит	3,7–3,9	+++	+++	д. о.	д. о.	+	д. о.
Аксинит	3,2–3,3	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Актинолит	3,0–3,1	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Аллофан	1,8–2,0	+++	—	—	д. о.	д. о.	д. о.
Алмаз	3,2–3,5	—	—	—	—	—	—
Алунит	2,6–2,8	—	д. о.	+	+	++	++
Альбит	2,5–2,6	—	—	++	+++	—	—
Альмандин	3,4–4,3	—	—	—	—	—	—
Анальцим	2,2–2,3	+++	—	—	++	—	д. о.
Анатаз	3,82–3,95	—	—	—	—	—	—
Англезит	6,1–6,4	+	+	+	—	+++	++
Андалузит	3,1–3,2	—	—	—	—	—	—
Андрадит	3,1–4,3	++	—	—	+	—	—
Анкерит	2,9–3,1	+++	—	—	—	—	—
Антимонит	4,5–4,6	+++	+++	+	—	—	—
Антофиллит	2,8–3,2	—	—	—	—	—	—
Апатит	3,1–3,2	++	++	++	++	—	—
Апофиллит	2,3–2,4	++	++?	—	+?	—	—
Арагонит	2,9–3,0	+++	+++	+	+	+	—
Арсенопирит	5,9–6,2	—	+++	+	+	—	—
Арфведсонит	3,44–3,46	—	—	—	—	—	—
Атакамит	3,7–3,8	++	+++	+	+	+?	—
Ашарит	2,65	+	+	+	+	—	—
Барит	4,3–4,7	—	—	—	+?	—	—
Берилл	2,6–2,8	—	—	—	+	—	—
Биотит	2,7–3,1	—	—	—	—	—	—
Бирюза	2,6–2,8	+	++	+	+	—	—
Боксит	2,5–3,5	—	—	—	—	—	—
Борнит	4,9–5,2	—	+	—	—	—	—
Браунит	4,7–5,0	+	+	+?	—	—	—
Брейнерит	3,0–3,1	++	++	+	+	—	—
Брошантит	3,7–3,9	+	+	+	+	—	—
Брукит	3,87–4,08	—	—	—	—	—	—
Брусит	2,3–2,4	+	++	+	+	—	—

Продолжение приложения 2

Название минерала	Удельный вес	Растворимость					
		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	KOH	NaOH
Везувиан	3,3–3,4	—	—	—	—	—	—
Вивианит	2,5–2,6	++	++	++	+	—	—
Волластонит	2,7–2,9	++	д. о.	д. о.	д. о.	—	—
Вольфрамит	6,7–7,5	+	д. о.	+	+	—	—
Галенит	7,4–7,6	++	++	д. о.	д. о.	—	—
Галлуазит	2,0–2,2	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Гарниерит	2,3–2,8	+	+	+	+	+	—
Гаусманит	4,8	++	++	++	д. о.	—	—
Геденбергит	3,5–3,6	—	+?	+?	+?	+?	—
Геленит	2,9–3,1	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Гематит	5,0–5,3	+	—	—	+	—	—
Гётит	4,0–4,5	+	—	—	—	—	—
Гиперстен	3,4–3,5	+	—	—	—	—	—
Гипс	2,3	+	д. о.	+	+?	д. о.	—
Глауконит	2,3	+	д. о.	—	д. о.	д. о.	—
Глаукофан	3,1	—	—	—	—	—	—
Грейнерит	2,9–3,0	+++	+++	+++	+++	д. о.	д. о.
Гриноцит	4,9–5,0	++	++	++	+	д. о.	—
Гроссуляр	3,1–4,3	—	—	—	—	—	—
Гюбнерит	6,7–7,3	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Датолит	2,9–3,0	+	+++?	+?	+?	+?	д. о.
Диопсид	3,2–3,3	—	—	—	—	—	д. о.
Диаспор	3,3–3,5	—	—	—	—	—	—
Кианит (дистен)	3,5–3,7	—	—	—	—	—	—
Доломит	1,8–2,3–2,9	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Жадеит	3,1–3,2	—	—	—	—	—	—
Золото	12–19,3	—	—	—	—	—	—
Ильменит	4,5–5,2	—	—	—	—	—	—
Каламин	3,4–3,5	++	++	+	+	+	+
Кальцит	2,71	+++	+++	++	++	+	д. о.
Канкринит	2,4–2,5	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Каолинит	2,5–2,6	—	—	+	д. о.	д. о.	д. о.
Касситерит	6,8–7,1	—	—	—	—	—	—
Кварц	2,66	—	—	—	++	++	++
Киноварь	8,0–8,2	—	++	—	—	—	д. о.

Продолжение приложения 2

Название минерала	Удельный вес	Растворимость					
		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	KOH	NaOH
Клиногумит	3,1	++	—	++	д. о.	д. о.	д. о.
Кобальтин	6,1–6,3	—	++	—	—	—	—
Ковеллин	4,5–4,6	++	++	++	—	д. о.	д. о.
Колумбит	5,1–8,2	—	—	—	—	—	—
Корунд	3,7–4,1	—	—	—	—	—	—
Куприт	6,0–6,2	++	+++	д. о.	д. о.	—	—
Лазулит	3,0	—	—	—	—	—	—
Лазурит	2,3–2,4	++	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Лепидолит	2,8–2,9	—	—	—	—	—	—
Лепидомелан	3,0–3,2	++	д. о.	—	—	—	—
Лимонит	3,3–4,0	++	—	—	—	—	—
Ловчоррит	3,1–3,3	++	++	++	++	д. о.	д. о.
Лопарит	6,3–6,4	—	—	—	++	—	—
Людвицит	4	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Магнезит	2,9–3,2	++	+	+	+	д. о.	д. о.
Магнетит	4,9–5,2	+	+	—	—	—	—
Малахит	3,9–4,1	+++	+++	+++	д. о.	д. о.	д. о.
Маргарит	2,9–3,0	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Медь	8,5–8,9	+	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Мелилит	2,9–3,1	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Мелонит	7,3–7,72	д. о.	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Микроклин	2,54–2,57	—	—	—	—	++	—
Молибденит	4,7–4,8	—	++	—	—	—	—
Монацит	5,0–5,5	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Мусковит	2,7–3,1	—	—	—	—	—	—
Нагролит	2,2–2,5	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Нефелин	2,5–2,6	++	++	++	++	++	—
Никелин	7,3–7,7	—	+	д. о.	д. о.	—	—
Опал	1,9–2,2	—	—	—	++	++	++
Ортит	3,2–4,1	++	д. о.	—	—	д. о.	—
Ортоклаз	2,55–2,58	—	—	—	—	++	—
Парагонит	2,78–3,0	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Пеннин	2,6–2,8	++	—	++	д. о.	д. о.	д. о.
Пентландит	4,6–5,0	++	++	д. о.	д. о.	—	—
Перовскит	3,9–4,0	—	—	+	—	—	—

Продолжение приложения 2

Название минерала	Удельный вес	Растворимость					
		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	KOH	NaOH
Пирофиллит	2,8–2,9	—	—	—	—	д. о.	—
Пиролозит	4,7–5,0	++	++	—	д. о.	—	—
Пироклор	4,2–4,3	—	—	+	+	+	—
Пирротин	4,5–4,6	++	++	++	д. о.	—	—
Платина	14–19	—	—	—	—	—	—
Пренит	2,8–2,9	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Псиломелан-вад	3,4–4,7	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Ревдинскит	2,7	++	д. о.	д. о.	—	д. о.	—
Рибекит	3–4	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Роговая обманка	3,1–3,3	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Родонит	3,5–3,7	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Рутил	4,2	—	—	—	—	—	—
Самарскит	5,6–5,8	+	+	+	+	—	—
Сера	2	—	++	—	—	д. о.	—
Серебро	10–11	—	++	—	д. о.	—	—
Серпентин	2,5–2,6	++	д. о.	++	д. о.	д. о.	д. о.
Сидерит	3,7–3,9	+	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Силлиманит	3,2	—	—	—	—	—	—
Скородит	3,1–3,3	++	д. о.	—	д. о.	д. о.	д. о.
Смитсонит	4,1–4,5	+++	+++	++	++	+	д. о.
Спессаргин	3,1–4,3	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Сподумен	3,1–3,2	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Ставролит	3,6–3,8	+	—	++	—	—	—
Сфалерит	3,5–4,2	++	++	++	+	—	—
Тальк	2,6–2,8	—	—	—	—	—	—
Танталит	5,2–7,7	—	—	—	—	—	—
Тенардит	2,7	+++	+	+	+	—	д. о.
Титанит (сфен)	3,4–3,6	+	д. о.	++	+++	д. о.	д. о.
Топаз	3,5	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Тремолит	2,9–3,0	—	—	—	—	—	—
Турмалин	2,9–3,2	—	—	—	—	—	—
Фаялит	4,0–4,35	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	—
Фенакит	2,96–3,0	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Флогопит	2,7–2,8	+	+	+	+	—	—
Флюорит	3,0–3,2	—	—	+	—	—	—

Окончание приложения 2

Название минерала	Удельный вес	Растворимость					
		HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	KOH	NaOH
Форстерит–оливин	3,1–3,3	+	д. о.	++	д. о.	д. о.	—
Ферберит	7,0–7,5	++	д. о.	д. о.	д. о.	—	—
Франклинит	5,07–5,2	++	д. о.	д. о.	д. о.	—	—
Халцедон	2,5–2,6	—	—	—	—	+	+
Халькозин	5,0–5,5	—	++	++	—	—	—
Халькопирит	4,1–4,3	—	+	+	—	—	+
Хризоберилл	3,6–3,8	—	—	—	—	—	+
Хризоколла	2,0–2,2	++	++	+	+	+	—
Хромит	2,6–2,8	—	—	—	—	—	—
Целестин	3,9–4,0	—	—	++	—	—	—
Церуссит	6,4–6,6	+	+++	++	—	—	++
Циркон	4,68–4,7	—	—	—	+?	—	—
Цоизит	3,2–3,3	—	—	—	—	д. о.	д. о.
Шеелит	5,9–6,2	++	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.
Шпинель	3,5–4,1	—	—	—	—	—	—
Эвдиалит	2,8	++	++	+	++	+	д.о.
Эгирин	3,4–3,6	+	+	+	+	—	—
Энстатит	3,1–3,3	—	—	—	—	—	—
Эпидот	3,4–3,5	+	—	—	—	—	д. о.
Эритрин	2,9	++	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.	д. о.

Примечание. — — нерастворимые; +++ — очень легко растворимые; ++ — легко растворимые; + — растворимые при нагревании; д. о. — данные отсутствуют.

### 3. Факторы, определяющие выбор методов и аппаратуры при разработке схем по выделению мономинеральных фракций

Методы обогащения	Обогатительная аппаратура, используемая в лаборатории	Крупность обрабатываемого материала, мм	Разделительная среда	Свойства, лежащие в основе метода, аппарата	Контрастность свойств, необходимая для осуществления разделения в аппарате	Производительность аппарата	Конечный продукт разделения		Рекомендации по применению методов, аппаратов в схеме	
							Обогащенный концентрат	Мономинеральная фракция		
Гравитационный метод	<b>Концентрационный стол 30А-КЦ-7е</b>	0,5–0,25	Вода	Плотность	1 г/см <sup>3</sup>	50 кг/ч	Концентрат		В первичных операциях обогащения	
	<b>Винтовой сепаратор лаборатории МОПМ</b>	03–0,25	”	”	1,5 г/см <sup>3</sup>	10–100 г	”		То же	
	<i>Разделение в тяжелых жидкостях</i>									
	отстаиванием в воронках	1 до 0,074	Бромформ, тетрабромэтан, йодистый метилен	Плотность	0,01 г/см <sup>3</sup>	В зависимости от объема воронки и количества	”	Монофракция	В первичных операциях доводки	
									Жидкость Клеричи, жидкость Туле	В операциях концентрации и доводки
центрифугирование	менее 0,074	То же	”	”	То же	”	”	”		
Магнитный метод	<b>Ручной магнит Сошнева С-9</b>	от 2 до 0,074	Воздух	Магнитная восприимчивость	К-170 извлечение сильномагнитных минералов при $\chi = 3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	50–10 г/ч	”	”	В первичных операциях обогащения	
	<b>Ручной магнит в чехле РМЧ</b>	от 5 до 0,05	Воздух, вода, спирт			200–300 г/ч*	”	”	В операциях концентрации и доводки	
	<b>Электромагнитный сепаратор с вращающимся магнитным полем</b>	от 2 до 0,045	Воздух			15–20 г/ч	”	”		
	<b>Магнитный анализатор 25Т</b>	от 0,5 до 0,045	Вода			10–15 г в один прием	”	”		
	<b>Электромагнитный роликовый сепаратор 138Т-СЭМ</b>	от 2 до 0,074	Воздух	То же	$(30-40) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	3–5 кг/ч	”	”	В первичных операциях обогащения	

Методы обогащения	Обогатительная аппаратура, используемая в лаборатории	Крупность обрабатываемого материала, мм	Разделительная среда	Свойства, лежащие в основе метода, аппарата	Контрастность свойств, необходимая для осуществления разделения в аппарате	Производительность аппарата	Конечный продукт разделения		Рекомендации по применению методов, аппаратов в схеме
							Обогащенный концентрат	Мономинеральная фракция	
Магнитный метод	<i>Универсальный электромагнит УЭМ-1Т с роликовой приставкой и полюсными наконечниками (плоский сменовидный)</i>	от 2 до 0,043	Воздух, вода	Магнитная восприимчивость	$(5-10) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	5 г в один прием с приставкой 25 г/ч	Концентрат	Монофракция	В операциях концентрации и доводки
	<i>Электромагнитный изодинамический сепаратор СИМ-1</i>	от 1 до 0,05	То же	То же	$1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	1 г/мин	”	”	
Электрический метод	<i>Электрический сепаратор ПС-1</i>	от 2 до 0,043	Воздух	Электропроводность		30–50 кг/ч	”	”	В первичных операциях обогащения
	<i>Электрический сепаратор СЭД (разработанный в лаборатории Ин-та геологии Петрозаводска)</i>	от 0,25 до 0,043	”	Диэлектрическая проницаемость, электропроводность	при ДП > 1,5	20 г/ч	”	”	В операциях концентрации и доводки
	<i>Диэлектрический сепаратор ДСК</i>	от 0,2 до 0,02	Органические жидкости	Диэлектрическая проницаемость	1,5–2	1 г за 3 мин	”	”	В операциях доводки
Флотационный метод	<i>Флотационные машины</i>								
	<i>156 ФЛ</i> , емкость 1,5 л	0,3–0,015	Вода, воздух реагенты	Гидрофобность–гидрофильность минералов	В лаборатории флотация применяется для разделения минералов с устойчивыми	300–400 г/ч	”		В первичных операциях обогащения и в операциях концентрации
	<i>ФМ-2</i> , емкость камер 0,1; 0,15; 0,25 и 0,75 л	0,3–0,015				80–100 г/ч	”		
	<i>МОЛМ</i> , емкость камер 0,275; 0,75 л	0,15				100 г/ч	”		

					реагентными режимами (полевые шпаты, слюды, кварц...)				
Ультразвуковой метод	<i>Диспергатор ультразвуковой низкочастотный УЗДН-1</i>	Макро-, микро-объекты	Вода, твердые реагенты	Комплекс физических, химических свойств	Твердость, хрупкость, ковкость и др.	от 5 до 25 г в один прием	Продукт, обработанный ультразвуком	Продукт, обработанный ультразвуком	Перед операцией концентрации и доводки с целью интенсификации процессов разделения
Избирательные растворения	<i>Стеклоянная емкость</i>	0,3–0,043	Соляная кислота, плотность 1,19, содержит 37% HCl	Растворимость	Растворимость–нерастворимость	В зависимости от емкости посуды	Концентрат	Монофракция	В операциях концентрации и доводки, а также в подготовительных операциях
		0,5–0,043	Азотная кислота, плотность 1,38, содержит 62,6% HNO <sub>3</sub>						
		0,3–0,043	Серная кислота, плотность 1,84, содержит 96,5% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>						
	<i>Емкость из органического стекла</i>	0,3–0,043	Плавиковая кислота, плотность 1,12, содержит 40% HF						

#### 4. Факторы, определяющие выбор аппаратуры в операциях подготовки проб

Методы подготовки проб	Аппаратура подготовки проб для обогащения в лаборатории	Исходная крупность материала, мм	Минимальный размер зерен обработки в аппарате, мм	Среда, в которой осуществляется процесс	Свойства, влияющие на результаты дробления, измельчения, отсева	Производительность аппаратов	Конечный продукт обработки	Рекомендации по использованию лабораторных аппаратов в схеме
Дробление–измельчение	<i>Дробилка щековая ЦД 150×80</i>	65	10	Воздух	Твердость, хрупкость, ковкость	300 кг/ч	Раздробленный материал	В I стадии дробления
	<i>Валковая дробилка ДВ 200×125</i>	10	от 10 до 0,063	Воздух		200 кг/ч	Измельченный материал	Во II стадии дробления, измельчения
	<i>Дисковый истиратель ИРА-175</i>	3	от 3 до 0,074			10 кг/ч		
	<i>Дисковый истиратель ПДИ-200</i>	1–2	от 2 до 0,074			200–300 г за 4–5 мин		
	<i>Лабораторная планетарная мельница (МОЛМ)</i>	2–3	от 2 до 0,074	Воздух, вода, реагенты		500 г/ч	Измельченный разупрочненный продукт	Измельчение, разупрочнение концентратов и породы
	<i>Измельчитель вибрационный 75т-ДРМ</i>	3–10	от 3 до 0,045	Воздух		200 г в течение 2–3 мин	Измельченный материал	Измельчение навесок на анализы
	<i>Ступка для истирания горных пород СМБМ</i>	0,8–1,2	до 0,074			от 5 до 25 г за 7–40 мин		Измельчение навесок на анализы доизмельченных концентратов
Классификация По крупности	<i>Анализатор ситовой вибрационный 23<sup>6</sup>-ГР</i>	2–3	0,063	Воздух, вода	Форма зерен	300 г в один прием	Материал, рассеянный по крупности	На ситовой анализ и рассев проб весом 200–300 г после дробления
	<i>Грохот МОЛМ</i>	4	0,1	Воздух		10 кг/ч	Рассеянный материал	После II стадии отсева
	<i>Шламовый конус</i>	0,5	0,009–0,02	Вода		5–10 кг/ч	Обесшламленный материал	После измельчения

### 5. Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева

Группы элементов											
Периоды	Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	1	<b>1</b> Водород <b>H (1520)</b> 1,0079								<b>2</b> Гелий <b>He (8·10<sup>-7</sup>)</b> 4,0026	
2	2	<b>3</b> Литий <b>Li (20)</b> 6,941	<b>4</b> Бериллий <b>Be (2,6)</b> 9,01218	<b>5</b> Бор <b>B (10)</b> 10,81	<b>6</b> Углерод <b>C (450)</b> 12,011	<b>7</b> Азот <b>N (25)</b> 14,0067	<b>8</b> Кислород <b>O (47,4%)</b> 15,9994	<b>9</b> Фтор <b>F (500)</b> 18,9984	<b>10</b> Неон <b>Ne</b> 20,179		
3	3	<b>11</b> Натрий <b>Na (2,3%)</b> 22,98977	<b>12</b> Магний <b>Mg (2,3%)</b> 24,305	<b>13</b> Алюминий <b>Al (8,2%)</b> 26,98154	<b>14</b> Кремний <b>Si (27,7%)</b> 28,0855	<b>15</b> Фосфор <b>P (1000)</b> 30,97376	<b>16</b> Сера <b>S (260)</b> 32,06	<b>17</b> Хлор <b>Cl (130)</b> 35,453	<b>18</b> Аргон <b>Ar (1,2)</b> 39,948		
4	4	<b>19</b> Калий <b>K (2,1%)</b> 39,0983	<b>20</b> Кальций <b>Ca (4,1%)</b> 40,08	<b>21</b> Скандий <b>Sc (16)</b> 44,9559	<b>22</b> Титан <b>Ti (5600)</b> 47,88	<b>23</b> Ванадий <b>V (160)</b> 50,9415	<b>24</b> Хром <b>Cr (100)</b> 51,996	<b>25</b> Марганец <b>Mn (950)</b> 54,9380	<b>26</b> Железо <b>Fe (4,1%)</b> 55,847	<b>27</b> Кобальт <b>Co (20)</b> 58,9332	<b>28</b> Никель <b>Ni (80)</b> 58,69
	5	<b>29</b> Медь <b>Cu (30)</b> 63,546	<b>30</b> Цинк <b>Zn (75)</b> 65,38	<b>31</b> Галлий <b>Ga (18)</b> 69,72	<b>32</b> Германий <b>Ge (1,8)</b> 72,59	<b>33</b> Мышьяк <b>As (1,5)</b> 74,9216	<b>34</b> Селен <b>Se (0,05)</b> 78,96	<b>35</b> Бром <b>Br (0,37)</b> 79,904	<b>36</b> Криптон <b>Kr</b> 83,80		

Группы элементов											
Периоды	Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
5	6	<b>37</b> Рубидий <b>Rb (90)</b> 85,4678	<b>38</b> Стронций <b>Sr (370)</b> 87,62	<b>39</b> Иттрий <b>Y (30)</b> 88,9059	<b>40</b> Цирконий <b>Zr (190)</b> 91,22	<b>41</b> Ниобий <b>Nb (20)</b> 92,9064	<b>42</b> Молибден <b>Mo (1,5)</b> 95,94	<b>43</b> Технеций <b>Tc</b> [98]	<b>44</b> Рутений <b>Ru</b> 101,07	<b>45</b> Родий <b>Rh</b> 102,9055	<b>46</b> Палладий <b>Pd</b> 106,42
	7	<b>47</b> Серебро <b>Ag (0,07)</b> 107,868	<b>48</b> Кадмий <b>Cd (0,11)</b> 112,41	<b>49</b> Индий <b>In</b> <b>(0,049)</b> 114,82	<b>50</b> Олово <b>Sn (2,2)</b> 118,69	<b>51</b> Сурьма <b>Sb (0,2)</b> 121,75	<b>52</b> Теллур <b>Te</b> <b>(0,5·10<sup>-6</sup>)</b> 127,60	<b>53</b> Иод <b>I (0,14)</b> 126,9045	<b>54</b> Ксенон <b>Xe</b> 131,29		
6	8	<b>55</b> Цезий <b>Cs (3)</b> 132,9054	<b>56</b> Барий <b>Ba (600)</b> 137,33	<b>57*</b> Лантан <b>La(32)</b> 138,9055	<b>72</b> Гафний <b>Hf (8,3)</b> 178,49	<b>73</b> Тантал <b>Ta (2)</b> 180,9479	<b>74</b> Вольфрам <b>W (1)</b> 183,85	<b>75</b> Рений <b>Re</b> <b>(4·10<sup>-8</sup>)</b> 186,207	<b>76</b> Осмий <b>Os</b> 190,2	<b>77</b> Иридий <b>Ir</b> 192,22	<b>78</b> Платина <b>Pt</b> 195,08
	9	<b>79</b> Золото <b>Au</b> <b>(0,1·10<sup>-6</sup>)</b> 196,9665	<b>80</b> Ртуть <b>Hg</b> <b>(0,5·10<sup>-5</sup>)</b> 200,59	<b>81</b> Таллий <b>Tl (0,6)</b> 204,383	<b>82</b> Свинец <b>Pb (14)</b> 207,2	<b>83</b> Висмут <b>Bi</b> <b>(0,048)</b> 208,9804	<b>84</b> Полоний <b>Po</b> [209]	<b>85</b> Астат <b>At</b> [210]	<b>86</b> Радон <b>Rn</b> [222]		
7	10	<b>87</b> Франций <b>Fr</b> [223]	<b>88</b> Радий <b>Ra</b> 226,0254	<b>89**</b> Актиний <b>Ac</b> 227,0278	<b>104</b> Резерфордий <b>Rf</b> [261]	<b>105</b> Дубний <b>Db</b> [262]	<b>106</b> Сиборгий <b>Sg</b> [263]	<b>107</b> Борий <b>Bh</b> [262]	<b>108</b> Хассий <b>Hs</b> [265]	<b>109</b> Майтнерий <b>Mt</b> [266]	<b>110</b> Уун <b>Uun</b> [?]

\*Лантаноиды

<b>58</b> Церий <b>Ce (68)</b> 140,12	<b>59</b> Пра- зеодим <b>Pr (0,5)</b> 140,9077	<b>60</b> Неодим <b>Nd (38)</b> 144,24	<b>61</b> Про- метий <b>Pm</b> <b>(145)</b> [145]	<b>62</b> Самарий <b>Sm (7,9)</b> 150,36	<b>63</b> Евро- пий <b>Eu</b> <b>(2,1)</b> 151,96	<b>64</b> Гадо- линий <b>Gd (7,7)</b> 157,25	<b>65</b> Тербий <b>Tb (1,1)</b> 158,9254	<b>66</b> Дис- прозий <b>Dy (6)</b> 162,50	<b>67</b> Гольмий <b>Ho (1,4)</b> 164,9304	<b>68</b> Эрбий <b>Er (3,8)</b> 167,26	<b>69</b> Тулий <b>Tm (0,48)</b> 168,9342	<b>70</b> Иттер- бий <b>Yb (3,3)</b> 173,04	<b>71</b> Люте- ций <b>Lu (0,51)</b> 174,967
--	---	--	---	--	---	---	---	---	--	--	---	--	---

\*\*Актиноиды

<b>90</b> Торий <b>Th (12)</b> 232,0381	<b>91</b> Прот- актиний <b>Pa</b> 231,0359	<b>92</b> Уран <b>U (2.4)</b> 238,0389	<b>93</b> Неп- туний <b>Np</b> 237,0482	<b>94</b> Плу- тоний <b>Pu</b> [244]	<b>95</b> Аме- риций <b>Am</b> [243]	<b>96</b> Кюрий <b>Cm</b> [247]	<b>97</b> Берклий <b>Bk</b> [247]	<b>98</b> Кали- форний <b>Cf</b> [251]	<b>99</b> Эйн- штейний <b>Es</b> [252]	<b>100</b> Фермий <b>Fm</b> [257]	<b>101</b> Менде- левий <b>Md</b> [258]	<b>102</b> Но- белий <b>No</b> [255]	<b>103</b> Лоу- ренсий <b>Lr</b> [260]
--	---	--	--	---	---	---------------------------------------	---	---	---	---	--	---	---

П р и м е ч а н и я. Атомные массы элементов с 1 по 103 приведены по данным IUPAC, 1979; в квадратных скобках – массовое число наиболее стабильного или наиболее распространенного изотопа; названия элементов – по материалам IUPAC, январь 1997 г.; в круглых скобках – содержание в земной коре (в г/т) по Дж. Эмсли [9].

## Л и т е р а т у р а

### *Основная*

1. *Чечотт Г. О.* Опробование и испытание полезных ископаемых. М.; Л.: Гос. науч.-техн. горно-геол. изд-во, 1932. – 143 с.
2. *Бетехтин А. Г.* Курс минералогии. – М.: Госгеолтехиздат, 1956. – 558 с.
3. *Барский Л. А.* Основы минералургии: Теория и технология разделения минералов. – М.: Наука, 1985. – 384 с.
4. *Глембоцкий В. А., Классен В. И.* Флотация. – М.: Недра, 1973. – 384 с.
5. *Берлинский А. И.* Разделение минералов. – М.: Недра, 1988. – 227 с.
6. *Ляхович В. В.* Методы сепарации акцессорных минералов. – М.: Недра, 1981. – 86 с.
7. *Кевлич В. А., Сыромятина Н. Д.* Технологическо-минералогические рекомендации к разработке схем по выделению мономинеральных фракций из докембрийских горных пород Карелии // Наука производству: сб. ст. / под ред. В. В. Щипцова. – Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1985. – 69 с.
8. *Шоу Д. М.* Геохимия микроэлементов кристаллических пород / пер. с фр. В. А. Галибина; под ред. Ю. К. Буркова и др. – Л.: Недра, 1969. – 208 с.
9. Подготовка препаратов для анализа на микрозонде; метод. рекомендации / сост. Ю. И. Маликов. – Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. АН СССР, Ин-т геологии и геофизики, 1984. – 35 с.

### *Рекомендуемая*

- Бергер Г. С., Ефимов И. А.* Методы выделения мономинеральных фракций. – М.: Госгеолтехиздат, 1963. – 202 с.
- Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарев А. А.* Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 416 с.
- Дементьева Г. И., Гордиенко В. В.* Технология минерального сырья. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998. – 112 с.
- Коц Г. А., Разумная Е. Г.* Применение микрообогатительных методов и аппаратуры для минералогических исследований оценки обогатимости и технологического картирования месторождений. – М.: Недра, 1970. – 128 с.
- Куликов Б. Ф., Зуев В. В., Вейшенкер И. А.* Минералогический справочник технолога-обогапителя. – Л.: Недра, Ленингр. отд., 1978. – 206 с.
- Методы минералогических исследований / справочник; под ред. А. И. Гинзбурга. – М.: Недра, 1985. – 480 с.
- Томов Т. Г.* Обогащение руд в тяжелых жидкостях. – М.: Наука, 1968. – 167 с.
- Чуева М. Н.* Практическое руководство по разделению минералов в тяжелых жидкостях и солях. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 56 с.
- Эмсли Дж.* Элементы: справочник / пер. с англ. Е. А. Краснушкиной. – М.: Мир, 1993. – 298 с.

## Содержание

Введение .....	3
1. Представительность исходных проб и отбор их навесок для лабораторных исследований ....	–
1.1. Дробление .....	6
1.2. Измельчение .....	–
1.3. Истирание .....	7
1.4. Отмучивание .....	9
2. Подготовка проб к выделению мономинеральных фракций .....	–
3. Сепарация минералов по их физическим свойствам .....	10
3.1. Сепарация минералов по магнитным свойствам .....	12
3.2. Сепарация минералов гравитационными методами .....	14
3.2.1. Разделение минералов в тяжелых жидкостях .....	15
3.2.2. Разделение минералов по плотности на концентрационно-сотрясательных столах	16
3.2.3. Разделение минералов на активной подложке по различной форме зерен (трению)	17
3.3. Флотационное разделение минералов .....	19
4. Использование избирательной растворимости минералов в различных реактивах для выделения мономинеральных фракций .....	23
5. Доводка мономинеральных фракций .....	–
6. Примеры схем выделения мономинеральных фракций, используемых в специализированных лабораториях .....	24
6.1. Общая схема выделения мономинеральных фракций из горных пород, применяемая в минералогической лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН, С.-Петербург .....	–
6.2. Методика выделения мономинеральных фракций Лаборатории акцессорных минералов Института минералогии и геохимии АН РФ (ИМГРЭ), Москва .....	26
6.3. Методика выделения мономинеральных фракций Лаборатории минералогического анализа и минерального фракционирования Института геологии карельского филиала АН РФ, Петрозаводск .....	–
7. Баланс распределения химических элементов по минералам горных пород и руд .....	–
8. Изготовление шашек для микрозондового анализа .....	30
9. Техника безопасности при выполнении лабораторных работ .....	31
Заключение .....	32
Приложения .....	33
1. Схема обработки и сокращения проб .....	–
2. Плотность и растворимость наиболее распространенных минералов .....	34
3. Факторы, определяющие выбор методов и аппаратуры при разработке схем по выделению мономинеральных фракций .....	39
4. Факторы, определяющие выбор аппаратуры в операциях подготовки проб .....	42
5. Периодическая система химических элементов Д. И. Менделеева .....	43
Литература .....	46

Учебное издание

*Валерий Васильевич Михайлов*  
*Владимир Васильевич Гордиенко*

**ПРОСТЕЙШИЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ  
ВЫДЕЛЕНИЯ МОНОМИНЕРАЛЬНЫХ ФРАКЦИЙ**

*Учебно-методическое пособие*

*Редактор Э. А. Горелик*  
*Верстка Н. В. Беляевой*

---

Подписано в печать 14.12.2012.  
Формат 70×100 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,94.  
Уч.-изд. л. 4,15. Тираж 150 экз. Заказ № 55.

Геологический факультет СПбГУ.  
Отпечатано в участке Службы оперативной полиграфии  
по направлениям «геология и менеджмент»  
Издательского центра Издательства СПбГУ.  
199034, С.-Петербург, Университетская наб., 7/9.