

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный
университет»



Е. Ф. Цыпин

ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Учебное пособие

Екатеринбург – 2015

УДК 622.7

Ц96

Рецензент: *Козин В. З.*, заведующий кафедрой
обогащения полезных ископаемых
ФГБОУ ВПО «УГГУ»,
профессор, доктор технических наук

Печатается по решению Редакционно-издательского совета
Уральского государственного горного университета

Цыпин Е. Ф.

Ц96 **Информационные методы обогащения полезных ископаемых:**
учебное пособие / Е. Ф. Цыпин; Урал. гос. горный ун-т. – Екатеринбург:
Изд-во УГГУ, 2015. – 206 с.

ISBN 978-5-8019-0365-1

Учебное пособие составлено в соответствии с учебной программой курса «Информационные методы обогащения полезных ископаемых» (модуль «Обогатительные процессы»). В учебном пособии рассмотрена история развития и особенности информационных методов обогащения полезных ископаемых, их теоретические и физические основы. Приведено описание обогатительного оборудования и примеры технологий с использованием информационных обогатительных процессов. Большое внимание уделено описанию и применению информационных методов обогащения, которые до настоящего времени в отечественной и зарубежной литературе освещены недостаточно.

Учебное пособие предназначено для студентов специализации «Обогащение полезных ископаемых» специальности 21.05.04 (130400.65) – «Горное дело» всех форм обучения.

Рис. 62. Табл. 58. Библ. 6 назв.

*Работа выполнена по заданию № 2014/235 на выполнение государственных работ
в сфере научной деятельности.*

УДК 622.7

© Уральский государственный
горный университет, 2015

ISBN 978-5-8019-0365-1

© Цыпин Е. Ф., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ.....	6
2. ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ..	9
3. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА.....	13
4. ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЕЩЕСТВО	17
5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.....	21
5.1. Способы получения информации	21
5.2. Признаки разделения	24
5.2.1. Оценка признака разделения.....	26
5.2.2. Интегральные и дифференциальные признаки.....	26
5.3. Параметры и алгоритмы разделения	30
5.4. Режимы информационных процессов обогащения	35
5.5. Фракционные характеристики	37
5.6. Сепарационные характеристики и границы разделения	43
6. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ И ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЕЩЕСТВО	53
6.1. Радиоактивность. Характеристики радиоактивных излучений и потоков частиц	53
6.2. Взаимодействие ионизирующих излучений и потоков частиц с ядрами и атомами	59
6.3. Ионизирующие излучения и потоки частиц	60
6.4. Взаимодействие заряженных частиц с атомами и ядрами	62
6.5. Взаимодействие нейтронов с веществом	66
6.6. Взаимодействие γ -излучения с веществом на ядерном и атомном уровнях	72
6.6.1. Фотозэффект.....	73
6.6.2. Ядерный фотозэффект	79
6.6.3. Резонансное поглощение.....	81
6.6.4. Рассеяние излучения	81
6.6.5. Образование пар.....	83
6.6.6. Ослабление и поглощение гамма-излучения	84
6.7. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом на атомном уровне.....	90
6.8. Взаимодействие излучений с минералами и горными породами.....	92
6.8.1. Взаимодействие ультрафиолетового излучения с веществом	93
6.8.2. Люминесценция	93

6.8.3. Взаимодействие видимого излучения с веществом	99
6.8.4. Использование излучения инфракрасного диапазона	110
6.8.5. Взаимодействие радиоволнового излучения с веществом.....	116
7. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУПП.....	125
8. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ.....	128
8.1. Порции сортировки	128
8.2. Рудосортировочные контрольные станции и мелкопорционные сортировочные установки	130
8.3. Информационные сепараторы	135
8.3.1. Принципы устройства сепараторов.....	135
8.3.2. Радиометрические сепараторы.....	138
8.3.3. Фотонейтронные сепараторы	141
8.3.4. Нейтронно-абсорбционные сепараторы	141
8.3.5. Гамма-абсорбционные сепараторы	142
8.3.6. Рентгеноабсорбционные сепараторы	143
8.3.7. Рентгенофлуоресцентные сепараторы	144
8.3.8. Рентгенолюминесцентные сепараторы.....	149
8.3.9. Оптические (фотометрические) сепараторы.....	153
8.3.10. Унификация сепараторов и комплексирование признаков разделения.....	158
9. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФОРМАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ	161
10. ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ	162
10.1. Принципиальные схемы обогащения	162
10.2. Руды чёрных металлов	165
10.3. Руды цветных, редких и благородных металлов.....	172
10.4. Урановые руды.....	187
10.5. Алмазосодержащие руды	194
10.6. Изумрудно-бериллиевые и бериллиевые руды.....	196
10.7. Бокситы	199
10.8. Неметаллические полезные ископаемые.....	200
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	202
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	203
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	206

ВВЕДЕНИЕ

Особой ветвью методов обогащения является группа информационных методов. Они отличаются от прочих обязательным использованием ряда информационных процедур (измерение свойств, преобразование информации, принятие решения об удалении или неудалении) в элементарном акте разделения каждой разделяемой частицы или порции.

Информационные методы обогащения получили свое развитие в середине XX века и находят в настоящее время широкое применение в горной промышленности. Они являются неотъемлемой составляющей технологии переработки урановых, бериллиевых, алмазосодержащих руд, перспективны для обогащения многих руд черных, цветных, редких и благородных металлов, а также неметаллических полезных ископаемых.

Изучение дисциплины следует начинать с уяснения теоретических и физических основ методов.

Освоение следующих разделов и овладение навыками и умениями по работе на рентгенорадиометрическом сепараторе, изучение закономерностей информационного разделения, анализ рентгенорадиометрической обогатимости минерального сырья необходимо сочетать с выполнением лабораторного курса.

1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

Информационные методы обогащения использовались человеком с древних времен. Ручная рудоразборка в ряде случаев применяется до сих пор. Все информационные процедуры (получение и обработка информации, принятие решений) при ручной рудоразборке выполняются человеком, отбор нужных кусков также выполняется вручную, лишь иногда для механического удаления кусков вместо ручного используют специальные удаляющие устройства.

В 1939 году М. Е. Богословским для выделения алмазов из черного гравитационного концентрата был предложен рентгенолюминесцентный метод. Им же был сконструирован и создан первый сепаратор. Это было первое применение, в том числе и промышленное, одного из информационных методов обогащения и в СССР, и в мире.

Новое развитие информационных методов связано с промышленным освоением урановых руд. Первые исследования в СССР в этом направлении были проведены З. В. Волковой в конце 1940-х годов. Одна из первых моделей радиометрического сепаратора была разработана Г. Р. Гольбеком. В тот же период в Канаде в 1947 году был разработан и испытан под руководством К. М. Лапойнте один из первых образцов сепаратора.

В 50-х годах XX века в СССР введена в эксплуатацию первая радиометрическая фабрика по обогащению урана в городе Жёлтые Воды.

Области применения информационных методов сепарации расширялись за счет использования самых различных излучений и эффектов взаимодействия их с обогащаемым сырьём.

В 50-х годах А. М. Годеном (Массачусетский технологический институт) с коллегами предложен фотонейтронный способ обогащения бериллиевых руд, несколько ранее (в 1938 г.) советским изобретателем Г. В. Горшковым этот способ был предложен для определения бериллия в рудах и породах.

В Великобритании традиционно развивались фотометрические методы сепарации. Прообразом сепарации минерального сырья были использовавшиеся в этой стране с 30-х годов сортировочные аппараты для бобов кофе и какао. В 1953 году П. С. Ньюэном и П. Ф. Уиланом предложен способ разделения угля по блеску. В 1960 году специалистами алмазодобывающего предприятия в Южной Африке для обогащения алмазов было предложено использовать различия в способности минералов отражать и пропускать видимый свет.

Первый рентгенолюминесцентный сепаратор для обогащения сухих гравитационных концентратов алмазосодержащих руд был создан в 1955 году В. В. Финне. Он явился прообразом современной аппаратуры, применяемой в алмазодобывающей промышленности всего мира.

С 60-х годов разработка способов и аппаратуры для сепарации происходит весьма интенсивно. В СССР разработаны нейтронно-абсорбционный, фотонейтронный, фотометрические, гамма-абсорбционный, радиорезонансный, фотолюминесцентный, рентгеноспектральный (в начале 70-х годов) способы сепарации. В 1966 году была освоена промышленная технология с использованием фотонейтронных сортировки и сепарации бериллиевых руд. В те же годы начинается промышленная эксплуатация рентгенолюминесцентных сепараторов для алмазов. В 1970 году в ЦНИЛА изготовлены промышленные нейтронно-абсорбционные сепараторы, которые использовались для обогащения датолитов. Там же разработаны и доведены до широкого промышленного внедрения гамма-абсорбционные сепараторы для обогащения окисленных железных руд Кривбасса.

За рубежом в 60-70-е годы английской фирмой «Gunsons Sortex Ltd» разработано несколько моделей фотометрических и рентгенолюминесцентных сепараторов.

В 80-е годы канадская фирма «Ore Sorters Ltd» разработала серию сепараторов с монослойной раскладкой кусков. Реализованы фотометрический, радиометрический, радиорезонансный, фотолюминесцентный способы разделения. Кроме них фирмой выпускались кондуктометрические сепараторы с контактным измерением проводимости, используемые для сортировки руды с самородной медью и вторичного металлургического сырья. Фотометрический сепаратор этой фирмы австралийскими разработчиками был модернизирован в комбинированный с дополнительной системой рентгенорадиометрического детектирования для улавливания богатых вольфрамовых кусков при фотометрическом обогащении жильного кварца, с которыми ассоциирует вольфрамит. В те же годы в центре геофизических исследований Франции разработан магнитометрический сепаратор ленточного типа. Этот высокочувствительный аппарат был использован для разделения мало отличающихся по магнитным свойствам талька и хлорита.

Ряд методов, разработанных в СССР и за рубежом, не являются бесконтактными. В них необходимую для разделения информацию о свойствах вещества в каждом куске получают или с использованием

контактного воздействия на вещество, или (и) с контактным измерением физических характеристик вещества. Такой принцип реализуется в ряде аппаратов. Ранее уже упоминался кондуктометрический сепаратор с контактным измерением проводимости. К ним относится инфраметрический сепаратор австралийской компании «Colonial Sugar Refining», использующий различие теплоемкостей и теплопроводностей асбеста и вмещающих пород путем бесконтактного измерения температуры поверхности куска после кратковременного нагревания руды в пламени газовой горелки (нагрев осуществляется не излучением, а при контакте с пламенем). В СССР разработан способ и аппаратура для сортировки губчатого титана по величине термоЭДС, в котором и нагрев, и измерение ЭДС осуществляются контактными устройствами.

Как уже отмечалось выше, в Канаде выпускались кондуктометрические сепараторы с контактным измерением проводимости кусков, которые использовались для выделения из руды самородной меди и для разделения вторичного металлургического сырья.

Наиболее активные разработки методов и аппаратуры сепарации с использованием информации о разделяемых кусках и порциях велись в СССР и за рубежом в 1960-1990-е годы.

В 90-е годы в разных странах появились модели оптических сепараторов с измерением трёхцветных координат цвета в системе RGB.

С 90-х годов по настоящее время ведутся работы главным образом по совершенствованию методов и аппаратуры для сортировки, внедрению сепараторов в промышленность. При этом происходит естественный отбор методов, пригодных для промышленного использования по критериям технологической, экономической, экологической эффективности. Существенным ограничением применения отдельных методов является их радиационная безопасность.

Наибольшее распространение в настоящее время получили аппараты, использующие рентгенорадиометрические, фотометрические, люминесцентные, радиометрический, радиорезонансный методы измерения.

2. ОСОБЕННОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ

По характеру использования различий в свойствах методы обогащения можно разделить на разрушающие, осуществляемые, как правило, двухоперационными процессами, в первой из операций при избирательном разрушении используется различие в прочности разделяемых фаз, во второй – приобретённые в результате избирательного разрушения различия в крупности или форме, используемые для собственно разделения, и неразрушающие. Последние в свою очередь подразделяются на прямые и информационные.

Информация о вещественном (элементном, минеральном) составе разделяемого сырья используется в обогащении в самых различных аспектах.

Она является основой для прогноза обогатимости, выбора методов и режимов разделения, обоснования и построения обогатительной технологии, для управления технологическими процессами (и по возмущению, и по отклонению). На основе оперативно получаемой информации вводятся различные управляющие воздействия: меняются расход реагентов, плотность среды разделения, положения шиберов, скоростные режимы, продолжительность операций, варианты схем и т. п. Для управления процессами информацию получают на основе анализов проб, специально отобранных от перерабатываемого материала. Полученная информация способствует повышению эффективности технологического процесса, но не является обязательным условием для его осуществления в конкретный момент времени с материалом, находящимся в зоне разделения аппарата. Любой элементарный акт разделения, будь то закрепление частицы с гидрофобной поверхностью на границе раздела жидкой и газообразной фаз, всплытие частицы с малой плотностью в тяжёлой суспензии или перемещение частицы с высокой магнитной восприимчивостью при движении в неоднородном магнитном поле в зону максимальной напряжённости магнитного поля, произойдёт независимо от того, получена или не получена информация о составе конкретной обогащаемой частицы. Для перемещения конкретной частицы в тот или иной продукт разделения она не требуется. Информация характеризует состав перерабатываемого материала в целом и непосредственно в разделии каждой частицы или локальной порции не используется. Перечисленные варианты использования информации применимы к любым обогатительным процессам, для которых

характерна прямая взаимосвязь свойств минералов и сепарирующих сил.

Однако почти все свойства, лежащие в основе разделения в методах с непосредственным воздействием на частицу поля силы той же природы, что и сами свойства, могут быть использованы совершенно по-другому. Они могут быть измерены, т. е. от любой обогащаемой частицы с помощью измерительной системы может быть получен сигнал, пропорциональный значению физической характеристики частицы, преобразуемый далее в параметр разделения, который сопоставляется с граничным значением параметра. По результатам сопоставления может быть принято решение об удалении конкретной частицы в тот или иной продукт. Это всё – информационные процедуры, являющиеся обязательными для обогащения каждой частицы, без которых не произойдёт переход любой из них в концентрат или хвосты. Это принципиально другой способ использования информации, при этом информационные процедуры являются составляющими элементарного акта разделения. То есть одни и те же свойства минералов могут использоваться для разделения в двух принципиально отличающихся друг от друга вариантах.

Методы, основой которых является получение информации о составе или свойствах каждой обогащаемой порции (частицы) с целью оценки её качественной характеристики, принятие решения на основе анализа информации об удалении порции (частицы), формирование на основе решения воздействия для перемещения порции (частицы) в тот или иной продукт разделения, относятся к информационным. Все перечисленные операции составляют любой элементарный акт информационного разделения. В этих методах информация необходима для каждой разделяемой частицы и только по ней принимается решение о её удалении.

Различие процессов прямых и информационных методов наглядно иллюстрируется рис. 2.1.

Непосредственное использование различий в физических, физико-химических и химических свойствах минералов характерно для прямых методов обогащения. К ним относятся гравитационные, магнитные, электрические, флотационные, специальные (по трению и упругости) и тому подобные.

В прямых методах разделения поведение частиц определяется воздействием сепарирующей силы той же природы, что и используемое для разделения свойство, причём действие этой силы проявляется

непосредственно при взаимодействии частиц с полем, со средой разделения, с поверхностью разделения и тому подобное, а её величина пропорциональна величине признака разделения частицы. В результате силового воздействия или взаимодействия частиц со средой или с поверхностью разделения изменяются траектории движения частиц. Воздействию разной интенсивности могут подвергаться все частицы, содержащие выделяемые компоненты. Исключением при использовании в качестве основной операции является грохочение, в котором переход частицы в тот или иной продукт определяется не величиной силового воздействия, а соотношением размеров частицы и отверстий просеивающей поверхности.

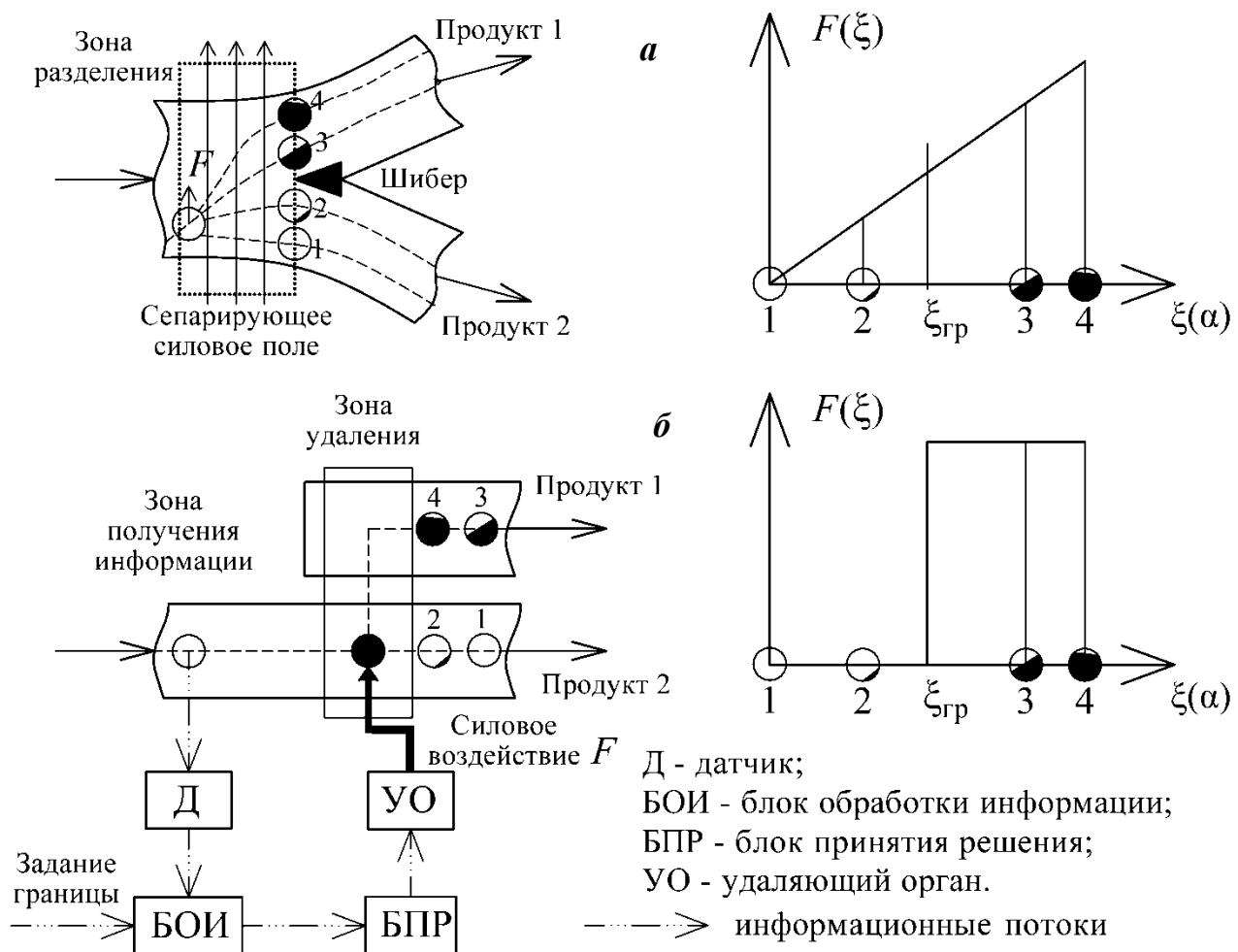


Рис. 2.1. Типовые процессы разделения при использовании прямых (а) и информационных (б) методов обогащения

Отличие прямых и информационных методов состоит в том, что в них по-разному формируется силовое воздействие на частицу в потоке разделения, а граница разделения настраивается либо в прямых процессах – механическими делительными устройствами (шиберами, за-

слонками, перегородками, затворами, насадками, разгрузчиками и т. п.), либо в информационных – сигналами задания.

Почти все свойства, используемые в прямых методах разделения, и ряд дополнительных свойств могут быть измерены, а информация о них по каждой частице может быть использована для её перемещения в один из продуктов разделения – это другой механизм разделения. То есть одни и те же свойства минералов могут использоваться для разделения как непосредственно, так и с использованием информации об этих свойствах.

Для осуществления разделения в прямых методах нужно само различие свойств разделяемых минералов, но разделение происходит без информации о свойствах разделяемых частиц. В этих процессах информация применяется лишь для управления процессом в целом и используется периодически при настройке режимов, а для осуществления собственно разделения нужно само различие свойств разделяемых частиц, а не информация о свойствах. В информационных методах информация необходима для каждой разделяемой порции (частицы) и только по ней принимается решение об удалении конкретной порции. При этом силовое воздействие избирательно, оно распространяется лишь на часть частиц (для которых принято решение об удалении). Величина силового воздействия для отдельных кусков либо постоянна, либо пропорциональна массе, объёму частицы и не зависит от величины измеренного свойства частицы.

Характеристики (свойства) вещества, используемые для измерений в информационных методах, определяются элементарным, изотопным, минеральным составом, особенностью текстуры и структуры, характером минерализации, состоянием поверхности и многими другими факторами.

Информационные методы отличаются от прочих несколькими существенными только им весьма ценными возможностями. Среди них: возможность разделения по признакам, весьма тесно связанным с содержаниями элементов; возможность использования комплексных раздельных признаков, обеспечивающих качественную идентификацию минеральных фаз; возможность учёта в алгоритмах принятия решения содержаний нескольких элементов с учётом их промышленной ценности; возможность использования при разделении в одной технологической операции различных разделяемых фаз в нескольких физических свойствах, что в прямых методах обогащения или просто невозможно, или требует развёрнутых технологических схем.

3. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

По современным представлениям, атом любого элемента состоит из положительно заряженного ядра и электронов, располагающихся вокруг ядра в виде слоёв. В ядре сосредоточена почти вся масса атома. Число электронных слоёв увеличивается с возрастанием порядкового номера элемента.

В состав ядра входят элементарные частицы – нуклоны, это частицы двух видов: протоны (p) и нейтроны (n): протоны – положительно заряженные частицы, а нейтроны – нейтральные. Количество протонов Z определяет заряд ядра, оно совпадает с порядковым (атомным) номером элемента. Число протонов равно количеству орбитальных электронов, поэтому атом в целом электрически нейтрален.

Ядра атомов различаются по числу нейтронов и протонов. Их соотношение в стабильных ядрах является вполне определённым. A – массовое число элемента, $A-Z$ – число нейтронов в ядре.

В ядре могут проходить переходы типа $n \rightarrow p$, $p \rightarrow n$, иногда протон и нейтрон рассматривают как разное состояние нуклона. Нуклоны в ядре связаны между собой ядерными силами притяжения, благодаря чему прочность ядра очень велика. Радиус действия ядерных сил чрезвычайно мал (около 10^{-15} м). Ядерные силы быстро затухают с увеличением расстояния между частицами и обладают способностью к насыщению, особенно в системе $2n \rightarrow 2p$. Этим объясняется наличие в ядре, помимо элементарных частиц p и n , более сложных α -частиц (${}^4_2\text{He}$), каждая из которых состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Радиус ядра составляет примерно 10^{-14} м, а радиус атома – 10^{-10} м, то есть атом имеет очень разреженную структуру. Суммарный объём ядра и всех электронов атома равен 10^{-12} объёма атома. По этим причинам элементарные частицы могут легко проходить через слои вещества значительной толщины.

Протон является заряженной частицей с единичным положительным зарядом. Масса протона в 1836 раз больше, чем масса электрона. У электрически нейтрального нейтрона масса близка к массе протона (больше на 2,5 массы электрона).

В лёгких ядрах (малые Z) содержится равное или почти равное число протонов и нейтронов. В тяжёлых ядрах соотношение числа протонов и нейтронов меняется, нейтронов становится в 1,5 раза больше, чем протонов. Для стабильных ядер связь между Z и A описывается эмпирическим соотношением:

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}.$$

Существование стабильных ядер свидетельствует о том, что ядерные силы притяжения значительно превосходят кулоновские силы взаимного отталкивания.

Изотопами называются совокупности атомов какого-либо элемента, ядра которого содержат одинаковое число протонов, но разное число нейтронов. Поэтому изотопы имеют различное массовое число и одинаковые химические свойства. В природе большинство элементов представляют смесь двух или более изотопов. Изобары имеют ядра с одинаковыми массовыми числами, но с разным количеством нейтронов и протонов.

Масса ядра всегда меньше суммы масс всех составляющих его нейтронов и протонов, так как прочно связанная система нуклонов имеет минимум энергии согласно формуле Эйнштейна $E=mc^2$. Разность масс – дефект массы, определяет энергию связи нуклонов ядра. Энергия связи – это та энергия, которую надо затратить для разделения ядра на составляющие нуклоны. Эта энергия – мера прочности ядра.

Ядро атома окружено диффузным облаком из электронов, которое определяет размер атома. Области наиболее вероятного нахождения электронов называют орбиталями. Каждая орбиталь характеризуется определённой энергией.

В соответствии со значением главного квантового числа $n=1, 2, 3, \dots$, электронные оболочки атома принято обозначать буквами K, L, M соответственно. Электроны K -оболочки имеют наибольшую энергию связи с ядром.

Физические и химические свойства атомов и вещества в целом во многом определяются особенностями электронного облака вокруг атомного ядра.

Орбитальные электроны при стационарном состоянии атома движутся по замкнутой орбите, при этом не выделяется энергия и орбиты электронов являются устойчивыми.

Возможно существование нескольких стационарных состояний, каждое из которых характеризуется определённой энергией. Если электрон переходит из состояния с более высокой энергией в состояние с пониженной энергией, происходит излучение фотона определённой энергии. В возбуждённое состояние атом может перейти, например, при нагреве вещества при прохождении через него электрического тока, при выбивании фотоном электрона с внутренней электронной оболочки.

Энергетические переходы электронов внутренних слоёв (*K*, *L* и т. д.) приводят к возникновению квантов рентгеновского излучения (энергия в сотни и тысячи электрон-вольт). Такие переходы могут быть вызваны внешними воздействиями, например, α -частицами или квантами с достаточным уровнем энергии (рентгеновского или γ -излучения), которые первоначально вызывают удаление из атома одного из внутренних электронов и заполнение образовавшейся вакансии другим электроном, который переходит с более удалённых от ядра оболочек. Время перехода (или цепочки переходов) 10^{-7} - 10^{-16} с. Энергия кванта характеристического рентгеновского излучения равна разности энергий электронов внешней и внутренней оболочек. Если первоначальная вакансия образовалась на *K*-слое, то атомом испускается квант *K*-серии, при удалении электрона с *L*-слоя испускается квант *L*-серии. Для каждой серии с увеличением порядкового номера элемента происходит закономерное увеличение как требуемой для возбуждения энергии, так и энергии излучаемых квантов.

Рентгеновские спектры характерны для каждого элемента и практически не зависят от типа химических соединений элементов, что позволяет эффективно определять элементный состав минерального и техногенного сырья.

Формой существования химических элементов в свободном виде являются простые вещества, они в природе представлены металлами и неметаллами.

Если атом обладает всеми свойствами химического элемента, то молекула – это мельчайшая частица химического соединения (вещества), которая обладает всеми свойствами химического соединения и способна к самостоятельному существованию. Молекула состоит из двух или более атомов.

Химическое соединение – сложное вещество, которое состоит из атомов двух или нескольких элементов. Иногда в качестве химических соединений могут рассматриваться простые вещества, если их молекулы состоят из атомов, связанных ковалентной связью.

Важнейшими физическими свойствами веществ, которые могут быть использованы для их идентификации, являются электрические (электропроводность, диэлектрическая проницаемость), магнитные (магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость), теплофизические (теплопроводность, теплоёмкость), оптические (коэффициенты и спектры поглощения, пропускания, рассеяния, преломления), люминесцентные (спектр и интенсивность свечения).

Химическое соединение – это следующий за ядром и атомом уровень организации материи.

Природное химическое соединение, химический состав которого изменяется в граничных пределах, обладающее кристаллической структурой, образовавшееся в результате геологических процессов, называют **минералом**.

Минерал обладает определёнными физическими, механическими свойствами, может быть представлен несколькими минеральными видами и иметь сложный состав. Каждый минеральный вид имеет определённый химический состав и структуру. Они определяют его конституцию, которая, в свою очередь, определяет присущие минералу свойства и его морфологию.

Форма кристаллов определяется его структурой и влиянием окружающей среды. Степень развития кристалла в разных направлениях определяет его облик. Различают следующие типы облика:

- изометричный – примерно одинаковое развитие кристалла по взаимно перпендикулярным направлениям;
- удлинённый – при увеличении кристалла в одном направлении облик последовательно будет короткопризматическим, длиннопризматическим, игольчатым, волокнистым;
- уплощённый – при сжатии в одном направлении облик меняется в последовательности: таблитчатый, пластинчатый, чешуйчатый, листоватый;
- если кристалл в разных направлениях развит неравномерно, облик называют бочонковидным, клиновидным, скипетровидным, сноповидным и т. п.

Минеральные индивиды – это отдельные кристаллы, зёрна минералов, отделённые друг от друга физическими поверхностями раздела и представляющие собой форму нахождения минеральных видов в природе. Минеральный индивид – исходное понятие минералогии, они являются составными частями минеральных агрегатов.

Агрегатом называют незакономерное срастание множества индивидов одного или разных минералов. Форма отдельных кристаллов и механизм их образования предопределяют форму минеральных агрегатов.

Если зёрна изометричны, то по их величине агрегаты подразделяют на тонкозернистые (зёрна на глаз не различимы), мелкозернистые (зёрна различимы на глаз и менее 1 мм), среднезернистые (1-5 мм), крупнозернистые (5-20 мм), гигантозернистые (крупнее 20 мм).

При вытянутой форме индивидов они образуют шестоватые, игольчатые, волокнистые агрегаты. При уплощенной форме кристаллов агрегаты приобретают пластинчатое, чешуйчатое и листоватое строение.

Природные совокупности агрегатов минералов примерно одинакового минералогического состава, образующие самостоятельные геологические тела, слагающие земную кору, называются горными породами.

Как физическое тело минеральные агрегаты, горные породы характеризуются группой свойств, среди них плотностные, упругие, прочностные, тепловые, электрические, магнитные, оптические и т. д. Важными свойствами являются также пористость и трещиноватость. Свойства горных пород зависят также от различного рода воздействий: механического (давление), теплового, электрического, магнитного, радиационного, вещественного (насыщенность жидкостями или газами) и т. д.

4. ВИДЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЕЩЕСТВО, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Бесконтактные воздействия на вещества могут оказывать электромагнитное излучение и потоки элементарных частиц.

Электромагнитное излучение (волны) – это распространяющееся в пространстве возмущение взаимодействующих друг с другом электрического и магнитного полей.

Основными характеристиками электромагнитного излучения принято считать частоту и длину волны.

Длина волны λ прямо связана с частотой через скорость распространения излучения. Скорость распространения излучения в вакууме равна скорости света c , в других средах она меньше. Длина волны λ и частота ν связаны соотношением $\lambda = c/\nu$.

Распространение электромагнитных волн и все характеристики электромагнитного излучения определяются способом и источником генерирования излучения и свойствами среды.

Электромагнитное излучение принято делить по частотным диапазонам. Между диапазонами нет явных границ, они иногда существенно перекрываются.

В табл. 4.1 приведены характеристики электромагнитного излучения различных диапазонов.

Таблица 4.1

Характеристика диапазонов электромагнитного излучения

Название диапазона	Длина волны, м	Частота, Гц	Энергия квантов, эВ	Источники излучения
Радиоволны, в том числе СВЧ	10^{-3} – 10^4 10^{-3} – 10^0	$3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^8$ – $3 \cdot 10^{11}$	– –	Переменные токи в проводниках и электронных потоках (колебательные контуры)
Инфракрасное излучение, в том числе ближнее	$0,76 \cdot 10^{-6}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ $0,76 \cdot 10^{-6}$ – $2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{11}$ – $3,9 \cdot 10^{14}$ $1,2 \cdot 10^{14}$ – $3,9 \cdot 10^{14}$	$0,62 \cdot 10^{-3}$ – $1,63$ $0,5$ – $1,63$	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
Видимое излучение	$0,76 \cdot 10^{-6}$ – $0,38 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{14}$ – $7,9 \cdot 10^{14}$	$1,63$ – $3,26$	–
Ультрафиолетовое излучение, в том числе ближнее	10^{-8} – $0,38 \cdot 10^{-6}$ $0,20 \cdot 10^{-6}$ – $0,38 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$ $7,9 \cdot 10^{14}$ – $1,5 \cdot 10^{15}$	$3,26$ – 10^2 $3,26$ – $6,2$	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов
Рентгеновское излучение, в том числе мягкое	$5 \cdot 10^{-12}$ – 10^{-8} $2 \cdot 10^{-10}$ – 10^{-8}	$3 \cdot 10^{16}$ – $6 \cdot 10^{19}$ $3 \cdot 10^{16}$ – $1,5 \cdot 10^{18}$	$1,24 \cdot 10^2$ – $2,48 \cdot 10^5$ $1,24 \cdot 10^2$ – $6,24 \cdot 10^3$	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц и высокоэнергетических квантов (фотонов)
Гамма-излучение	$<10^{-10}$	$>3 \cdot 10^{18}$	$>1,24 \cdot 10^4$	Ядерные процессы, радиоактивный распад

Описанием свойств и параметров электромагнитного излучения в целом занимается электродинамика. Классическая электродинамика, основанная на уравнениях Максвелла, используется для описания низкочастотного электромагнитного излучения (радиоволн). Характеристику излучений *оптического* диапазона (инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое) описывает оптика. В частности различают: *волновую*

оптику, для которой характерна близость размеров некоторых частей оптической системы и длины волны излучения; *квантовую оптику*, описывающую процессы поглощения, излучения, рассеяния фотонов; *геометрическую оптику* – предельный случай волновой оптики, когда длиной волны излучения пренебрегают. Излучения с самыми малыми длинами волн, но с самыми высокими энергиями квантов являются предметом изучения атомной и ядерной физики.

Источники излучений различных диапазонов отличаются по физической природе. Для возбуждения радиоволн используют токи в проводниках и электронных потоках (колебательные контуры), для их регистрации применяют резонансные приборы. Радиоволны можно рассматривать без учёта атомистического строения среды из-за больших значений λ . В этом диапазоне очень слабо сказываются квантовые свойства излучения.

Лишь самые короткие радиоволны (микроволны, СВЧ), примыкающие к инфракрасному участку спектра, начинают проявлять квантовые (корпускулярные) свойства излучений. Между микроволновым (СВЧ) и инфракрасным излучениями одинаковых длин волн нет принципиальных различий, но происхождение их различно: СВЧ-излучение генерируется электронным прибором, а инфракрасное – инфракрасным источником.

Оптическая область спектра объединяет видимое, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения. Для преобразования этих излучений используют схожие по конструкции приборы, включающие линзы, зеркала, призмы, дифракционные решётки, интерферометры и т. д.

Частоты волн этих диапазонов сопоставимы с собственными частотами атомов и молекул, а их длины волн сравнимы с размерами молекул и с межмолекулярными расстояниями. Поэтому в этой области атомистическое строение вещества определяет род явлений и в оптическом диапазоне проявляются как волновые, так и квантовые свойства света. Кроме того, важной характеристикой излучения видимого диапазона является поляризация.

Поляризация волн – это характеристика, определяющая пространственную направленность векторных волновых полей.

В областях рентгеновского и гамма-излучения определяющими становятся квантовые свойства излучения. Эти виды излучений имеют одинаковые свойства, но разное происхождение. Гамма-излучение возникает в результате процессов, происходящих внутри атомных ядер: ядерных реакций, радиоактивного распада. Рентгеновское излучение

возникает при торможении быстрых заряженных частиц (электронов, протонов, α -частиц), а также при взаимодействии гамма- и рентгеновских квантов с электронными оболочками атомов.

Спектры вторичного излучения различных диапазонов при взаимодействии с веществом определяются: у микроволнового диапазона – вращательными спектрами молекул, у инфракрасного диапазона – вращательными и колебательными движениями молекул, у видимого и ультрафиолетового диапазонов – квантовыми переходами электронов внешних оболочек атомов; у рентгеновского диапазона – возбуждением атомов и квантовыми переходами электронов внутренних оболочек, у гамма-диапазона – ядерными превращениями. Энергия квантов электромагнитного излучения может быть оценена по формуле:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с); λ – длина волны излучения, м; h – постоянная Планка: $h=6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с или $h=4,136 \cdot 10^{-15}$ эВ·с, так как $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Энергию квантов в эВ можно рассчитать, зная длину волны (λ в м), по формуле:

$$E = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8}{\lambda} = \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{\lambda}.$$

Помимо излучений на вещество могут воздействовать потоки элементарных частиц. Их основные физические константы приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Основные физические константы элементарных частиц

Частицы	Масса		Заряд, 10^{-19} , Кл
	г	а.е.м.	
α -частица	$6,64660 \cdot 10^{-24}$	4,002603	+3,204
β -частица	$9,10977 \cdot 10^{-28}$	$5,48593 \cdot 10^{-4}$	–1,602
Позитрон	$9,10977 \cdot 10^{-28}$	$5,48593 \cdot 10^{-4}$	+1,602
Протон	$1,67352 \cdot 10^{-24}$	1,007825	+1,602
Нейтрон	$1,67496 \cdot 10^{-24}$	1,008665	0,000

Примечание: а.е.м. – атомная единица массы, равная $1,66 \cdot 10^{-24}$ г.

Потоки элементарных частиц возникают в результате ядерных превращений самопроизвольно или в результате ядерных реакций, происходящих при воздействии потоков частиц или высокоэнергетических излучений (искусственная радиоактивность).

происходящих при воздействии потоков частиц или высокоэнергетических излучений (искусственная радиоактивность).

Начальная кинетическая энергия α -частиц для различных ядер может меняться в пределах от 1,8 до 15 МэВ. Максимальный уровень энергии в энергетическом спектре β -частиц может меняться от 2,5 кэВ до десятков МэВ.

Нейтроны в зависимости от скорости движения и энергии условно подразделяют на девять энергетических групп (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Энергетическая характеристика нейтронов

Класс нейтронов	Группа нейтронов	Энергия E_n , эВ
Низких энергий (медленные)	Ультрахолодные	$<10^{-7}$
	Очень холодные	$10^{-7}-10^{-4}$
	Холодные	$10^{-4}-5 \cdot 10^{-3}$
	Тепловые	$5 \cdot 10^{-3}-0,5$
	Резонансные	$0,5-10^4$
	Промежуточные	10^4-10^5
Высоких энергий (быстрые)	Быстрые	10^5-10^8
	Высокоэнергетичные	10^8-10^{10}
	Релятивистские	$>10^{10}$

Помимо электромагнитного излучения и потоков элементарных частиц, которые действуют на ядерном, атомном и молекулярном уровнях, возможны контактные энергетические воздействия на вещество, такие как тепловые, электрические, механические и прочие. Такие воздействия осуществимы на макроуровне применительно к минералам и горным породам. В некоторых случаях внешнее воздействие для получения информации о веществе и его свойствах не требуется.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

5.1. Способы получения информации

Способы получения информации о составе и свойствах вещества иллюстрируются рис. 5.1, и более детально их можно подразделить по способу измерения свойств и по способу воздействия на вещество.

Для получения информации используют контактные и бесконтактные способы как воздействия на вещество, так и измерения реакции на воздействия. Информация может быть получена без применения специального первичного воздействия, например, при измерении естественной радиоактивности вещества, ЭДС, заряда тела.

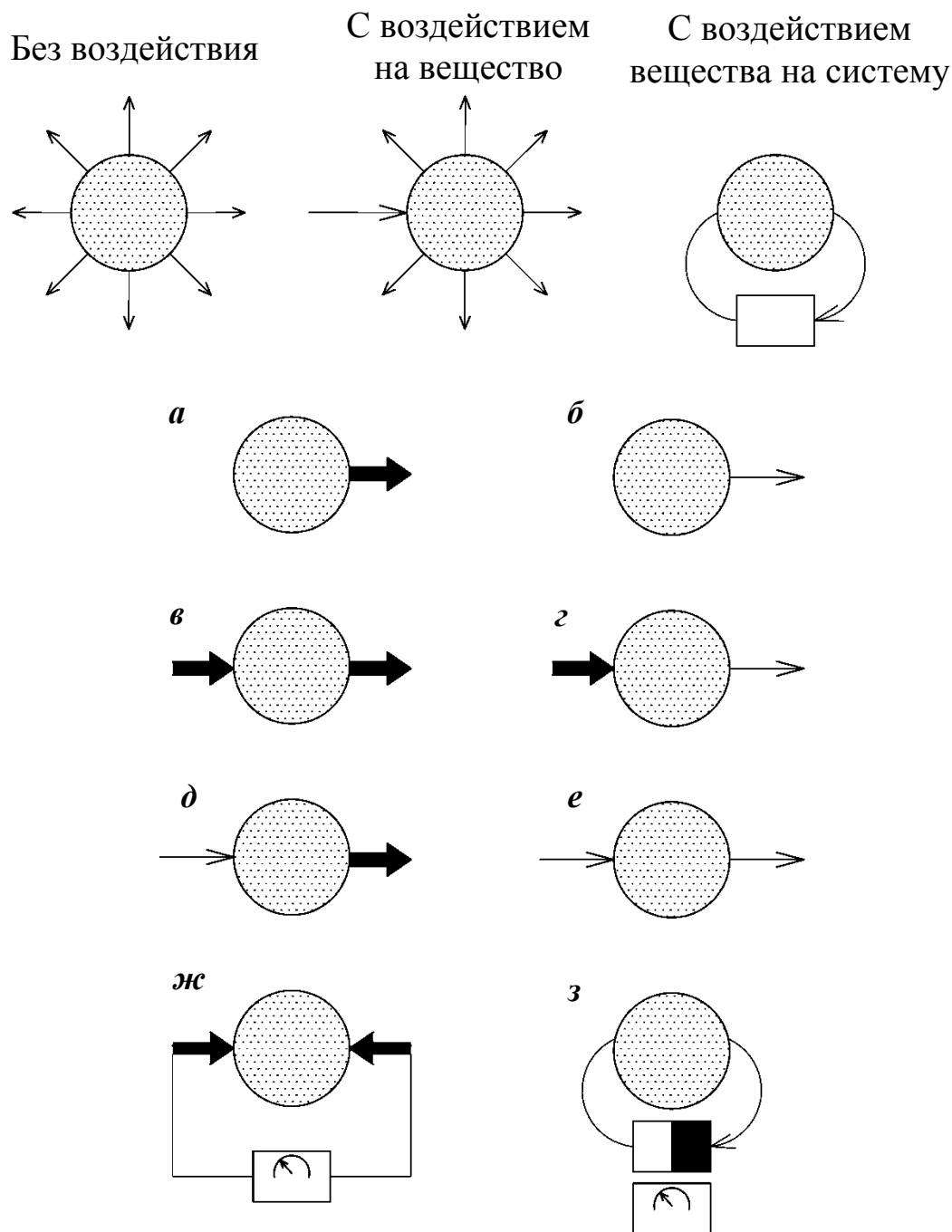


Рис. 5.1. Способы получения информации о составе и свойствах вещества:
a – контактное измерение свойств вещества в естественных условиях;
б – бесконтактное измерение свойств без воздействия; *в* – контактное при контактном воздействии; *г* – бесконтактное при контактном воздействии;
д – контактное при бесконтактном воздействии; *е* – бесконтактное при бесконтактном воздействии; *ж* – контактное при воздействии вещества на характеристики измерительной системы; *з* – бесконтактное измерение характеристик генераторно-измерительной системы при бесконтактном (в ряде случаев и контактном) воздействии на неё вещества

Информация также может быть получена по изменениям характеристик некой генерирующей системы при воздействии вещества сортируемой порции (куска) на систему.

Примеры реализации известными из практики методами:

а – контактное измерение ЭДС, температуры, заряда и т. д. без специальных воздействий (они же признаки);

б – измерение естественной радиоактивности (признак – интенсивность гамма-излучения);

в – контактное измерение температуры тела при относительно кратковременном контактном нагреве (признак – температура, свойство – температуропроводность), возникновение ЭДС при нагреве (признак – термоЭДС) и т. д.;

г – измерение температуры по инфракрасному излучению тела при его контактном нагреве (признак – спектр и интенсивность ИК-излучения);

д – контактное измерение температуры при бесконтактном конвективном нагреве или облучении видимым, ИК-, СВЧ-излучениями (свойства – оптические, теплофизические, электрические; признак – температура на поверхности);

е – бесконтактное измерение интенсивности, спектрального состава, пространственного распределения излучения и потоков частиц при бесконтактном воздействии на вещество излучениями и потоками частиц (все так называемые радиометрические методы для нерадиоактивных руд, признаки – интенсивность, спектральный состав или энергия квантов, пространственное распределение излучений);

ж – контактное измерение силы протекающего через кусок тока (свойство – электропроводность, признак – сила протекающего через кусок тока);

з – измерение характеристик генераторно-измерительной системы при бесконтактном (в ряде случаев и контактном) воздействии на неё вещества (свойства – электропроводность, магнитная восприимчивость, диэлектрическая проницаемость, признаки – параметры амплитудно-частотной характеристики колебательного контура).

В случае **ж** контролируемый кусок в момент измерения становится элементом измерительной системы, в то время как в случае **в** имеются отдельные источник энергетического воздействия и измеряющий результат датчик.

В случае **з** кусок при измерении становится частью элемента автогенератора (ёмкости или индуктивности), меняя амплитудно-частотную характеристику генератора, в отличие от случая **з**, в случае **в** существуют отдельные источник излучения или потока частиц и приёмник (приёмники) излучения или потока частиц.

Несколько подробнее рассмотрим случай *е*, к которому относятся так называемые радиометрические методы обогащения. Термин в такой широкой трактовке принят многими авторами только в СССР и России и является спорным по ряду причин. Общепризнан данный термин для случая *б*, то есть для метода обогащения по естественной радиоактивности.

Для групп методов *б* и *е* бесспорным объединяющим названием являются ***бесконтактные информационные методы***. Это название не только бесспорно, но и позволяет без терминологической путаницы объединить данные группы, в этом случае истинно радиометрический метод является частью группы бесконтактных информационных методов, хотя отличается от прочих отсутствием источника воздействия (облучения).

5.2. Признаки разделения

Непосредственное использование различий в физических свойствах частиц характерно для прямых физических и физико-химических методов обогащения. К ним относятся, например, гравитационные, магнитные, электрические, флотационные и другие методы. Для этих методов используемые для разделения свойства и есть признаки разделения.

Информационным методам обогащения (рентгенорадиометрическому, фотометрическому, рентгенолюминесцентному и т. п.) свойственно использование информационных процедур, участвующих в разделении. Это операции измерения и преобразования информации, принятия решения об удалении и т. д. Любой полученный измерительной системой сигнал характеризует содержание компонента в куске или выбранную для разделения его физическую характеристику. Например, интенсивность или спектральный состав излучения, полученные от куска и попадающие в датчик сепаратора, являются признаками разделения, связанными с содержанием компонентов в куске или с его физическими свойствами (и то и другое – качество куска). В этом случае сигнал датчика сепаратора и полученный в аппаратуре сепаратора в результате преобразований аппаратурный признак разделения, по которому осуществляется принятие решения об удалении, характеризуют признак разделения частицы.

Природное свойство минерала, используемое для обогащения, проявляющееся в различном действии на датчик измерительной системы сепаратора, напрямую связано с используемым для разделения при-

знаком. Если для принятия решения об удалении одной частицы используется несколько сигналов (от нескольких признаков разделения, связанных с природными свойствами), эти сигналы или аппаратурные признаки разделения могут преобразовываться и формировать первичный комбинированный признак разделения. Комбинированный аппаратурный признак разделения в этом случае вводится искусственно и представляет собой некую формулу или (и) совокупность логических операторов.

В информационных процессах часто объединяется несколько признаков в комбинированный признак или оценивается сразу несколько аппаратурных признаков с заданием отдельных границ по каждому из них, что способствует повышению эффективности распознавания минералов, точности определения содержания компонента. В ряде случаев измеренные аппаратурные признаки корректируют, учитывая дополнительно какие-либо факторы (например, учет спектра или интенсивности излучения источника в радиометрических методах, учёт размера куска, учёт геометрии измерения и т. п.). Комбинированный или скорректированный аппаратурный признак разделения в геофизике называют *аналитическим параметром*.

Итак, для информационных процессов обогащения признаки разделения – это все инструментально измеряемые свойства и характеристики вещественного состава минералов и горных пород, полученные путём преобразования таких сигналов. Свойства компонентов или характеристики продуктов, по которым ведется само разделение, сформировавшиеся к переделу обогащения, являются первичными признаками разделения.

Следует подчеркнуть, что в некоторых информационных методах применяют специальные воздействия для инициирования измеряемых в дальнейшем физических свойств. Например, в рентгенорадиометрическом, рентгенолюминесцентном и им подобных методах характеристики вторичного излучения измеряются, по ним ведется разделение, они же являются первичными признаками разделения. Несмотря на то, что данные характеристики – результат воздействия, само воздействие является неотъемлемой частью метода, без которого метод не может быть реализован.

Если природные свойства используются для получения новых характеристик компонентов в результате какого-либо специального воздействия, а сами воздействия осуществляются с использованием отдельных операций, то вновь приобретённые свойства, новые характе-

ристики или их комбинации являются вторичными признаками разделения. По ним ведётся разделение. Приемы формирования вторичных признаков используют для улучшения показателей предварительного обогащения.

Для формирования вторичных признаков применимы различные физические, физико-химические и химические методы воздействия.

5.2.1. Оценка признака разделения

Истинные значения признака разделения для каждого куска определяются с некоторой погрешностью, вызванной неидеальностью измерения любой физической величины. Многократные измерения дают отличающиеся друг от друга результаты. Каждый результат измерения признака будем называть *частной оценкой* признака разделения. Частные и средние значения оценки и колебания оценки признака для одного и того же куска зависят от характера минерализации куска, контраста свойств элементов или минералов куска и их плотностей, геометрии измерения, чувствительности измерительной системы и ряда других факторов.

5.2.2. Интегральные и дифференциальные признаки

Каждые минерал, изотоп или элемент (в общем случае компонент) обладают характерными для них свойствами. В куске или другой порции минерального сырья могут присутствовать несколько компонентов. Если значение измеряемого свойства куска является усреднённой функцией значений этого свойства нескольких компонентов, то данное свойство следует считать интегральным, которому соответствует *интегральный* признак разделения. Если признак разделения связан с уникальным свойством компонента, а у прочих компонентов оно не проявляется, то свойство и соответствующий признак следует считать *дифференциальным*. Если у каждого из нескольких компонентов проявляются отличные от других компонентов характерные только для них свойства, то свойства и соответствующие признаки следует считать *дифференциальными многокомпонентными*.

При использовании интегрального признака оценкой содержания интересующего компонента является средневзвешенное значение свойств всех компонентов куска. Такие признаки применимы для бинарных или сводимых к ним систем, у каждого компонента которых имеется характерное (при близости свойств всех компонентов кроме

определённого) значение свойства, меняющееся в небольших пределах. В этом случае

$$\xi_k = \alpha_1 \xi_1 + \alpha_2 \xi_2, \text{ при } \alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

где ξ_k , ξ_1 , ξ_2 – значения признака разделения (в ряде случаев свойства), соответственно куска, 1-го и 2-го компонентов; α_1 , α_2 – содержания (массовая доля, объёмное или поверхностное содержание) соответственно 1-го и 2-го компонентов.

В поликомпонентных системах, даже мало меняющихся, но отличных друг от друга свойств отдельных компонентов, появляется неопределённость в соотношении содержания интересующего компонента со значением признака разделения куска, поскольку соотношение содержаний прочих компонентов может произвольно меняться.

На рис. 5.2 приведены возможные зоны изменения зависимостей значения признака разделения куска от содержания интересующего компонента α_1 для бинарной и трёхкомпонентной системы, для которой справедлива зависимость признака разделения куска от содержаний интересующего (1-го) и прочих (2-го и 3-го) компонентов и соответствующих значений свойств компонентов:

$$\xi_k = \alpha_1 \xi_1 + (1 - \alpha_1 - \alpha_3) \xi_2 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \xi_3.$$

Неопределённость причины изменения ξ_k (изменение α_1 , α_2 или α_3) приводит к высоким погрешностям измерения при использовании интегральных признаков.

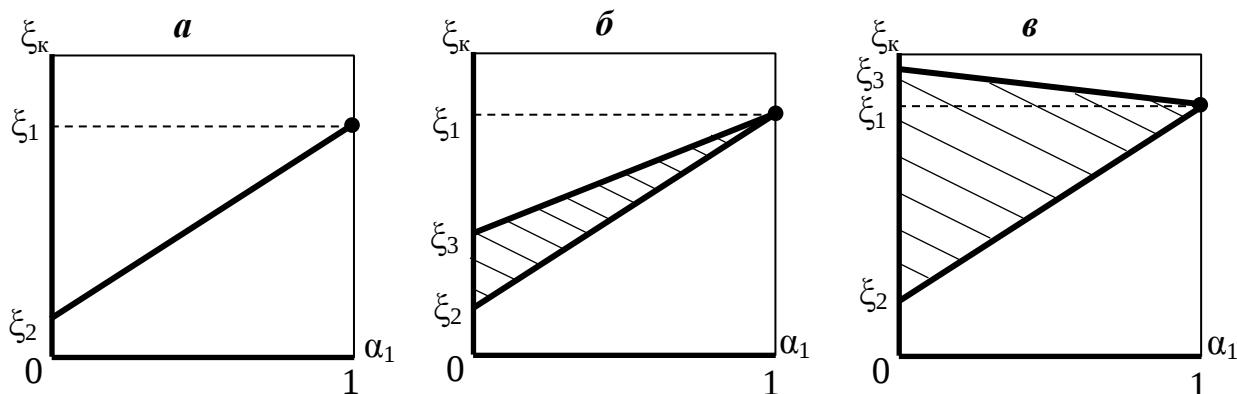


Рис. 5.2. Возможные зоны изменения зависимостей значения признака разделения куска от содержания интересующего компонента α_1 для случаев:

a – бинарной системы (зона вырождается в линию);

б – трёхкомпонентной системы ($\xi_2 < \xi_3 < \xi_1$);

в – трёхкомпонентной системы ($\xi_2 < \xi_1 < \xi_3$)

Дифференциальные признаки позволяют идентифицировать интересующий компонент по характерному только для него свойству, а по интенсивности его проявления можно судить о содержании данного

компонента в куске. Яркими примерами этого являются рентгенофлуоресцентный метод для элементов от кальция (Ca) до урана (U), в котором элемент идентифицируется по энергии квантов вторичного характеристического излучения, а содержание оценивается по числу импульсов от квантов характерной для элемента энергии, а также фотонейтронный метод определения бериллия (Be), для которого характерен в несколько раз меньший, чем для прочих элементов, порог фотоядерной реакции – 1,67 МэВ, у прочих элементов порог более 5 МэВ.

Помимо непостоянства состава компонентов в куске на точность оценки содержания интересующего компонента влияют характер минерализации, размеры и форма куска, геометрия измерения, загрязнение поверхности. Степень влияния перечисленных факторов на точность оценки различна у объёмных и поверхностных признаков получения информации.

Объёмные признаки используют радиометрический, все абсорбционные и нейтронные, фотоядерный, СВЧ-термометрический, радиорезонансный методы. Для них важнейшими мешающими факторами являются размеры и форма кусков, переменные плотности минералов, характер минерализации кусков (скрытая, поверхностная, равномерная и т. п.).

Поверхностные признаки характерны для оптических, люминесцентных, γ - и рентгенофлуоресцентных, контактно-термометрических, контактно-электрических (кондуктометрических) методов. Потенциально мешающими факторами являются характер минерализации кусков, загрязнение поверхности кусков, размер и форма кусков. Весьма большое значение приобретает геометрия измерения (например, полнота «осмотра» куска – односторонний, двухсторонний, интегральный «осмотр» и т. п.).

Влияние геометрии измерения рассмотрим на примере результатов моделирования получения оценки содержания компонента при различных вариантах способа «осмотра» куска при поверхностных признаках разделения с рядом допущений: куски кубической формы одинакового размера. Каждый кусок – это «краевой» сросток с разным содержанием фаз (рис. 5.3), плотность фаз *A* и *B* одинакова.

Частная оценка содержания фазы *A* при одностороннем «осмотре» осуществляется в различных положениях куска по отношению к линии «осмотра» (линии облучения и «осмотра» совпадают) как отношение площади проекции фазы *A* на плоскость, перпендикулярную линии «осмотра» к суммарной площади проекций фаз *A* и *B* на ту же плос-

кость. Положение куска по отношению к линии «осмотра» на каждом шаге меняется поворотом вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. После варьирования всех положений куска с заданным содержанием фазы А содержание фазы А изменяется и процедура моделирования продолжается.

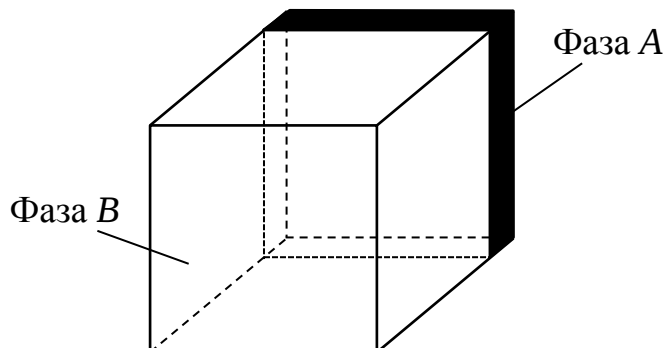


Рис. 5.3. Модель «краевого» сростка

По окончании варьирования положения куска при всех заданных содержаниях строится линия регрессии:

$$\hat{\alpha} = f(\alpha) = 0,5514\alpha + 0,2099,$$

где $\hat{\alpha}$ – оценка массовой доли фазы А; α – массовая доля фазы А. Доверительные интервалы для 67 %-й вероятности для этой зависимости приведены на рис. 5.4.

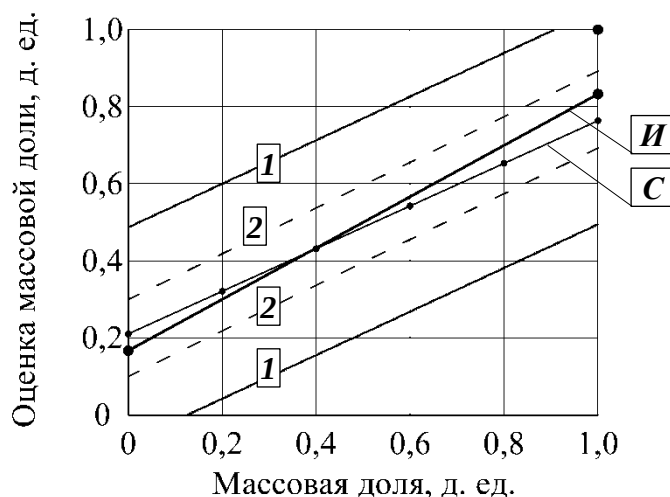


Рис. 5.4. Зависимость оценки массовой доли от массовой доли компонента при различных способах «осмотра» куска: 1 – доверительные интервалы оценки при одностороннем «осмотре»; 2 – доверительные интервалы при двухстороннем «осмотре»;

С – среднее значение оценки при одно- и двухстороннем «осмотрах»;

И – интегральный «осмотр»

При двухстороннем «осмотре» частная оценка содержания фазы А находится как среднее значение частных оценок двухсторонних

«осмотров» с противоположных сторон куска. Линии регрессии одно- и двухстороннего «осмотров» совпадают, а ширина доверительного интервала при двухстороннем «осмотре» уменьшается в 2,62 раза по отношению к одностороннему «осмотру» (рис. 5.4).

При интегральном «осмотре» в качестве частной оценки содержания фазы A принимается отношение площади поверхности куба, приходящейся на фазу A , к суммарной площади поверхности куба. Линия связи $\hat{\alpha} = f(\alpha)$ при интегральном «осмотре» (рис. 5.4, в) описывается уравнением

$$\hat{\alpha} = \frac{2}{3}\alpha + \frac{1}{6}.$$

Таким образом, при использовании поверхностных признаков возможно появление краевых эффектов, а доверительные интервалы оценки уменьшаются с увеличением доли «осматриваемой» площади куска.

5.3. Параметры и алгоритмы разделения

Признак или производный от признака параметр разделения являются основой для принятия решения об удалении куска. Параметр разделения для однокомпонентных руд характеризует содержание или признак одного компонента. Для многокомпонентных руд вводятся несколько независимых (по числу компонентов) параметров, связанных при принятии решения логическими процедурами, тогда каждый параметр может характеризовать либо содержание одного компонента, либо соответствующий признак разделения, а алгоритм принятия решения включает несколько сравнений каждого параметра с соответствующими границами разделения по каждому из них. В другом случае несколько параметров объединяют в функцию нескольких аргументов и принятие решения об удалении производят путём сравнения значений функции, вычисленных по нескольким параметрам или признакам разделения, с заданной по каким-либо критериям границей-функцией. Таким образом, границей разделения может быть точка на числовой оси при одном параметре или признаке, линия или набор линий специально подобранной конфигурации на плоскости при двух параметрах или признаках, гиперповерхность нужной формы при n параметрах или признаках разделения. Примеры некоторых границ приведены на рис. 5.5.

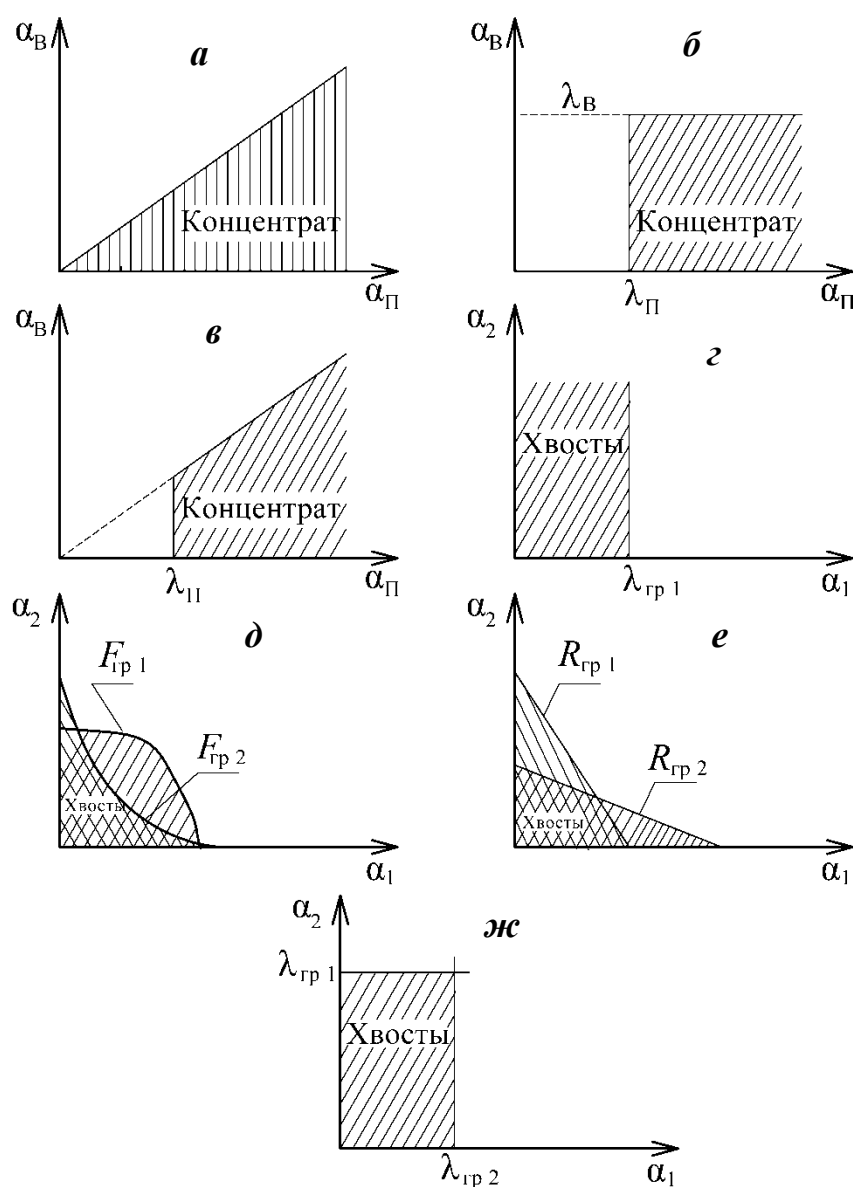


Рис. 5.5. Границы разделения при различных алгоритмах (параметрах)

Специально подобранные алгоритмы позволяют решать различные технологические задачи разделения. Это особенно важно для многокомпонентных руд.

Многокомпонентные руды при традиционной технологии обогащают по коллективно-селективным, селективно-коллективно-селективным схемам или по схемам последовательной селекции. Информационное обогащение, как правило, не может включать в себя многооперационные схемы, в большинстве случаев схема должна состоять из одной или двух последовательных операций. Очевидно, что преобладающим является вариант коллективной сепарации, редкими вариантами – селективная сепарация с выделением одного или двух компонентов либо сочетание в какой-либо последовательности двух сепараций – коллективной и селективной.

Если рассматривать операцию как селективную, то, принимая выделяемый в концентрат ценный компонент за единственный, можно в большинстве случаев не вводить понятие «параметр разделения», а ограничиться известным содержанием полезного компонента и признаком разделения (значением физического свойства разделения).

Прямое измерение содержаний нескольких компонентов позволяет использовать сложные параметры, получаемые с помощью арифметических или логических процедур. Рассмотрим это на простых примерах.

Впервые разновидности параметров разделения названы *алгоритмами* применительно к радиометрической сепарации Э. Г. Литвинцевым. Далее будут проанализированы два типа алгоритмов разделения и соответствующих им параметров разделения R и Z . Алгоритм в данном случае – это процедуры отнесения куска к хвостам или концентрату по величине измеренного параметра разделения. В редких случаях выделения селективных концентратов вводят дополнительное ограничение по вредным примесям. Тогда разделение можно вести по величине модуля качества (отношение содержаний полезного компонента $\alpha_{\text{п}}$ к содержанию вредного $\alpha_{\text{в}}$ – C или, наоборот, – по $\alpha_{\text{в}}/\alpha_{\text{п}}=C'$ (см. рис. 5.5, *а*)): **концентрат**, если

$$C = \alpha_{\text{п}}/\alpha_{\text{в}} > C_{\text{гр}}, \quad \text{или} \quad C' = \alpha_{\text{в}}/\alpha_{\text{п}} < C'_{\text{гр}},$$

где $C_{\text{гр}}$ и $C'_{\text{гр}}$ – граничные значения модулей, обеспечивающие для данной руды требуемое качество концентрата (могут быть найдены по кривым контрастности по C и C').

Если модуль не лимитируется, а накладываемые ограничения не увязываются с соотношением $\alpha_{\text{п}}$ и $\alpha_{\text{в}}$, разделение можно вести по алгоритму с использованием логических процедур (см. рис. 5.5, *б*): **концентрат**, если

$$\alpha_{\text{п}} > \lambda_{\text{п}} \cap \alpha_{\text{в}i} < \lambda_{\text{в}i},$$

где $\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{в}i}$ – граничные значения соответственно для полезного и i -го вредного компонентов, обеспечивающие для данной руды требуемое качество концентрата по полезному компоненту и вредным примесям (могут быть получены по соответствующим кривым контрастности).

Если лимитируются и модуль ($C' < C'_{\text{гр}}$), и высокое содержание одного из компонентов ($\alpha_{\text{п}} > \lambda_{\text{п}}$), разделение следует вести по сложному алгоритму, показанному на рис. 5.5, *в*.

При коллективном обогащении понятия о параметрах и алгоритмах расширяются.

В первую очередь следует отметить параметр разделения, связанный с косвенными признаками разделения. Косвенный признак разделения (плотность, магнитная восприимчивость, электропроводность) связан с содержаниями компонентов α_1 , α_2 вероятностными зависимостями $\Pi_1(\alpha_1)$, $\Pi_2(\alpha_2)$, поскольку Π_1 , Π_2 , $\Pi_{\text{пор}}$ – величины случайные.

$\Delta\P$ – параметр разделения для частиц в приращениях по отношению к породе для двухкомпонентной руды может быть записан в виде

$$\Delta\P = \Delta\P_1 \cdot \alpha_1 + \Delta\P_2 \cdot \alpha_2,$$

где $\Delta\P_1$, $\Delta\P_2$, $\Delta\P$ – приращения признака разделения соответственно первого, второго компонентов и частицы по отношению к признаку разделения породы $\Pi_{\text{пор}}$ (например, $\Delta\P_1 = \Pi_1 - \Pi_{\text{пор}}$).

Следует отметить, что коллективное обогащение возможно, если $\Delta\P_1$ и $\Delta\P_2$ имеют один и тот же знак.

Данный параметр разделения является функцией не только содержаний компонентов α_1 , α_2 , но и признаков разделения, для них характерных, – Π_1 , Π_2 . Граница разделения устанавливается по $\Delta\P$, а потому разделение по содержанию компонентов не может быть достаточно точным. Из рис. 5.6 следует, что по $\Delta\P_{\text{гр}}$ в данном случае можно в любой продукт выделить куски и с $\alpha_{\min}$, и $\alpha_{\max} = 1$.

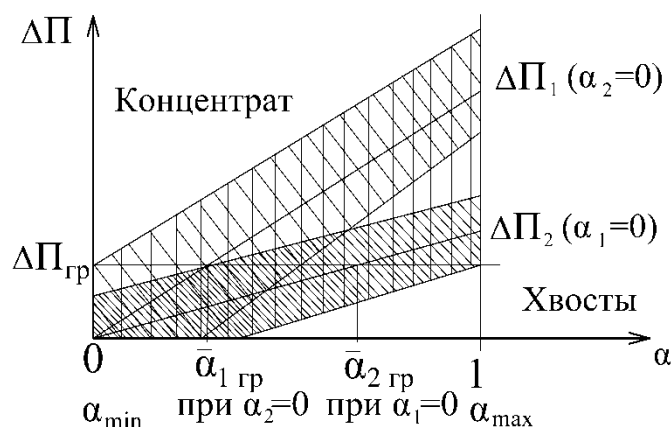


Рис. 5.6. Зависимость $\Delta\P$ -параметра разделения от содержания компонентов (наклонные штриховки – зоны вероятного значения признака разделения компонентов, вертикальная штриховка – то же для куска)

В некоторых случаях может быть измерено содержание лишь одного из компонентов и, если содержания других компонентов связаны с ним положительной корреляцией, коллективное обогащение можно вести по X -параметру (см. рис. 5.5, 2) с использованием алгоритма: **хвосты**, если

$$X = \alpha_i < \lambda_{\text{гри}},$$

где $\lambda_{\text{гр}i}$ – граничное значение содержания i -го компонента, обеспечивающее для данной руды требуемое содержание полезного компонента в хвостах (может быть определено по кривым контрастности).

Из-за вероятностной связи между содержаниями компонентов при фиксированной границе по одному из компонентов не удаётся добиться точного разделения по второму.

Прямое измерение содержаний нескольких компонентов позволяет использовать сложные параметры, получаемые с помощью арифметических или логических процедур.

Комплексирование произвольных функций содержаний $f(\alpha_1), f(\alpha_2)$ приводит к получению F -параметра $F[f(\alpha_1); f(\alpha_2)]$. В этом случае границы разделения на корреляционном поле могут быть самыми разнообразными, как показано на рис. 5.5, *д*.

Если использовать комбинацию функций содержаний линейного вида (см. рис. 5.5, *е*), разделение по R -параметру идет по алгоритму: **хвосты**, если

$$R = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \alpha_i < R_{\text{гр}},$$

где C_i – числовой коэффициент для i -го компонента.

Данным весовым коэффициентам может быть придан различный физический смысл, например условной стоимости компонентов. Абсолютное значение и соотношение коэффициентов меняет положение границы разделения. В отличие от $\Delta\Pi$ -параметра здесь числовые коэффициенты могут произвольно изменяться, в то время как в первом случае они являются константами.

Вариантом использования логических процедур является Z -параметр (см. рис. 5.5, *ж*) с алгоритмом: **хвосты**, если

$$\alpha_1 < \lambda_{\text{гр}1} \cap \alpha_2 < \lambda_{\text{гр}2} \cap \alpha_3 < \lambda_{\text{гр}3} \dots \cap \alpha_i < \lambda_{\text{гр}i},$$

где $\lambda_{\text{гр}}, \lambda_{\text{гр}1}, \lambda_{\text{гр}2}, \lambda_{\text{гр}3}, \dots, \lambda_{\text{гр}i}$ – граничные значения содержаний по соответствующим компонентам, обеспечивающие для данной руды требуемые содержания полезных компонентов в хвостах (могут быть определены по кривым контрастности соответствующих компонентов); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i$ – содержания 1-го, 2-го, 3-го, i -го компонентов в куске.

Этот параметр комплексный, задаваемый содержанием каждого компонента независимо друг от друга. При принятии решений по Z -алгоритму последовательно содержание каждого компонента сравнивается с границей по данному компоненту. Кусок относится к хвостам, если по каждому из компонентов содержание меньше заданного.

Данный алгоритм для n компонентов заменяет схему обогащения по n признакам.

Для технологической задачи разделения руды на технологические типы или сорта, в зависимости от вводимых признаков типов или сортов (если их два или несколько), применимы те же параметры разделения, что и при разделении по селективному или коллективному принципу.

Сравнивая возможности различных методов обогащения, следует отметить информационные методы как наиболее универсальные и обладающие особыми возможностями: по измеренным содержаниям можно не только менять границу разделения при настройке процесса, но и подбирать лучшие для конкретной технологической задачи соотношения компонентов. Таким образом, появляется дополнительная степень свободы при технологической адаптации операций информационного обогащения к общей схеме рудоподготовки и обогащения. Так, в прямой физико-механической сепарации невозможно добиться улучшения качества по нескольким компонентам в одну операцию, если их содержания плохо коррелированы, потребуются отдельные операции для повышения качества по каждому компоненту. В информационных методах в алгоритме разделения могут учитываться и ограничиваться содержания нескольких компонентов, и та же технологическая задача может быть решена в одну операцию.

Учёт вида используемого параметра разделения необходим при оценке предельной (по содержанию компонентов) обогатимости многокомпонентных руд, так как именно он во многом определяет потенциальные показатели обогащения.

5.4. Режимы информационных процессов обогащения

Процессы разделения могут осуществляться в различных режимах. Режимы целесообразно классифицировать по признакам типа потока, поступающего в аппарат, и типов элементов потоков, формирующих выделяемые продукты обогащения (рис. 5.7).

В большинстве аппаратов с непосредственным воздействием на частицу полей и сил имеет место объемная подача материала и объемное выделение продуктов. Иногда из объемного потока выделяется (формируется) продукт в виде слоя. В некоторых случаях разделение, как по питанию, так и по продуктам ведется в монослое. Такие потоки используются для устранения взаимного влияния частиц и для повышения эффективности разделения. Кроме того, имеются процессы, в

которых используются различия во взаимодействии частиц с поверхностью (например, некоторые виды электрической сепарации, разделение по трению на плоскости). Теоретически допустимым для прямых физических процессов разделения является и покусковой поток в питании и в продуктах, например, при особых требованиях.

Анализируя виды существующих режимов удаления в процессах обогащения, можно сделать вывод, что при прямом физико-механическом разделении продукты формируются в виде потоков, аналогичных продуктам питания. Так, из объемного потока питания получают объемные потоки концентрата и хвостов, из монослойного или покускового потоков питания – соответственно хотя бы один монослойный или покусковой потоки продуктов (другой может формироваться в виде веера).

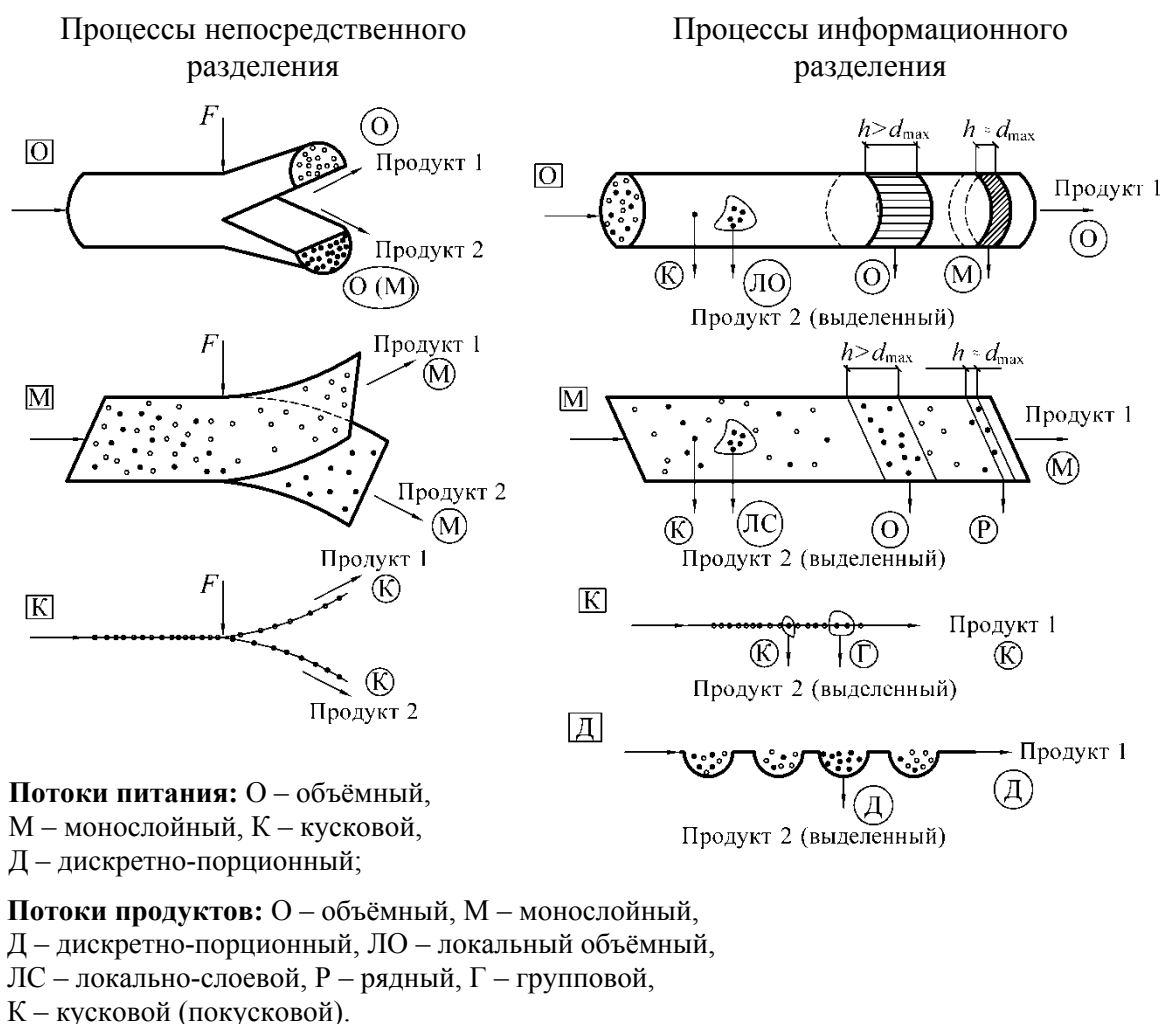


Рис. 5.7. Режимы питания и выделения продуктов обогащения

Процессы информационного разделения реализуются более разнообразно. Помимо перечисленных режимов подачи, свойственных прямым физическим процессам разделения, встречается еще один – дис-

кретно-порционный. Его отличительной особенностью является специальное формирование дискретной порции в какой-либо ёмкости, причём масса и объем порций мало изменяются. Процессы информационного разделения допускают большее разнообразие режимов, в т. ч. и по типу выделяемых потоков. Выделение продукта в информационных процессах осуществляется в виде извлекаемых фрагментов из основного потока (элементами потока в виде поперечных сечений: объемами, монослоями, кусками либо выборочными близкорасположенными в пространстве группами кусков в объеме, монослое, ряду). При этом основной поток по характеру остается прежним: объемным, монослойным, покусковым, а удаляемый поток представляет собой выборочно формируемую последовательность элементов потока.

Объемные элементы потока могут существенно отличаться друг от друга по массе и объему. Если элемент потока выделяется поперечным сечением с толщиной слоя, близкой к максимальному размеру куска, то режим выделения поперечно-монослойный.

Наибольшей селективностью обладают процессы с покусковыми режимами удаления. Это объясняется наибольшей контрастностью по содержанию компонента тех элементов потока, каковыми являются куски, по сравнению с любыми вариантами элементов потока из перечисленных выше. Эти процессы реализуются в современных информационных сепараторах, в которых удаление ведется в покусковом режиме, а питание может быть покусковым, покусковым многоручьевым (несколько параллельных покусковых потоков) и плоскостным монослойным.

Именно по этой причине из информационных процессов сепарация с покусковым удалением наиболее перспективна, как обеспечивающая более высокие технологические показатели разделения.

Осуществление информационных процессов в других режимах (порционная сортировка) возможно в непосредственной близости от мест добычи с исключением операций дробления и перегрузок материала для очень бедных руд или для разделения руды на технологические типы, сорта и применяется, главным образом, на добывающих предприятиях, поскольку некоторые продукты сортировки могут складироваться на месте (забалансовые, убогие руды, порода).

5.5. Фракционные характеристики

Фракционные (w - и β -функции) и сепарационные характеристики, свойственные физическим методам обогащения (в том числе информа-

ционным), впервые с общих для всех методов позиций введены и всесторонне рассмотрены О. Н. Тихоновым. С их помощью для любого по сложности сырья, включающего любое число компонентов $m_{\text{ком}}$, с использованием нескольких признаков разделения n можно осуществлять прогноз показателей обогащения для любого i -го продукта:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= \int \dots \int_D \varepsilon_i(\xi_1, \dots, \xi_n) w_{\text{исх}}(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \approx \sum \dots \sum_D \varepsilon_i w_{\text{исх}} \Delta \xi_i; \\ \beta_{ij} &= \gamma_i^{-1} \int \dots \int_D \beta_j(\xi_1, \dots, \xi_n) \varepsilon_i(\xi_1, \dots, \xi_n) w_{\text{исх}}(\xi_1, \dots, \xi_n) d\xi_1, \dots, d\xi_n \approx \\ &\approx \gamma_i^{-1} \sum \dots \sum_D \beta_j \varepsilon_i w_{\text{исх}} \Delta \xi_i,\end{aligned}$$

где γ_i – выход i -го продукта; β_{ij} – содержание j -го компонента в i -м продукте; $i=1, 2, \dots, m_{\text{пр}}$; $m_{\text{пр}} \neq m_{\text{ком}}$ в общем случае; $j=1, 2, \dots, m_{\text{ком}}$; $\beta_j(\xi_1, \dots, \xi_n)$ – n -мерная β -функция j -го компонента; $\varepsilon_i(\xi_1, \dots, \xi_n)$ – n -мерная сепарационная характеристика (или функция фракционного извлечения) для i -го продукта; $w_{\text{исх}}(\xi_1, \dots, \xi_n)$ – n -мерная плотность распределения материала по фракциям; D – область исходного питания в n -мерном пространстве.

В простейшем и наиболее распространённом случае одного компонента, одного признака разделения и двух конечных продуктов (хвостов и концентрата) показатели определяют по формулам:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \varepsilon_i(\xi) w_{\text{исх}} d\xi; \\ \beta_i &= \gamma_i^{-1} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \beta_{\text{исх}}(\xi) \varepsilon_i(\xi) w_{\text{исх}} d\xi,\end{aligned}$$

где i – индекс получаемого продукта (их в данном случае два); $\xi_{\min}$ и $\xi_{\max}$ – соответственно минимальное и максимальное значения признака разделения в исходном питании.

Функции $w_{\text{исх}}(\xi)$, $\beta_{\text{исх}}(\xi)$ могут иметь самый разнообразный вид и способы определения задания. Для основных обогатительных аппаратов, реализующих прямые физические методы обогащения, выведены аналитические выражения сепарационных характеристик и их важнейших параметров (граница разделения, крутизна в рабочей точке), известен графический вид, описаны методы получения и варианты использования.

Остановимся подробнее на отличительных особенностях задания фракционного состава применительно к информационным методам обогащения. Они отличаются большим разнообразием.

Фракционирование в информационных методах может осуществляться по элементарным (измеренным свойствам, характеристикам) или по комбинированным признакам (в частном случае в геофизических терминах по аналитическим параметрам). Многие из них весьма близки к содержаниям компонентов благодаря наличию тесной корреляционной связи между ними, поэтому часть информационных методов разделения приближается к идеализируемому информационному методу – методу с прямым определением содержания компонента.

Частным случаем функций фракционного состава являются $w_{исх}(\alpha)$, $\beta_{исх}(\alpha)$, у которых в качестве аргумента приняты содержания компонента. Определяемые по этим функциям показатели обогащения являются предельными, наиболее высокими, так как в прочих случаях признак разделения связан с содержанием не функционально, а вероятно.

Учитывая значительную тесноту связи признаков разделения и содержаний компонентов в современных сепараторах, допустимо в качестве признаков разделения в некоторых информационных методах использовать содержания компонентов, а для многокомпонентных руд и параметров разделения, зависящих от нескольких содержаний.

И признаки, и параметры разделения, как уже упоминалось ранее, могут специально формироваться с помощью специальных воздействий или информационных (алгебраических, логических и прочих) процедур, которые существуют только в информационных методах обогащения. Специальное формирование фракционных характеристик для информационных методов – один из путей повышения эффективности разделения.

Функции получают экспериментально или, для грубых оценок в предположении полного раскрытия минералов, теоретически, с использованием усреднённых физических характеристик минералов и результатов минералогического анализа проб. Экспериментальное определение возможно в двух вариантах: первый – прямое фракционирование пробы с последовательной перестройкой границы разделения, второй – измерение свойств всех частиц пробы и последующее их виртуальное распределение по фракциям с назначенными границами или, в случае представления каждой частицы фракцией, их сортировки по возрастанию или убыванию. В обоих случаях информация о массе и массовой доле интересующего компонента во фракции является основой для получения упомянутых функций.

Второй путь является более приемлемым для информационных методов обогащения: физические свойства и характеристики трансформируются в признаки разделения, подчас являющиеся функциями нескольких физических характеристик.

При сопоставлении различных вариантов характера минерализации частиц и методов измерения свойств в сепараторах неизбежен вывод о том, что эти факторы необходимо учитывать при фракционировании, поскольку геометрия измерения и ориентация кусков определяют способ формирования признака разделения. То есть в информационных методах значения признака разделения зависят не только от физических свойств минералов, характера минерализации, содержания минеральных составляющих, но и от условий их получения.

В простейшем случае под геометрией измерения можно понимать взаимоположение источника, приёмника и частицы, их габариты, удаление друг от друга, параметры применяемых средств формирования потоков излучений (диафрагм, линз, коллиматоров, экранов, перегородок и т. п.).

Понятие геометрии измерения существенно расширяется, если признак разделения поверхностный, а способ получения информации фрагментарный и направленный, и с его помощью измеряются свойства части или всей поверхности, с её пространственными деформациями, которые влияют на характер взаимодействия излучения с поверхностью вещества и на долю воспринимаемого приёмником вторичного излучения. В отдельных случаях за счёт применения специальных приёмов, таких как диффузное освещение при фотометрической сепарации, двухстороннее облучение и «осмотр» при прочих видах сепарации, удаётся минимизировать и даже устранить погрешности, вносимые геометрией измерения.

Информационные методы отличаются от прочих несколько свойствами только им весьма ценных возможностей. Среди них: возможность разделения по признакам, весьма тесно связанным с содержаниями элементов; возможность использования комплексных раздельных признаков, обеспечивающих качественную идентификацию минеральных фаз; возможность учёта в алгоритмах принятия решения содержаний нескольких элементов с учётом их промышленной ценности; возможность использования при разделении в одной технологической операции различных разделяемых фаз по нескольким физическим свойствам, что в прямых методах обогащения или просто невозможно, или требует развёрнутых технологических схем.

Фракционные характеристики являются информационной основой для прогноза обогатимости сырья.

Элементарный акт разделения в процессах информационного обогащения основан на обязательном измерении характеристик разделяемых кусков. Одновременно может производиться измерение не одного, а нескольких параметров. Кроме измерения характеристик в этих методах осуществимы и другие информационные процедуры, например, преобразование измеряемых параметров или характеристик кусков в новые комплексные характеристики. Новые признаки приводят к появлению новых фракционных характеристик сырья, которые количественно выражаются функциями – плотностью распределения $w_{исх}(\xi)$ и β -функцией исходного.

В простейшем случае новым признаком может быть некий интегральный показатель куска, определяемый суммированием нескольких первичных частных идентичных показателей меньшей информативности:

$$\xi = \sum a_i \xi_i,$$

где a_i – весовой коэффициент i -го показателя.

Поскольку одни и те же куски случайным образом ориентируются при перемещении через зону измерения, что особенно проявляется при одностороннем «осмотре», колебаниях геометрических параметров кусков и т. п., получение информации о массовой доле компонента обуславливает возникновение случайных составляющих погрешностей метода, что приводит к видоизменению функций фракционного состава, в том числе β -функцию переводят в разряд случайных. Это требует особых процедур при использовании фракционных характеристик для прогноза показателей разделения (рис. 5.8).

На рис. 5.8 t – значение критерия Стьюдента для задаваемого уровня значимости; $S_{\beta(\xi)}$ – среднее квадратичное отклонение содержания компонента при значении признака ξ .

В этом случае меняется процедура прогноза показателей разделения. Она должна включать неоднократное вычисление показателей разделения при каждом значении массовой доли оценки ξ , по которому с помощью генерирования случайных реализаций выбирается значение массовой доли $\beta_i(\xi)$ с учётом, например, нормального распределения массовой доли относительно точек линии регрессии $\beta=f(\xi)$. Показатели отдельных реализаций определяются по известным формулам:

$$\gamma_{k,x} = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \varepsilon_{k,x}(\xi) w_{\text{и}}^{\text{част}} d\xi;$$

$$\beta_{k,x}^i = \gamma_{k,x}^{-1} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \beta_i(\xi) \varepsilon_{k,x}(\xi) w_{\text{и}}^{\text{част}} d\xi,$$

где $\gamma_{k,x}$ – выходы продукта разделения; $\beta_{k,x}^i$ – массовые доли компонента в продуктах разделения при i -й реализации; $w_{\text{и}}^{\text{част}}(\xi)$ – плотность распределения исходного сырья по частным реализациям признака разделения ξ (оценке массовой доли); $\varepsilon_{k,x}(\xi)$ – сепарационные характеристики аппарата; $\beta_i(\xi)$ – массовая доля компонента в куске с признаком разделения ξ при i -й реализации.

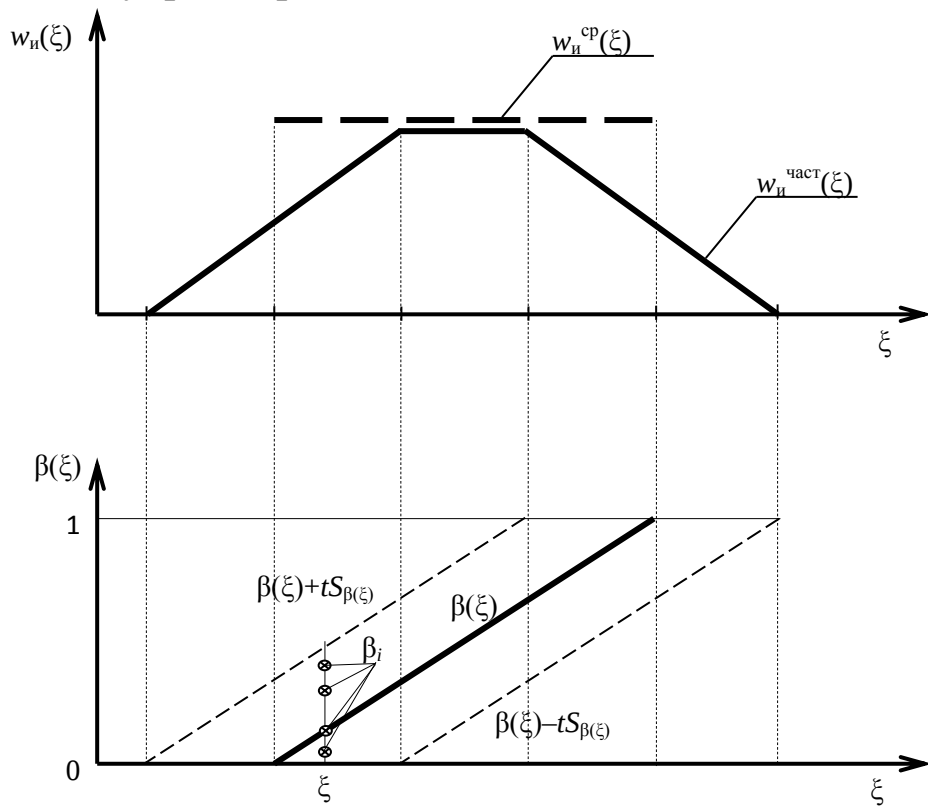


Рис. 5.8. Видоизменение функций фракционного состава при переходе от средних (ср) значений признака по куску к частным (част)

Получение большей информации улучшает вновь полученные фракционные характеристики сырья, снижает уровень неопределённости в случае β -функции, повышает эффективность разделения.

В другом случае измеренные характеристики позволяют повысить точность измерения содержаний благодаря учёту вновь получаемых признаков переменных параметров (размеры, массы куска, геометрии измерения в методе спектральных отношений при рентгенофлуоресцентной сепарации) или увеличению контраста признака разделения

(например, учёт селективного характера спектров при фотометрической сортировке прозрачных, полупрозрачных и непрозрачных кусков и т. п.).

В третьем случае новый признак целесообразно формировать при определённых целевых функциях разделения. Примером может служить задача предварительного коллективного обогащения с целевой функцией максимизации выхода хвостов и ограничениях по содержаниям элементов в хвостах.

Признаком при возможности определения содержаний нескольких элементов (компонентов) одновременно (реализуется, например, в рентгенофлуоресцентных сепараторах, особенно с полупроводниковыми датчиками) может быть их комбинация. Простейшие формулы новых признаков могут иметь вид:

$$\xi = a_1 \xi_1(\alpha_1) + a_2 \xi_2(\alpha_2) + a_3 \xi_3(\alpha_3) + \dots,$$

где a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты, имеющие, например, смысл условной ценности соответствующего компонента (элемента); $\xi_1(\alpha_1), \xi_2(\alpha_2), \xi_3(\alpha_3)$ – первичные признаки, коррелированные с содержаниями компонентов (элементов).

Таким образом, способ получения информации предопределяет точность идентификации разделяемых частиц и эффективность разделения в информационных методах.

5.6. Сепарационные характеристики и границы разделения

Сепарационная характеристика, присущая аппаратам информационных методов обогащения, имеет отличительные особенности. Сепарацию можно рассматривать как последовательность двух операций. Первая – это определение значения признака разделения частицы и принятие решения об удалении, вторая – удаление частицы из потока.

Вероятность ε отнесения частицы с истинным значением признака разделения к хвостам или концентрату по результатам измерения этого признака зависит, во-первых, от совершенства измерительной и питающей системы и, во-вторых, от настройки сепаратора, то есть от заданной $\xi_{гр}$ (рис. 5.9, *а-в*).

Эта вероятность определяется по эталонировочным кривым, отличающимся видом аналитической аппроксимации в зависимости от применяемого метода. Иногда (для числа регистрируемых элементарных частиц от куска радиоактивной руды менее 20) используют распределение Пуассона. Чаще (для большинства методов и большом

числе регистрируемых элементарных частиц от куска руды) оценка вероятности отнесения кусков к концентрату или хвостам производится на основе закона нормального распределения Гаусса. Поэтому дальнейший анализ проведем при использовании в качестве вероятностной характеристики опознавания интегральной кривой нормального закона распределения $F(\xi)$, которая количественно оценивается средним квадратичным отклонением S , и настройкой сепаратора, то есть $\xi_{гр}$ (рис. 5.6, а). Более совершенный сепаратор имеет малое значение S , а потому более крутую характеристику в точке перегиба при $\xi_{гр}$. Идеально измеряющий и принимающий решение сепаратор имеет ступенчатую характеристику опознавания кусков. Сумма вероятностей отнесения частицы к хвостам либо к концентрату равна 1. Поэтому

$$F_X(\xi) = 1 - F_K(\xi).$$

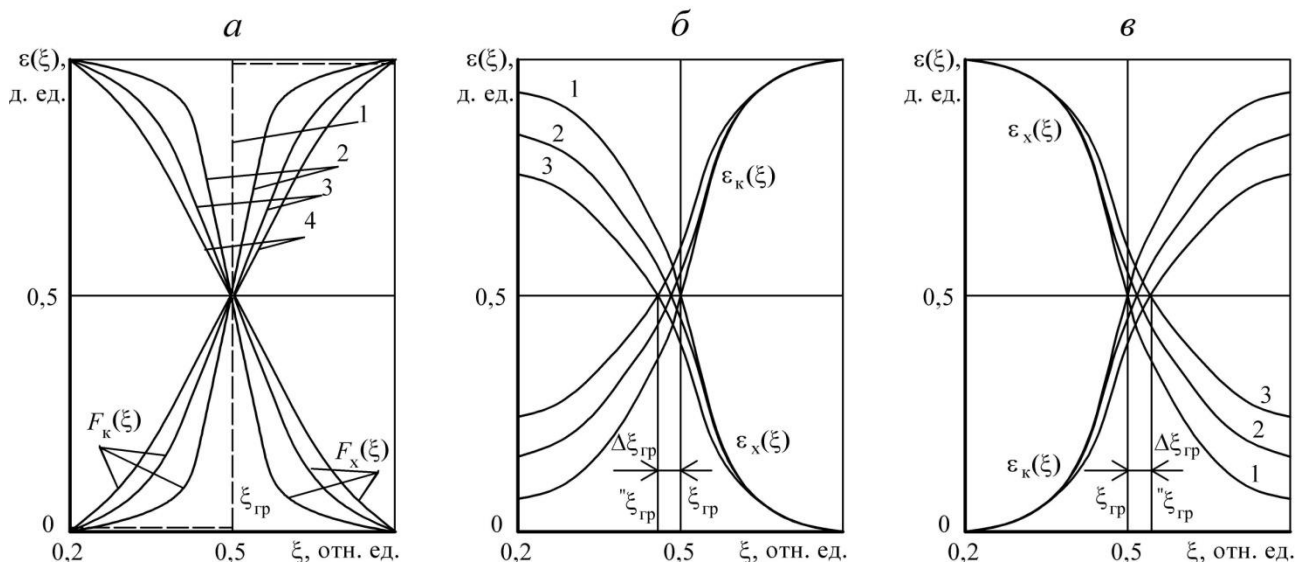


Рис. 5.9. Сепарационные характеристики информационных сепараторов при различных сочетаниях погрешностей измерения и отбора:

а – при $P=1$, S : 1 – 0; 2 – 0,05; 3 – 0,10; 4 – 0,15;

б – при $S=0,10$, $P_{п}$: 1 – 0,95; 2 – 0,85; 3 – 0,75 (удаляемый продукт – хвосты);

в – при $S=0,10$, $P_{м}$: 1 – 0,95; 2 – 0,85; 3 – 0,75 (удаляемый продукт – концентрат)

Именно эталонировочными кривыми пользовались как инструментом прогноза в информационных методах обогащения. Поскольку сама сепарация – это не только информационные процедуры, но и механическое удаление частиц, в истинной сепарационной характеристике, в отличие от эталонировочных кривых, необходим учет этой составляющей.

Вторая операция – удаление (отбор) кусков, так же как и идентификация, вносит свою погрешность в разделение. В данном случае ошибки возникают вследствие несовершенства удаляющей системы и системы подачи материала (сдвоенные куски) и т. п. В простейшем

случае можно допустить, что не подлежащие удалению куски всегда попадают в нужный продукт при нормальной регулировке механической части сепаратора, а подлежащие удалению имеют большую вероятность быть удаленными, но сохраняют некоторую вероятность не-удаления. Вероятность правильного отбора P не зависит от значения признака разделения куска.

Сепарационная характеристика информационного сепаратора, если бедные куски имеют меньшее, а богатые большее значение ξ , может быть определена как произведение вероятностей последовательности операций по формулам:

при удалении богатых полезным минералом кусков:

для концентрата (удаляемый продукт)

$$\varepsilon_k^M(\xi) = P F_k(\xi), \quad (5.1)$$

для хвостов (неудаляемый продукт)

$$\varepsilon_x^M(\xi) = 1 - F_k(\xi) + F_k(\xi)(1 - P) = 1 - P F_k(\xi); \quad (5.2)$$

при удалении бедных (породных) кусков:

для хвостов (удаляемый продукт)

$$\varepsilon_x^H(\xi) = P [1 - F_k(\xi)], \quad (5.3)$$

для концентрата (неудаляемый продукт)

$$\varepsilon_k^H(\xi) = F_k(\xi) + [1 - F_k(\xi)](1 - P) = 1 - P + F_k(\xi)P, \quad (5.4)$$

где $F_k(\xi)$ – интегральная функция распределения вероятности отнесения куска к концентрату при идентификации; P – вероятность правильного удаления при отборе либо богатых, либо бедных минералом кусков (приняты одинаковыми).

Заметим, что

$$\varepsilon_k^M(\xi) + \varepsilon_x^M(\xi) = 1, \quad \varepsilon_k^H(\xi) + \varepsilon_x^H(\xi) = 1.$$

Тогда из сопоставления формул (5.1) и (5.3), (5.2) и (5.4) следует, что при удалении из потока богатых или бедных кусков и одинаковой точности идентификации сепарационные характеристики для концентрата и хвостов отличаются друг от друга (рис. 5.9, **б**, **в**). При этом происходит смещение границы разделения.

В более общем случае, помимо неэффективного удаления кусков, вероятен попутный выброс в удаляемый продукт кусков, не подлежащих удалению, например, при прохождении близкорасположенных кусков друг к другу, один из которых бедный, а другой богатый, удаляющее воздействие переместит оба куска в удаляемый продукт. Вероятность этого возрастает при увеличении частоты подачи. То есть возможно как неудаление требующих удаления кусков с вероятностью

(1- P), так и удаление не подлежащих удалению кусков с вероятностями (1- R), где R – вероятность правильного неудаления. Тогда сепарационная характеристика аппарата с идеальной измерительной системой будет иметь вид, меняющийся с изменением вида выделяемого продукта, (рис. 5.10) и описываться выражениями (5.5)-(5.8).

при удалении богатых кусков:

$$\varepsilon_{\kappa}^M(\xi) = \begin{cases} 1-R & \text{при } \xi < \xi_{\text{гр}}; \\ 0,5 & \text{при } \xi = \xi_{\text{гр}}; \\ P, & \text{при } \xi > \xi_{\text{гр}}. \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_{\chi}^M(\xi) = \begin{cases} R & \text{при } \xi < \xi_{\text{гр}}; \\ 0,5 & \text{при } \xi = \xi_{\text{гр}}; \\ 1-P, & \text{при } \xi > \xi_{\text{гр}}. \end{cases} \quad (5.6)$$

при удалении бедных кусков:

$$\varepsilon_{\chi}^{\Pi}(\xi) = \begin{cases} P & \text{при } \xi < \xi_{\text{гр}}; \\ 0,5 & \text{при } \xi = \xi_{\text{гр}}; \\ 1-R, & \text{при } \xi > \xi_{\text{гр}}. \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_{\kappa}^{\Pi}(\xi) = \begin{cases} 1-P & \text{при } \xi < \xi_{\text{гр}}; \\ 0,5 & \text{при } \xi = \xi_{\text{гр}}; \\ R, & \text{при } \xi > \xi_{\text{гр}}. \end{cases} \quad (5.8)$$

Если перейти к более общему случаю, когда существуют погрешности и удаления, и неудаления, а также функция погрешностей измерения F (описываемая, например, интегральной кривой вероятности Гаусса), графики сепарационных характеристик для разных случаев примут вид, показанный на рис. 5.11.

Выражения, описывающие сепарационные характеристики, тогда будут следующими:

$$\varepsilon_{\kappa}^M = 1 - R + (P + R - 1)F; \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_{\chi}^M = R - (P + R - 1)F; \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_{\chi}^{\Pi} = P - (P + R - 1)F; \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{\kappa}^{\Pi} = 1 - P + (P + R - 1)F. \quad (5.12)$$

Из приведённых формул следует, что, если $P \neq R$, то следует ожидать разных технологических показателей информационного разделе-

ния при выделении в удаляемый продукт богатых минералом или породных кусков. Границы разделения для этих случаев также будут различными.

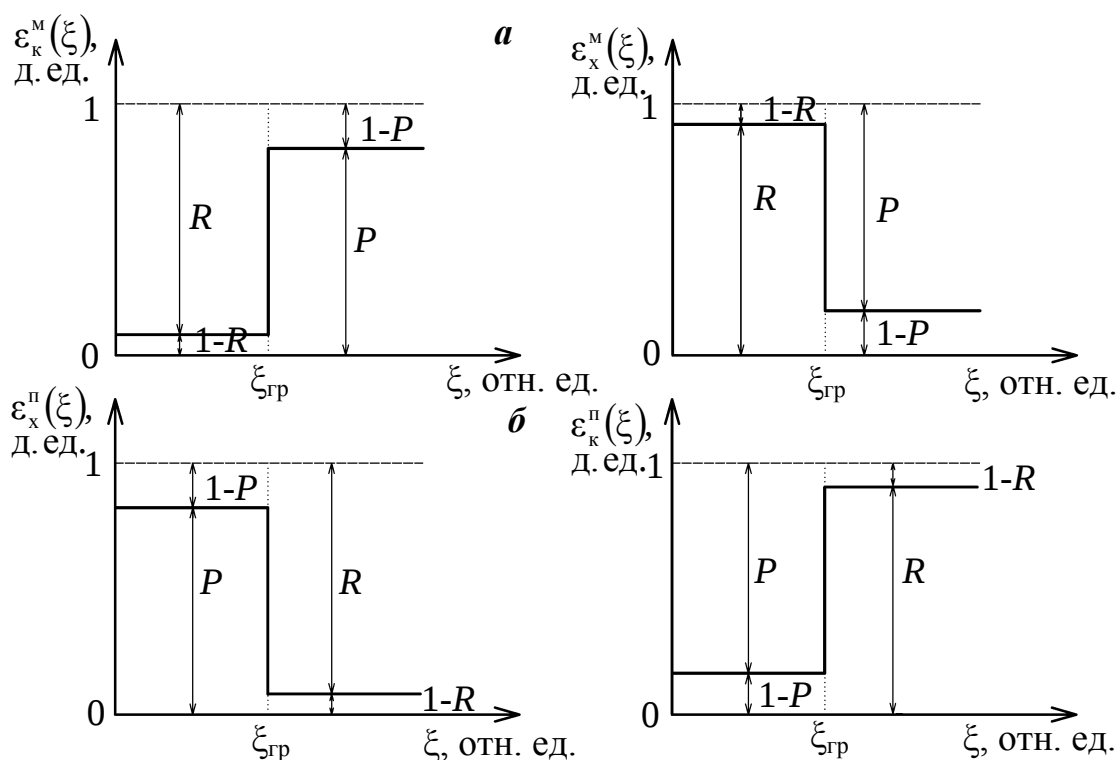


Рис. 5.10. Сепарационные характеристики информационного сепаратора при идеальном измерении признака разделения и погрешностях удаления в оба разделяемых продукта: а – удаление в выделяемый продукт (концентрат) богатых полезным минералом кусков; б – удаление в выделяемый продукт (хвосты) породных кусков

Кроме перечисленных погрешностей вид сепарационной характеристики зависит от содержания компонентов в кусках, которые при различных методах измерения могут идентифицироваться, начиная с различных минимальных значений. Эти значения определяют пороги чувствительности для конкретных методов измерения, элементов и минералов. При содержаниях, меньших этого порога, находится зона нечувствительности, что отражается на виде сепарационной характеристики (рис. 5.12).

Граница разделения в информационных сепараторах, в зависимости от технологической задачи, свойств и состава сортируемого материала, от числа признаков разделения задаётся по-разному и на различных уровнях.

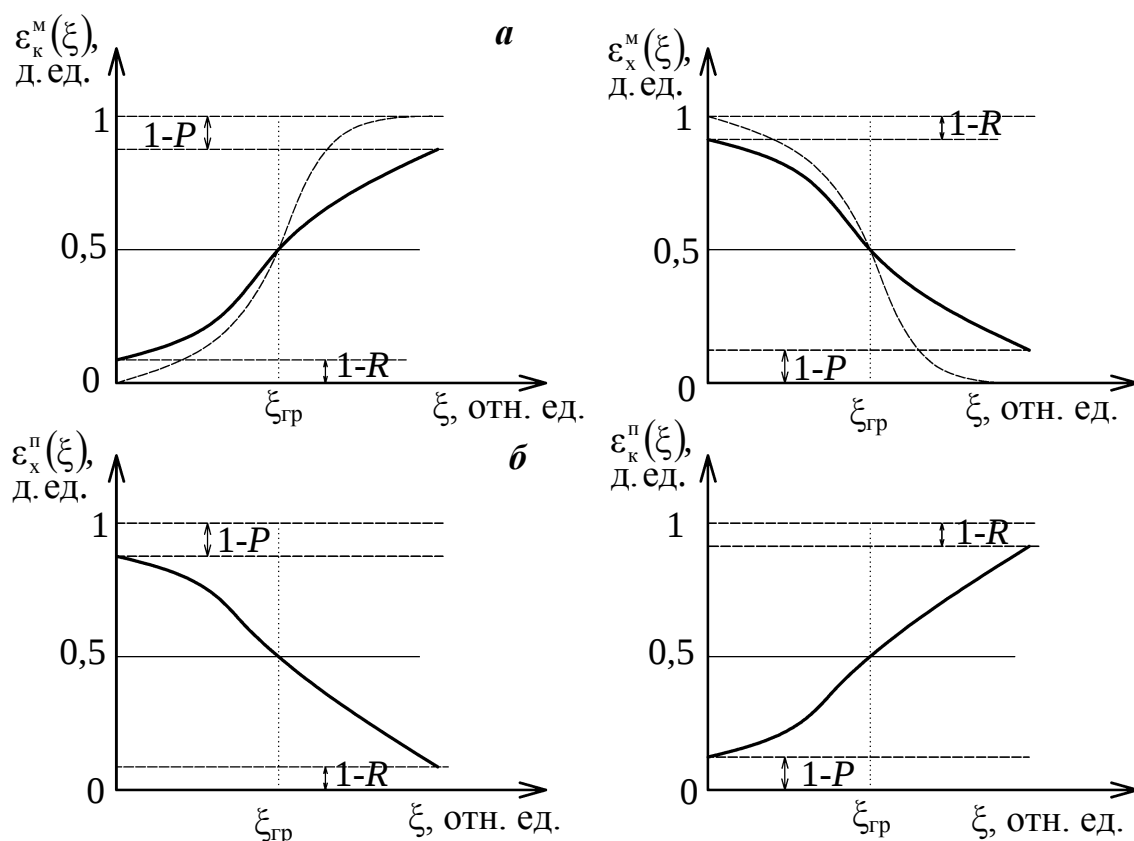


Рис. 5.11. Сепарационные характеристики информационного сепаратора при погрешностях измерения и удаления в оба разделяемых продукта:
a – удаление в выделяемый продукт (концентрат) богатых полезным минералом кусков; ***б*** – удаление в выделяемый продукт (хвосты) породных кусков

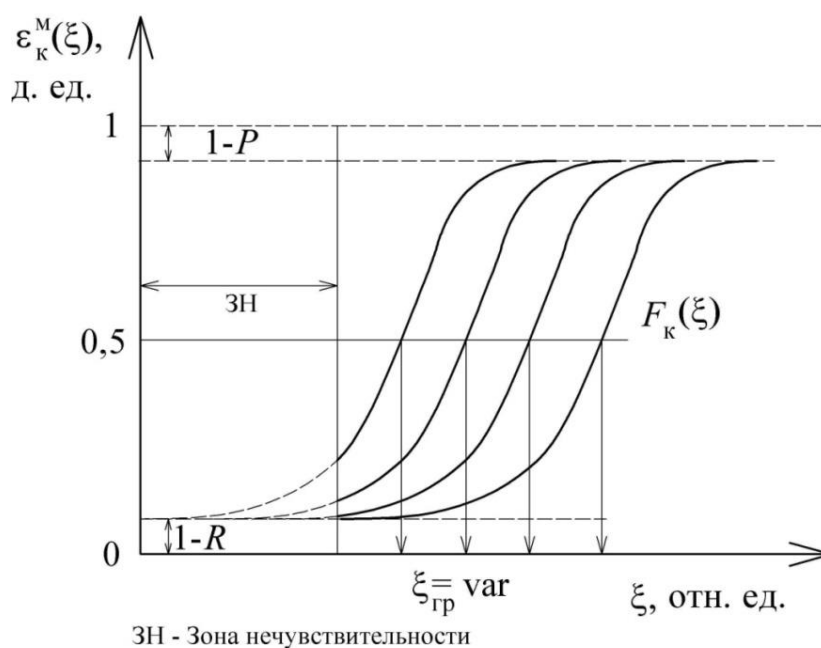


Рис. 5.12. Сепарационная характеристика при перестройке границы разделения

При единственном признаке разделения границей является абсцисса рабочей точки сепаратора при вероятности перехода частицы в концентрат или хвосты, равной 0,5 (ордината рабочей точки равна 0,5). При двух независимых признаках разделения сепарационная характеристика представляет поверхность, а граница разделения – это проекция изолинии с ординатой 0,5 на поверхности сепарационной характеристики на горизонтальную плоскость. В случае трёх разделительных признаков граница – это поверхность тела, внутри которого преобладают частицы одного вида (вероятность попадания их внутрь более 0,5), а снаружи – другого. При числе признаков разделения более трёх граница – это гиперповерхность, которую целесообразно задавать многомерной функцией или в дискретном варианте координатами в n -мерном пространстве (рис. 5.13).

Благодаря тому, что информационные методы включают вычислительные процедуры, становится возможным при измерении нескольких разделительных признаков комбинировать их, и разделение материала с многомерным фракционным составом осуществлять в одну операцию в одном аппарате. При этом может реализовываться разделение по специфической сепарационной характеристике по границе произвольной формы (в n -мерном случае фракционного состава – это гиперповерхность n -го порядка), которая может целенаправленно задаваться. На рис. 5.14 приведен пример границы разделения сепарационной характеристики для случая комбинирования двух признаков при разделении руды с одним полезным компонентом на два продукта.

Данная особенность информационных процессов разделения чрезвычайно важна. Благодаря ей, в одну операцию становится возможным разделение сырья, в прочих случаях обогащавшегося по комбинированным схемам с n операциями.

На рис. 5.15 приведены варианты границ разделения для двух случаев: первого – при использовании информационного комбинированного метода, в котором разделение по сложной границе $\varphi_{\text{и}}(\xi_1, \xi_2)$ может осуществляться в одну операцию (рис. 5.15, *а*) и второго – сочетающего два прямых физико-механических метода разделения в комбинированной схеме, которая должна включать при показанном варианте кусочно-линейной аппроксимации сложной границы не менее шести операций (рис. 5.15, *б*).

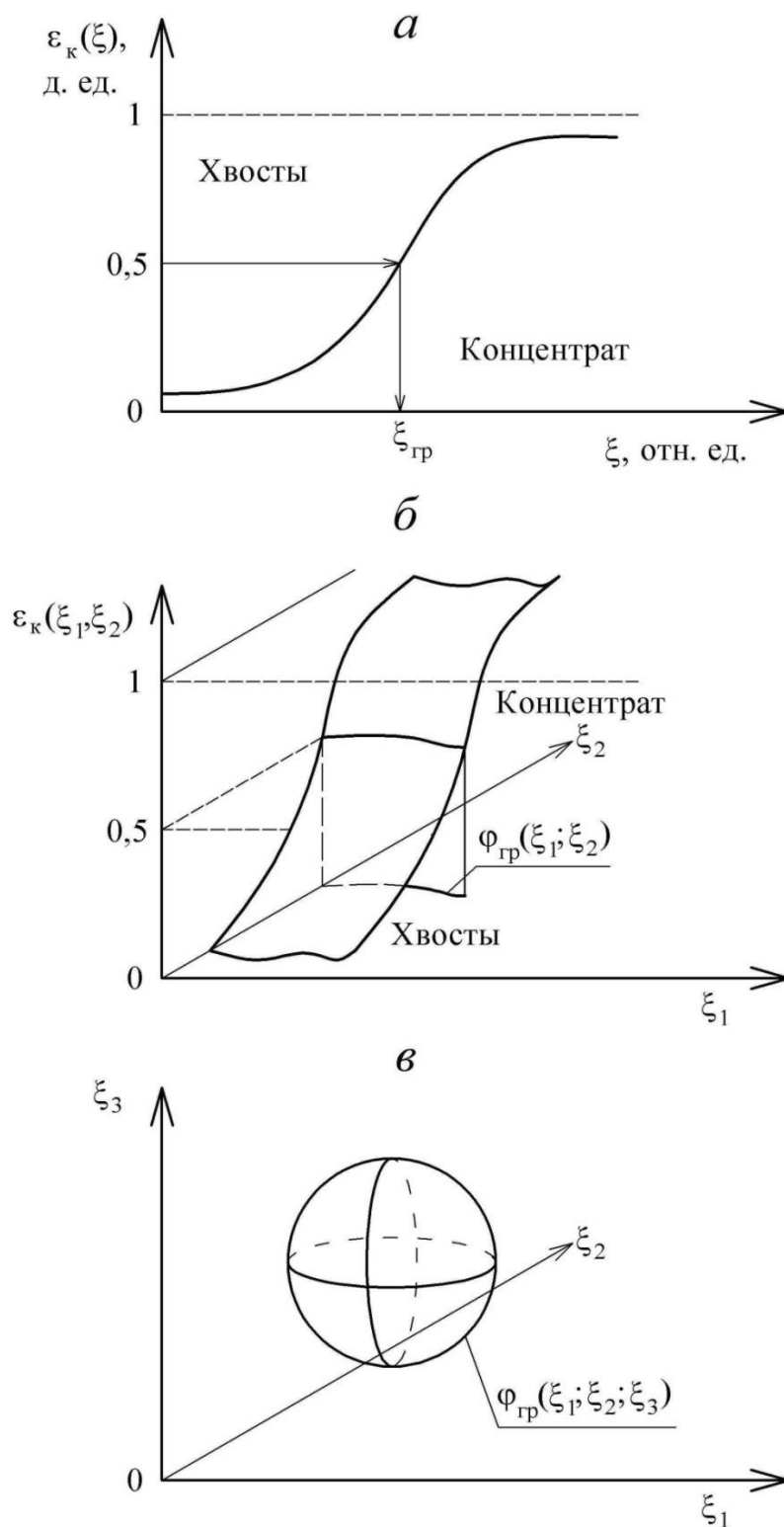


Рис. 5.13. Границы разделения информационного сепаратора при разном числе разделительных признаков:
a – одним; *б* – двух; *в* – трёх (внутри тела концентрат, вне тела – хвосты)

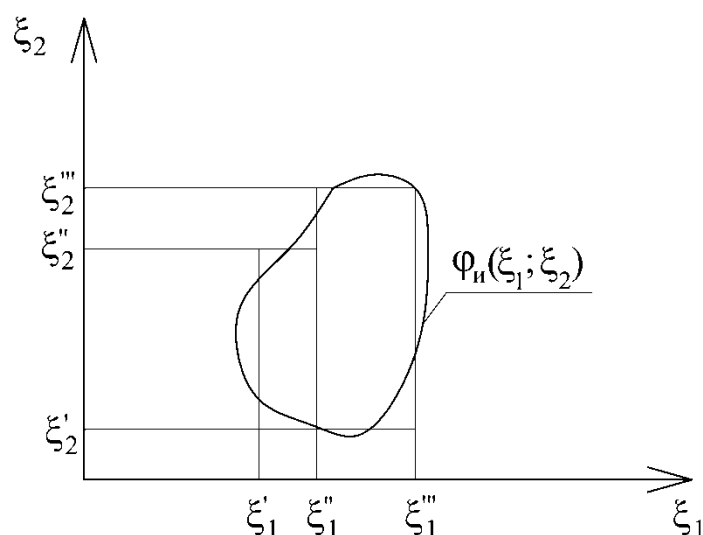


Рис. 5.14. Сопоставление границ разделения при использовании информационного комбинированного метода и при сочетании двух различных прямых физико-механических методов в комбинированной схеме

Данный пример иллюстрирует по одному потенциальному варианту принципиальных схем для каждого случая реализации границ, для случая (см. рис. 5.15, б) возможно несколько иных схем, отличающихся последовательностью выполнения операций. Принципиальные преимущества информационных методов перед другими в этом смысле неоспоримы.

Использование нескольких удаляющих органов или удаляющих органов на нескольких позициях не вызывает трудностей реализации в одну операцию многопродуктового разделения. Этот аргумент также указывает на определенные преимущества использования информационных методов разделения для решения сложных технологических задач нестандартными методами. Для нескольких первичных или вновь полученных признаков в информационных методах для однократного разделения может быть задано несколько границ для каждого из признаков.

Вычисленные содержания отдельных элементов α_i дают возможность применять новые алгоритмы сортировки. Так, для каждого сортируемого куска можно рассчитать его относительную ценность (по отношению к массе куска):

$$\Pi = \sum_{i=1}^n k_i \alpha_i, \quad (5.13)$$

где k_i – коэффициент, соответствующий цене металла на мировых рынках и учитывающий затраты на последующие обогащение и металлургию.

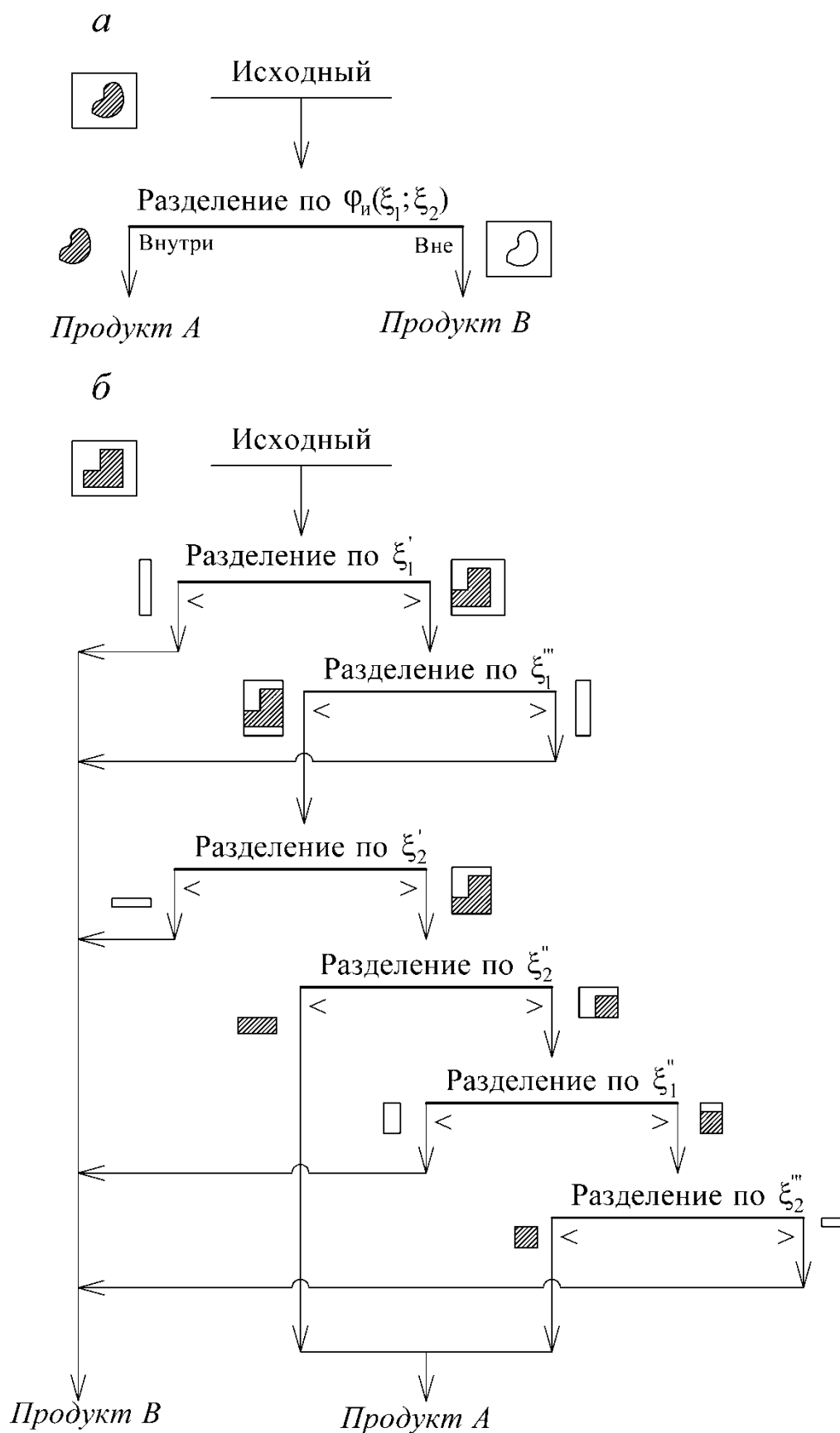


Рис. 5.15. Варианты принципиальных технологических схем при использовании информационного метода (а) и при сочетании двух различных прямых физико-механических методов при реализации разделения по сложной границе (б)

При сортировке с технологической задачей предварительной концентрации принятие решения об удалении в хвосты принимается по условию:

$$\sum_{i=n}^n k_i \alpha_i < C_{\text{зад}}. \quad (5.14)$$

По этому алгоритму, например, при вычисленных содержаниях элементов сульфидные медно-цинковые руды могут быть разделены на трёхпродуктовом сепараторе на хвосты по вышеприведённому алгоритму, а также на медную и медно-цинковую руду, например, по дополнительному соотношению содержаний меди и цинка.

Такой подход может быть применён ко многим видам комплексных руд для решения аналогичных задач.

6. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ И ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЕЩЕСТВО

6.1. Радиоактивность. Характеристики радиоактивных излучений и потоков частиц

Единственным реально используемым в информационных методах свойством, проявляющимся без какого-либо воздействия извне, является радиоактивность.

Естественная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер атомов, протекающий с определённой вероятностью, характерной для данного радионуклида.

Ядро становится неустойчивым и самопроизвольно распадается при отклонении от соотношения, связывающего атомный номер элемента Z с его массовым числом A : $Z=A/(1,98+0,015A^{2/3})$, что, как правило, характерно для тяжёлых элементов. Этот процесс называется **радиоактивным распадом**, а элементы с неустойчивыми ядрами – радиоактивными. Различают естественные, встречающиеся в природе, и искусственные (продукты ядерных реакций) радиоактивные элементы.

Известны следующие основные типы радиоактивных превращений: альфа-распад, бета-распад (электронный и позитронный распады, электронный захват), спонтанное деление ядер (имеет подчинённое значение и возможно лишь у тяжёлых ядер). Для естественных радиоактивных элементов в равной мере характерен α -распад и электронный β -распад, для искусственных – β -превращения, включая и электронный захват.

И альфа- и бета-распады сопровождаются гамма-излучением.

В табл. 6.1 приведена характеристика различных радиоактивных превращений. Радиоактивный распад протекает с изменением состава и энергетического состояния ядра.

Таблица 6.1

Характеристика различных радиоактивных превращений

Тип превращений	Схема превращений	Элементы, для которых данный тип распада преобладает	Вид излучений, сопровождающих распад
Альфа-распад	Вылет α -частицы	Тяжёлые ($Z \geq 83$), TR с числом нейтронов 84	α -излучение; γ -излучение низкоэнергетическое; электроны внутренней конверсии; характеристическое фотонное излучение
Бета-распад электронный (β^- -распад)	$n \rightarrow p + \beta^- + \tilde{\nu}$, где $\tilde{\nu}$ – антинейтрино	Благоприятно при условии $(A-Z)/Z > 1$	β^- -излучение с непрерывным спектром; γ -излучение разных энергий; электроны внутренней и парной конверсии; характеристическое фотонное излучение
Бета-распад позитронный (β^+ -распад)	$p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$, где ν – нейтрино	Благоприятно при условии $(A-Z)/Z \leq 1$	β^+ -излучение с непрерывным спектром; γ -излучение разных энергий
Электронный захват (E -захват)	$p + e \rightarrow n + \nu$, Слабое возбуждение ядра	E -захват сопутствует β^+ -, реже β^- -распаду	γ -излучение разных энергий; характеристическое фотонное излучение
Спонтанное деление ядер	Вылет двух осколков (два новых ядра с новыми массовыми числами) и нейтронов деления	Th, U, трансурановые элементы	n -излучение; γ -излучение; β^- -излучение осколков

Альфа-распад – это вылет α -частицы (${}^4_2\text{He}$), сопровождающийся уменьшением заряда ядра Z на две единицы по сравнению с материнским нуклидом. При таком распаде ядра испускают коротковолновое

(от десятков до первых сотен кэВ) электромагнитное γ -излучение сравнительно небольшой интенсивности. Начальная кинетическая энергия α -частицы, образовавшейся при распаде ядра при движении её в веществе, вызывает сильную ионизацию атома. Поэтому её проникающая способность весьма низка (десятки микрон).

Электронный бета-распад возникает в результате внутриядерного превращения нейтрона в протон, при этом испускается быстрый электрон и антинейтрино.

Если распад позитронный, протон превращается в нейтрон с испусканием положительно заряженного позитрона и нейтрино, порядковый номер элемента уменьшается на единицу.

Энергетический спектр β -частиц непрерывный, максимум кривой распределения энергий β -частиц приходится в среднем на энергию, равную 28 % от максимального уровня энергии β -частиц. При переходе дочерних ядер бета-распада с промежуточных энергетических уровней на основной испускаются γ -кванты с энергией от десятков до тысяч кэВ. Среди естественных радионуклидов основными излучателями γ -квантов являются именно β -излучатели.

При недостатке нейтронов в ядре протон может превратиться в нейтрон с испусканием нейтрино в результате захвата электрона. Этот тип распада называют E -захватом. Чаще захватывается электрон с ближайшего к ядру K -уровня, тогда процесс называют K -захватом. При восполнении образовавшейся вакансии на K -уровень переходит электрон с более высокого уровня, что сопровождается испусканием γ -кванта. Поскольку захват орбитального электрона происходит раньше, чем заполнение образовавшейся вакансии, то испускание γ -кванта относят к конечному ядру.

Длины волн γ -излучения естественных радионуклидов находятся в диапазоне $3,1 \cdot 10^{-11} - 4,7 \cdot 10^{-13}$ м, энергия квантов меняется в пределах 0,04-2,6 МэВ ($1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж).

Спонтанное деление ядер возможно у естественно неустойчивых ядер, если $(Z^2/A) = 50$. При этом ядро самопроизвольно раскалывается на два разлетающихся осколка.

Продукты распада радиоактивных элементов также могут распадаться, образуя цепочки радиоактивных элементов, называемых семействами или рядами (урановый, ториевый, актиноурановый ряды).

Излучения и потоки элементарных частиц, испускаемые при самопроизвольном распаде ядер радиоактивных элементов и продуктов их распада, отличаются энергетическими спектрами и интенсивностью.

Естественной радиоактивностью обладают урановые, ториевые руды, а также руды, содержащие природные радиоактивные элементы, такие как $^{40}_{19}\text{K}$, $^{87}_{37}\text{Rb}$, $^{147}_{62}\text{Sm}$ и др.

В табл. 6.2 приведены характеристики радиоактивных элементов земной коры.

Наибольший интерес для радиометрического обогащения представляют урановые и ториевые руды.

На рис. 6.1 и 6.2 приведены радионуклиды и спектры их излучения для уранового и ториевого рядов.

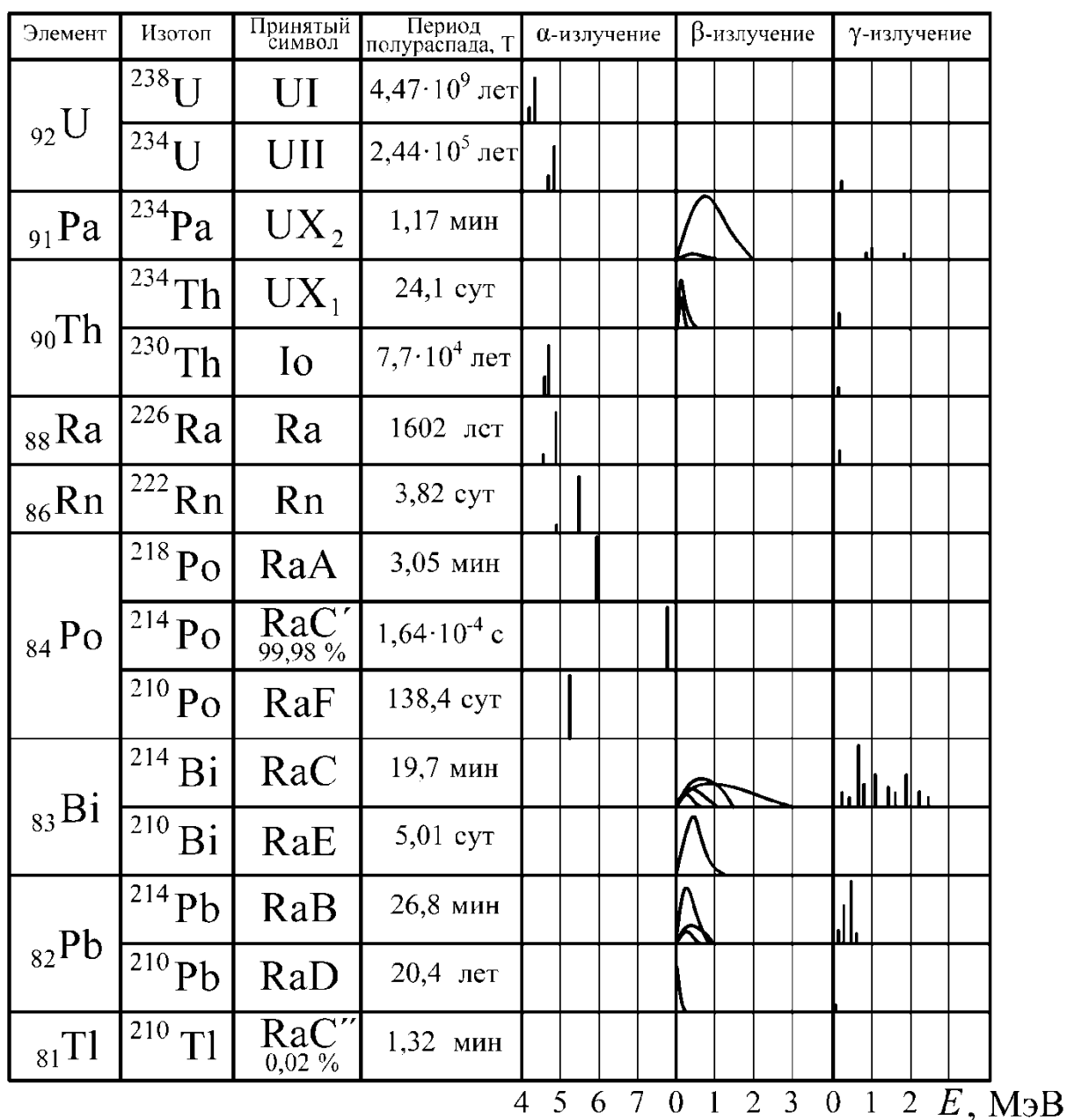


Рис. 6.1. Радионуклиды уранового ряда и их спектры излучения (^{238}U – 99,28 % в природном U)

Таблица 6.2

Радиоактивные элементы земной коры и константы их распада

Элемент	Химический индекс радиоактивного изотопа	Содержание изотопа в природной смеси элемента, %	Валентность	Кларк изотопа (%) элементов в земной коре	Тип распада	Энергия частиц и γ -квантов, кэВ	Конечный продукт распада	Период полураспада, лет	Постоянная распада, лет^{-1}
Уран	$^{238}_{92}\text{U}$	99,37	IV, VI	$2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,993$	α -распад	4180 4132	$^{206}_{82}\text{Pb}$	$4,49 \cdot 10^9$	$1,53 \cdot 10^{-10}$
Радий	$^{226}_{88}\text{Ra}$	—	II	—	α -распад	4750**	—	1622	$4,27 \cdot 10^{-4}$
Актиниум	$^{235}_{92}\text{Ac}$	0,73	IV, VI	$2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0073$	α -распад	4372	$^{207}_{82}\text{Pb}$	$7,13 \cdot 10^8$	$9,722 \cdot 10^{-10}$
Торий	$^{232}_{90}\text{Th}$	100	VI	$11,3 \cdot 10^{-4}$	α -распад	3990**	$^{208}_{82}\text{Pb}$	$1,40 \cdot 10^{10}$	$4,931 \cdot 10^{-11}$
Калий	$^{40}_{19}\text{K}$	0,011	I	$2,5 \cdot 0,00012$	β -распад K-захват	γ -1460 β -1330	$^{40}_{20}\text{Ca}$ $^{40}_{18}\text{Ar}$	$1,47 \cdot 10^9$ $1,24 \cdot 10^{10}$	$4,72 \cdot 10^{-10}$ $0,557 \cdot 10^{-11}$
Рубидий	$^{87}_{37}\text{Rb}$	27,2	I	$0,009 \cdot 0,272$	β -распад	β -274	$^{87}_{38}\text{Sr}$	$5 \cdot 10^{10}$ или $4,7 \cdot 10^{10}$	$1,39 \cdot 10^{-11}$ или $1,47 \cdot 10^{-11}$
Индий	$^{115}_{49}\text{In}$	95,72	III	$1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,957$	β -распад	—	$^{115}_{50}\text{Sn}$	$6,0 \cdot 10^{14}$	$1,15 \cdot 10^{-15}$
Олово	$^{124}_{50}\text{Sn}$	6,11	IV	$2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,061$	2β -распад (двойной)	—	$^{124}_{52}\text{Te}$	$2,4 \cdot 10^{17}$	$2,89 \cdot 10^{-18}$
Лантан	$^{138}_{57}\text{La}$	0,089	III	$3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,00089$	β -распад K-захват	1430	$^{138}_{58}\text{Ce}$ $^{138}_{56}\text{Ba}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$6,31 \cdot 10^{-12}$
Самарий	$^{146}_{62}\text{Sm}$	14,97	III	$7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,149$	α -распад β -распад	—	$^{143}_{60}\text{Nd}$	$1,05 \cdot 10^{11}$	$6,6 \cdot 10^{-12}$
Неодим	$^{150}_{60}\text{Nd}$	5,62	III	$3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,056$	β -распад	—	$^{150}_{61}\text{Pm}$	$1 \cdot 10^{16}$	$6,93 \cdot 10^{-17}$
Лютеций	$^{176}_{71}\text{Lu}$	2,59	III	$6,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,025$	β -распад K-захват	89	$^{176}_{72}\text{Hf}$ $^{176}_{70}\text{Yb}$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$3,31 \cdot 10^{-11}$
Рений	$^{187}_{75}\text{Re}$	66,93	IV	$7 \cdot 10^{-8} \cdot 0,629$	β -распад	8	$^{187}_{76}\text{Os}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,61 \cdot 10^{-11}$
Радио-углерод	$^{14}_6\text{C}$	—	—	—	β -распад	50**	$^{14}_7\text{N}$	5568	$1,245 \cdot 10^{-4}$

* Элементы литофильной группы.

** Средневзвешенная энергия частиц и γ -квантов в группе.

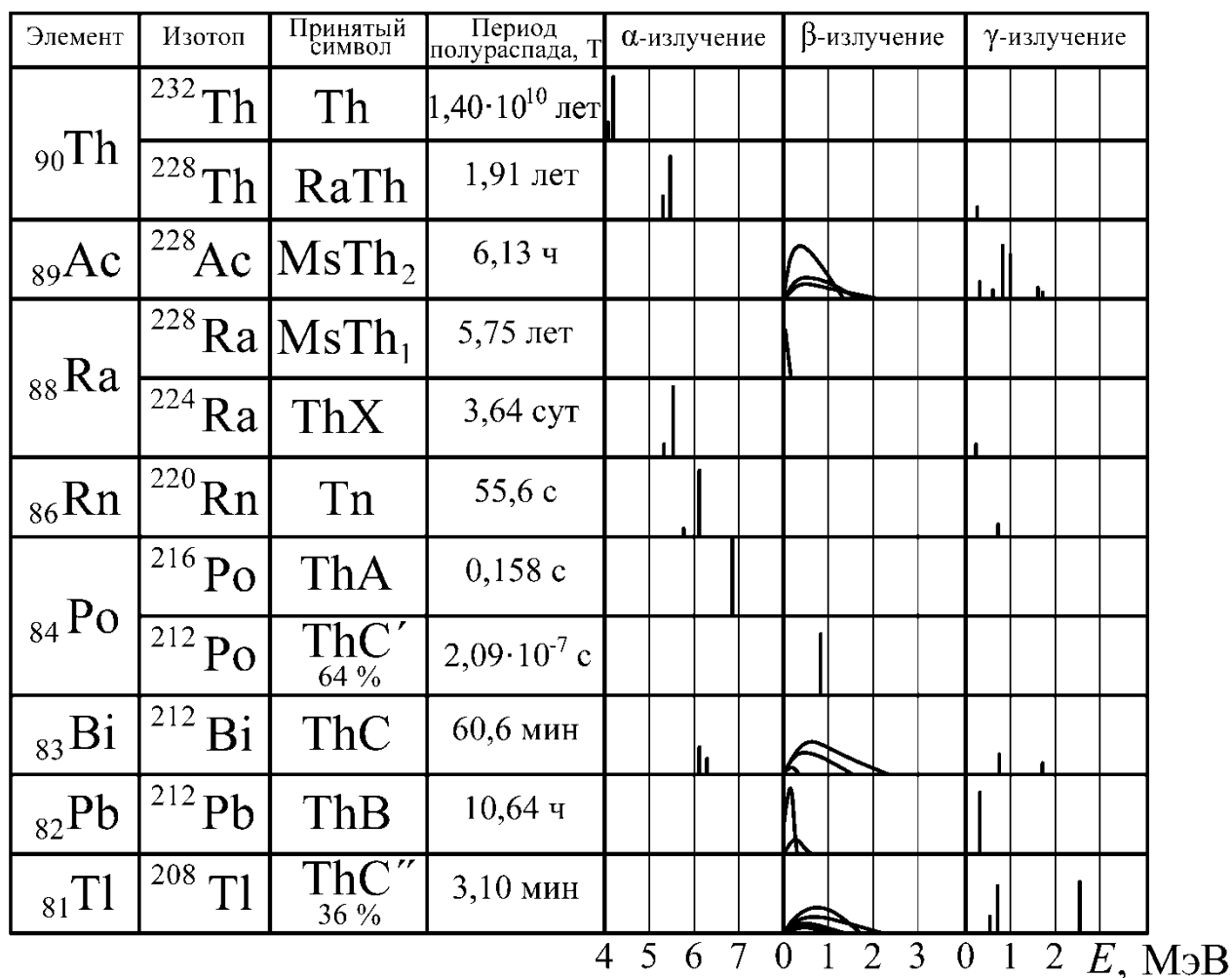


Рис. 6.2. Радионуклиды ториевого ряда и их спектры излучения

Уран, торий и их дочерние радиоактивные элементы являются источниками различных видов излучения и потоков частиц. Собственно уран и торий испускают α -излучение и низкоинтенсивное γ -излучение, следующие дочерние элементы при распаде испускают β -излучение и слабое γ -излучение. Наиболее интенсивными излучателями семейств урана и тория являются элементы дочерних рядов радия и радиотория, имеющие малую продолжительность жизни.

Все естественные и дочерние радиоактивные элементы имеют различные времена жизни, оцениваемые периодом полураспада, и, следовательно, разные скорости распада.

Задача определения содержаний радиоактивных элементов с использованием радиоактивных излучений весьма сложна, поскольку в руде могут одновременно содержаться в меняющихся соотношениях как родоначальники радиоактивных рядов, так и их дочерние элементы. Каждый из них испускает различные (α -, β -, γ -) виды излучений,

отличающиеся интенсивностями испускания и энергетическими спектрами.

Нарушение радиоактивного равновесия в рядах вызывается растворением и выщелачиванием отдельных элементов, а также частичным удалением газообразных изотопов, таких как ^{222}Rn , Tn (^{222}Rn), An (^{219}Rn). Наиболее часто отмечается нарушение равновесия в урановом ряду, особенно между U , Io (^{230}Th), изотопами тория, радия. Радиоактивные элементы ряда тория дают труднорастворимые химические соединения, у них также малый срок существования и потому нет условий для избыточного накопления дочерних элементов. Благодаря этому руды тория всегда находятся в состоянии радиоактивного равновесия.

Поэтому для обеспечения благоприятных условий определения концентраций требуется их радиоактивное равновесие с наиболее интенсивными излучателями соответствующего ряда. Нарушение равновесия снижает эффективность определения содержаний и разделения.

В естественных условиях все радиоактивные элементы приходят в состояние радиоактивного равновесия с продуктами своего распада.

Состояние радиоактивного равновесия между ураном и радием, например, характеризуется коэффициентом равновесия c из выражения

$$c = \frac{\alpha_{\text{Ra}}}{\alpha_{\text{U}}} \cdot 2,9 \cdot 10^6,$$

где α_{Ra} , α_{U} – содержание радия и урана в руде, %.

При $c=1$ урановая руда равновесная, при $c<1$ равновесие смещено в сторону урана, при $c>1$ равновесие смещено в сторону радия.

6.2. Взаимодействие ионизирующих излучений и потоков частиц с ядрами и атомами

Заряженные частицы, γ -кванты и нейтроны, взаимодействуя с веществом, поглощаются или рассеиваются, что сопровождается ионизацией и возбуждением атомов, ядерными реакциями, нарушениями структуры вещества (радиационными дефектами).

Вероятность любого взаимодействия характеризуется эффективным сечением взаимодействия σ данного процесса, например, поглощения, рассеяния, ослабления, ядерной реакции, захвата и т. п. Этот термин используют для любого вида взаимодействия частиц или квантов с атомами или ядрами, в соответствии с принятой в настоящее время моделью атома.

Эффективное сечение взаимодействия соответствует доле частиц или квантов, вызвавших то или иное взаимодействие в единичном объ-

ёме по отношению ко всем первичным частицам или квантам, попавшим на единицу площади облучаемого вещества, то есть оно характеризует вероятность процесса взаимодействия.

Смысл термина «эффективное сечение» дополнительно поясняется формулой, см²:

$$\sigma = \frac{N'}{nNdx},$$

где N – число падающих частиц в течение определённого времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющегося в слое толщиной dx n ядер или атомов; N' – число частиц, вступивших за тот же интервал времени в ту или иную реакцию либо во взаимодействие в слое толщиной dx (см) на поперечном сечении 1 см².

Чем меньше сечение процесса, тем он реже происходит.

Величина эффективного сечения (или просто сечения) зависит как от природы и свойств вещества, так и от энергии, размеров, зарядов частиц и квантов.

Полученные экспериментальные значения ядерных сечений находятся в пределах от 10^{-25} до 10^{-23} см² на ядро. Величина сечения, равная 10^{-24} см², принята за единицу и называется барном.

Для получения надёжной информации можно использовать только те физические процессы, которые характеризуются достаточно высоким значением эффективного сечения взаимодействия с химическим элементом.

6.3. Ионизирующие излучения и потоки частиц

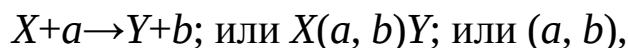
К непосредственно ионизирующим следует относить заряженные частицы, образующиеся в результате радиоактивного распада или ядерных реакций (α -, β^+ , β^- -частицы, протоны, электроны внутренней конверсии). К группе косвенно ионизирующих излучений, которые при взаимодействии со средой создают вторичные ионизирующие излучения, относят фотонное излучение (γ -кванты, рентгеновские кванты) и нейтроны.

Сущность явлений, происходящих при самопроизвольном радиоактивном распаде, рассмотрена ранее.

Потоки элементарных частиц и фотонов, помимо самопроизвольного радиоактивного распада, возникают также в результате ядерных реакций.

Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или излучениями (высокоэнергетичные γ -кванты) либо друг с другом.

В результате ядерной реакции происходит изменение состава ядра и его структуры. Ядерные реакции сопровождаются энергетическими превращениями. Они могут протекать как с выделением, так и с поглощением энергии. Символическая запись реакции такова:



где X и Y – исходные и конечные ядра; a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

По характеру происходящих ядерных превращений ядерные реакции подразделяют на:

- реакции с испусканием нейтронов (n);
- реакции с испусканием заряженных частиц (α , β , p);
- реакции захвата (ядро не испускает никаких частиц, а переход в основное состояние происходит за счёт испускания одного или нескольких γ -квантов).

Длина пробега ионизирующих излучений в веществе различна. В среднем соотношение длин пробега таково: $l_\alpha : l_\beta : l_\gamma \approx 1 : 100 : 10\,000$.

При различных энергиях излучений в различных веществах эти соотношения существенно меняются. Это иллюстрируется на примере пробега частиц и фотонов в алюминии (табл. 6.3).

Таблица 6.3

**Максимальная длина пробега
различных элементарных частиц и фотонов в алюминии, мм**

Энергия, МэВ	γ -кванты (потеря 90 % квантов)	Электроны, позитроны	Протоны	α -частицы
0,05	24	0,011	–	–
0,10	59	0,045	–	–
0,50	111	0,630	0,005	–
1,00	135	1,600	0,013	–
2,00	194	3,500	0,043	–
3,00	243	5,800	0,078	0,008
5,00	295	9,900	0,196	0,017

Поскольку нейтроны не имеют заряда, они легко проникают в любые ядра.

В свободном состоянии нейтроны существуют недолго. Они или распадаются с периодом полураспада 11,77 мин, или захватываются ядрами.

Быстрые нейтроны получают реже за счёт фотонейтронных реакций (γ, n), а чаще – за счёт реакций (α, n) и с использованием трансурановых изотопов.

Для получения медленных и тепловых нейтронов источник окружают слоем замедлителя из парафина, графита или воды. Быстрые нейтроны при соударениях с атомными ядрами теряют энергию. После нескольких столкновений энергия становится ниже энергии возбуждения, после чего нейтроны рассеиваются без изменения внутреннего состояния ядра, то есть упруго. При одном упругом соударении нейтрон теряет долю энергии, равную $2A/(A+1)^2$, где A – массовое число ядра-мишени (замедлителя). Эта доля мала для тяжёлых ядер (10^{-2} для Pb) и велика для лёгких ($1/7$ для C, $1/2$ для H). Поэтому в лёгких ядрах нейтрон замедляется гораздо быстрее. В процессе замедления образуются тепловые нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии со средой, в которой происходит замедление.

6.4. Взаимодействие заряженных частиц с атомами и ядрами

Заряженные частицы могут взаимодействовать как с ядрами атомов, так и с электронами вещества (рис. 6.3).

Поглощение частицы ядром невелико. Мала и вероятность рассеяния заряженной частицы в поле ядерных сил.

В поле кулоновских сил может происходить как упругое, так и неупругое рассеяние заряженных частиц.

Взаимодействуя с электронами вещества, заряженные частицы могут вызвать ионизацию или возбуждение атома либо испытать упругое соударение. При прохождении через вещество тяжёлых (по массе сопоставимых с массой атома) заряженных частиц (α -частиц, протонов и т. п.) с энергией в несколько МэВ преобладают процессы ионизации (выбивания электрона с внешней оболочки с образованием свободного электрона и ионизированного атома) и возбуждения (выбивания электрона с внутренней оболочки на внешнюю) атомов.

Энергия α -частиц тратится на взаимодействие с электронными оболочками атомов веществ. С уменьшением скорости α -частицы увеличивается вероятность захвата ими электронов, благодаря которому она превращается в нейтральный атом гелия.

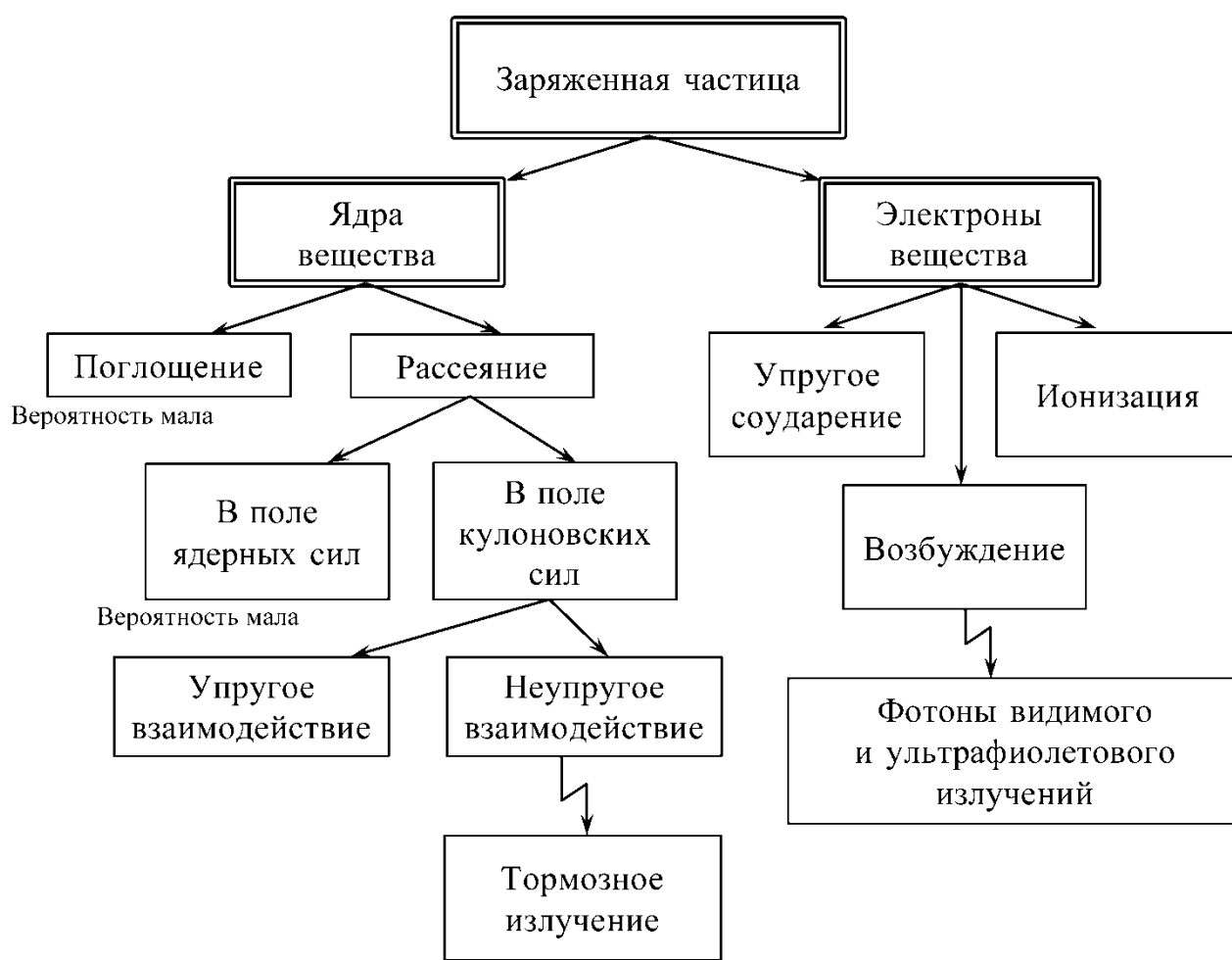


Рис. 6.3. Схема взаимодействия заряженных частиц с веществом на ядерном и атомном уровнях

Взаимодействие α -частиц с ядрами атомов в виде упругого или неупругого рассеяния имеет значительно меньшую вероятность и потому не влияет на характер прохождения α -частиц через вещество.

Каждый α -активный изотоп испускает моноэнергетические характерные именно для него группы α -частиц. Поэтому потоки α -частиц используют обычно для возбуждения ядерных реакций типа (α, n) , (α, β) , для возбуждения характеристического рентгеновского излучения при анализе лёгких элементов рентгенорадиометрическим методом.

Реакцию (α, n) часто используют для получения потока нейтронов.

Проникающая способность α -частиц невелика, большая часть энергии теряется у поверхности вещества.

Протоны (p) вызывают ядерные реакции (p, α) ; (p, n) ; (p, p) ; (p, γ) .

Для получения больших потоков протонов, нейтронов и ионов различных элементов используют генераторы и ускорители заряженных частиц. С их помощью можно получить интенсивные потоки γ -излучения и нейтронов по реакциям (p, γ) , (d, n) . Здесь d – дейтрон.

Прямое использование α -частиц для определения состава вещества в информационных методах обогащения не нашло применения.

Бета-излучение в большинстве случаев представляет собой поток отрицательно заряженных частиц – электронов. При взаимодействии с орбитальными электронами или ядрами атомов вещества электрон испытывает большое количество актов упругого или неупругого рассеяния. При неупругом рассеянии электрона его энергия тратится на ионизацию и возбуждение атомов и на радиационное (тормозное) излучение. Вследствие упругого рассеяния электрон не теряет энергию, а лишь изменяет направление своего движения.

Следует отметить, что проникающая способность бета-излучения невелика, в минералах и горных породах она обычно не превышает долей миллиметра.

Основными последствиями взаимодействия электронов при их энергиях до нескольких мегаэлектронвольт являются возбуждение и ионизация атомов. При ионизации атома выбивается один из электронов, который в соответствии с переданной ему энергией может производить также ионизацию атомов среды. В большинстве случаев энергия выбитых электронов оказывается небольшой, и поэтому число актов ионизации, вызываемых ими, как правило, невелико.

Возбуждение атома происходит вследствие выбивания бета-частицей электрона с более глубоких электронных оболочек атома. Переход атома из возбуждённого состояния в нормальное сопровождается испусканием фотонов характеристического рентгеновского излучения, как и при возбуждении гамма-излучением. Однако бета-флуоресценция меньше зависит от колебаний вещественного состава исследуемого образца по сравнению с гамма-флуоресценцией.

При торможении электрона в кулоновском поле ядра возникает электромагнитное излучение с энергией, зависящей от ускорения электрона. Поскольку отдельные электроны испытывают различное ускорение, тормозное излучение имеет непрерывный энергетический спектр. Максимальную энергию фотоны тормозного излучения приобретают в том случае, когда электрон полностью теряет свою энергию в кулоновском поле ядра атома; энергия фотона равна при этом кинетической энергии электрона. Потери энергии электронов на тормозное излучение на единице пути (dE/dx) зависят от порядкового номера элемента и энергии электронов E и определяются выражением

$$(dE/dx) \approx EZ^2n,$$

где n – число атомов в 1 см^3 вещества.

С увеличением энергии электронов и атомного номера элемента потери энергии на тормозное излучение возрастают и являются существенными лишь для высоких значений энергии электронов и для элементов с большими порядковыми номерами.

Метод измерения, основанный на возбуждении атомов потоком бета-частиц, называется **бета-флуоресцентным**. Он может применяться в анализе руд, содержащих тяжёлые элементы с атомным номером $Z \geq 35$, например, молибденовых, свинцовых, оловянных, вольфрамовых.

Упругое рассеяние электронов может происходить как на орбитальных электронах, так и на ядрах атомов вещества. Однако вероятность рассеяния электрона ядрами атомов значительно больше вероятности рассеяния орбитальными электронами. Сечение упругого рассеяния на орбитальных электронах приблизительно пропорционально порядковому номеру Z и, соответственно, Z^2 – на ядрах атомов. В результате упругого рассеяния большая часть электронов отклоняется на малые углы. Вероятность отклонения электрона на больший угол увеличивается для элементов с большими Z и при небольших энергиях электронов.

Плотность потока рассеянных в обратном направлении бета-частиц зависит от толщины слоя и порядкового номера элемента, входящего в состав вещества, подвергаемого облучению. Увеличение толщины рассеивающего слоя приводит к возрастанию плотности потока обратно рассеянного излучения. Однако это происходит до определённого предела. Минимальная толщина образца, начиная с которой плотность рассеянного излучения не возрастает, является **слоем насыщения**.

Изменение плотности потока обратно рассеянного излучения в зависимости от порядкового номера элемента объясняется различным вкладом упругого рассеяния бета-частиц в общий процесс рассеяния данным веществом. Порядковый номер элемента определяет и характер энергетического распределения обратно рассеянного бета-излучения.

С увеличением порядкового номера максимум интенсивности рассеянного излучения смещается в сторону больших значений энергии.

Метод измерения, основанный на измерении плотности потока обратно рассеянного бета-излучения, называется **бета-отражательным**. Он может применяться для руд, содержащих тяжёлые элементы.

В информационных методах обогащения взаимодействие бета-излучения с веществом для идентификации состава практически не используется.

6.5. Взаимодействие нейтронов с веществом

Характер взаимодействия нейтронов с веществом определяется свойствами ядер вещества и энергией нейтронов. Важнейшим свойством ядра является его массовое число. Ядра химических элементов можно классифицировать следующим образом: лёгкие – до 25; средние – от 25 до 80, тяжёлые – свыше 80.

Основные элементарные процессы взаимодействия нейтронов с веществом показаны на рис. 6.4.

Нейтроны низких энергий (медленные, тепловые) могут испытывать упругое рассеяние (n, n), радиационный захват (n, γ), а также может происходить деление тяжёлых ядер (^{238}U , ^{235}U , ^{239}Pu). Для нейтронов высоких энергий (быстрых) характерны процессы неупругого (n, n') и упругого (n, n) рассеяния, захвата с испусканием γ -квантов (n, γ), α -частиц (n, α), протонов (n, p), двух нейтронов ($n, 2n$), деления ядер (n, f). Здесь f – осколки ядер.

Для применения в информационных методах обогащения целесообразно использование медленных, тепловых нейтронов.

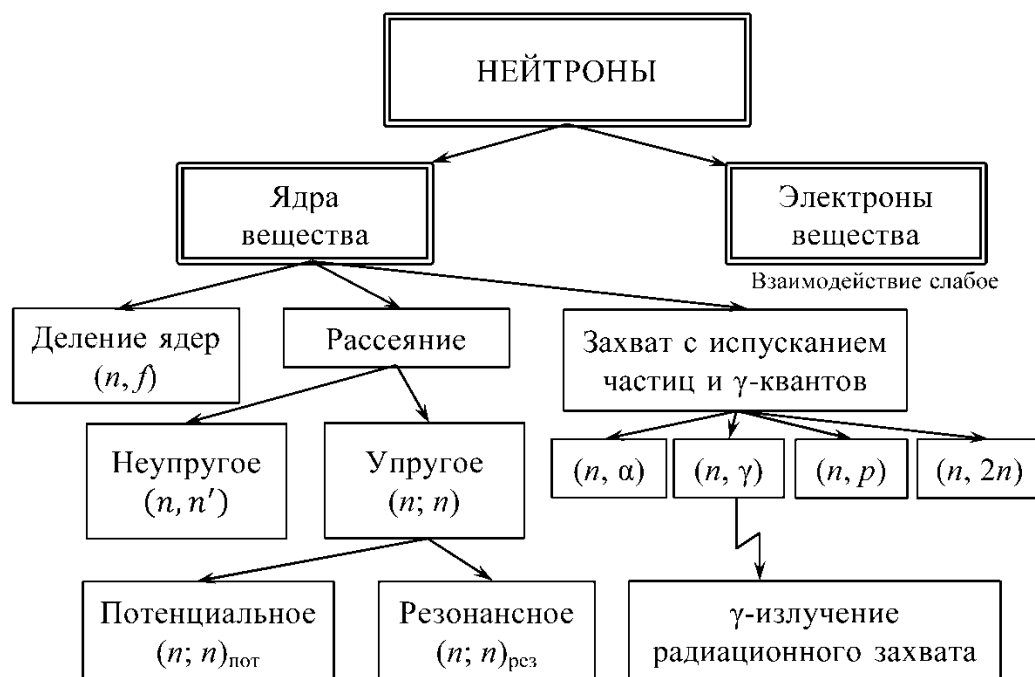


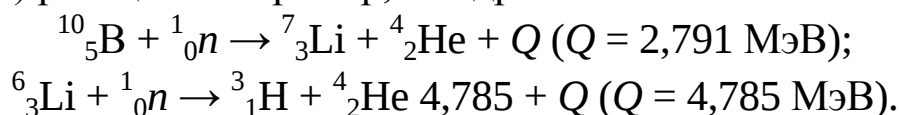
Рис. 6.4. Схема взаимодействия нейтронов с веществом на ядерном и атомном уровнях

Основным видом взаимодействия нейтронов с веществом является их взаимодействие с атомными ядрами. Это самый обширный и разнообразный класс ядерных превращений, поскольку нейтрон, не имея электрического заряда, легко сближается с ядрами атомов.

Столкновение нейтрона с ядром приводит либо к отклонению его в поле ядерных сил от первоначального направления, либо к захвату нейтрона ядром и образованию составного возбуждённого ядра. Переход ядра в более низкое энергетическое состояние может происходить путём распада с испусканием α -частицы или (и) γ -кванта.

Вероятность того или иного процесса взаимодействия зависит от энергии нейтрона. Какая-то часть нейтронов проходит сквозь вещество без взаимодействия.

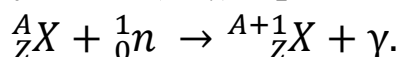
На медленных нейтронах на небольшом числе лёгких ядер наблюдается (n, α) реакция. Например, на ядрах ^{10}B и ^6Li они имеют вид:



Для естественной смеси изотопов сечение (n, α)-реакции для В – 754 барна, для Li – 70,4 барна. У отдельных изотопов они значительно выше: для ^{10}B – 3843 барна, для ^6Li – 945 барнов.

Для многих других химических элементов сечения этой реакции на 3-6 порядков ниже.

Наибольшее распространение при захвате нейтрона имеет реакция с испусканием гамма-излучения (n, γ) – радиационный захват:



Радиационный захват нейтрона протекает при любой энергии и на любом ядре. Вероятность радиационного захвата увеличивается с убыванием скорости нейтронов. Для медленных и особенно тепловых нейтронов с энергией $0,1 \div 10$ эВ сечение радиационного захвата является наибольшим. Это область резонансного поглощения нейтронов ядрами некоторых элементов. Увеличение сечения (n, γ)-реакции наблюдается также при переходе от лёгких к тяжёлым элементам.

Время жизни ядра, возникшего при радиационном захвате, составляет 10^{-14} с. Это время соответствует испусканию гамма-кванта, после чего ядро путём исходного радиационного процесса возвращается в основное состояние. Интенсивность и энергия гамма-излучения (n, γ)-реакции являются специфическими для каждого элемента свойствами, что может быть использовано для измерения содержаний элементов.

Метод измерения содержаний элементов, основанный на использовании различий разделяемых компонентов полезных ископаемых в интенсивности линий γ -квантов радиационного захвата нейтрона, называется **нейтронно-радиационным**.

Теоретически метод может быть использован для элементов с сечением радиационного захвата более 1 барна. Это руды Ni, Cu, Zn, Zr, Cr, Fe, Mn, V, Ag, Au, W и др., однако практического применения метод к настоящему времени пока не имеет.

В ряде (n, γ)-реакций конечное ядро является стабильным изотопом облучаемого ядра, а возникающее гамма-излучение – единственным продуктом ядерной реакции.

В других случаях радиационный захват нейтронов ядрами приводит к образованию нестабильных (радиоактивных) изотопов. Это явление называется **искусственной радиоактивностью**, а способ её образования – **активацией**. Образующиеся при этом радиоактивные изотопы отличаются по виду и энергии излучения, периоду полураспада и другим свойствам. Обычно эти изотопы излучают гамма-кванты, электроны или позитроны. При этом интенсивность наведённой радиоактивности зависит от сечения активации и содержания элемента в облучаемом веществе.

Метод измерения, основанный на использовании различий разделяемых компонентов полезных ископаемых в интенсивности наведённого излучения, называется **нейтронно-активационным**.

Наибольшее практическое применение в аналитике нашёл активационный анализ на тепловых нейтронах. Возникающие в результате активации радиоактивные изотопы испускают потоки гамма- и бета-излучений с характерными для активированных изотопов энергиями. При активации на тепловых нейтронах наиболее вероятна ядерная реакция с испусканием гамма-излучения и с образованием изотопа того же элемента. Этот метод анализа весьма чувствительный и селективный, им можно определять до 70 элементов. Для определения лёгких элементов наиболее благоприятно использование быстрых нейтронов, обладающих более высокими энергиями, с образованием потоков протонов, α -частиц или нейтронов. Чувствительность метода в этом случае снижается.

К достоинствам метода относят высокую чувствительность (при использовании мощных потоков нейтронов возможно, например, определение золота на кларковом уровне, весьма малых содержаний редких и рассеянных элементов), возможность одновременного опре-

деления нескольких элементов в одной навеске (образце), применимость метода для анализа малых количеств вещества. Недостатки метода: значительная продолжительность анализа, поскольку каждая из необходимых для анализа операций (активация, остывание, измерение наведённой активности) требует некоторого (подчас значительного) времени; высокая радиационная опасность, как за счёт первичных нейтронных потоков, так и за счёт вторичных, активированных в продуктах излучений. Во многих случаях при больших значениях периода полураспада наведённая радиоактивность в руде может сохраняться часы, сутки, месяцы, годы, то есть руда надолго становится источником радиоактивных излучений. Так, у изотопа ^{51}Cr период полураспада составляет 27,8 дня.

Нейтронно-активационный анализ используется для руд, горных пород и продуктов обогащения для аналитических целей, в том числе и для определения в порошковых пробах содержаний микропримесей (в этом случае для активации используются нейтронные исследовательские каналы атомных реакторов, а в прочих случаях применяют ионные и электронные ускорители, генераторы нейтронов и радионуклиды), а также для определения состава природных сред (в скважинах).

В практике геолого-разведочных работ данный метод нашёл применение в скважинном каротаже и оказался полезным при разведке месторождений топлива (уголь, нефть), чёрных металлов (марганец), цветных металлов (алюминий, медь), нерудного сырья (флюорит, фосфорит, пьезокварц). Каротаж скважины занимает несколько часов как в непрерывном, так и в дискретном режимах.

Продолжительность измерений при нейтронно-активационном анализе не согласуется с требованиями к быстродействию процессов мелкопорционной сортировки и покусковой сепарации, которые должны протекать в реальном времени. Для них требуемое суммарное время на обработку каждого куска и каждой порции должно составлять доли секунды, а нейтронно-активационный анализ многооперационен и продолжителен, его длительность значительно превосходит допустимые пределы. В этом основная причина отсутствия сепараторов с использованием нейтронно-активационного анализа и, следовательно, невозможности реализации нейтронно-активационного метода обогащения на современном уровне развития техники. Следует также отметить, что сама технология и продукты разделения при использовании нейтронно-активационного анализа становятся радиационно опасными.

Для отдельных руд в перспективе этот метод может быть применён для крупнопорционной сортировки в транспортных ёмкостях.

Крупнопорционная сортировка, в отличие от сепарации, не позволяет получать продукты обогащения (концентрат, хвосты). С её помощью горную массу разделяют на богатую, рядовую, бедную и забалансовую руды.

При взаимодействии тепловых нейтронов с веществом какая-то часть их рассеивается, часть захватывается ядрами атомов, а какое-то количество нейтронов проходит через вещество. Медленные нейтроны тоже частично рассеиваются и захватываются, частично замедляются до тепловых энергий, а остальная часть проходит через вещество. В результате всех этих процессов первоначальный поток нейтронов ослабляется. Закон ослабления имеет вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-N_A \sigma_n x},$$

где Φ_0 – плотность первичного потока нейтронов; Φ – плотность потока нейтронов после прохождения слоя толщиной x ; σ_n – полное сечение взаимодействия нейтронов; N_A – число Авогадро (физическая константа, численно равная количеству специализированных структурных единиц (атомов, молекул, ионов или любых других частиц) в 1 моле вещества, $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Сечения различных взаимодействий нейтронов с химическими элементами приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

**Сечения взаимодействия тепловых нейтронов
с ядрами и изотопами некоторых химических элементов**

Элемент	Z	A	Сечение, барн		
			упругого рассеяния σ_y	захвата σ_z	активации σ_a
H	1	1	20,36	0,335	–
Li	3	6,939	~1,5	70,4	–
B	5	10,811	3,9	754	–
C	6	12	4,7	$3,73 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
N	7	14	9,96	1,88	–
O	8	16	3,73	$0,2 \cdot 10^{-3}$	–
Na	11	23	3,3	0,47	0,536
Mg	12	24,31	3,9	0,069	–
Al	13	27	1,35	0,241	0,21
Si	14	28,09	~2,2	0,16	–
K	19	39,09	~2	2,07	3

Окончание табл. 6.4

Элемент	Z	A	Сечение, барн		
			упругого рассеяния σ_v	захвата σ_z	активации σ_a
Ca	20	40,08	3,3	0,44	—
V	23	50,94	5	5	
		51	—	—	4,5
Cr	24	52	3,7	3,1	—
		50	—	—	13,5
Mn	25	55	2,1	13,2	13,3
Fe	26	55,85	—	2,62	—
		56	12,5	—	—
		54	—	—	2,5
Ni	28	58,71	—	4,6	
		58	27	—	—
		64	—	—	1,6
Cu	29	63,55	—	3,79	—
		63	7,6	—	4,3
Zn	30	65,37	4,1	1,1	0,2
Ag	47	107,87	—	64,8	—
		107	10	—	45
Cd	48	112,4	5,3	2537	—
Gd	64	157,25	26	46 600	—
		155	—	61 000	—
W	74	183,85	~6	19,2	
		186	—	—	34
Ir	77	192,2	—	440	—
		191	—	—	260
Au	79	197	9	98,2	96,0

Степень ослабления первичного потока зависит от ядерных свойств элементов и содержания данных элементов в облучаемом объёме. Метод измерения, основанный на различии в ослаблении потока нейтронов разделяемыми компонентами полезных ископаемых, называют *нейтронно-абсорбционным* или *нейтрон-нейтронным*. Признаком разделения при этом методе является плотность потока нейтронов, прошедших сквозь подвергаемый облучению объём полезного ископаемого. Этот метод реализуем при большом различии в значениях сечений захвата нейтронов ядрами разделяемых элементов. Нейтронно-абсорбционным методом потенциально могут обогащаться руды, содержащие бор, литий, кадмий, олово, редкоземельные элементы и др.

К настоящему времени нейтронные методы сепарации широкого распространения не получили. Исключением является применение нейтронно-абсорбционной сепарации для обогащения борсодержащих руд.

Анализ табл. 6.4 показывает, что нейтронно-активационный метод измерения целесообразно применять для руд, содержащих калий, хром, марганец, железо, никель, медь, цинк, серебро, золото и редкие элементы; нейтронно-абсорбционный – для руд, содержащих бор, литий, кадмий и редкоземельные элементы; нейтронно-радиационный – для руд, содержащих калий, ванадий, хром, марганец, железо, никель, медь, серебро, золото и другие.

6.6. Взаимодействие γ -излучения с веществом на ядерном и атомном уровнях

В качестве источников γ -излучения могут использоваться радиоактивные изотопы, находящиеся в возбуждённом состоянии в результате α - и β -распадов. Переход ядра в основное состояние сопровождается испусканием γ -кванта. Поскольку у ядра может быть несколько возбуждённых уровней, изотоп может испускать несколько групп γ -излучения, каждая из которых характеризуется определённой энергией, т. е. является моноэнергетичной. Интенсивные и высокоэнергетичные потоки γ -излучения получают с использованием ускорителей заряженных частиц. При взаимодействии потоков с мишенью возникает тормозное γ -излучение с непрерывным спектром.

Основные процессы взаимодействия γ -излучения со средой, представляющие интерес для использования в информационных методах обогащения и аналитике минерального сырья, – это фотоэлектрическое поглощение на электронных оболочках или на ядрах атомов, рассеяние на электронах, образование пар электрон-позитрон, при больших энергиях квантов – захват с делением ядра (ядерный фотоэффект), резонансные поглощения.

Процессы поглощения сопровождаются испусканием характеристического рентгеновского излучения, оже-электронов (фотоэффект), испусканием электронов и позитронов (образование пар), нейтронов (фотоядерный эффект), γ -квантов (резонансное поглощение). Рассеяние сопровождается изменением направления движения и энергии γ -квантов, а также в последнем случае испусканием заряженных частиц.

На рис. 6.5 приведена схема взаимодействия γ -квантов с веществом.

Прошедшее через вещество γ -излучение ослабляется главным образом за счёт фотопоглощения на электронных оболочках (фотоэффект), иногда за счёт фотопоглощения на ядрах атомов с испусканием нейтронов (фотоядерный эффект), когерентного и некогерентного рассеяния на электронах (комptonовское рассеяние, преобладает над прочими видами рассеяния), образования пар электрон-позитрон как на ядре, так и на электронах.

6.6.1. Фотоэффект

Процесс, когда γ -квант взаимодействует с одним из электронов и при этом полностью поглощается атомом, а его энергия тратится на преодоление связи электрона и удаление его из атома, называется **фотоэлектрическим поглощением**, или **фотоэффектом**.

При этом электрон выбрасывается за пределы атома с энергией

$$E_e = E_\gamma - E_q,$$

где E_γ – энергия γ -кванта; E_q – энергия связи электрона (потенциал ионизации оболочки атома).

Если энергия γ -кванта больше энергии связи наиболее близкого к ядру электрона, то фотоэффект может происходить на любой электронной оболочке атома. Максимальную вероятность поглощения кванта имеют наиболее сильно связанные электроны. Фотоэлектрический коэффициент поглощения на K -оболочке в несколько раз больше подобного коэффициента на всех остальных.

Поскольку электроны, окружающие ядра атомов, располагаются на отдельных энергетических уровнях (K -, L -, M - и т. д.), при удалении одного из электронов атом оказывается в возбуждённом состоянии. Он возвращается в нормальное состояние практически мгновенно (10^{-16} – 10^{-7} с) путём целого каскада последовательных переходов электронов с одного уровня на другой с постепенным снижением энергии перехода. В результате таких переходов избыток энергии атома теряется за счёт испускания фотонов, образующих характеристическое рентгеновское излучение, называемое также рентгеновским флуоресцентным излучением.

Характеристические рентгеновские линии группируются в, так называемые, K -, L - и M -серии. Например, при переходах на K -оболочку возникает целая серия спектральных линий K_α , K_β , K_γ и т. д.

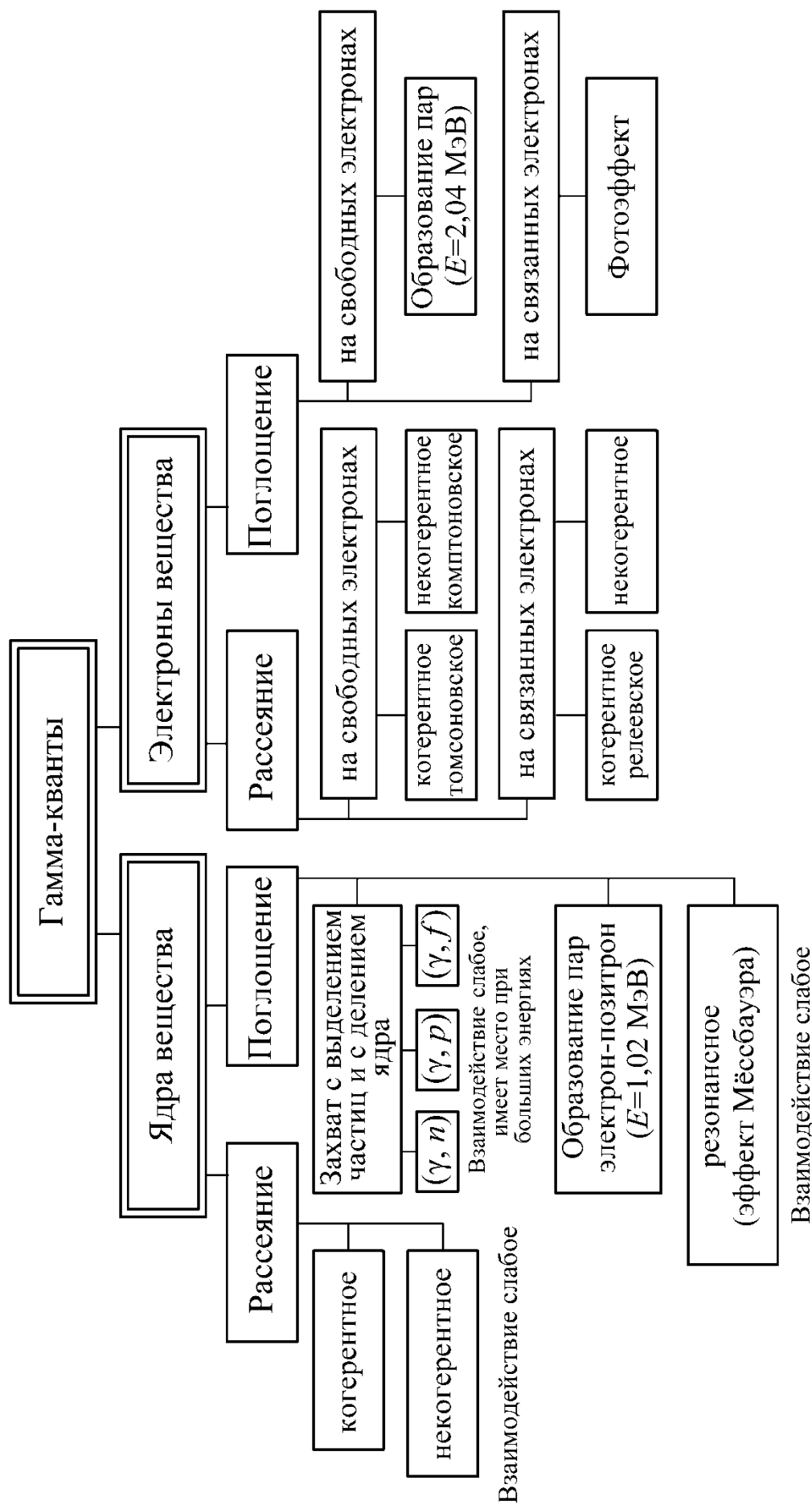


Рис. 6.5. Схема взаимодействия γ -квантов с веществом на ядерном и атомном уровнях

Серия линий L_α , L_β , L_γ образуется аналогично при переходах на оболочку L электронов с более удалённых от ядра оболочек L , M , N и т. д.

K -серия является самой высокочастотной серией рентгеновского спектра (энергия квантов максимальна), она же является и наиболее интенсивной (число испускаемых характеристических квантов максимально). Поэтому самыми «заметными» линиями рентгеновского спектра являются K_α и K_β , в отдельных случаях для тяжёлых элементов, когда энергии квантов первичного рентгеновского излучения недостаточно для выбивания электронов с K -оболочки, наиболее интенсивными становятся линии L_α , L_β .

В 1913 г. был открыт как эмпирическая закономерность закон Мозли.

Длины волн линии K_α разных элементов показали, что выполняется соотношение $(1/\lambda)^{1/2} = 289,5 (Z - 1,13)$, где λ – длина волны, см.

Он выражает масштабирование параметров внутренних электронных оболочек атомов при изменении заряда ядра.

Развитие методов квантовой механики позволило выяснить смысл эмпирических постоянных, входящих в уравнение. В соответствии с боровской моделью ядра длина волны λ характеристической спектральной линии (любой) связана с Z зависимостью

$$\frac{1}{\lambda} = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (6.1)$$

где R – постоянная Ридберга; σ – средняя постоянная экранирования заряда ядра, учитывающая влияние на отдельный электрон всех остальных электронов атома; n_1 , n_2 – главные квантовые числа начального и конечного состояний, переход между которыми определяет рассматриваемую спектральную линию.

Поскольку $1/\lambda = E/(\hbar c)$, где E – энергия характеристического кванта при характеристической длине волны; $\hbar$ – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме, уравнение (6.1) может быть записано в виде

$$E = R\hbar c(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Для каждой спектральной линии значения n_1 и n_2 различны. Для каждой из линий справедливо

$$\sqrt{E_x} \propto Z.$$

Таким образом, для каждого элемента энергия его характеристических квантов строго фиксирована, и интенсивность характеристического излучения определяется массовой концентрацией этого элемента в исследуемом веществе. Эти два обстоятельства являются основой **гамма-флуоресцентного** метода измерения.

В данном методе обычно используются *K*- и *L*-серии характеристического излучения элементов.

Для возбуждения атома на *q*-уровне энергия, передаваемая электрону, не может быть меньше энергии связи электрона на данном уровне. Минимальная энергия излучения, приводящая к возбуждению атома на *q*-уровне, очень близка к энергии *q*-края поглощения, но несколько меньше него. Энергия возбуждения атома на *K*-уровень почти на порядок больше той же энергии для возбуждения на *L*-уровень.

Если $E_\gamma > E_K$ (наиболее близкого к ядру электрона), то фотоэффект может происходить на любой электронной оболочке атома.

Испускаемое атомами характеристическое излучение имеет линейчатый спектр, состоящий из нескольких серий линий. Линия спектра *K*-серии возникает при появлении вакансии на *K*-уровне, линия *L*-серии при возникновении вакансии на *L*-уровне и т. п. Если атомы вещества испускают кванты *q*-серии, то в спектре всегда будут присутствовать линии более удалённых уровней (серий). Заполнение *K*-уровня электронами может происходить за счёт электронов *L*_{III}- и *L*_{II}-подуровней (соответственно K_{α_1} -, K_{α_2} -линии с энергией фотонов, отличающихся друг от друга) или за счёт электронов уровней *M*_{III} и *N*_{III} (линии K_{β_1} , K_{β_2}).

Если речь идёт об одном атоме, то возникает одна из линий *K*-серии. Поскольку любой из переходов случаен, предсказать появление конкретной линии невозможно. Вероятность появления линий различна, больше она для линий, расположенных к *K*-уровню ближе других. Соотношение интенсивностей линий *K*-серии следующее:

$$I_{\alpha_1} : I_{\alpha_2} : I_{\beta_1} : I_{\beta_2} = 100 : 50 : 25 : 5.$$

Подобные закономерности соотношения интенсивностей справедливы и для других уровней.

В редких случаях избыток энергии атома вызывает не излучение фотона, а излучение оже-электрона. Это происходит при заполнении вакансии электроном *L*_{III}-серии с *L*_I-уровня (безрадиационный переход).

Выход фотонов характеризуется коэффициентом выхода флуоресценции (отдачей флуоресценции) W_q , определяемым соотношением

числа атомов, испустивших фотоны характеристического излучения q -серии, к общему числу атомов, возбуждённых на q -уровень:

$$W_q = \frac{n_{qx}}{n_q}.$$

Коэффициент выхода флуоресценции зависит от порядкового номера элемента и возбуждаемого уровня, для каждого элемента он является постоянной величиной. С увеличением порядкового номера элемента вероятность радиационных переходов возрастает.

Приближённое значение коэффициента выхода флуоресценции для K -уровня можно найти по формуле

$$W_K = \frac{Z^4}{Z^4 + 34,2^4}.$$

Для L -уровня коэффициент выхода флуоресценции в несколько раз меньше, чем для K -уровня (эта закономерность действует и при переходе к каждому последующему уровню), поэтому при γ -флуоресцентном методе обогащения целесообразно использовать информацию о характеристическом излучении, возникающем при возбуждении K - или L -краёв поглощения химических элементов. В табл. 6.5 приведены значения энергии K -краёв поглощения для химических элементов. При этом под краем поглощения понимается граничное значение энергии излучения, способного удалить электрон с K -уровня.

Энергии скачков специфические для каждого элемента. Энергия каждого i -го скачка соответствует i -му краю поглощения.

В табл. 6.5 представлены энергетические характеристики фотонов химических элементов.

При рассмотрении данных таблицы следует учитывать, что фотоны с энергией 1–3 кэВ имеют низкую проникающую способность даже в воздухе, что делает невозможным их использование при информационном обогащении. Нижняя граница применения гамма-флуоресцентного метода находится в области элементов с $Z=20$, то есть метод применим начиная с кальция.

Гамма-флуоресцентный метод обогащения может использоваться для многих типов руд цветных, чёрных и редких металлов, например марганцевых, медно-никелевых, медно-цинковых, молибденовых, оловянных, свинцово-цинковых, цезиевых, вольфрамовых и др.

**Энергия фотонов основных линий и краёв поглощения
некоторых химических элементов**

Элемент	Атомный номер	Энергия фотонов, кэВ				
		K_{α}	K_{β}	L_{α}	L_{β}	К-край поглощения
Магний	12	1,254	1,297	—	—	1,303
Алюминий	13	1,487	1,553	—	—	1,559
Кремний	14	1,740	1,832	—	—	1,838
Сера	16	2,308	2,464	—	—	2,470
Кальций	20	3,691	4,012	0,341	0,344	4,038
Скандий	21	4,090	4,460	0,395	0,399	4,496
Титан	22	4,510	4,931	0,452	0,458	4,964
Ванадий	23	4,952	5,427	0,510	0,519	5,463
Хром	24	5,414	5,946	0,571	0,581	5,988
Марганец	25	5,899	6,490	0,636	0,647	6,537
Железо	26	6,403	7,057	0,704	0,717	7,111
Кобальт	27	6,930	7,649	0,775	0,790	7,709
Никель	28	7,477	8,264	0,849	0,866	8,331
Медь	29	8,047	8,904	0,928	0,948	8,898
Цинк	30	8,638	9,571	1,009	1,032	9,660
Мышьяк	33	10,543	11,725	1,282	1,317	11,863
Рубидий	37	14,960	13,394	1,694	1,752	15,201
Ниобий	41	16,614	18,621	2,166	2,257	18,987
Молибден	42	17,478	19,607	2,293	2,395	20,002
Серебро	47	22,162	24,942	2,984	3,151	25,517
Кадмий	48	23,172	26,093	3,133	3,316	26,712
Олово	50	25,270	28,483	3,444	3,662	29,190
Сурьма	51	26,357	29,723	3,605	3,843	30,486
Барий	56	32,191	36,376	4,467	4,828	37,410
Вольфрам	74	59,310	67,233	8,396	9,670	69,508
Платина	78	66,820	75,736	9,441	11,069	78,379
Золото	79	68,794	77,968	9,711	11,439	80,713
Ртуть	80	70,821	80,258	9,987	11,823	83,106
Свинец	82	74,957	84,922	10,549	12,611	88,001
Висмут	83	77,097	87,335	10,836	13,021	90,521

Флуоресцентные методы весьма селективны, они являются прямыми, так как интенсивность излучения в характеристической рентгеновской энергетической области элемента прямо характеризует его содержание в контролируемом объёме (слое) вещества. В спектре может быть выделено несколько спектральных областей, каждая из которых

соответствует определённому элементу, что позволяет одновременно определять содержания нескольких элементов. Эти преимущества делают флуоресцентные методы наиболее информативными и перспективными для применения.

Практическая реализация флуоресцентных методов обогащения, помимо выделения спектральной области определённого элемента, требует в ряде случаев учёта ряда мешающих факторов (размеры кусков, расстояния излучатель-кусок, кусок-детектор, влияние аналитических линий прочих элементов, влияние рассеянного излучения и т. д.). Учёт может производиться различными приёмами.

Чаще применяют в качестве разделительного признака функцию интенсивностей потоков квантов в нескольких спектральных областях, в том числе в области рассеянного излучения. Формирование разделительного признака (построение алгоритма разделения) осуществляется чаще с использованием способов спектральной разности, спектрального отношения или их комбинаций.

6.6.2. Ядерный фотоэффект

Под *ядерным фотоэффектом* понимают ядерные реакции типа (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) . Минимальная энергия γ -кванта, при которой возможен ядерный фотоэффект, определяет энергетический порог данной реакции для данного вещества.

При ядерном фотоэффекте γ -квант, взаимодействуя с ядром атома, образует, как правило, промежуточное ядро, которое распадается с испусканием нейтронов, протонов, α -частиц. Вследствие наличия кулоновского барьера выход реакций (в данном случае – выход образовавшихся частиц за пределы облучаемого вещества) (γ, p) и (γ, α) значительно меньше выхода реакции (γ, n) . Поэтому для измерений используют именно эту реакцию.

Энергия нейтронов, образующихся при ядерном фотоэффекте, зависит от энергии γ -квантов и с возрастанием последней увеличивается.

Необходимым условием для осуществления фотоядерной реакции является превышение энергии γ -кванта над энергией отделения нейтрона. Полное число образующихся фотонейтронов зависит от активности источника i , сечения фотоядерной реакции $\sigma_{\text{ф.я}}$, расстояния от источника r , полного коэффициента ослабления μ и содержания химического элемента α , вступающего в реакцию. В случае точечного источника монохроматических γ -квантов число нейтронов b ,

образующихся в секунду в единице объёма на расстоянии r , можно вычислить:

$$b = i\alpha \frac{n_0 \sigma_{\text{ф.я}}}{4\pi r^2} e^{-\mu r},$$

где n_0 – число ядер в единице объёма химически чистого расщепляемого вещества, $n_0 = (\rho N_A / A)$, здесь N_A – число Авогадро; A – атомная масса вещества; ρ – плотность вещества.

Каждый химический элемент характеризуется определённым порогом (γ, n) реакции и её эффективным сечением $\sigma_{\text{ф.я}}$. Пороги фотоядерной реакции для некоторых изотопов приведены в табл. 6.6, а максимальные сечения фотоядерных реакций – в табл. 6.7.

Таблица 6.6

Пороги фотоядерных реакций (γ, n) некоторых изотопов

Изотоп	Порог реакции, МэВ	Изотоп	Порог реакции, МэВ
${}^6\text{Li}$	5,35	${}^{97}\text{Mo}$	7,10
${}^9\text{Be}$	1,67	${}^{113}\text{Cd}$	6,50
${}^{25}\text{Mg}$	7,25	${}^{118}\text{Sn}$	9,10
${}^{57}\text{Fe}$	7,75	${}^{184}\text{W}$	6,25–7,15
${}^{65}\text{Cu}$	10,00	${}^{208}\text{Pb}$	7,40
${}^{67}\text{Zn}$	7,00	${}^{209}\text{Bi}$	7,40

Метод измерения плотности потока нейтронов, образующихся при ядерном фотоэффекте (или фотоядерной реакции), называется **фотонейтронным**.

Таблица 6.7

Максимальные сечения фотоядерной реакции для некоторых химических элементов

Элемент	Максимальное сечение, барн	Элемент	Максимальное сечение, барн
Бериллий	0,002	Кобальт	0,125
Углерод	0,013	Медь	0,100
Магний	0,012	Цинк	0,102
Марганец	0,081	Молибден	0,240
Железо	0,074	Свинец	0,850
		Висмут	0,940

Фотонейтронный метод может быть практически применён для бериллиевых руд, поскольку для прочих элементов очень велик порог фотоядерной реакции, что требует применения уже не импульсных

изотопных источников излучения (что возможно в случае с бериллием), а ускорителей электронов.

6.6.3. Резонансное поглощение

Резонансное ядерное поглощение сводится к такому взаимодействию фотона с ядром атома, при котором фотон, поглощаясь ядром, переводит его из основного в возбуждённое состояние, соответствующее одному из его энергетических уровней. Переход ядра из возбуждённого обратно в основное состояние сопровождается испусканием фотона той же энергии. Это возможно только в том случае, если энергия, расходуемая квантом на возбуждение ядра, в точности равняется энергии квантового перехода, т. е. разности энергии ядра в возбуждённом и основном состояниях.

Ослабление излучения веществом за счёт резонансного поглощения зависит от доли испускаемых и поглощаемых фотонов без отдачи (эффект Мёссбауэра), от содержания и вида соединения изотопа, входящего в состав резонансной пары. Вероятность резонансного ядерного поглощения невелика, и его доля в общем процессе ослабления излучения веществом незначительна, поэтому это явление не представляет интереса для идентификации элементов при информационном обогащении, но может быть использовано в аналитических целях.

6.6.4. Рассеяние излучения

При взаимодействии γ -квантов, имеющих энергию 0,01–3 МэВ, с веществом может происходить их рассеяние, то есть отклонение от их первоначального направления. Различают рассеяние двух видов: некогерентное, при котором квант изменяет свою энергию, и когерентное, при котором энергия кванта не изменяется.

Некогерентное рассеяние (так называемое комптоновское рассеяние) имеет место, когда энергия фотона велика в сравнении с энергией связи электрона, а также при взаимодействии со свободными или слабосвязанными электронами. Взаимодействие кванта с электроном можно рассматривать в этом случае как столкновение двух независимых частиц.

Когерентное рассеяние играет существенную роль в общем процессе рассеяния в области малых энергий фотонов (20–50 кэВ). При энергиях выше 100 кэВ некогерентное рассеяние становится преобладающим.

Большая часть когерентного рассеяния мало отклоняется от направления первичного излучения (до 15°), то есть в конечном итоге оно является частью проходящего через вещество излучения и не ослабляет первичный поток излучения в значительной степени.

Исходя из законов сохранения энергии и импульса взаимодействующих частиц, можно установить связь между углом некогерентного рассеяния θ и энергиями первичного E и рассеянного E_p квантов (E в МэВ):

$$E_p = \frac{E}{1 + 2E(1 - \cos\theta)}.$$

Минимальной величины энергия рассеянного излучения достигает при угле рассеяния $\theta=180^\circ$:

$$E_p = \frac{E}{1 + 4E}.$$

При малых углах рассеяния энергия рассеянного излучения близка к энергии первичного излучения.

Когерентное рассеяние имеет место при небольших по сравнению с энергией связи электрона энергиях квантов. В этом случае при столкновении γ -кванта с электроном перераспределение энергии происходит не между квантом и электроном, а между квантом и атомом. Поскольку масса атома сравнительно велика, энергия фотона при таком рассеянии практически не меняется.

Для оценки количественных характеристик рассеяния используют массовые коэффициенты рассеяния, учитывающие количество атомов в единице массы вещества. Для некогерентного рассеяния с увеличением энергии излучения массовый коэффициент рассеяния уменьшается, при этом он мало зависит от состава вещества, поскольку количество электронов в единице массы вещества незначительно отличается для различных элементов.

При когерентном рассеянии массовый коэффициент сильно зависит от энергии излучения и атомного номера. В табл. 6.8 приведены значения массовых коэффициентов когерентного σ^k и некогерентного σ^h рассеяния γ -излучения для различных элементов. По данным таблицы видно, что интенсивность рассеянного излучения различными рудами может значительно отличаться, особенно в области малых энергий. Метод измерения рассеянного γ -излучения называется *гамма-отражательным*.

Массовые коэффициенты рассеяния γ -излучения, см²/г

Элемент	$E_\gamma=0,02$ МэВ			$E_\gamma=0,05$ МэВ		
	σ^k	σ^h	$\sigma^k + \sigma^h$	σ^k	σ^h	$\sigma^k + \sigma^h$
Водород	0,0067	0,362	0,3687	0,0011	0,334	0,3351
Бериллий	0,0355	0,149	0,1845	0,007	0,147	0,1540
Углерод	0,064	0,160	0,2240	0,0137	0,163	0,1767
Кислород	0,099	0,154	0,2530	0,0217	0,161	0,1827
Кальций	0,382	0,132	0,5140	0,090	0,149	0,2390
Железо	0,517	0,116	0,6330	0,124	0,136	0,2600
Цирконий	0,924	0,097	1,0210	0,235	0,121	0,3560
Кадмий	1,18	0,0906	1,2706	0,303	0,114	0,4170
Барий	1,37	0,843	1,4543	0,361	0,106	0,4670
Вольфрам	2,17	0,073	2,2430	0,554	0,0994	0,6534
Свинец	2,34	0,0695	2,4095	0,642	0,0955	0,7375

Гамма-отражательный метод может быть применён для обогащения руд, содержащих тяжёлые элементы, например железных, свинцово-цинковых, ртутных, хромовых.

6.6.5. Образование пар

Процесс ослабления γ -излучения веществом с образованием пар сводится к образованию пары электрон – позитрон, при этом фотон перестаёт существовать.

Так как энергия покоя электрона или позитрона равна 0,51 МэВ, то пара может быть образована при энергии фотона больше 1,02 МэВ.

Массовый коэффициент поглощения γ -излучения за счёт образования пар и зависит от энергии излучения и порядкового номера элемента:

$$\kappa = \frac{Z^2}{A} f(E),$$

где $f(E)$ пропорциональна величине $(E-1,02)$ МэВ.

Этот процесс играет существенную роль лишь при очень больших энергиях фотонов и для элементов с высокими порядковыми номерами.

6.6.6. Ослабление и поглощение гамма-излучения

При прохождении сквозь слой вещества толщиной x направленного пучка монохроматического γ -излучения интенсивность прошедшего излучения I может быть рассчитана по формуле

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения; μ – линейный коэффициент ослабления, численно равный суммарной доле рассеянных и поглощённых фотонов на единице толщины слоя вещества, см^{-1} .

Интенсивность излучения – это энергия, переносимая квантами или частицами за единицу времени через единичную площадь в направлении, перпендикулярном этой поверхности, $\text{МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$:

$$I = \frac{nE}{St}.$$

Здесь n – число квантов; E – энергия одного кванта; S – площадь поверхности; t – время.

Массовый коэффициент ослабления μ_m ($\text{см}^2/\text{г}$) соответствует вероятности взаимодействия фотона при прохождении слоя вещества с единичной поверхностной плотностью m ($\text{см}^2/\text{г}$).

Величины μ и μ_m связаны соотношением

$$\mu = \mu_m \rho,$$

где ρ – плотность вещества, $\text{г}/\text{см}^3$.

Тогда

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} = I_0 e^{-\mu_m m},$$

где $m = \rho x$ – поверхностная плотность поглотителя, $\text{г}/\text{см}^2$.

В отличие от линейного коэффициента ослабления μ массовый коэффициент ослабления μ_m не зависит от физического и химического состояния вещества.

Абсолютные значения этих коэффициентов зависят от энергии излучения и атомного номера поглощающего элемента. Величина I , кроме того, дополнительно зависит от плотности вещества, размеров куска и элементного состава вещества, то есть является функцией многих переменных.

Массовый коэффициент ослабления сложного вещества можно найти по формуле

$$\mu_m = \sum_i (\mu_m)_i C_i,$$

где i – индекс i -го химического элемента; C_i – концентрация i -го элемента.

Если поток лучей немонахроматичен и состоит из нескольких линий (j), то суммарную интенсивность прошедшего через слой вещества излучения можно вычислить следующим образом:

$$I = \sum_j I_{0j} e^{-\mu_j x} = \sum_j I_{0j} e^{-\mu_{mj} \rho x}.$$

Полный массовый коэффициент ослабления γ -излучения веществом представляет сумму коэффициентов ослабления за счёт фотоэлектрического поглощения τ_m , когерентного σ^k и некогерентного σ^H рассеяния и образования пар κ :

$$\mu_m = \tau_m + \sigma^k + \sigma^H + \kappa.$$

Здесь $\sigma^H = \sigma_p^H + \sigma_{\Pi}^H$, где σ_{Π}^H – комптоновский коэффициент поглощения; σ_p^H – комптоновский коэффициент (эффективное сечение) некогерентного рассеяния.

Массовый коэффициент некогерентного рассеяния слабо зависит от элементного состава вещества, так как $\sigma^H \approx f(E) \cdot Z/A$, где $f(E)$ зависит от энергии γ -излучения.

Каждый из рассмотренных выше эффектов взаимодействия γ -излучения с ядрами и атомами вносит свой вклад в ослабление прошедшего через вещество излучения.

Полный массовый коэффициент истинного поглощения γ -излучения можно рассмотреть как сумму массовых коэффициентов ослабления за счёт основных процессов: фотоэлектрического поглощения τ_m (массовый коэффициент фотоэлектрического поглощения), некогерентного (комптоновского) поглощения σ_{Π}^H и образования пар κ :

$$\mu_{m\Pi} = \tau_m + \sigma_{\Pi}^H + \kappa.$$

В истинном поглощении по сравнению с ослаблением не учитывается когерентное рассеяние, так как фотоны при взаимодействии с электронами не поглощаются, а лишь несколько меняют свою первоначальную траекторию.

Энергия γ -квантов при прохождении через вещество ослабевает при некогерентном рассеянии. Часть этого излучения истинно рассеивается (учитывается σ_p^H), а часть энергии поглощается (рассеивается на электронах), что учитывается комптоновским коэффициентом поглощения σ_{Π}^H . Коэффициент σ_{Π}^H существенно меньше коэффициента σ_p^H .

Для малых энергий основным процессом ослабления является процесс фотоэлектрического поглощения. С увеличением энергии излучения полный массовый коэффициент ослабления уменьшается.

Показательным для объяснения соотношений между коэффициентами ослабления и поглощения излучения является пример свинца, для которого в области энергий фотонов до 200 кэВ массовые коэффициенты ослабления и поглощения практически одинаковы, а основной вклад в общее поглощение и ослабление в этом энергетическом диапазоне для свинца вносит фотоэлектрическое поглощение.

Процесс ослабления излучения при прохождении через вещество зависит от:

- энергии фотонов или длины волны излучения;
- атомного номера вещества (или эквивалентного ему).

Для ряда элементов в табл. 6.9 приведены значения массовых коэффициентов поглощения для различных энергий рентгеновского и γ -излучения.

Таблица 6.9

Массовые коэффициенты поглощения рентгеновского и γ -излучения для некоторых химических элементов $\mu_{\text{мн}}$, см²/г

Порядковый номер	Химический элемент	Энергия фотонов E , кэВ				
		1,24	5	12,4	49,6	124
1	H	13,7	0,62	0,45	0,36	0,29
6	C	1100	14,0	1,40	0,186	0,142
7	N	1800	30,5	2,20	0,195	0,144
8	O	2600	45,5	3,20	0,206	0,145
11	Na	5300	132	8,80	0,287	0,150
12	Mg	340	185	11,7	0,330	0,152
13	Al	520	235	15,2	0,380	0,155
14	Si	740	290	18,2	0,442	0,159
17	Cl	1700	430	29,7	0,667	0,176
19	K	2350	540	40	0,86	0,191
20	Ca	2800	625	48	0,98	0,200
24	Cr	4100	136	80,5	1,60	0,241
25	Mn	4350	148	90	1,79	0,253
26	Fe	4700	162	100	2,02	0,265
28	Ni	5600	193	121	2,51	0,303
29	Cu	6000	212	130	2,79	0,328
30	Zn	6400	227	141	3,07	0,35
42	Mo	3650	544	54,8	7,50	0,79
50	Sn	5900	940	84	11,3	1,20
82	Pb	4100	900	75	9,2	3,41
92	U	4820	755	101	13,1	3,91

Массовый коэффициент поглощения рентгеновского и γ -излучения для всех элементов уменьшается с возрастанием энергии фотонов.

При анализе табл. 6.9 можно констатировать, что для химических элементов вмещающих пород (порядковый номер до 15) массовый коэффициент поглощения существенно меньше, чем у химических элементов, входящих в состав полезных минералов руд чёрных, цветных и редких металлов ($Z > 24$).

Метод измерения, основанный на различии в ослаблении интенсивности γ -излучения объёмами полезного ископаемого и породы, называется *гамма-абсорбционным*. Потенциальным разделительным признаком в данном случае является интенсивность излучения, прошедшего через объём объекта измерения.

Сравнение характера поглощения γ -излучения минералами и горными породами можно проводить по эффективному атомному номеру (учитываются все элементы, входящие в минерал или породу), определяемому по формуле:

$$Z_{\text{эфф}} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n \alpha Z_i^3},$$

где Z_i – атомный номер i -го элемента, всего их n ; α – массовая доля i -го элемента. В табл. 6.10 приведены значения эффективного атомного номера некоторых минералов и горных пород.

Таблица 6.10

**Эффективный атомный номер и плотность
некоторых минералов и горных пород**

Минерал, руда	Формула	Эффективный атомный номер	Плотность, кг/м ³
Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	11,1	2620
Англезит	PbSO ₄	72,2	6300
Анортит	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	13,4	2750
Антимонит	Sb ₂ S ₃	47,2	4600
Бадделеит	ZrO ₂	36,2	4700
Барит	BaSO ₄	46,6	4450
Борнит	Cu ₅ FeS ₄	26,3	4600
Висмутин	Bi ₂ S ₃	77,5	6600
Вода	H ₂ O	7,7	1000
Вольфрамит	(Mn, Fe)WO ₄	62,9	7100
Галенит	PbS	78,2	7500

Окончание табл. 6.10

Минерал, руда	Формула	Эффективный атомный номер	Плотность, кг/м ³
Гаусманит	Mn ₃ O ₄	22,5	4800
Гематит	Fe ₂ O ₃	23,7	5100
Гранит	–	13,6	2700
Диабаз	–	15,9	3100
Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	12,9	2700
Известняк	CaCO ₃	15,1	2750
Ильменит	FeTiO ₃	23,1	4700
Кальцит	CaCO ₃	15,1	2700
Кварц	SiO ₂	11,65	2650
Ковеллин	CuS	23,5	4600
Киноварь	HgS	76,2	8100
Кубанит	CuFe ₂ S ₃	24,2	4100
Лопарит	(Na, Ce, Ca)(Nb, Ti)O ₃	26,9	4800
Магнетит	Fe ₃ O ₄	23,4	5100
Миллерит	NiS	25,0	5400
Монацит	(Ce, La, ...)PO ₄	48,5	5200
Песчаник	–	12,5	2300
Пентландит	(Fe, Ni) ₉ S ₈	24,3	4700
Перовскит	CaTiO ₃	18,6	4000
Пирит	FeS ₂	21,7	5000
Пирротин	Fe _n S _{n+1}	23,0	4700
Пирохлор	(Na, Ca,...) ₂ (Nb, Ti,...)O ₆ (Fe, OH)	24,5	4200
Пиролозит	MnO ₂	21,6	4900
Поллуцит	CsAlSi ₂ O ₆	41,6	2900
Рутил	TiO ₂	18,7	4200
Сидерит	FeCO ₃	20,6	3900
Стронцианит	SrCO ₃	32,0	3700
Сфалерит	ZnS	26,7	4000
Танталит	(Fe, Mn)Ta ₂ O ₆	65,1	8200
Титаномагнетит	Fe ₃ O ₄ ·TiO ₂	23,1	5100
Уголь	C	12,0	1300
Халькозин	Cu ₂ S	27,3	5700
Халькопирит	CuFeS ₂	24,7	4200
Хромшпинелиды	–	18,0	4400
Целестин	SrSO ₄	30,0	4000
Церуссит	PbCO ₃	75,3	6500
Циркон	ZrSiO ₄	31,9	4700
Шеелит	CaWO ₄	63,8	6000

Условие для эффективного использования гамма-абсорбционного метода – тесная корреляционная связь между эффективным атомным номером и содержанием определяемого компонента. Связь становится неочевидной при близких атомных номерах элементов. Примеры эквивалентных концентраций сопутствующих минералов приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

**Эквивалентные концентрации
минералов рудных месторождений**

Руда	Основные рудные минералы	Сопутствующие минералы	Эквивалентная концентрация, отн. ед.
Баритовая	Барит	–	1,0
		Пирит	2,1
		Галенит	0,6
Вольфрамовая	Вольфрамит	–	1,0
	Шеелит	–	0,93
		Кальцит	4,2
Железная	Магнетит	–	1,0
		Рутил	1,2
		Пиролюзит	1,1
		Кальцит	0,6
Марганцевая	Пиролюзит	–	1,0
		Магнетит	0,9
		Гематит	0,9
Ртутная	Киноварь	–	1,0
		Барит	1,7
		Антимонит	1,6
Свинцово-цинковая	Галенит	–	1,0
		Пирит	3,6
		Сфалерит	2,9
		Барит	1,7
	Сфалерит	–	1,0
		Пирит	1,2
		Галенит	0,3
		Барит	0,6
Стронциевая	Стронцианит	–	1,0
Сурьмяная	Антимонит	–	1,0
		Барит	1,0
		Киноварь	0,6
Хромовая	Хромшпинелиды	–	1,0
		Магнетит	1,3
		Гематит	1,3

При близости их значений к единице достоверно содержания того или другого минерала не определить.

Метод определения содержания элемента по интенсивности прошедшего излучения называют **гамма-абсорбционным элементным**, а, если с использованием интенсивности прошедшего излучения определяют плотность вещества, метод называют **гамма-абсорбционным плотностным**. Определение плотности целесообразно проводить при большой энергии гамма-квантов.

В принципе при тесной корреляции между плотностью и содержанием элемента плотностной метод становится для данного случая и элементным.

Для устранения влияния колебаний плотности и размеров кусков применяют и «двухлучевые» методы с использованием γ -излучения двух энергий. Метод не селективен для элементов с близкими атомными номерами.

Метод потенциально применим для бокситов, фосфоритов, угля, простых моноэлементных руд, таких как железные, сурьмяные, свинцовые, хромовые. В них эффективный атомный номер коррелирован с содержанием единственного элемента, имеющего промышленное значение. Для комплексных руд метод не эффективен.

Для обогащения γ -методы в настоящее время используются редко, поскольку те же закономерности и эффекты часто реализуются более технологичными и безопасными рентгеновскими методами.

6.7. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом на атомном уровне

Рентгеновское и γ -излучение представляют собой электромагнитные колебания, различающиеся природой своего происхождения. Энергетические (частотные) диапазоны их перекрываются в широкой области (12,4-250 кэВ). При одинаковой энергии фотонов оба типа излучений эквивалентны.

Процессы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом предопределяются энергией фотонов и составом вещества, поэтому независимо от происхождения фотонов, закономерности взаимодействия обоих излучений равных энергий с веществом одинаковы, и излучения могут рассматриваться и как рентгеновское, и как γ -излучение.

Первичное рентгеновское излучение чаще получают с использованием рентгеновских трубок при торможении заряженных частиц (электронов) материалом анода (тормозное рентгеновское излучение).

В результате ядерной реакции, например, распада радиоактивного изотопа или аннигиляции частиц испускается γ -излучение.

Спектр первичного рентгеновского излучения является сплошным (диапазон спектра – от нуля до максимума, определяемого напряжением на аноде), поскольку энергии электронов, взаимодействующих с атомами вещества анода, меняются в широких пределах. Он может иметь выраженный пик, соответствующий энергии первичного характеристического рентгеновского излучения атомов вещества анода (*K*- или *L*-серии). Спектр γ -излучения линейчатый (одна или несколько энергетических линий от радиоактивного изотопа) или сплошной (тормозное γ -излучение при поглощении ускоренных заряженных частиц).

Вторичное рентгеновское флуоресцентное излучение возникает в результате возбуждения атомов под действием фотонов мягкого γ - или рентгеновского излучения и в ряде случаев потока α - и β -частиц с последующими переходами электронов между разными энергетическими уровнями электронной оболочки.

Для определения концентраций элементов в рудах и горных породах при сортировке используют, как правило, вторичное характеристическое рентгеновское флуоресцентное излучение, возникающее при взаимодействии первичного рентгеновского излучения (включающего и тормозное, и характеристическое от материала анода) с веществом. Первичное характеристическое излучение иногда используют лишь при аналитическом лабораторном контроле состава вещества.

Рентгеновское излучение может быть также использовано для рентгеноотражательного и рентгеноабсорбционного методов обогащения, по сути не отличающихся от соответствующих γ -аналогов.

Особенности, связанные со сплошным спектром первичного рентгеновского излучения, а также с большей мощностью излучения рентгеновской трубки в сравнении с излучением изотопа, определяют методические отличия применения всех рентгеновских методов в сравнении с их γ -аналогами.

Поскольку изотопы (источник γ -излучения) – это радиоактивные вещества, которые представляют постоянную радиоактивную опасность, и их мощность существенно меньше, чем у рентгеновских трубок, в настоящее время в качестве источников излучения для общего

диапазона энергий γ - и рентгеновских квантов применяют рентгеновские трубки.

Основные методы измерения содержания элементов с использованием облучения кусков руды первичным рентгеновским излучением – рентгенофлуоресцентный, рентгеноабсорбционный, рентгеноотражательный (по рассеянному излучению) – во многом повторяют соответствующие γ -аналоги. Самым универсальным и внедряемым в последние годы является рентгенофлуоресцентный метод обогащения.

К наиболее разработанным и нашедшим промышленное использование в России и ряде стран мира следует также отнести и рентгенолюминесцентный метод обогащения.

6.8. Взаимодействие излучений с минералами и горными породами

Радиометрические, нейтронные, гамма-, рентгеновские и другие рассмотренные ранее методы обогащения «нацелены» на определение содержаний элементов в объектах разделения. Часть из них, например рентгенофлуоресцентный, гамма-флуоресцентный, фотонейтронный для бериллия, могут быть отнесены к прямым методам определения содержаний элементов, другие косвенно характеризуют содержания элементов.

Эти методы основаны на получении информации на ядерном или атомном уровнях организации материи.

Прочие информационные методы с меньшими энергиями квантов или большей длиной волны ориентированы на идентификацию или определение содержаний минералов или горных пород, то есть содержаний простых или сложных веществ. Это следующий из выделенных нами ранее уровней организации материи.

А. С. Марфунин в своей монографии пишет: «Свойства минералов зависят не только от рода составляющих их атомов и от расположения их в структуре: атомная структура не определяет непосредственно свойства. Оптические, магнитные, электрические, химические, механические свойства – это электронные свойства, определяемые состоянием связи. Сведения об электронном строении позволяют интерпретировать свойства и описывающие их параметры».

6.8.1. Взаимодействие ультрафиолетового излучения с веществом

Область ультрафиолетового излучения условно делят на *ближнюю* (200-400 нм) и *вакуумную* или далёкую (10-200 нм). Специфическое название область «вакуумная» обусловлено тем, что излучение в этой области легко поглощается воздухом, и измерение его характеристик необходимо производить с помощью вакуумных спектральных приборов.

Спектр ультрафиолетового излучения может быть линейчатым (спектры изолированных атомов, ионов или лёгких молекул), полосчатым (УФ-излучение, обусловленное электронно-колебательно-вращательными переходами молекул, характерно для спектров тяжёлых молекул – молекулярные спектры) и непрерывным (УФ-излучение, возникающее при торможении и рекомбинации электронов – тормозное излучение).

Оптические свойства веществ в диапазоне УФ-излучения значительно отличаются от свойств в видимой части. Прозрачность веществ значительно ниже, и при $\lambda < 105$ нм прозрачных материалов почти нет. Воздух непрозрачен практически при $\lambda \leq 185$ нм из-за поглощения кислородом.

Поэтому для обогащения с измерением характеристик взаимодействия излучения с веществом теоретически пригодно излучение с $\lambda > 185$, то есть ближнего УФ-диапазона. Ультрафиолетовое излучение может вызывать люминесценцию веществ.

6.8.2. Люминесценция

Люминесценция – это излучение, представляющее собой избыток над тепловым излучением тела и продолжающееся в течение времени, значительно превышающего период световых колебаний.

Излучение совокупности атомов (молекул), находящихся в состоянии, близком к равновесному, может быть тепловым и люминесцентным. Тело может люминесцировать при любой температуре, в то время как тепловое излучение в выделенной области спектра заметно только при температуре в несколько сотен или тысяч градусов. Поэтому люминесцентное излучение избыточно по отношению к тепловому.

Большая, чем период световых колебаний, продолжительность люминесцентного излучения объясняется наличием промежуточных относительно длительных процессов и отличает люминесценцию от

различных видов рассеяния, отражения, параметрического преобразования света, тормозного излучения и т. п.

В настоящее время понятие люминесценции относится к излучению в видимом, в ближних ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах (180-1200 нм).

Элементарный акт люминесценции состоит из поглощения энергии, серий переходов атома или молекулы из основного состояния в различные возбуждённые состояния и возврата в основное состояние путём нескольких переходов, при этом часть переходов являются безызлучательными, а возврат в основное состояние – переход излучательный. Разные механизмы отличаются числом и последовательностью переходов, различают резонансную, спонтанную, вынужденную и рекомбинационную люминесценции.

Люминогеном называют химический элемент, на основе которого в кристаллической решётке возникает центр люминесценции. Центр люминесценции, или центр свечения, – это точечный дефект структуры твёрдого тела. Дефектами могут быть атомы (часто примесные), ионы переходных металлов, комплексные катионы, молекулы, радикалы, точечные дефекты кристаллической структуры, центры переноса заряда (пространственно разделённые неравновесные носители заряда: дырки – в валентной зоне, электроны – в зоне проводимости) и т. д. Дефект решётки характеризуется либо внедрением в неё постороннего атома или иона и т. д., либо образованием вакансии – дырки. Переход возбуждённого центра люминесценции в нормальное или менее возбуждённое состояние сопровождается испусканием света. Это и есть люминесцентное свечение вещества.

По длительности свечения различают флуоресценцию (быстрозатухающую люминесценцию) и фосфоресценцию (длительную люминесценцию). При люминесценции чаще всего часть поглощённой энергии теряется на тепло (возбуждаются колебания атомов), поэтому квант света люминесценции имеет меньшую энергию (и большую длину волны), чем квант возбуждающего излучения.

Способность к люминесценции имеют различные вещества. Вещество способно люминесцировать, если его спектры имеют дискретный характер, то есть его уровни должны быть разделены зонами так называемых запрещённых энергий. **Запрещённая энергия** – область значений энергии, которыми не могут обладать электроны в идеальном (бездефектном) кристалле. Поэтому обладающие непрерывными аналитическими спектрами металлы и соединения с почти металлической свя-

зью не дают люминесценции, в них энергия возбуждения непрерывно переходит в тепло. Кроме того, необходимым условием для люминесценции является превышение вероятности излучательных переходов из возбуждённого состояния в основное над безызлучательными. Если это условие не выполняется, происходит тушение люминесценции. Вероятность безызлучательных переходов увеличивается с повышением температуры (температурное тушение), концентрации люминесцирующих молекул (концентрационное тушение) или примесей (примесное тушение). Тушение связано с передачей энергии возбуждения молекулам тушителя, с потерей энергии при взаимодействии люминесцирующих молекул между собой или с тепловыми колебаниями атомов в кристаллической решётке вещества. Таким образом, способность вещества к люминесценции определяется природой вещества, его фазовым состоянием и зависит от внешних условий.

Основные физические характеристики люминесценции: способ возбуждения (спектр возбуждения); спектр вторичного излучения; состояние поляризации излучения; выход излучения, то есть отношение излучённой энергии к поглощённой. Поляризация люминесценции связана с ориентацией и мультипольностью излучающих и поглощающих атомных систем.

Для идентификации минералов в сложных минеральных системах могут использоваться также кинетические характеристики возбуждения и затухания люминесценции.

Цвет, интенсивность свечения для одного и того же минерала могут меняться и зависят от особенностей его состава и структуры, а также от способа возбуждения (табл. 6.12).

Уникальным свойством люминесценции является преобразование различных видов электромагнитного и корпускулярного излучения, а также электрической, тепловой, механической энергии в видимый (близкий к видимому) свет.

Люминесценцию можно классифицировать по типу возбуждения, механизму преобразования энергии, временным характеристикам свечения. Возбуждение может вызываться излучениями, потоками ускоренных частиц, электрическими и тепловыми полями, механическими деформациями, химическими реакциями и др.

В обогащении для люминесценции минералов и горных пород используют фотолюминесценцию (возбудитель – УФ излучение или мощное лазерное излучение УФ или видимого диапазона), рентгенолюминесценцию (возбудитель – рентгеновские лучи).

Распределение некоторых минералов по цвету люминесценции

Цвет люминесценции (длина волны, нм)	Первичное излучение	
	ультрафиолетовое (200-400 нм)	рентгеновское
Инфракрасный (>760)	Пирохлор	—
Красный (600-700)	Аксинит, александрит, арагонит, брусит, гексагидрит, кальцит, кианит, корунд, сподумен, родохрозит, рубин, содалит, шпинель	Кианит, родохрозит
Оранжевый (580-600)	Гакманит, гипс, доломит, кальцит, сфалерит	Кальцит, пектолит, сподумен
Жёлтый (560-580)	Амблигонит, англезит, везувиан, волластонит, гакманит, гидроцинкит, гипс, каолин, касситерит, молибдошеелит, олигоклаз, повеллит, скаполит, смитсонит, церуссит, циркон	Апатит, волластонит, датолит, касситерит, молибдошеелит, пектолит, повеллит, циркон, эшинит
Зелёный (500-560)	Англезит, барит, вавеллит, гялит, доломит, кальцит, ортоклаз, повеллит, топаз, флюорит, янтарь, минералы урана	Альбит, амазонит, апатит, берилл, лабрадор, лепидолит, монацит, норденшельдит, олигоклаз, повеллит, смитсонит, тремолит, флюорит, церуссит, целестин
Голубой (470-500)	Алмаз, анортоклаз, брусит, галит, гидромагнетит, кальцит, опал, скаполит, флюорит, шеелит	Шеелит, алмаз
Синий (420-470)	Алунит, плагиоклаз, датолит	Микроклин, нефелин, плагиоклаз
Фиолетовый (380-420)	Апатит, барит, витерит, каламин, кальцит, лабрадор, микроклин, флюорит	Датолит
Ультрафиолетовый (<380)	—	Галит, данбурит, кварц, топаз, фенакит

Важнейшим примером использования люминесцентной сепарации является обогащение алмазов. Эта технология с использованием рент-

генолюминесцентной сепарации широко применяется в России, США, ЮАР и других алмазодобывающих странах. В качестве признака разделения при извлечении якутских алмазов используют комбинацию интенсивности свечения в синей части спектра и времён разгорания и затухания люминесценции.

Для других полезных ископаемых известны примеры успешных промышленных (шеелитовые, флюоритовые руды, комплексные редкометалльные пегматитовые руды) и лабораторных испытаний. Обобщение опыта исследований в этой области приводит к выводу, что люминесцентная сепарация особенно перспективна для обогащения неметаллических полезных ископаемых.

Признаки для люминесцентного разделения минералов могут учитывать амплитудные, спектральные, кинетические характеристики как по разгоранию, так и по затуханию люминесценции, а также число импульсов возбуждающего люминесценцию излучения. Амплитудно-интегральный признак соответствует интегральной интенсивности люминесценции во всём спектральном диапазоне. Это самый простой признак. Он применим при наличии устойчивой люминесценции у полезных минералов при одновременном полном отсутствии таковой у сопутствующих минералов или наоборот. По такому признаку можно идентифицировать некоторые минералы: апатит, содалит, канкринит. Интенсивность проявления люминесценции у разных минералов меняется с увеличением энергии облучения по-разному. Так, благодаря тому, что при росте энергии возбуждения до 10-25 кэВ интенсивность свечения апатита существенно возрастает, содалита резко снижается, канкринита полностью исчезает, при этих энергиях становится возможным эффективное выделение апатита из смеси, представленной апатитом, нефелином, содалитом, титаномагнетитом, сфеном, канкринитом.

На практике такие случаи встречаются редко. Чаще и у сопутствующих минералов наблюдается люминесценция. Если максимумы спектров люминесценции разделяемых минералов различаются, то, выделяя нужную спектральную область интересующего минерала и измеряя в ней интенсивность люминесценции, можно оценивать содержание данного минерала. Такой метод использует амплитудно-спектральный разделительный признак.

На рис. 6.6 приведены спектры рентгенолюминесценции ряда минералов. Довольно яркое свечение всех минералов не позволяет использовать для их разделения амплитудно-интегральный признак. Раз-

деление всех этих минералов не вызывает проблем при использовании амплитудно-спектрального разделительного признака.

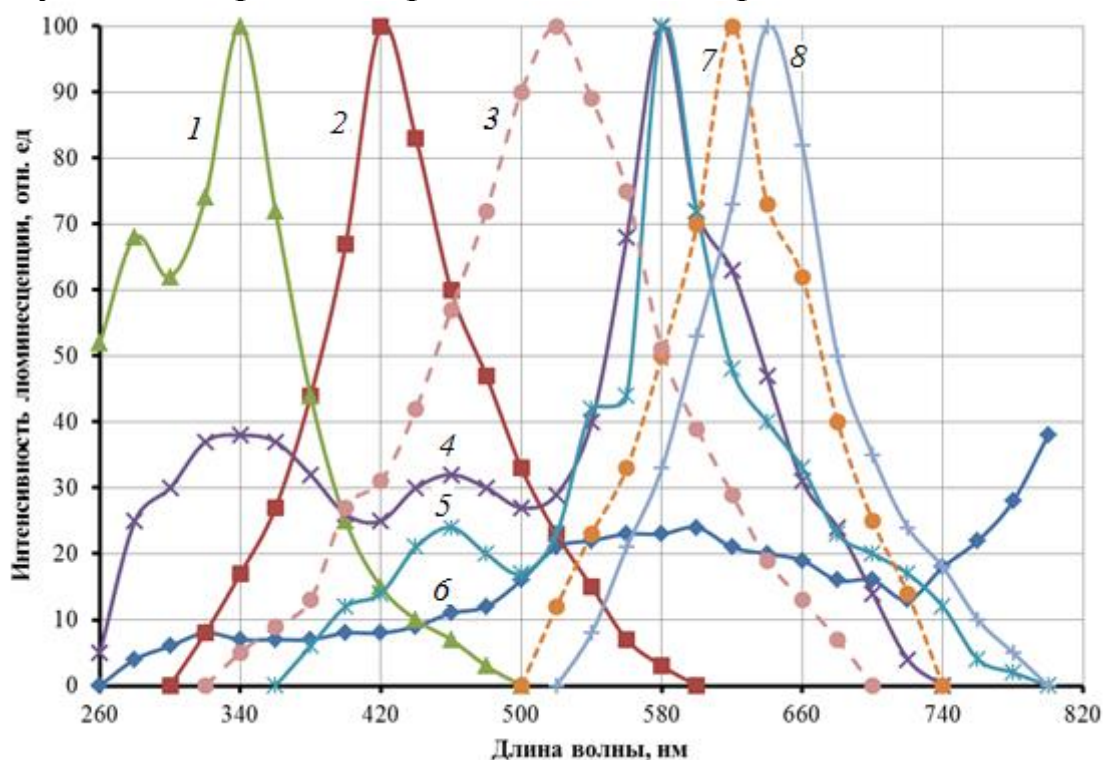


Рис. 6.6. Спектры люминесценции минералов:

1 — флюорит; 2 — шеелит; 3 — плагиоклаз; 4 — апатит;
5 — циркон; 6 — актинолит; 7 — кальцит; 8 — волластонит

Амплитудно-временные признаки учитывают изменение интенсивности люминесценции во времени — скорости либо продолжительности разгорания и затухания люминесценции, причём признаки могут быть реализованы как в интегральном, так и в спектральном вариантах. Амплитудно-временной признак по разгоранию люминесценции применим для отделения полезных минералов ряда «шеелит — повеллит» от сопутствующих кальцита и волластонита. Амплитудно-временной признак по затуханию люминесценции широко применяется для выделения алмазов из руды, содержащей люминесцирующие сопутствующие минералы, такие как кальцит, циркон, микроклин, плагиоклаз и др. Спектрально-амплитудно-временной признак даёт дополнительные возможности для отделения минералов, меняющих спектральный состав люминесценции в ходе затухания свечения. Это возможно, если сопутствующие минералы имеют отличия в спектральном составе свечения разгорания и затухания люминесценции и в кинетике.

В абсолютном большинстве случаев измерение характеристик люминесценции производят при однократном импульсе излучения, возбуждающего люминесценцию. Введение дополнительного возбужда-

ющего импульса (стимуляции) позволяет у некоторых минералов вызвать вторую вспышку люминесценции, что для них может явиться более надёжным идентификационным признаком.

6.8.3. Взаимодействие видимого излучения с веществом

Видимая область спектра имеет диапазон 380-760 нм. Спектр видимого излучения может быть непрерывным, линейчатым, полосчатым в зависимости от природы источника и применяемых оптических элементов систем.

С точки зрения электронной теории взаимодействие света с веществом заключается в воздействии электромагнитного поля световой волны на внешние электроны вещества, в результате чего возбуждаются колебания связанных зарядов (ионов, электронов) в направлении, совпадающем с колебаниями электрического вектора падающей световой волны. В процессе вынужденных колебаний заряженных частиц в молекулах периодически с вынуждающей частотой изменяются их дипольные электрические моменты. При этом излучаются вторичные электромагнитные волны с длиной, равной длине волны падающего света. Первичные и вторичные волны когерентны между собой и могут взаимно интерферировать. При взаимодействии может возникнуть излучение, длина волны которого может отличаться от длины волны первичного излучения. Это явление называется **комбинационным рассеянием света**.

При падении световой электромагнитной волны на границу раздела двух различных сред в результате интерференции первичной и вторичной волн образуется отраженная волна, распространяющаяся в той же среде, что и первичная, и преломлённая волна, распространяющаяся во второй среде.

Зависимость коэффициента отражения вещества от длины волны $R(\lambda)$ называется **спектром отражения**. Видом спектра объясняется окрашенность вещества в отражённом свете.

Пространственное распределение отраженного излучения и его интенсивность определяются соотношением между λ и размером неровностей, их ориентаций и распределением на поверхности, условиями освещения и свойствами отражающей среды.

Если свет падает на плоскую поверхность (размеры неровностей поверхности существенно меньше λ) оптически однородного вещества, то угол падения первичной волны равен углу отражения вторичной волны. Такое отражение называется зеркальным. Зеркальная компо-

нента, возникающая в результате отражения без прохождения внутрь, описывается формулой Френеля (при нормальном падении света):

$$R_{\text{зерк}} = \frac{(n - 1)^2 + n^2 K^2}{(n + 1)^2 + n^2 K^2},$$

где K – показатель (коэффициент) поглощения вещества; n – показатель преломления при переходе из воздуха в вещество.

Для прозрачных кристаллов зеркальная компонента:

$$R_{\text{зерк. прозр}} = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}.$$

Диффузная составляющая отражённого света возникает как при взаимодействии световой волны с поверхностью вещества, так и при внутреннем отражении света от вещества.

Если поверхность вещества шероховата (размеры неровностей сопоставимы с длиной волны λ либо больше), то отражённый свет, вследствие пространственной ориентации микрограней, будет распространяться по всем направлениям.

Диффузная компонента отражённого света возникает и в результате поглощения света веществом и появления его на освещённой поверхности после многократного рассеяния на оптических неоднородностях в объёме вещества, вследствие дифракции (внутреннее отражение).

Чаще всего в реальных условиях имеет место смешанное отражение света.

Отражение света сопровождается его частичной поляризацией, в результате которой часть отражённого света приобретает определённую ориентацию векторов электрической и магнитной напряжённости.

Преломление света меняет направление распространения световой волны при переходе из одной среды в другую по закону:

$$\sin \varphi_2 = \sin \varphi_1 n_{21},$$

где φ_1 и φ_2 – углы соответственно падающей и преломлённой волн; n_{21} – относительный показатель преломления среды распространения преломлённого света (относительно среды распространения падающего света).

Преломление света наиболее значимо для прозрачных и полупрозрачных тел. Зависимость коэффициента пропускания вещества от длины волны τ (λ) называется спектром пропускания вещества.

Прохождение света через вещество также сопровождается поглощением света, то есть потерей энергии волны.

Свет, отражённый от границы раздела сред, и свет, возвращающийся из второй среды в первую (выходящий из куска), распространяются в различных направлениях.

Если условно разделить возможные направления рассеяния первичного светового потока на рассеянный назад (отражённый) $\Phi_{\text{н}}$, рассеянный вперёд $\Phi_{\text{п}}$, рассеянный в стороны $\Phi_{\text{с}}$ и учесть, что часть первичного светового потока Φ_0 поглощается телом, можно ввести коэффициенты:

отражения	$R = \frac{\Phi_{\text{н}}}{\Phi_0};$
пропускания	$\tau = \frac{\Phi_{\text{п}}}{\Phi_0};$
рассеяния	$\sigma = \frac{\Phi_{\text{н}} + \Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{с}}}{\Phi_0};$
поглощения	$K = \frac{\Phi_0 - (\Phi_{\text{н}} + \Phi_{\text{п}} + \Phi_{\text{с}})}{\Phi_0} = 1 - \sigma.$

При попадании электромагнитной волны на проводящую поверхность возникает ток, электромагнитное поле которого стремится компенсировать это воздействие, что приводит практически к полному отражению света. В зависимости от резонансной частоты колебательных контуров в молекулярной структуре вещества при отражении излучается волна определённой частоты. Поэтому непрозрачные вещества приобретают окраску.

Коэффициент отражения света R – величина, равная отношению потока энергии отражённой волны к потоку энергии волны, падающей на поверхность раздела двух сред.

Поглощение света – это уменьшение его интенсивности при прохождении через материальную среду за счёт его взаимодействия со средой.

Световая энергия при поглощении переходит в различные формы внутренней энергии среды (например, в тепловую), она также может быть переизлучена средой (полностью или частично) на частотах, отличных от частоты поглощённого излучения (комбинационное рассеяние).

Закон Бугера описывает зависимость интенсивности прошедшего через слой вещества света от интенсивности исходного светового потока:

$$I = I_0 e^{-K_{\text{л}} x},$$

где K_{λ} – линейный коэффициент поглощения, который имеет различные значения при разных λ , м^{-1} ; x – толщина слоя вещества, м.

Со световой волной «резонируют» (следовательно, поглощают некоторую энергию) атомы, молекулы и связи между ними, имеющие близкие частоты собственных колебаний.

Зависимость K_{λ} от λ называют **спектром поглощения вещества**. Характер собственных колебаний сказывается на характере связи $K_{\lambda}(\lambda)$.

Этой зависимостью объясняется окрашенность поглощающих (неполная прозрачность или непрозрачность) тел.

Линейный коэффициент поглощения для диэлектриков невелик ($10^{-3} \div 10^{-1} \text{ м}^{-1}$), однако у них наблюдается селективное поглощение света внутри вещества в определённых интервалах длин волн.

В диэлектриках нет свободных электронов и поглощение света обусловлено явлением резонанса при вынужденных колебаниях электронов в атомах и атомах в молекулах диэлектрика.

Линейный коэффициент поглощения для металлов имеет значительно большие значения ($\approx 10^5 \div 10^7 \text{ м}^{-1}$), и потому металлы практически непрозрачны для света. В металлах из-за наличия свободных электронов, движущихся под действием электрического поля световой волны, возникают быстропеременные токи, сопровождающиеся выделением джоулевой теплоты. Поэтому энергия световой волны быстро уменьшается, превращаясь во внутреннюю энергию металла. Чем выше проводимость проводника, тем сильнее в нём поглощение света, то есть K_{λ} сильно зависит от электропроводности. Та часть излучения, которая не поглощена телом, рассеивается им.

К рассеиваемому излучению относятся, во-первых, всё отражённое (рассеянное) на границе сред при попадании света в вещество, во-вторых, рассеянное внутри оптически неоднородной среды и вышедшее из неё при обратном переходе из второй среды в первую, в-третьих, прошедшее сквозь слой вещества без внутреннего рассеяния.

В оптически неоднородной среде происходит дифракция света. Дифрагируя однократно или на множестве неоднородностей среды, свет по всем направлениям распределяется довольно равномерно. Такое рассеяние света в объёме среды происходит на неоднородностях данной среды и проявляется при обратном выходе излучения на границе раздела фаз (например, кусок-воздух).

Для малых размеров неоднородностей ($l < 0,1\lambda$) справедлив закон Релея:

$$I_{\text{расс}} \sim \frac{I_0}{\lambda^4}$$

В однородных беспримесных средах при флуктуациях плотности, анизотропии и концентрациях атомов и молекул возможно молекулярное рассеяние.

Проявление дифракции в оптически неоднородных средах и такое рассеяние света характерно для полупрозрачных сред (кусков).

Интенсивность рассеянного излучения у полупрозрачных тел за счёт избирательного поглощения может зависеть от λ (селективный характер). Результатом этого является изменение сложного по спектральному составу света при рассеянии по сравнению с первичным, что при освещении белым светом визуально воспринимается как окраска тел.

Комбинационное рассеяние света (КРС) – это такое рассеяние света при взаимодействии с веществом, при котором изменяется частота рассеиваемого света (уменьшается – красный, он же стоксов, сдвиг, увеличивается – фиолетовый, он же антистоксов, сдвиг).

Интенсивность антистоксовых линий намного меньше, чем стоксовых. Существенное изменение частоты рассеиваемого света происходит, если источник испускает линейчатый спектр (например, лазер) и интенсивный пучок света концентрируется на изучаемом объекте. При комбинационном рассеянии света (КРС) первичный световой поток преобразуется во вторичный, что сопровождается переходом рассеивающих молекул на другие колебательные и вращательные уровни. Частоты новых линий в спектре рассеяния – это комбинации частот первичного потока света и частот колебательных и вращательных переходов рассеивающих молекул.

Вероятность комбинационного рассеяния света растёт с увеличением интенсивности возбуждающего света.

Комбинационное рассеяние проявляется при освещении алмазов лучом лазера (например, с источником излучения He-Ne лазером при $\lambda=633$ нм имеет место комбинационное рассеяние на длине волны $\lambda=691,1$ нм, что соответствует первому порядку линий КРС).

В кристаллах алмаза линия рассеяния уширяется, а интенсивность линии снижается, если алмазы имеют дефекты кристаллической решётки или внутренние напряжения. Интенсивность полосы рассеяния у наиболее качественных алмазов отличается от прочих в десятки раз.

Мощное лазерное излучение видимого диапазона может вызывать люминесценцию алмазов и отдельных сопутствующих минералов.

Спектр люминесцентного излучения начинается от линии возбуждающего света и продолжается далеко в инфракрасную область.

Для непрозрачных объектов важна степень детализации контролируемой поверхности (размер пятна сканирования).

Степень детализации может быть различной: вся поверхность куска (интегральный «осмотр»), часть поверхности куска от её половины при одностороннем «осмотре» до площадей в десятые доли миллиметра при сканировании поверхности «пятном». Степень детализации при измерении важна для кусков-сростков с разным характером минерализации. Детальное сканирование позволяет определять поверхностное содержание минерала.

Комбинации перечисленных характеристик являются основой разновидностей фотометрического метода измерения и фотометрической сепарации, отличающихся оптическими свойствами минералов.

Пространственное распределение интенсивности рассеянного излучения при освещении тела направленным потоком параллельных лучей характеризуется индикатрисой рассеяния.

На рис. 6.7 приведены плоские сечения вариантов индикатрис рассеяния для кусков прозрачного (*а*), полупрозрачного (*б*), непрозрачного с зеркально (*в*) и диффузионно (*г*) отражающими поверхностями при взаимодействии с первичным излучением.

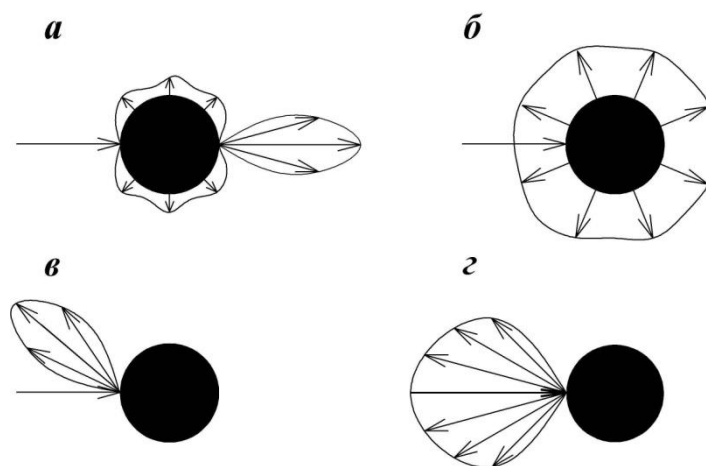


Рис. 6.7. Плоские сечения вариантов индикатрис рассеяния для различных кусков:

- а* – прозрачный кусок; *б* – полупрозрачный кусок;
в – непрозрачный кусок с зеркальным отражением;
г – непрозрачный кусок с диффузным отражением

Наиболее полной информацией об объекте сортировки является совокупность пространственных характеристик рассеяния, спектральных характеристик и интенсивности рассеянного излучения (рассеянного назад: отражённого зеркально (*в*), отражённого диффузно (*г*); рас-

сеянного вперёд, т. е. прошедшего (*a*), рассеянного во все стороны (*b*) на рис. 6.7).

В различных способах фотометрической сепарации могут быть применены такие характеристики взаимодействия света с кусками, как интенсивность и спектральные характеристики диффузного отражения (для разделения объектов непрозрачных с шероховатыми поверхностями), интенсивность и спектральные характеристики зеркального отражения (для разделения непрозрачных объектов с гладкими плоскими и шероховатыми поверхностями), интенсивность и спектральные характеристики пропускания (для разделения объектов прозрачных или полупрозрачных от непрозрачных), интенсивность и спектральные характеристики интегрального рассеяния (разделение объектов, отличающихся спектрами поглощения), характеристики пространственного распределения интенсивности рассеяния света (разделение объектов с различными сочетаниями блеска, прозрачности, полупрозрачности).

Характер спектра отражения минерала определяет яркость минерала по интенсивности белого цвета (среднее значение коэффициента отражения в спектре) и цвет или цветовой оттенок (дисперсия коэффициента отражения).

Насыщенность цвета определяется различием коэффициентов отражения на разных длинах волн. Большие различия характеризуют цвет, небольшие – цветовой оттенок (кремовый, желтоватый, голубоватый, сиреневый и т. д.), при очень малых различиях минералы имеют белый или серый цвета различной яркости.

В общем случае весь спектр является наиболее полной информативной характеристикой, в практических реализациях функцию $R(\lambda)$ заменяют на несколько значений коэффициентов отражения на разных длинах волн (2, 3 и более). Их далее преобразуют в единый аналитический параметр $\varphi(R_{\lambda_1}, R_{\lambda_2} \dots)$. Если выделяют два спектральных участка, то метод измерения называют бихроматическим.

В простейших случаях таким параметром может быть спектральное отношение $R_{\lambda_1}/R_{\lambda_2}$ и т. п. Насыщенность количественно можно оценить относительной разностью коэффициентов отражения минерала R на двух длинах волн – λ_1 (440 нм) и λ_2 (700 нм).

На рис. 6.8 приведены спектры отражения некоторых рудных минералов, которые получены на аншлифах со специальными приставками к микроскопу. Среди них имеются примеры спектров отражения «бесцветных» и цветных минералов.

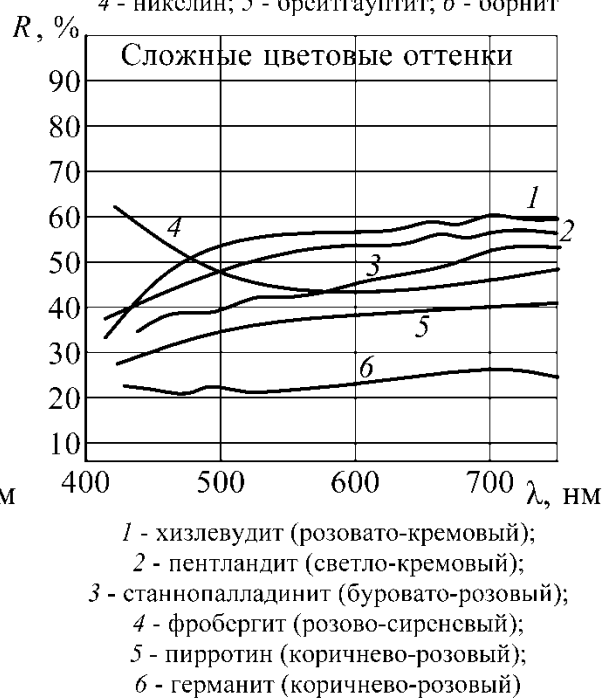
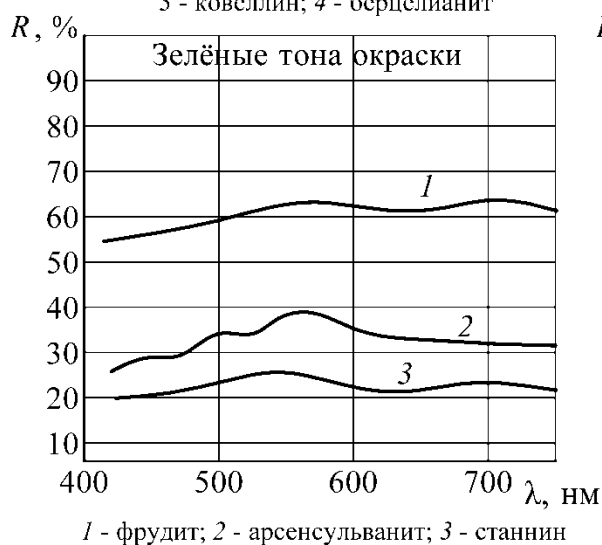
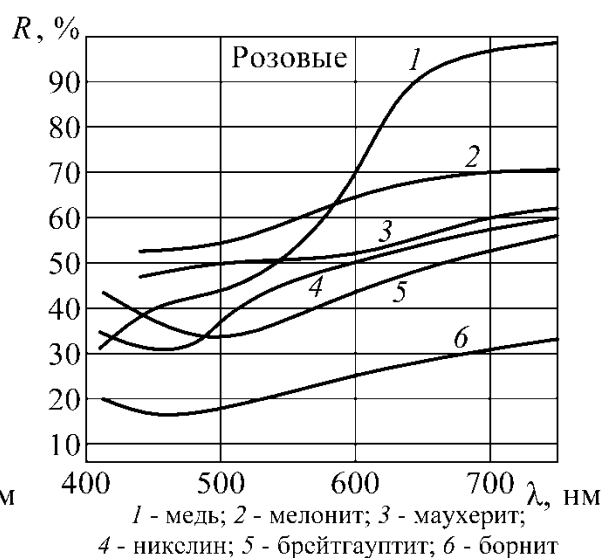
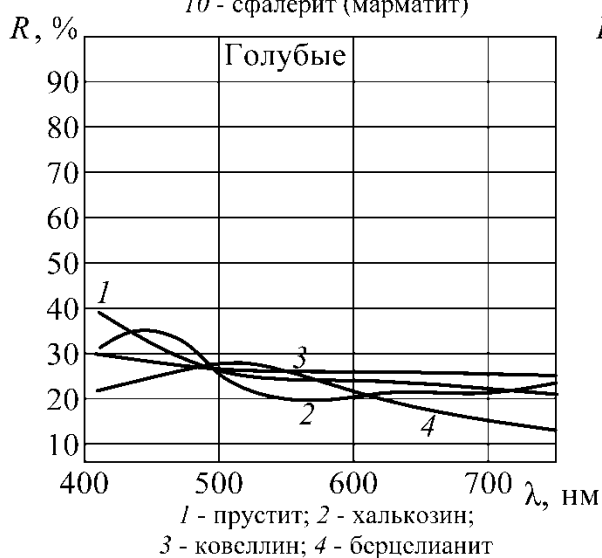
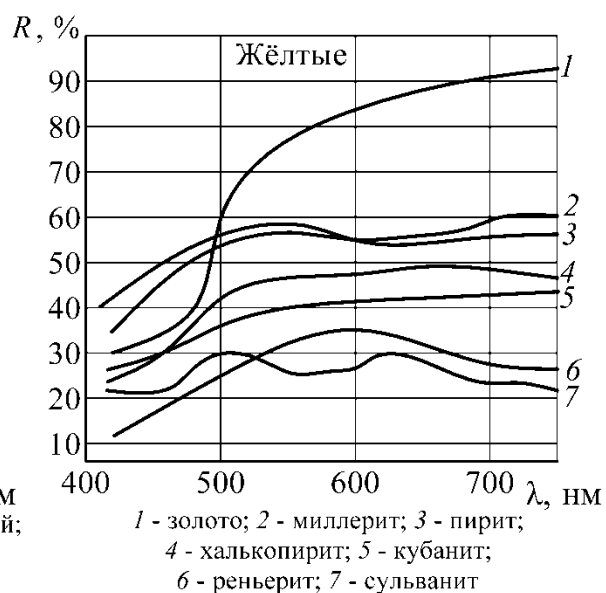
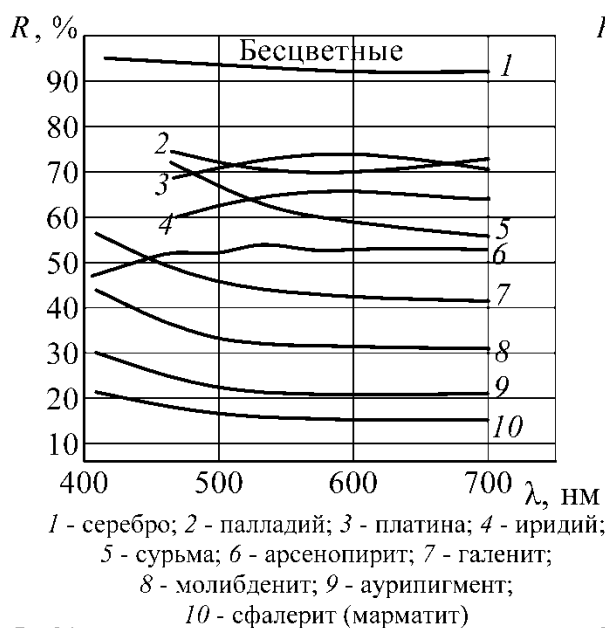


Рис. 6.8. Спектры отражения рудных минералов

Следует заметить, что такие спектры отражения (см. рис. 6.8) получены под микроскопом с весьма малых по площади отполированных поверхностей. Крупные или большие скопления включений в массе кусков руды таких минералов встречаются крайне редко. Поэтому напрямую оценивать содержания многих рудных минералов в кусках представляется малоперспективным.

Оптические методы идентификации минералов могут быть применены при больших содержаниях минералов в руде и в отдельных кусках или при тесной корреляционной связи между содержаниями рудного минерала (при его малых концентрациях в руде и кусках и мелкой вкрапленности) и преобладающего пороодообразующего минерала, например, золото в кварце.

Цвет рудных минералов в штуфе отличается от цвета в аншлифе, а спектр отражения штуфа имеет существенно меньшую дисперсию. Как правило, он существенно более бледный и может характеризоваться металлоидными оттенками серого и чёрного цветов. Во многих случаях истинный цвет минерала маскируется окисными плёнками, побежалостями, вызывающими интерференционные эффекты.

На поверхности минералов, вследствие механической обработки при добыче, дроблении, грохочении, почти всегда образуются шероховатости, потёртости. Шероховатая поверхность минерала имеет спектр отражения, близкий к спектру отражения черты минерала или этого минерала в тонкодисперсном состоянии. Такой спектр имеет меньший, чем в штуфе, общий уровень коэффициента отражения и меньшую его дисперсию.

Нерудные минералы и горные породы имеют не меньшее разнообразие цветов. В отдельных случаях им свойственна прозрачность в кусках. И главное, во многих случаях раскрытие разделяемых фаз у нерудных полезных ископаемых происходит в значительной крупности, сопоставимой с крупностью сортируемой горной массы или, по крайней мере, превосходящей размер «пятна» сканирования кусков.

По указанным причинам измеряемые в сепараторах оптические характеристики нерудных минералов и горных пород более информативны, чем рудных. Поэтому фотометрическая сепарация более перспективна для нерудных полезных ископаемых.

Механические повреждения поверхности кусков при добыче и подготовке сырья к разделению меняют спектры отражения, как у нерудных минералов, так и у рудных. Как правило, уровень отражения у

светлых минералов повышается, у тёмных минералов снижается, а дисперсия снижается в обоих случаях.

Возможными причинами изменчивости оптических свойств являются наличие микропримесей некоторых элементов даже при их малых концентрациях, непостоянство химического состава, разнообразные дефекты кристаллической решётки.

В отдельных случаях примеси в естественном состоянии не проявляются, но от них необходимо избавиться при обогащении.

Спектр отражения минерала значительно меняет свои параметры и при изменении влажности поверхности кусков.

Использование спектральных характеристик отражения и поглощения для фотометрической сепарации возможно в различных вариантах с измерением интенсивности отражённого, рассеянного или прошедшего через кусок света в нескольких узких спектральных областях. Два из них рассмотрены ранее.

Для выявления спектральных различий в разных измерительных системах применяют полихроматические источники света и узкополосные светофильтры, светодиоды, лазеры. Интенсивность света по каждому спектральному каналу (координата) может кодироваться, и для каждого канала могут быть установлены свои границы, входящие в общий алгоритм принятия решения о минералогической принадлежности куска.

Окраска минерала определяется степенью его дисперсности. У минералов с металлическим блеском мелкодисперсные частицы обычно темнее, чем минерал в куске. У минералов с полуметаллическим блеском мелкодисперсные частицы или аналогичны минералу в куске, или светлее его. Преобладают коричневые оттенки. Минералы с алмазным блеском в порошке имеют красный, оранжевый, жёлтый цвета разной яркости и тона. У бесцветных минералов с алмазным блеском порошок имеет белый цвет.

У порошков минералов со стеклянным блеском белый или светло-серый цвета с различными оттенками, а куски этих минералов с «потёртой» шероховатой поверхностью (множеством случайным образом ориентированных микрограней) имеют более светлые тона, чем у тех же кусков с гладкой поверхностью.

В настоящее время для оценки цвета используют лишённые субъективизма системы измерения, использующие принципы смешения цветов. Количественные измерения цвета основываются на оптических спектрах отражения и поглощения.

Любой цвет можно воспроизвести путём смешения различных комбинаций других цветов, причём таких комбинаций существует бесконечное множество. В соответствии с законом Грассмана, минимально необходимое для воспроизведения путём смешения количество цветов равно трём:

$$\Pi_0 = a\Pi_1 + b\Pi_2 + c\Pi_3,$$

где Π_1, Π_2, Π_3 – независимые цвета-векторы, то есть такие, что смешением двух цветов нельзя получить третий (обычно это красный, зелёный, синий); a, b, c – числовые весовые коэффициенты.

Π_1, Π_2, Π_3 – это основные цвета. В 1931 г. Международной комиссией по освещению была утверждена трёхцветная система RGB. В ней единичные цвета – это монохроматические излучения с длинами волн: R (красный) – 700 нм, G (зелёный) – 546,1 нм и B (синий) – 435,8 нм. Любой цвет в этой системе есть комбинация цветов R, G и B, которые взяты в количествах r, g, b : $F = rR + gG + bB$. Эти координаты полностью характеризуют цвет излучения по яркости и по цветности.

В другой международной колориметрической системе XYZ (МКО, 1931 г.) основные цвета R, G, B заменены нереальными цветами X, Y, Z. Цветовой вектор в прямоугольной системе координат XYZ (соответствуют основным цветам) задается в виде

$$\Pi_0 = x'X + y'Y + z'Z,$$

где x', y', z' – коэффициенты, указывающие на относительное содержание основных цветов.

Цветность задаётся с помощью координат цветности x, y, z , где

$$x = \frac{x'}{x' + y' + z'}; \quad y = \frac{y'}{x' + y' + z'}; \quad z = \frac{z'}{x' + y' + z'}.$$

Так как $x + y + z = 1$, для описания цветности достаточно использовать две координаты, обычно x и y .

На рис. 6.9 приведена цветовая диаграмма в координатах x и y . Системы RGB и XYZ позволяют переходить от одной к другой и обратно.

Описанные системы и прочие аналогичные им могут быть использованы для кодирования и распознавания цвета объектов разделения в информационных методах обогащения.

Чаще других фотометрических методов используется фотоотражательный, в отдельных специфических случаях могут быть применены фотоабсорбционный и зеркальный фотометрический методы, к перспективным для специальных задач относят основанный на использовании комбинационного рассеяния света КРС-метод.

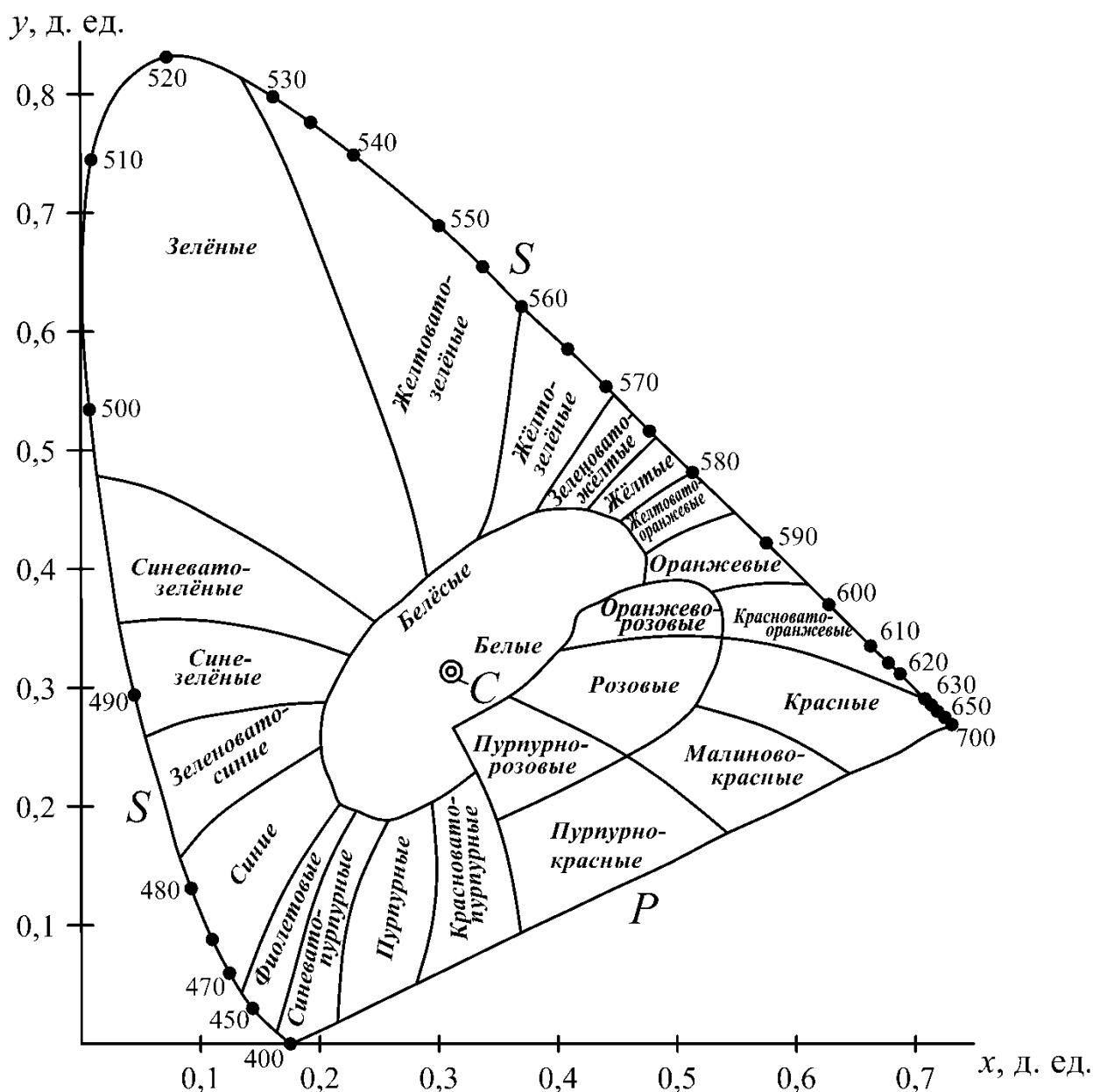


Рис. 6.9. Расположение областей цветности различных цветов на цветовой диаграмме

В современных фотометрических сепараторах используются системы координатного (чаще трёхкоординатного, например RGB) кодирования спектров отражения и поглощения сортируемых кусков минералов и горных пород с заданием пороговых значений по всем координатам.

6.8.4. Использование излучения инфракрасного диапазона

Инфракрасную область спектра обычно условно разделяют на три: ближнюю (<2,5 мкм), среднюю (2,5-50 мкм), далёкую (50-2000 мкм). Спектр инфракрасного излучения может быть линейчатым, полосчатым и непрерывным в зависимости от природы источника.

Линейчатые спектры испускают возбуждённые атомы и молекулы. Возбуждённые молекулы испускают также полосчатые спектры, обусловленные их колебаниями и вращениями. Колебательные и вращательные спектры характерны для средней области ИК-излучения, чисто вращательные – далёкой области ИК-излучения.

Спектральные характеристики поглощения, отражения, рассеяния минералов в инфракрасной области спектра в принципе могут использоваться так же, как и аналогичные характеристики видимого или ближнего ультрафиолетового диапазонов. Однако чаще используют параметры инфракрасного излучения самих тел. Параметры излучения тел меняются при изменении температуры тела, то есть при нагреве и охлаждении.

Существует несколько способов нагрева тел: контактный, конвективный, терморadiационный – электромагнитным излучением (оптического, СВЧ-, видимого и инфракрасного диапазонов), электрическим током, трением и т. п.

Важнейшими способами в информационных методах являются конвективный, контактный и терморadiационный – излучением СВЧ-диапазона. При всех способах нагрева на температуру тела влияет несколько различных факторов, однако всегда важную роль играют теплофизические характеристики вещества. Первые два из указанных выше способов нагрева – поверхностные, при этом тепловая энергия подводится к поверхности тела. Скорость распространения тепла в теле и изменения температуры в объёме и на поверхности определяются во многом его теплофизическими характеристиками.

Для воздушной среды приращение температуры на поверхности частицы кубической и сферической форм при конвективном нагреве, если тепло поглощается минералами неселективно, можно определить по формуле:

$$\Delta T_{\text{конв}} = \frac{6 \alpha \Delta T_{\text{с-ч}}}{d c \rho} \Delta t,$$

где $\Delta T_{\text{с-ч}}$ – разность температур среды и частицы минерала, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(см²·°К); Δt – время контакта частицы со средой, с; d – диаметр сферической или длина ребра кубической частицы, м; c – удельная теплоёмкость вещества частицы (минерала), Дж/(кг·К); ρ – плотность вещества частицы (минерала), кг/м³.

При прекращении нагрева температура на поверхности куска (минерала) будет снижаться, причём тем быстрее, чем выше теплопроводность вещества куска (минерала). Таким образом, куски разного мине-

рального состава с разными теплофизическими свойствами будут иметь разную температуру через одинаковый промежуток времени с момента окончания конвективного нагрева.

Аналогичная зависимость для ΔT будет и при контактном нагреве:

$$\Delta T_{\text{конт}} = \frac{\alpha \Delta T_{\text{с-ч}} s}{V c \rho} \Delta t,$$

где s – площадь контакта источника тепла и нагреваемого куска, м^2 ; V – объём куска, м^3 .

Минералы и горные породы отличаются теплофизическими свойствами: удельной теплоёмкостью, теплопроводностью, температуропроводностью. В табл. 6.13 эти характеристики приведены для некоторых самородных элементов, минералов и горных пород.

За счёт различий в этих свойствах температура на поверхности кусков разного минерального состава через одинаковое время нагрева или охлаждения может быть различной.

Возможно применение ещё одного способа селективного нагрева минералов, металлов, горных пород, шлаков. Это нагрев СВЧ-излучением. Нет принципиального различия между этим и инфракрасным излучением одинаковых длин волн, но если излучение генерируется электронным прибором, это – СВЧ (или микроволновое) излучение, а если инфракрасным источником – инфракрасное.

Разность температур компонентов при нагреве в СВЧ-поле будет зависеть от теплоёмкости и плотности вещества, а также от относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Энергия квантов в СВЧ-диапазоне мала. Её недостаточно для изменений в структуре атомов и молекул, но достаточно, чтобы взаимодействовать с вращательными уровнями молекул, например воды, либо воздействовать на свободные электроны, например в проводниках, либо вызывать поляризацию в диэлектриках (с переполюсовкой). При высокой интенсивности СВЧ-излучение может вызывать нагрев веществ. СВЧ-излучение – самый коротковолновый поддиапазон радиоволнового диапазона ($\lambda=0,1\text{--}0,3$ см). Оно проникает в вещество на глубину до нескольких сантиметров, что обеспечивает прогрев по всему объёму, а не только с поверхности.

Таблица 6.13

Теплопроводность и теплоёмкость минералов
(по данным К. Хораи, Д. Симмонса,
А. С. Поваренных, Г. Т. Продайводы, Р. П. Юрчака)

Минерал	Тепло- провод- ность Λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоём- кость c , Дж/(кг·К)	Минерал	Тепло- провод- ность Λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоём- кость c , Дж/(кг·К)
Кварц (монокрист.)	$\perp^*$ 6,5–7,2 $\parallel^*$ 11,3–13,2	–	Гроссуляр	5,46	–
α -кварц	7,99	–	Галит	5,3–6,5	879,0
Альбит	2,31	711,0	Ангидрит	4,91–5,75	–
Ортоклаз	1,96	837,0	Гипс	1,30	–
Лабрадор	1,5	837,0	Турмалин	4,50	–
Анортит	1,7	711,0	Флюорит	4,03	–
Ортоклаз	2,31	628,0	Рутил	$\perp^*$ 7,14 $\parallel^*$ 13,8	–
Микроклин	2,42	669,0	Барит	1,7	460,5
Форстерит	5,15	753,0	Топаз	23,4	–
Фаялит	3,16	628,0	Берилл	8,4	–
Оливин	5,0	795,3	Корунд	34,6	711,0
Шпинель	3,48	–	Циркон	4,5	669,0
Пироксен	4,38	748,8	Молибденит	–	574,3
Авгит	3,82	–	Касситерит	–	340
Бронзит	4,03	–	Ковеллин	–	502,4
Энстатит	4,39	–	Халькопирит	–	534,3
Ставролит	4,30	–	Куприт	–	460,5
Андалузит	7,57	–	Сфалерит	26,7	–
Жадеит	5,61	753,4	Пирит (монокрист.)	38,9	–
Диопсид	5,76	711,0	Гематит (поликрист.)	10,4	628,0
Сerpентин	1,70–2,47	950,2	Гематит	$\parallel^*$ 12,1 $\perp^*$ 14,7	–
Нефелин	1,75	–	Магнетит	5,3	586,1
Биотит	1,95	–	Лимонит	–	921,1
Флогопит	2,29	879,0	Рутил	$\parallel^*$ 12,6–13,7 $\perp^*$ 7,11–8,5	–
Мусковит	2,32	–			–
Пироп	3,21	690,6			
Альмандин	3,31	–	Окись урана	9,66	–
Кианит	14,2	–			
Силлиманит	9,1	–			

* $\perp$ и $\parallel$ – значение Λ измерено перпендикулярно оптической оси и параллельно ей.

При нагреве тела в СВЧ-поле приращение его температуры ΔT (К) через время Δt (с) составит:

$$\Delta T_{\text{свч}} = \frac{\pi f E^2 \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta}{c \rho} \Delta t,$$

где f – частота поля, с^{-1} ; E – напряжённость СВЧ-поля, В/м; ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; ε – относительная диэлектрическая постоянная вещества; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь вещества; c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность вещества частицы (минерала), кг/м^3 .

Часть входящих в формулу переменных характеризуют вещество, их можно записать в виде СВЧ-термометрического фактора, $\text{К} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{Дж}^{-1}$:

$$F = \frac{\varepsilon \operatorname{tg} \delta}{c \rho}.$$

Таким образом, значительных различий у разделяемых компонентов по величине СВЧ-термометрического фактора следует ожидать от компонентов с разными диэлектрическими, теплофизическими свойствами и плотностью.

Наибольшие различия могут быть у минералов, отличающихся диэлектрическими свойствами. Для минералов и пород они приведены далее. Контраст минералов и горных пород по удельной теплоёмкости и плотности значительно меньше. Авторами описанного способа В. М. Волошиным и В. Ю. Зубкевичем он назван *термографическим*.

Тепловым излучением называется электромагнитное излучение, испускаемое телами за счёт их внутренней энергии. При этом энергия внутренних хаотических тепловых движений электронов непрерывно переходит в энергию испускаемого электромагнитного излучения, при этом возбуждённые электроны переходят из состояния с большей в состояние с меньшей энергией с испусканием фотонов различных энергий. То есть нагретое тело отдаёт внутреннюю энергию за счёт теплового излучения.

Спектр излучения непрерывный в очень широком диапазоне, его максимум перемещается в область малых длин волн с повышением температуры в соответствии с законом смещения Вина, м:

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-6}}{T},$$

где T – температура источника излучения, К.

Полная (интегральная по всем частотам ν или длинам волн λ) испускательная способность чёрного тела в соответствии с законом излучения Стефана-Больцмана определяется по формуле:

$$U = \int_0^{\infty} U_{\nu,T} d\nu = \sigma T^4,$$

где $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^3 \hbar}$; $k = \frac{R}{N_A}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); N_A – число Авогадро, моль⁻¹; c – скорость света, м/с; $\hbar$ – постоянная Планка, Дж·с.

То есть полная испускательная способность абсолютно чёрного тела (спектр поглощения абсолютно чёрного тела неселективен и равен 1 на всех длинах волн) пропорциональна четвёртой степени температуры тела T .

Серое тело – это тоже источник теплового излучения (серого излучения) отличается от чёрного тем, что его поглощающая способность не зависит от частоты, а зависит лишь от температуры, причём она меньше 1. Серое тело ближе по сути к реальным объектам, чем абсолютно чёрное, оно имеет лишь меньшую энергетическую яркость, а спектральный состав абсолютно чёрного и серого тел одинаков. Отличие реального тела от абсолютно чёрного оценивают степенью черноты – отношением испускательных способностей при одинаковой температуре. Все законы абсолютно чёрного тела применимы к серому телу, в них меняются лишь константы.

С определёнными допущениями эти законы можно применить для реальных тел, в том числе для минералов и горных пород, учитывая реальную степень черноты.

Степень черноты ряда веществ приводится ниже:

Глинозём обожжённый.....	0,8
Алюминий грубой обработки.....	0,07
Алюминий полированный.....	0,039-0,057
Базальт.....	0,72
Медная необработанная пластина.....	0,22
Латунь полированная.....	0,03
Стекло.....	0,92
Гранит.....	0,45
Гипс.....	0,85
Железо, грубый слиток.....	0,87-0,95
Сажа.....	0,956
Окись магния.....	0,20-0,55
Мрамор белый.....	0,95
Магний полированный.....	0,07-0,13
Песок.....	0,76
Вода.....	0,95-0,963

Таким образом, температура тел при разных способах нагрева определяется теплофизическими характеристиками, плотностью вещества, при СВЧ-нагреве – дополнительно его диэлектрическими свойствами.

Излучаемая телом тепловая энергия (испускательная способность, энергетическая светимость), её спектральный состав, то есть те характеристики, которые измеряются бесконтактными термочувствительными приборами, зависят кроме вышеуказанных свойств веществ ещё и от степени черноты тела вещества.

Именно эти характеристики формируют разделительные признаки термометрических методов обогащения. Указание способа нагрева даёт разновидности этих методов.

Описанные выше методы идентификации компонентов при различных способах селективного нагрева по температуре поверхности куска следует называть **термометрическими**.

Известными испытанными вариантами метода являются конвективно-термометрический и контактно-термометрический для асбеста и СВЧ-термометрический для шлаков, а также железных и марганцевых руд.

6.8.5. Взаимодействие радиоволнового излучения с веществом

Радиоволновое излучение представляет собой распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле с длиной волны $10^{-3} \div 10^4$ м.

Характер взаимодействия радиоволн с горными породами определяется их электрическими и магнитными свойствами. При попадании в электромагнитное поле каких-либо объёмов полезного ископаемого (кусков) в зависимости от их структуры могут возникнуть *ток сквозной проводимости*, вызванный движением свободных зарядов, и *поляризация*, механизм которой связан со смещением центров электрических зарядов частиц, поворотом осей дипольных молекул, миграцией носителей зарядов в пределах изолированного включения в монофазной породе и т. п. Вещества, в которых преобладает ток проводимости, относят к *проводникам*, а вещества, в которых преобладает ток смещения, обусловливаемый поляризацией, – к *диэлектрикам*.

Электрические свойства характеризуются удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью, а магнитные – магнитной проницаемостью или магнитной восприимчивостью. Различия указан-

ных свойств у минералов и горных пород весьма различны, и этот факт может быть использован в информационных методах обогащения.

В результате взаимодействия радиоволнового излучения с минералами и горными породами происходит потеря энергии электромагнитного поля в них и перераспределение энергии самого поля в зоне создающего его источника.

Существуют два возможных основных направления использования электромагнитного излучения радиоволнового диапазона для обогащения. Первое из них, связанное с использованием эффекта поглощения радиоволн горными породами в системе «источник – порода – приёмник» (радиоабсорбционный), в обогащении не используется. Второе направление связано с применением для оценки свойств породы лишь источника радиоволн.

С перераспределением энергии электромагнитного поля в зоне создающего источника связаны резонансные методы измерения, заключающиеся в том, что количественная оценка свойств веществ, с которыми взаимодействует электромагнитное поле, производится на измерении реакции, испытываемой источником поля при внесении в него контролируемого вещества. В диапазоне радиоволн указанные методы измерения называют радиорезонансными. Источником поля в этом случае служат катушка индуктивности или конденсатор, являющиеся частью колебательного контура автогенератора. Измерения производятся в режиме резонанса, то есть в том случае, когда возбуждающая частота автогенератора ω совпадает с собственной частотой колебаний контура ω_0 , то есть

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{1/LC},$$

где L – индуктивность катушки; C – ёмкость конденсатора.

Если требуется идентифицировать различия в электропроводности или удельном электрическом сопротивлении тел, следует использовать автогенератор с индукционным датчиком, в случае выявления различий в диэлектрической проницаемости вещества применяют автогенератор с датчиком ёмкостного типа. При измерениях с использованием электромагнитных колебаний с частотами 1-100 кГц с индуктивным датчиком идентифицируется различие в магнитных свойствах.

В сепараторах с использованием различий в магнитных свойствах минералов и горных пород в колебательных контурах активным элементом является катушка индуктивности. Колебательный контур настроен на резонансную частоту. Прохождение кусков с различной магнитной восприимчивостью через катушку или вблизи неё приводит

к изменению индуктивного сопротивления контура и, следовательно, к смене резонансной частоты и добротности контура.

При использовании для получения информации датчиков индуктивного типа метод называется индукционным или индукционным радиорезонансным.

Если минералы отличаются диэлектрической проницаемостью, активный элемент – конденсатор. Кусок, проходя поблизости от обкладок конденсатора, меняет его диэлектрические свойства и, следовательно, ёмкость, что приводит к изменению добротности колебательного контура и сдвигу резонансной частоты. Метод называется радиорезонансным емкостным.

Информативным параметром при радиорезонансных методах измерения чаще всего является изменение добротности колебательного контура, которая определяется из выражения

$$Q = R^{-1} \sqrt{L/C},$$

где R – активное сопротивление контура.

Излучение СВЧ-диапазона радиоволн ($\lambda=10^{-3}\div 1$ м), как было описано ранее, при взаимодействии с веществом может приводить к селективному нагреву компонентов с различными электрическими и теплофизическими свойствами.

Электрические и магнитные свойства минералов и горных пород зависят от их химического и минерального состава, структуры и текстуры, пористости и влажности и существенно меняются с изменением частоты воздействующего электромагнитного поля.

Высокой электропроводностью (низким удельным электрическим сопротивлением) обладают металлы ($\rho=10^{-8}\div 10^{-4}$ Ом·м). Они имеют электронную проводимость. Металлическая форма кристаллической связи обуславливает наличие нелокализованных электронов. В соединениях при ковалентно-металлическом и ионно-металлическом видах связи также присутствуют электропроводящие элементы, что определяет высокую электропроводность ($\rho=10^{-6}\div 10^{-3}$ Ом·м) ряда минералов. Для электронных проводников характерно увеличение сопротивления с ростом температуры и увеличением содержания некоторых химических примесей, что иллюстрируется непостоянством удельного сопротивления рудных минералов, которое может меняться на 2-3 порядка.

Свойства полупроводников имеют некоторые химические элементы, к ним в частности относятся элементарные полупроводники (Si, Ge, C, Te, Se) и целый ряд рудных минералов. В строении многих минера-

лов имеются элементы с электронной проводимостью, однако, находясь в узлах решётки, они не создают высокую подвижность электронов, и поэтому такие минералы имеют высокое сопротивление ($\rho=10^4\div10^8$ Ом·м).

Полупроводники могут обладать собственно электронной и дырочной проводимостью. В элементарных проводниках и бездефектных кристаллах минералов количество передвигающихся электронов и дырок одинаково, но при наличии химических примесей даже в ничтожных количествах это равновесие нарушается и наблюдается либо типично дырочная, либо типично электронная проводимость.

Для полупроводников изменение концентрации примеси обуславливает резкое изменение удельного электрического сопротивления. Так, избыток кислорода в 0,1 % уменьшает сопротивление куприта в 10^4 раз. Полупроводники чувствительны к различного рода облучениям (фотоэффект и др.)

Диэлектрики – это минералы с ковалентной формой связи и наиболее плотными упаковками атомов в решётке (островные и цепочные структуры). Удельное сопротивление минералов $10^{12}\div10^{16}$ Ом·м, а некоторых элементов – $10^{24}\div10^{25}$ Ом·м. В сильных электрических полях диэлектрики обладают электронной проводимостью.

Зависимости сопротивления полупроводников и диэлектриков от температуры аналогичны: сопротивление уменьшается с повышением температуры.

Большинству рудных минералов свойственна электронная проводимость ($10^{-6}\div10^{-2}$ Ом·м). Графит также имеет электронную проводимость. Породообразующие минералы горных пород обладают свойствами полупроводников или диэлектриков ($10^6\div10^{16}$ Ом·м). Удельные электрические сопротивления рудных и породообразующих минералов приведены в табл. 6.14.

Удельное электрическое сопротивление влажных образцов существенно ниже, чем у аналогичных образцов с гигроскопической влажностью.

В зависимости от строения диэлектриков различают два основных вида поляризации: поляризацию смещения (электронного или ионного) и релаксационную поляризацию. Поляризация электронного смещения наблюдается у большинства твёрдых, жидких и газообразных веществ, она проявляется практически мгновенно. Для диэлектриков с таким типом поляризации ϵ близка к квадрату преломления согласно уравнению Максвелла: $\epsilon = n^2$.

Удельное электрическое сопротивление минералов и пород

Минерал, порода	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Минерал, порода	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Ангидрит	$10^7 \div 10^{10}$	Перидотит	$10^6 \div 10^7$
Базальт	$5 \cdot 10^3 \div 10^5$	Пирит	$10^{-4} \div 10^{-1}$
Галенит	$10^{-5} \div 10^{-3}$	Пирротин	$10^{-5} \div 10^{-4}$
Галит	$10^{12} \div 10^{14}$	Полевой шпат	$10^{11} \div 10^{12}$
Гнейс	$10^4 \div 10^5$		
Гранит	$10^4 \div 8 \cdot 10^7$	Сера	$10^{12} \div 10^{15}$
Графит	$10^{-6} \div 10^{-4}$	Сидерит	$10 \div 10^3$
Диабаз	$5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^6$	Сильвин	$10^{13} \div 10^{15}$
Кальцит	$10^7 \div 10^{12}$	Скарн	$10^6 \div 10^7$
Кварц	$10^9 \div 10^{12}$	Слюда	$10^{14} \div 10^{15}$
Кварцит	$10^6 \div 10^8$	Сфалерит	$10^{-6} \div 10^{-2}$
Лимонит	$10^6 \div 10^8$	Уголь	$10^{-4} \div 10^{-2}$
Магнетит	$10^{-1} \div 10^{-2}$	Филлит	$10^4 \div 10^5$
Марказит	$10^{-2} \div 10^{-1}$	Халькопирит	$10^{-3} \div 10^{-1}$
Мрамор	$10^6 \div 10^7$	Хлориты	$2 \cdot 10^{10}$

Для диэлектриков с поляризацией ионного смещения, наблюдаемой в твёрдых веществах с ионной решёткой и в аморфных веществах при наличии ионов, $\varepsilon = 4 \div 15$.

В реальном диэлектрике поляризация является результатом различных поляризационных процессов, возникновение любого из которых определяется химико-физическими свойствами вещества и диапазоном используемых частот.

В переменных полях в диэлектриках с релаксационной поляризацией возникают диэлектрические потери, связанные с переходом части электрической энергии в тепло, что обуславливается некоторой проводимостью вещества и медленно устанавливающейся поляризацией. Поляризация смещения потерь не вызывает и устанавливается за время $10^{-12} \div 10^{-15}$ с. Время релаксационной поляризации значительно больше, при ней возникает ток i , представляемый активной i'_a и реактивной i'_p составляющими. Кроме того, существуют токи i_c – ток смещения (емкостной) и i_a – ток проводимости.

По значению токов находят тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{i_a + i'_a}{i_c + i'_p}$$

Он меняется с частотой и описывается формулой Дебая:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty \omega^2 \tau^2},$$

где τ – время релаксации; ω – частота; диэлектрическая проницаемость: ε_0 – при $\omega=0$, ε_∞ – при $\omega=\infty$.

Диэлектрическая проницаемость минералов (табл. 6.15, где в скобках указаны оптические оси, а n – показатель преломления) связана с типом катиона и иона, их ионного радиуса и поляризуемости. В меньшей степени она зависит от структурных особенностей минералов. Диэлектрическая проницаемость имеет различные значения в радиочастотном и оптическом диапазонах. Высокая диэлектрическая проницаемость характерна для сульфидов и окислов, а среди них наиболее высокой диэлектрической проницаемостью обладают минералы, содержащие катионы таких металлов, как Pb, Fe и Cu, они имеют повышенные значения поляризуемости.

Диэлектрическая проницаемость горных пород (табл. 6.16) зависит от нескольких факторов, среди которых важнейшие – это соотношения минералов с различной диэлектрической проницаемостью, текстурные и структурные особенности породы и их пористость.

Диэлектрическая проницаемость сухих горных пород с увеличением пористости уменьшается, так как $\varepsilon_{\text{возд}}=1$, что намного меньше диэлектрической проницаемости минерала. Если в порах пород в естественном залегании содержится минерализованный раствор, диэлектрическая проницаемость кусков породы резко возрастает, так как $\varepsilon_{\text{раств}} \approx 80$, что существенно больше, чем $\varepsilon_{\text{твёрдой фазы}}$.

Влияние влаги усиливается с понижением частоты электрического поля. Увеличение концентрации солей в поровом растворе приводит к снижению диэлектрической проницаемости породы.

Диэлектрические потери, имеющие место в минералах и горных породах, объясняются медленно устанавливающимися видами релаксации, которые проявляются из-за наличия в веществе полярных молекул, сложных комплексных анионных радикалов, химически связанной воды, границ твёрдой и жидкой фаз, границ диэлектриков и проводников и т. п. Количественная характеристика диэлектрических потерь – тангенс угла диэлектрических потерь.

Малые диэлектрические потери ($\operatorname{tg} \phi = 10^{-4} \div 10^{-2}$ при частотах $10^5 \div 10^7$ Гц) характерны для минералов-диэлектриков, обладающих высоким сопротивлением.

**Диэлектрическая проницаемость некоторых минералов
(Пархоменко, 1965; Поваренных, 1979; Кларк, 1969)**

Минерал	ε в области		n^2
	радиочастот	оптических частот	
Алмаз	5,7	—	5,76
Сера	4,1	—	4,2
Графит	>81,0	—	4,0
Галенит	17,0–81,0	—	—
Сфалерит	6,9–12,1	5,6–6,1	5,7
Пирит	33,7–81,0	—	—
Пирротин	>81,0	—	—
Молибденит	33,7–81,0	—	4,0–18,5
Арсенопирит	>81,0	—	—
Халькозин	>81,0	—	—
Цинкит	11,0	—	4,0
Куприт	5,65–6,35	—	8,3
Гематит	25,0–170,0	8,65 (II)	9,0
		10,33 (I)	—
Рутил	80,0–173,0	6,82 (II)	8,4
		8,42 (I)	—
Касситерит	23,7–24,3	3,98 (II)	—
		4,36 (I)	—
Галит	5,7–6,2	2,39	2,4
Сильвин	4,39–6,2	2,2	2,2
Флюорит	6,26–6,79	2,06	2,05
Кальцит	7,5–8,7	2,21 (I)	2,2–2,8
Магнезит	10,6	2,75 (II)	2,2–2,9
Сидерит	5,2–7,4	—	2,6–3,5
Родохрозит	6,8	—	3,5
Англезит	14,0	3,52–3,59	—
Целестин	7,0	2,62 (a)	2,7
		2,64 (b)	—
Лимонит	3,2	—	4,0
Оливин	6,8	—	2,56
Диопсид	0,0	2,9	2,9
Сподумен	8,4	—	2,7
Актинолит	6,6	—	—
Роговая обманка	4,9–5,8	—	—
Альбит	5,39–5,63	2,33–2,36	2,5
Ортоклаз	6,03–6,06	2,39	—
Андезит	6,2	2,41	—
	6,47	2,41	2,5

Диэлектрическая проницаемость горных пород

Порода	f , Гц	ϵ	Порода	f , Гц	ϵ
Песчаник:			Диорит		
сухой	10^3-10^5	4,6–5,9	сухой	10^4-10^7	10,8–8,6
аркозовый сухой	10^2-10^7	5,9–5,3	Дациит	$3 \cdot 10^6$	6,8–8,16
водонасыщенный	–	7,4–12,1	Габбро	10^2	15,0
Аргиллит	–	5,53	сухое	10^4	10,2
Доломит сухой	10^2-10^7	11,9–7,7		10^7	8,8
Известняк сухой	10^2-10^7	15,4–9,2	Диабаз	$5 \cdot 10^3$	11,6
Сланец роговообманковый сухой	10^2-10^7	10,3–8,9	Диабаз сухой	10^2-10^7	23,5–8,5
Кварцит	$5 \cdot 10^3$	4,4–4,9	Базальт	10^5	18,3
Амфиболит	10^5-10^7	7,9–8,9	Перидотит	10^5-10^7	12,4–15,7
Гнейс сухой	10^2	9,7	Пироксенит	10^5-10^7	6,2–9,5
Силлиманит	10^4	8,8	Дунит	10^5-10^7	8,5–6
Гнейс гранатовый	10^7	8,1	Ювит	10^5-10^7	11,1–8,6
Сerpентинит	10^2-10^7	10,1–6,2	Уртит	10^5-10^7	8,5–7,3
Гранит	$5 \cdot 10^5$	4,5–5,4	Рисчоррит	10^5-10^7	5,8–4,9
Гранит роговообманковый	10^2-10^7	11,1–8,5	Луяврит	10^5-10^7	11,45–9,7

Величина $\text{tg}\phi$ растёт с увеличением содержания в породе порового электролита и рудных минералов с малым сопротивлением. Глины, пески, песчаник во влагонасыщенном состоянии имеют $\text{tg}\phi$ в диапазоне 0,1–1 (и выше) при частотах $10^2 \div 10^6$ Гц. В широких пределах от 0,1 до 2 $\text{tg}\phi$ меняется у изверженных горных пород и зависит от содержания катионов Fe^{2+} и Fe^{3+} . Зернистость рудной фазы или множество чередований зёрен рудных и породообразующих минералов значительно увеличивает $\text{tg}\phi$ пород.

Информация о магнитных свойствах минералов и горных пород содержится в табл. 6.17.

По магнитным свойствам минералы и горные породы разделяют на следующие группы:

– сильномагнитные или ферромагнитные (ферриты, магнетит, титаномagnetит, франклинит, иоцит, моноклинный пирротин и др.), обладающие удельной магнитной восприимчивостью вещества $\chi > 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$;

– слабомагнитные или парамагнитные с удельной магнитной восприимчивостью $\chi = 75 \cdot 10^{-7} \div 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ (оксиды, гидроксиды, кар-

бонаты железа, марганца, хрома, ильменит, вольфрамит, гранат, биотит и др.);

– немагнитные, имеющие удельную магнитную восприимчивость $\chi < 1,26 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$, и диамагнитные с $\chi < 0$, не извлекаемые в магнитных полях (кварц, алюмосиликаты, кальцит, касситерит, пирит и др.).

Таблица 6.17

Удельная магнитная восприимчивость некоторых минералов

Минералы	Химическая формула	Удельная магнитная восприимчивость, $10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$
Сильномагнитные		
Магнетит	Fe_3O_4 ; $(\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$	6300-12000
Маггемит	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	5000-6000
Титаномagnetит	$\text{Fe}(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{O}_4$	3000-4000
Пирротин	$\text{Fe}_n\text{S}_{n+1}$	63-700
Слабомагнитные		
Гематит	Fe_2O_3	8,8-22
Лимонит	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	2-3
Сидерит	FeCO_3	6-7
Ильменит	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{TiO}_3$	14-34
Манганит	$\text{MnO}_2 \cdot \text{Mn}(\text{OH})_2$	До 6,3
Пирролюзит	MnO_2	До 4
Вольфрамит	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$	8-12
Немагнитные		
Кварц	SiO_2	-0,025
Полевой шпат	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	0,630
Апатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$	0,126
Пирит	FeS_2	0,1
Рутил	TiO_2	0,2-06

Магнитные свойства сильномагнитных минералов имеют некоторые особенности. Их магнитная индукция и намагниченность меняются с изменением напряжённости поля

Магнитные свойства слабомагнитных минералов, в отличие от сильномагнитных, практически не меняются с изменением формы частиц и напряжённости намагничивающего поля.

7. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРУПП ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Характеристики (свойства) вещества, используемые для измерений в информационных методах, определяются элементным, изотопным, минеральным составом, особенностью текстуры и структуры, характером минерализации, состоянием поверхности и многими другими факторами.

В разные годы отечественными учёными Мокроусовым В. А. и Лилеевым В. А., Татарниковым А. П., Архиповым О. А., Марчевской В. В. и Терещенко С. В., Кравцом Б. Н., Лаговым Б. С. и Лаговым П. Б. были предложены классификации информационных методов обогащения под разными названиями и с различными признаками классификации.

Для классификации информационных методов целесообразно использовать принцип укрупнённого подразделения. На верхнем уровне может быть выделен уровень групп, имеющих свой признак классификации. В то же время любая из групп внутри себя может иметь свой классификационный признак, а это означает, что классификации верхнего и нижнего уровней в силу их специфики должны быть независимыми и отдельными.

Множество информационных методов обогащения может быть разделено на три крупных класса по уровню организации материи, на котором получают информацию для разделения (табл. 7.1).

Методы уровней организации материи ядерного (первого) и атомного (второго) позволяют оценивать *содержания химических элементов*, входящих в состав минералов и горных пород. Третий уровень – уровень вещества; в нашем случае минералов и горных пород, на котором оцениваются *свойства* входящих в разделяемые порции (куски) *минералов и горных пород*. В ряде случаев свойства минералов и горных пород коррелированы с содержаниями химических элементов и косвенно их характеризуют.

Классы включают в себя группы методов, отличающиеся используемыми для разделения свойствами. В двух первых классах используются методы прямого определения содержаний элементов. К ним относятся, во-первых, методы измерения характеристик излучений и потоков частиц – продуктов естественного радиоактивного распада, а также искусственных ядерных реакций, характеристик излучений и потоков частиц, рассеянных и частично поглощённых ядром, во-вторых,

методы измерения характеристик излучений и потоков частиц, возникающих в результате взаимодействия первичных излучений и потоков частиц с внутренними электронными оболочками атомов. Интенсивность вторичных излучений и потоков, вторичные энергетические спектры квантов и частиц, их пространственное распределение позволяют преобразовывать данную информацию в содержания интересных элементов, их сочетания формируют конкретные методы и их названия.

Таблица 7.1

Классификация групп информационных методов обогащения

Уровень организации материи	Группы методов	Используемые для разделения свойства
Ядра атомов	Радиометрические	Свойства атомных ядер в естественных условиях: испускание радиоактивных излучений и потоков частиц
	Ядерно-физические	Свойства атомных ядер при взаимодействиях с излучениями и потоками частиц: поглощение, рассеяние, искусственная радиоактивность
Атомы	Атомно-физические	Свойства внутренних электронных оболочек атомов при взаимодействиях с излучениями и потоками частиц: поглощение, рассеяние квантов и частиц
Минералы и горные породы	Люминесцентные	Люминесцентные свойства минералов
	Оптические (фотометрические)	Оптические свойства минералов: поглощение и рассеяние света минералами в видимой и прилегающих к ней областях спектра
	Теплофизические информационные	Теплопроводность, удельная теплоёмкость, температуропроводность минералов
	Электрические информационные	Удельное электрическое сопротивление, электропроводность, диэлектрическая проницаемость, поляризуемость минералов
	Магнитные информационные	Магнитная восприимчивость, остаточная намагниченность минералов
	Механометрические	Твёрдость, пластичность, упругость минералов
	...	...
	Комбинированные информационные	Например, диэлектрическая проницаемость + теплоёмкость минералов

Первый класс может быть разделён на 2 группы: первая – методы, использующие *определение содержания радиоактивных элементов* по естественной радиоактивности без первичного излучения или потока частиц (радиометрические); вторая – методы, использующие *определение содержаний элементов* по характеристикам излучений и потоков частиц после взаимодействия первичных излучений и потоков частиц с ядрами атомов.

Методы, использующие *определение содержаний элементов* по характеристикам излучений или потоков частиц после взаимодействия первичных излучений и потоков частиц с внутренними электронными оболочками атомов, отнесены к атомно-физическим (это второй класс методов). В третьем классе методы подразделяются на группы по используемым для разделения *свойствам минералов и горных пород*.

Входящие в группы методы весьма разнообразны и различаются видами (процессами) взаимодействия излучений и потоков частиц с веществом или прочими воздействиями на вещество на разных уровнях (ядро, атом, минерал, горная порода и т. п.) и видом получаемой информации о составе и свойствах порций (кусков). Число и перечень методов и групп могут меняться за счёт появления новых используемых свойств и утраты актуальности старых. Каждая группа при её внутренней классификации должна иметь собственный признак классификации, который может характеризовать способ измерения свойств, вид формируемого разделительного признака и т. п.

Информационные методы отличает от прочих несколько собственных только им весьма ценных возможностей. Среди них: возможность разделения по признакам, весьма тесно связанным с содержанием элементов; возможность использования комплексных разделительных признаков, обеспечивающих качественную идентификацию минеральных фаз; возможность учёта в алгоритмах принятия решения содержаний нескольких элементов с учётом их промышленной ценности; возможность использования при разделении в одной технологической операции различий разделяемых фаз по нескольким физическим свойствам, что в прямых методах обогащения или просто невозможно, или требует развёрнутых технологических схем.

8. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

8.1. Порции сортировки

Обогащение информационными методами в рудоподготовке в зависимости от количества в разделяемых порциях материала может осуществляться в трех вариантах: крупнопорционном, мелкопорционном и покусковом. Крупнопорционному дискретно-порционному режиму соответствует рудосортировка, осуществляемая на рудоконтрольных станциях (РКС). При рудосортировке из исходного может быть выделено несколько сортов руды, отличающихся содержанием ценного компонента (богатая, рядовая, забалансовая и т. п.) и пустая порода. Руда может быть разделена на технологические типы. В процессе используется неравномерность содержаний ценного компонента в заполненных рудой контролируемых и сортируемых емкостях (вагонетки, автосамосвалы, думпкары). Неравномерность в порциях формируется благодаря первичной неоднородности природных оруденений. Сортировке подвергают руду сразу после добычи, исключая операции перегрузки и усреднения.

РКС может быть оборудована в забое, у ствола шахты, на поверхностном комплексе шахты или на открытом руднике. Для эффективной сортировки необходимо обеспечение минимума перемешивания в транспортных операциях для сохранения неоднородности, близкой к естественной неоднородности руды в забое.

Измерение содержания проводится в ёмкости по сигналу датчика. Разделение на сорта производится с учетом взвешивания вагонеток по эталонировочному графику, связывающему сигнал датчика и содержание ценного компонента, построенному по эталонным вагонеткам и заданным границами разделения.

Для вагонеток сортировка осуществляется путем переключения стрелочного механизма и направлением руды в нужный сорт для последующей переработки или хранения. Аналогично сортируют руду в автосамосвалах или в думпках.

Погрешность определения содержаний возрастает с увеличением объема порций: в вагонетках – 25 %, в автосамосвалах – 40 % относительных. Это объясняется непредставительностью зондируемой части объема ко всему объему порций, варьированием параметров отдельных емкостей. При радиометрической сортировке не требуются источники

первичных излучений, для других методов обязательно использование излучателей нейтронов либо γ - и рентгеновского излучений.

Для объемных методов определения содержаний источники излучения устанавливаются соответственно под углом к линии датчика при фотонейтронном методе и с противоположной стороны потока или емкости по отношению к датчику при нейтронно-абсорбционном и γ -абсорбционном методах.

Для поверхностных методов (γ - и рентгенофлуоресцентных) регистрирующий блок (датчик) и излучатель устанавливают с одной стороны – со стороны свободной контролируемой поверхности. Датчик и излучатель могут размещаться в этом случае в рентгеновском моноблоке рудоконтролирующей станции.

Получение информации, необходимой для мелкопорционной сортировки, может осуществляться в любых движущихся потоках: на ленте конвейера, на вибрационном питателе, в свободном падении. Порция в этом случае – это локальный фрагмент потока, который может быть выделен (или не выделен) в отдельный продукт (хвосты, богатая или бедная руда, технологические типы и т. п.). Выделение организуется в зоне разгрузки материала с ленты или питателя или ниже зоны измерения при сортировке в свободном падении.

Управляющими органами могут быть электромагнитные шиберы, пневматические системы. В различных системах сортировки порции могут отсекаются по разным алгоритмам: либо за равные промежутки времени, либо при смене качества материала в сортируемом потоке. Сортировка может производиться на два-три или более продуктов. Масса сортируемых порций зависит от крупности обогащаемого материала и от производительности сортируемых потоков.

Информационная покусковая сепарация предназначена для разделения сырья с учетом информации о каждом куске и с удаляющим воздействием на любой подлежащий удалению объект (кусок, порцию). При этом нижний предел крупности обогащаемого материала ограничен либо техническими и методическими возможностями измерительных и удаляющих систем (чувствительностью, разрешающей способностью датчиков излучений, требуемым временем набора статистики, быстродействием и избирательной способностью удаляющих органов), либо экономическими соображениями, связанными с уменьшением производительности сепараторов при снижении крупности или усложнением конструкций (ручьевого или плоскостной принцип подачи разделяемых частиц).

Верхняя граница крупности обогащаемого данными методами материала 300 (400) мм. Нижняя граница в среднем 20-25 мм. Её снижают для дорогого сырья (оптически чистый кварц, камнесамоцветное сырье) до 1 мм, а для драгоценных камней, например для алмазов, изумрудов, до 0,5 мм.

8.2. Рудосортировочные контрольные станции и мелкопорционные сортировочные установки

Радиометрические контрольные станции предназначены для крупнопорционной сортировки естественно-радиоактивных руд в вагонетках, самосвалах, вагонах, ковшах экскаваторов. Они могут использоваться в шахте в непосредственной близости от забоя, либо как общерудничные на поверхности, либо на входе руды на обогатительную фабрику.

При получении информации о качестве руды в вагонетках вагонетку с рудой на РКС помещают между датчиками радиометра, который регистрирует интенсивность γ -излучения. При измерении радиоактивности в автосамосвалах датчики радиометра располагают над кузовом машины (рис. 8.1). Информация от радиометров служит для учёта получаемых продуктов разделения и для управления стрелками рельсовых путей и световой сигнализацией для автомобилей.

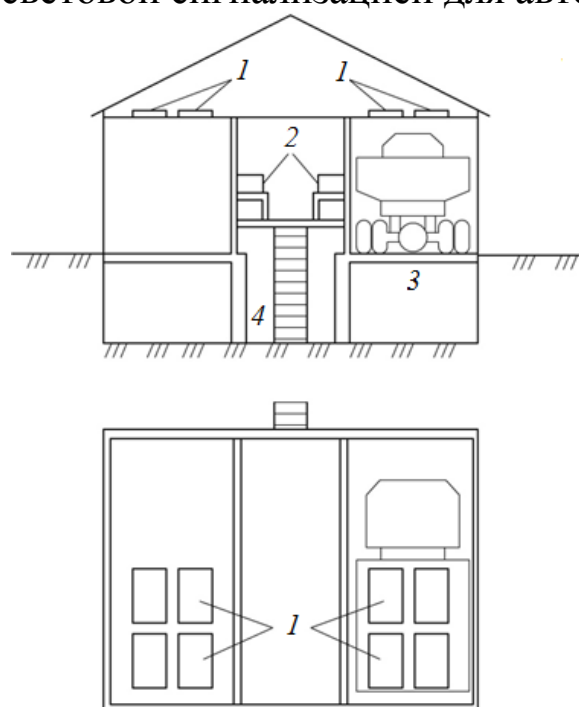


Рис. 8.1. Схема установки РКС для измерения гамма-излучения руды в автомашинах:

1 – датчик; 2 – пульт управления; 3 – весы; 4 – подвал для хранения эталонов

Фотонейтронная контрольная станция РКС-2Б применялась для крупнопорционной сортировки бериллиевой руды в вагонетках. Для возбуждения ядерной реакции использован изотоп ^{124}Sb . Она оборудована контейнерами с 4-6 гамма-источниками, 36 датчиками СНМ-11 или СНМ-18, радиометром, автоматической системой управления. Станция имеет внешнюю биологическую защиту (рис. 8.2). Источники γ -излучения и детекторы расположены симметрично по боковым сторонам вагонетки. Измерение длится до 1 мин.

Известно также применение нейтронно-активационной РКС для сортировки флюоритовой руды в вагонетках и нейтронно-радиационной РКС для сортировки никелевой руды в вагонетках.

В настоящее время наибольшее распространение получили рентгенорадиометрические РКС, эффективно определяющие содержания в рудах многих химических элементов (начиная с Са).

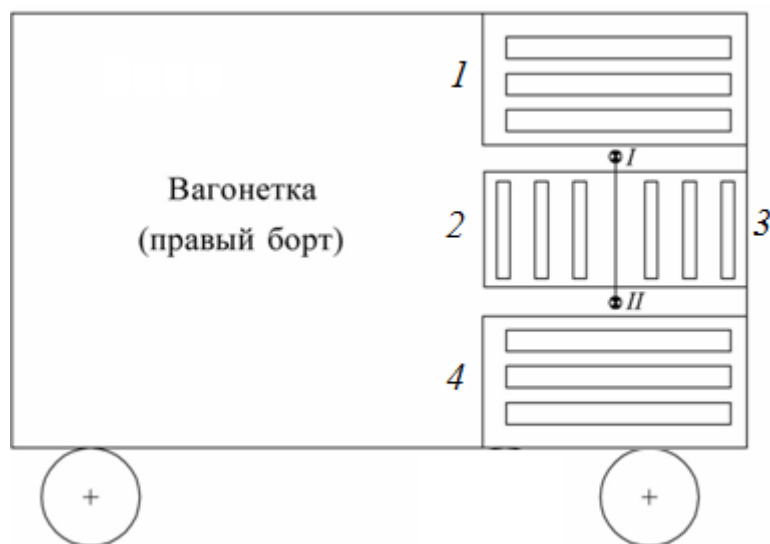


Рис. 8.2. Схема размещения источников (I, II) и кассет счётчиков (1-4) при экспресс-анализе бериллиевых руд в вагонетке

Для оперативного контроля качества руд в транспортных ёмкостях (вагонетках, автосамосвалах, вагонах и др.) или на ленте конвейера с целью сортировки и управления рудопотоками предназначена рудоконтролирующая станция РКС-А «СТАРК» совместного производства ООО «РАДОС» и ООО «Технорос». Для определения содержаний элементов используется рентгенорадиометрический метод. Источником рентгеновского излучения является портативный рентгеновский генератор «Прам-50». Для регистрации флуоресцентного излучения химических элементов используются полупроводниковые Si-Pin детекторы или газовые пропорциональные счётчики.

Станция включает модуль контроля и пульт оператора. Одновременно пульт может обслуживать до шести модулей контроля. Диапазон анализируемых элементов от Са до Вi при содержании от сотых долей до десятков процентов.

Рудоконтролирующая станция РКС-КМ (рис. 8.3, табл. 8.1) производства ООО «Технорос» предназначена для контроля качества руды в непрерывном технологическом цикле в реальном времени. Она устанавливается над лентой транспортёра. В основу её работы, так же как и в предыдущем случае, заложен рентгенофлуоресцентный метод определения вещественного состава.

Станция оснащена ультразвуковым высотомером, с точностью до 1 мм, определяющим расстояние до анализируемой поверхности. Это позволяет исключить влияние колебаний высоты слоя материала на показания станции и определить условное средневзвешенное содержание компонентов в руде за различные промежутки времени (10 минут, 1 час, смена, сутки, месяц и т. д.).

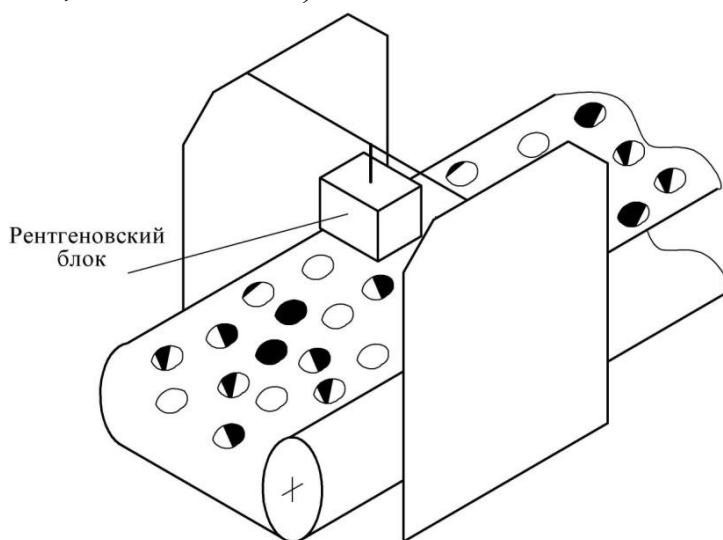


Рис. 8.3. Пример установки модуля контроля рудоконтролирующей станции РКС-КМ над лентой конвейера

Интерфейс станции позволяет отслеживать в динамическом режиме уровень загрузки руды на ленте, движение или остановку ленты, содержания контролируемых компонентов, а также проводить ретроспективный просмотр информации и тестирования работоспособности отдельных узлов и станции в целом. Информация, получаемая с помощью РКС-КМ, может служить для организации мелкопорционной сортировки на конвейере.

Таблица 8.1

Технические данные РКС-КМ

Наименование параметра	Значение
Количество одновременно контролируемых элементов	До 5, в зависимости от типа руды
Диапазон регистрируемых элементов с атомным номером Z	От 20 (Ca) до 92 (U)
Диапазон определения массовой доли элементов, %	От 0,1 до 80
Минимальное время усреднения измерений, с	30
Расстояние от электронного блока до контролируемой поверхности руды, мм	300±150
Мощность потребления блоком электронным, кВт (не более)	0,15
Размеры поверхности опробования на конвейерной ленте на расстоянии 300 мм от поверхности материала, мм (не менее)	120×200
Цикличность опробования руды на конвейерной ленте, с	30
Интерфейс линии связи блока электронного РКС с компьютером оператора	RS-485 (изол.)
Длина линии связи интерфейса RS-485, м (не более)	1000
Количество блоков электронных РКС, подключаемых к одному пульту управления	2
Режим работы станции	Непрерывный
Время установления рабочего режима, мин (не более)	30
Напряжение питания блока электронного РКС, В	220±20
Напряжение пульта управления, В	220±20
Мощность потребления пультом управления, кВт (не более)	0,45
Габаритные размеры блока электронного РКС ($B \times L \times H$), мм (не более)	300×600×232
Масса блока электронного РКС, кг (не более)	30
Габаритные размеры и масса пульта управления	Определяются типом персонального компьютера
Срок службы, лет (не менее)	5

Установка УС-15 разработки ООО «ЭГОНТ» предназначена для мелкопорционной сортировки руд на основе измерения среднего содержания ценных компонентов в контролируемом движущемся материале (табл. 8.2). Способ измерения содержаний в полиметаллических

рудах рентгеноспектральный. Для отдельных руд могут быть применены другие способы. Принцип ее работы показан на рис. 8.4.

Таблица 8.2

Характеристики сортировочной установки УС-15

Наименование показателей		Ед. изм.	Значение показателей	Примечание
Количество секций		ед.	2	Автономные
Количество каналов		ед.	2	По одному в каждой секции
Крупность сепарируемого класса		мм	-15+0	-
Производительность		т/ч	До 30	-
Пороговая чувствительность по цинку		%	0,3	-
Время формирования единичной порции сортировки, не более		с	0,3	-
Минимальная порция сортировки (при производительности 30 т/ч)		кг	1,25	-
Напряжение питания		В	220	50 или 60 Гц
Потребляемая мощность, не более		кВт	0,8	-
Масса	сепаратора	т	1,2	-
	стойки управления	т	0,2	-
Габаритные размеры ($B \times L \times H$)	сепаратора	м	1,72×1,2×1,83	-
	стойки управления	м	0,6×0,6×1,9	-

Подача материала в зону измерения осуществляется вибропитателем, во время прохождения материала по вибропитателю измеряются его рентгеновские характеристики. Затем материал разгонным (растягивающим) лотком трансформируется в монослойный поток, который управляемыми быстродействующими отсекателями распределяется по продуктам сортировки. Информационный блок, включающий моноблок, рентгеновский и блок управления, имеет функции измерения рентгенофлуоресцентного излучения материала, преобразования информации, принятия решения об отнесении контролируемой порции к какому-либо типу продуктов, выработки сигналов, управляющих работой отсекателей.

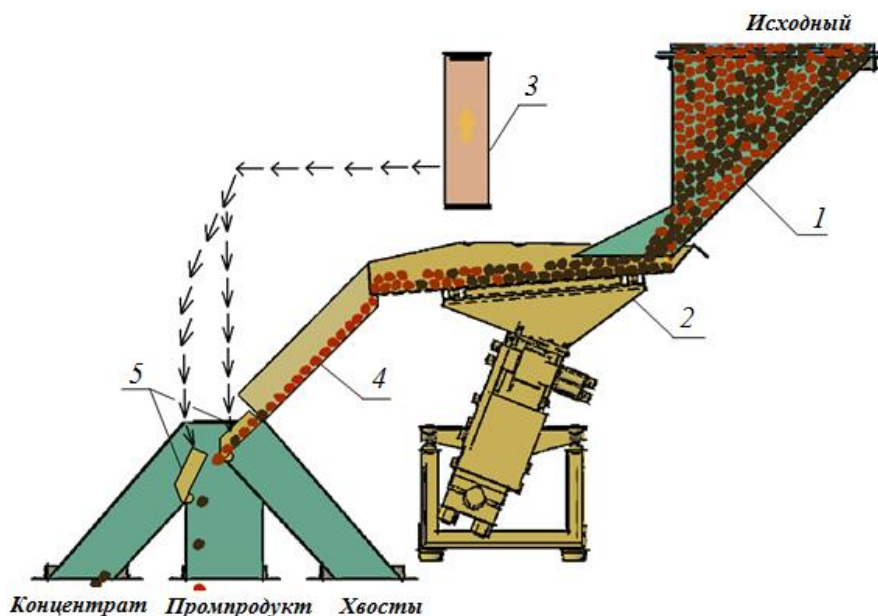


Рис. 8.4. Схема работы установки для мелкопорционной сортировки руд:

1 – бункер; 2 – вибропитатель; 3 – информационный блок;

4 – разгонный (растягивающий поток) лоток;

5 – управляемые быстродействующие отсекатели

Мелкопорционная сортировка может быть эффективной при обогащении относительно мелких продуктов разделения, в том числе для разделения мелких классов, сепарация которых в покусковом режиме экономически не оправданна.

8.3. Информационные сепараторы

8.3.1. Принципы устройства сепараторов

Информационный сепаратор включает несколько функциональных блоков: бункер-питатель для регулирования скорости подачи материала, транспортирующий блок для формирования потока движущихся частиц (конвейер, вибrolоток, лоток, барабан и др.); блок облучения (кроме радиометрического); блок регистрации; бортовой компьютер для обработки полученной о куске информации, принятия решения об удалении, выработки управляющего сигнала на удаление; исполнительный механизм (электромеханический, электромагнитный или электропневматический), управляемый бортовым компьютером и приводящий в движение удаляющий орган (лопатка, шибер) или формирующий удаляющее воздействие (игла пневмоклапана или её аналог, открывающая сопло пневмосистемы с высоким давлением); удаляющий орган; приёмные лотки продуктов разделения; промышленный компьютер, служащий для настройки, управления и контроля за борто-

вым компьютером (может использоваться один на несколько сепараторов).

В информационных сепараторах измерение характеристик кусков производится на питающей ленте либо в полете, траектория которого формируется питающим конвейером или вибратором. В стремлении к увеличению производительности сепараторов разработчики сепараторов прошли несколько этапов: одноручьевая покусковая подача, покусковая многоручьевая подача (обеспечивается желобчатой конфигурацией ленты или вибропитателя), число ручьёв в отдельных модификациях сепараторов достигает 8 штук; монослойная подача.

Удаление кусков из потока осуществляется либо струёй воздуха (электропневмоклапан), либо шибером (электромагнитное шиберное устройство). В зависимости от крупности материала частота удаления электропневматическими устройствами колеблется в пределах от 2 до 200 (400) с^{-1} , а механическими – от 3 до 20 с^{-1} . Электропневмоклапаны отличаются большим быстродействием, однако для них характерно интенсивное запыление рабочих помещений и окружающей среды, избежать которых можно только применением эффективных систем интенсивного пылеулавливания или предварительной промывкой сортируемых кусков руды.

Удаление кусков может осуществляться как с движущейся ленты конвейера, так и в полёте после схода кусков с конвейерной ленты или с вибрационного питателя, питающего жёлоба и т. п. При удалении кусков с ленты может формироваться несколько отличающихся веществным составом удаляемых продуктов (многопродуктовый сепаратор). При удалении в полёте число удаляемых продуктов редко может быть более двух (трёхпродуктовый сепаратор). В первом случае, при установке датчиков под лентой, расстояние от них до контролируемых кусков постоянно, в прочих случаях расстояние облучатель-кусок, детектор-кусок меняется из-за непостоянства размеров самих кусков и из-за колеблемости траекторий их полёта, т. е. геометрия измерения является нестабильным фактором, потенциально вызывающим дополнительные погрешности измерений. Геометрия и прочие условия измерения свойств кусков зависят от выбранного метода и его возможностей. Описанные варианты получения информации иллюстрируются рис. 8.5 (*а, б, в, г*).

В случае *а* (радиометрический, радиорезонансный сепараторы) в измерительной системе либо отсутствуют источники излучений и имеются только приёмники излучений 2 (радиометрический сепара-

тор), либо функции источника излучения и датчика совмещены в одном элементе 2 (активный элемент резонансного контура – конденсатор или катушка в радиорезонансном сепараторе). Для многих методов требуется и источник излучения 3, и приёмник излучения 2 (на рис. 6.19, б, в, г). Удаление частиц из потока производится пневматическими устройствами 4 или электромагнитными шиберами 5.

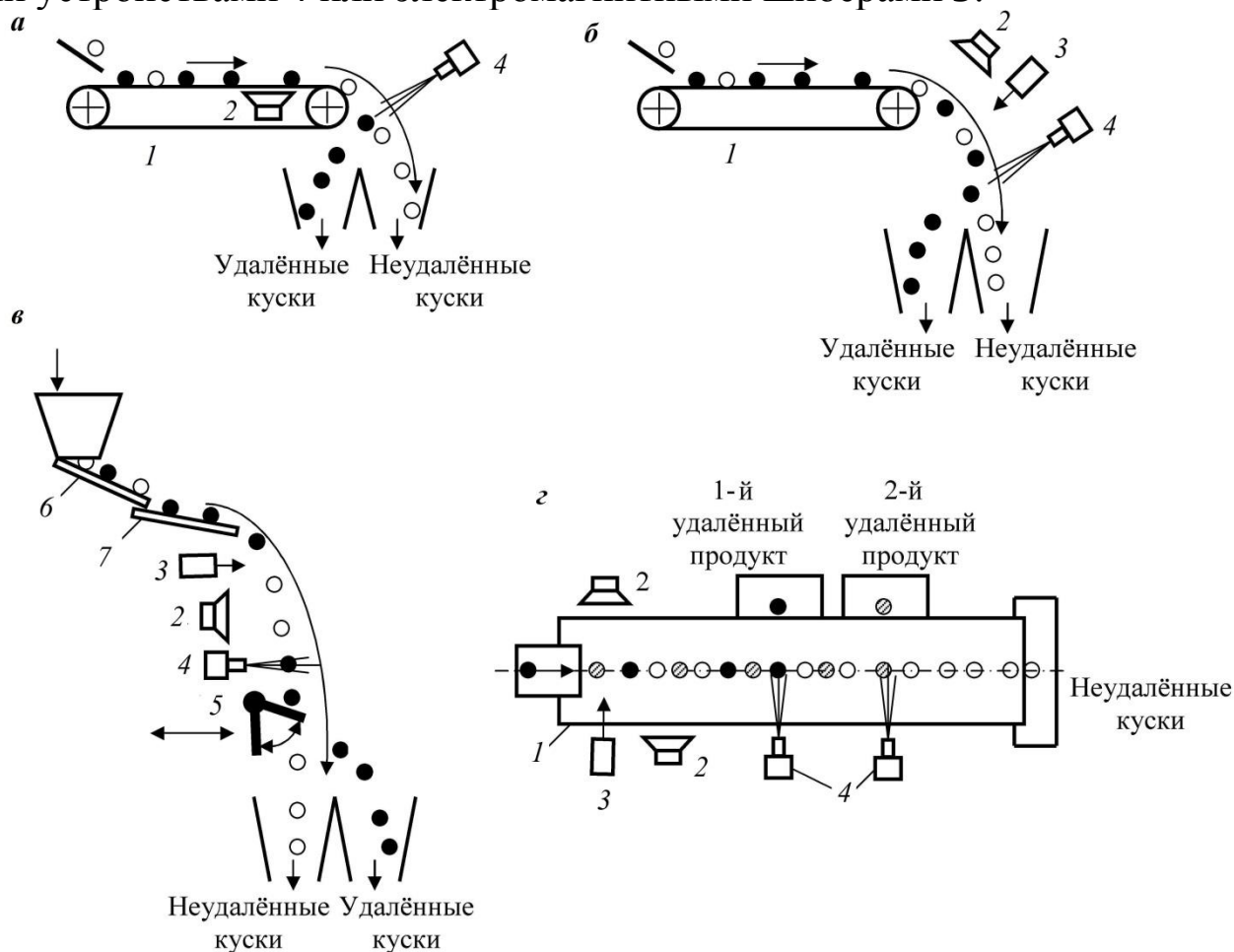


Рис. 8.5. Варианты сепараторов с покусковым режимом с различными условиями получения информации и удаления кусков:

1 – конвейерная лента; 2 – приёмник излучения или активный элемент резонансного контура; 3 – источник излучения; 4 – пневматические устройства; 5 – электромагнитные устройства; 6 – вибрационный питатель; 7 – раскладчик желобчатого типа; а – получение информации при нахождении материала на транспортирующем органе (конвейерной ленте), удаление в свободном падении; б – получение информации и удаление в свободном падении (формирование траектории полёта обеспечивается конвейерной лентой); в – получение информации и удаление в свободном падении (формирование траектории полёта обеспечивается вибрационным питателем и раскладчиком желобчатого типа, а удаление – пневматическими или электромагнитными шиберами); г – получение информации и удаление кусков из общего потока осуществляется на транспортирующем органе (ленте конвейера 1)

Ленточная подача позволяет формировать монослойный, а вибрационная – многоручьевой поток. В обоих случаях необходима организация удаления частиц в свободном падении. Для мелких классов (менее 10-15 мм) предпочтительней для удаления использовать пневматические устройства, как более быстродействующие и менее габаритные. При монослойной или многоручьевой подаче пневмоклапаны выстраиваются в один или несколько рядов по всей ширине подающего устройства (ленты, раскладчика и т. п.). Число задействованных клапанов для удаления конкретного куска может быть различным и в реальном времени принимается по результатам оценки размеров (и косвенно массы) этого куска. Преимуществом электромагнитных шибберных устройств является отсутствие пылеобразования при удалении. Для снижения пылеобразования при использовании пневматических устройств во многих случаях используют предварительную промывку или смачивание сортируемого материала.

При монослойной подаче дополнительно используется система изменения координат куска на ленте и синхронизации «прохождения» каждого куска через зону удаления с включением удаляющего органа (или нескольких органов), находящегося вблизи траектории прохождения куска.

Полученная информация в современных сепараторах обрабатывается бортовыми компьютерами, которые также управляют работой удаляющих органов, осуществляют диагностику работоспособности отдельных систем. Настройка, запуск нескольких сепараторов, анализ эффективности их работы могут осуществляться с персонального компьютера, установленного в операторском пункте.

8.3.2. Радиометрические сепараторы

В радиометрическом методе для измерения достаточно установки одного или нескольких детекторов (часто устанавливаются под лентой). Увеличение числа детекторов используют либо для увеличения достоверности информации, получаемой от кусков больших размеров (многосторонний «осмотр»), либо с той же целью, когда при последовательном расположении детекторов вдоль траектории движения кусков (эстафетный метод) увеличивается статистика накопленной информации за счёт суммирования статистик сигналов от всех датчиков по одному куску, что особо актуально для сортировки относительно бедных руд.

Для радиометрического метода характерно ограничение, связанное с эффектом «подсветки» от аномально богатых кусков, которое ведёт к снижению производительности из-за необходимости увеличения интервалов между кусками. Для сохранения общей производительности обогащения прибегают к сепарации в несколько приёмов с последовательным удалением в концентрат наиболее богатых кусков и снижением порогов разделения в каждом последующем приёме.

Поскольку чаще всего разделение в радиометрических сепараторах ведётся на ленте конвейера, при последовательной установке нескольких удаляющих органов (сопел, воздушными импульсами, сбрасывающими куски руды) и приёмников отделяемых продуктов по сторонам конвейера, часто практикуется разделение руды на несколько конечных продуктов. Таким образом, за одну операцию с движущейся ленты может быть удалено несколько продуктов плюс продукт из неудаляемых кусков, который разгружается при сходе ленты.

Радиометрические сепараторы (табл. 8.3) используют для обогащения материала крупностью -200+20 мм, разделённого на более узкие машинные классы.

Радиометрические сепараторы производят ФГУП «ВНИИХТ» совместно с ООО «Консит-А» и НПП «Аспект» и ГП «Восточный ГОК».

Таблица 8.3

Основные характеристики некоторых типов радиометрических сепараторов, применяемых для обогащения урановых руд

Наименование сепаратора	Число каналов	Сортируемый класс крупности, мм	Производительность, т/ч		Эффективность сепарации урановых руд, %	Потребляемая мощность, кВт
			общая	на 1 канал		
«Вихрь-2201Р»	1	-200+100	75	75	75-80	7,5
		-200+50	50	50	75-80	
«Уранит»	1	-200+100	20-30	20-30	90	5,0
«Азурит-Р100»	2	-100+50	10-14	5-7	90	6
«Азурит-Р50»	2	-50+25	4-6	2-3	85	6
УАС-200	1	-200+100	40-50	40-50	92-96	2,5
УАС-100	2	-100+50	22-30	11-15	90-95	2
УАС-50	2	-50+25	8-9	4-4,5	88-93	2

Конструкция сепараторов УАС даёт возможность создавать на их базе модульные рудосепарационные комплексы (рис. 8.6, табл. 8.4), в состав которых входят бункеры, вибропитатели, грохоты, конвейеры-грохоты, оснащённые системой промывки руды.

Таблица 8.4

Технические характеристики рудосепарационных модулей

Параметры и характеристики	Значения параметров и характеристик модулей		
	PCM-40	PCM-100	PCM-200
Производительность (по исходной руде), т/ч	30...50	80...120	160...240
Выполняемые функции	Грохочение исходной руды, промывка и сепарация классов -200+25 мм		
Максимальная крупность кусков, мм	200	200	200
Сепарируемые классы, мм	-200+25	-200+25	-200+25
Минимальная эффективность грохочения, %	90	93	93
Технологическая эффективность сепарации руд, доли ед.:			
Легко- и среднеобогатимых	0,8...0,9	0,85...0,9	0,8...0,9
Труднообогатимых	0,7...0,8	0,7...0,8	0,7...0,8
Количество сепараторов типа УАС-Р, шт.	2	5	10
Установленная мощность, кВт	не более 16,5	95,5	103
Максимальный расход воды, м ³ /ч	20	50	100
Расход сжатого воздуха, приведённый к нормальным условиям, м ³ /мин	7,5	19	37,5
Габариты, м:			
длина	10,09	18	18
ширина	6,62	7	11,7
высота	3,23	4,04	4,04
Масса, т	6,9	36	45

Давление в сети сжатого воздуха в сепараторах УАС, «Вихрь», «Азурит» 0,63 МПа. Тип разделяющего устройства – электропневматический. Расход воздуха на 1 т отбитых кусков 40-50 м³. Шумы при удалении кусков на уровне 120 дБ.

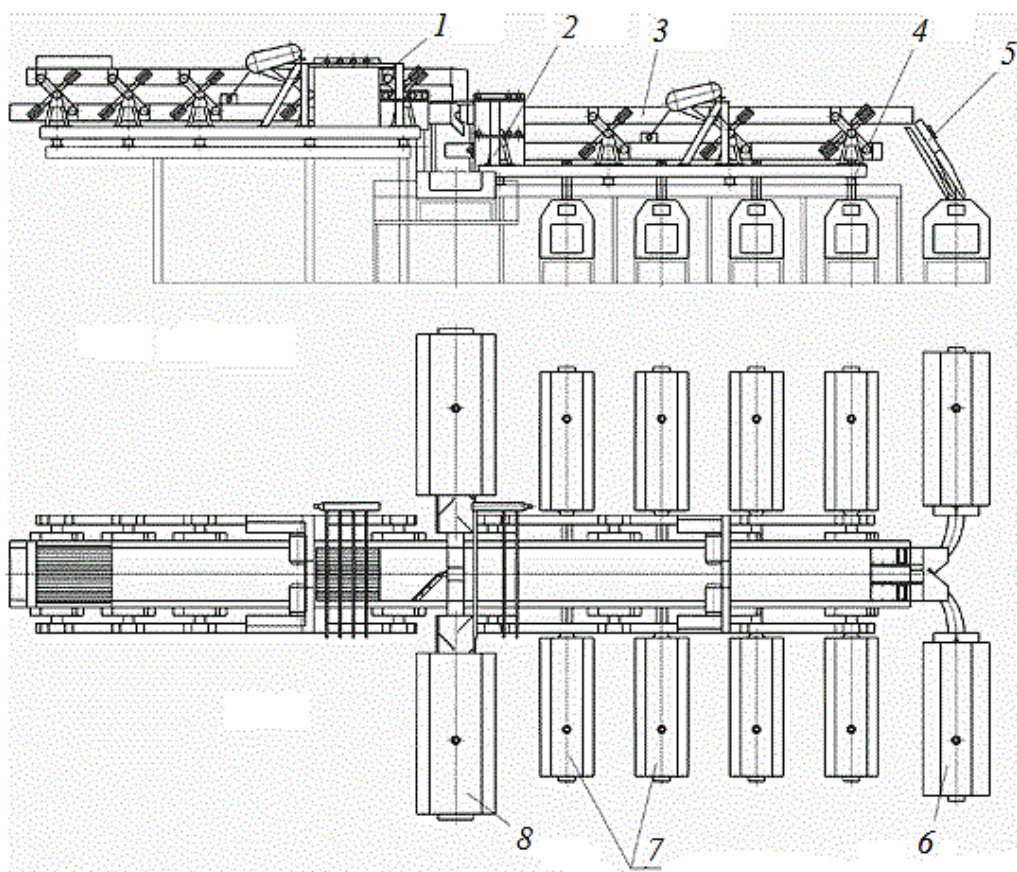


Рис. 8.6. Рудосепарационный комплекс

для покускового обогащения полезных ископаемых:

- 1, 3 – конвейеры-грохоты вибрационные КВГ-1,2; 2 – система отмывки;
 4, 5 – погрузочно-формирующие устройства; 6 – сепаратор УАС-100;
 7 – сепаратор УАС-50; 8 – сепаратор УАС-200

Модули УАС могут также оснащаться измерительной аппаратурой для рентгенорадиометрического, фотометрического и люминесцентного методов сепарации.

8.3.3. Фотонейтронные сепараторы

Фотонейтронные сепараторы успешно использовались для обогащения бериллиевых руд в 70-80-е годы XX века. В зависимости от способа транспортирования сортируемого материала разработаны сепараторы двух типов: РАМБ-300 (вибрационный) и РМБ-100 (ленточный). В них применяется в качестве источника γ -излучения изотоп ^{124}Sb и радиометры РСБ-2 и УСБ-3 со сцинтилляционными датчиками Т-2. К настоящему времени эта аппаратура морально устарела.

8.3.4. Нейтронно-абсорбционные сепараторы

В 80-е годы XX столетия в Советском Союзе (ЦНИЛА Восточного ГОКа, г. Жёлтые Воды, Украина) были произведены промышленные

нейтронно-абсорбционные сепараторы «Борат», с помощью которых перерабатывались забалансовые боратовые руды.

В начале 90-х годов прошлого века малым предприятием «Луч ЛТД» при КФИМ этот сепаратор был модернизирован. В модели «Бор-Н-200/50» введён гамма-абсорбционный канал, использовано отражение медленных нейтронов в сочетании с эстафетной схемой регистрации, применены новые детекторы и их экранировка, что позволило увеличить скорость конвейерной ленты в 6-7 раз по сравнению с прототипом и повысить производительность сепараторов с 35 до 200 т/ч.

8.3.5. Гамма-абсорбционные сепараторы

В ЦНИЛА также разработано несколько моделей гамма-абсорбционных сепараторов: ленточный «Минерал» (табл. 8.5), конусный «Кристалл», барабанные «Рубин» и «Рубин-2» для крупности руды -50+20 и -100+50 мм.

Таблица 8.5

Технические характеристики сепараторов «Минерал»

Показатели		Модификация	
		Минерал-Р-50 МЛ	Минерал-50-Р-100 МЛ
Класс крупности, мм		-50+25	-100+50
Производительность, т/ч		8-10	25-30
Тип разделяющего устройства		КВ-110 ПМ	
Расход сжатого воздуха на 1 т отбитой массы, м ³ /т		80-90	60-70
Давление воздуха, МПа		0,63-0,1	
Напряжение питающей сети переменного тока, В		220, 380	
Мощность, кВт		6	
Габаритные размеры, мм:	длина	6000	4800
	ширина	2050	2050
	высота	2250	2250
Площадь, занимаемая сепаратором, м ²		12,3	9,84
Масса сепаратора, кг		11500	9200
Скорость ленты, м/с		1,0	1,0
Количество каналов, шт.		6	
Количество детекторов в канале, шт.		10	6
Тип детектора		БДЛГ	
Расход воды, м ³ /с		2	

Эти сепараторы были широко внедрены на перерабатывающих предприятиях Криворожского железорудного бассейна. Их использование позволило повысить качество окисленных железных руд Кривбасса на 6-10 % по содержанию железа и получить дефицитный крупнокусковой мартеновский сорт руды. Показана возможность их использования для заметного увеличения содержания хрома в руде, снижения зольности углей Кизеловского бассейна, повышения удельной теплоты сгорания горючих сланцев Ленинградской области.

8.3.6. Рентгеноабсорбционные сепараторы

Схематическое изображение сепаратора MikroSort® TractSP приведено на рис. 8.7.

Техническая характеристика рентгеноабсорбционных сепараторов приведена в табл. 8.6 (производительность зависит от плотности и класса крупности исходного материала; технические требования компрессора могут изменяться в зависимости от числа извлекаемых частиц исходного материала, пропускной способности и среднего размера частиц, оценка данных параметров необходима перед каждым использованием).

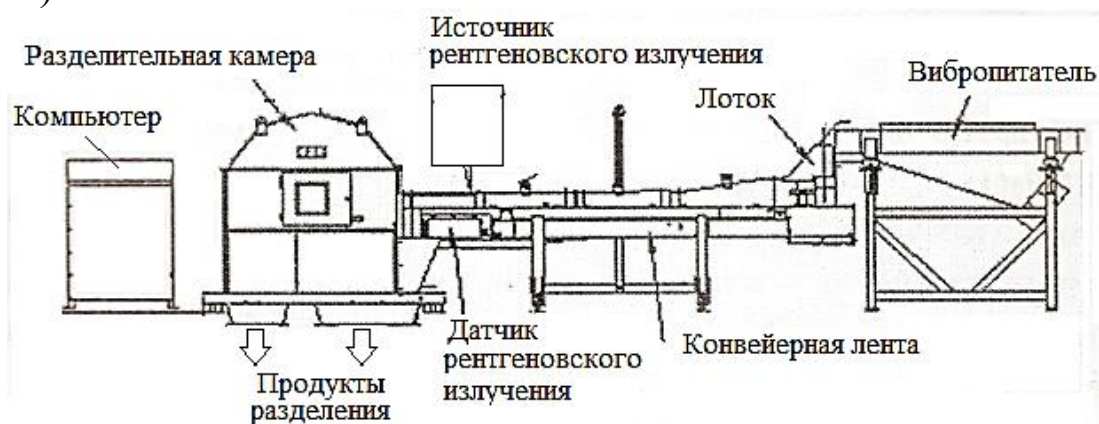


Рис. 8.7. Схематическое изображение рентгеноабсорбционного сепаратора

Сортируемый материал, движущийся по конвейерной ленте моно-слоем, просвечивается потоком рентгеновских лучей, прошедшее и ослабленное рентгеновское излучение фиксируется датчиками рентгеновского излучения. Признаком разделения является атомная плотность сортируемых объектов. Измерение интенсивности прошедшего излучения осуществляется в двух энергетических диапазонах, что позволяет несколько снизить влияние крупности частиц, плотности вещества сортируемых частиц, матричного эффекта от колебания содержаний элементного состава и т. д.

Техническая характеристика рентгеноабсорбционных сепараторов

Параметры	MikroSort® X-Tract 600	MikroSort® X-Tract 1200	Commodas Tertiary X-Tract 1200 Chute
Рабочая ширина, мм	600	1050	1138
Ширина установки, мм	1420	1850	1892
Длина конвейерной ленты, мм	4000	4000	3969
Общая длина установки, мм	7900	9000	-
Высота, мм	2150	2270	2021
Датчики	512 пикселей	768 пикселей	768 (1536) пикселей
Клапаны	128	До 512	До 144 (208)
Форсунки	128	До 512	До 256
Производительность, т/ч	До 10	До 50	До 40
Размер исходного материала, мм	4-50	10-150	10-40
Скорость движения ленты, м/с	2-3	2-3	3
Вибропитатель (индивид.), мм	2000	2500	Да
Воздушный компрессор (индивид.), кВт/10 ⁵ Па	35	55	55
Расширительный бачок (индивид.), л	2000	2000	3000

Информация от датчиков обрабатывается компьютером и используется для управления включением нужных форсунок для удаления каждого подлежащего удалению куска.

8.3.7. Рентгенофлуоресцентные сепараторы

В настоящее время одним из наиболее динамично развивающихся направлений сепараторостроения в России является производство рентгенофлуоресцентных сепараторов (ООО «РАДОС», компания «Интегра», ООО «ЭГОНТ» и др.). Это объясняется возможностью их применения для обогащения очень многих руд цветных, черных и редких металлов и неметаллических полезных ископаемых.

Общим принципом получения информации об объектах разделения является измерение спектральных характеристик вторичного характеристического рентгеновского излучения элементов и их использование в формировании аналитического параметра разделения. Ана-

литический параметр позволяет идентифицировать в кусках отдельные элементы и количественно оценивать их содержания.

Рентгенофлуоресцентные сепараторы, производимые различными фирмами, имеют отличительные особенности в организации потоков питания сортируемой горной массы, способах удаления частиц, конструкциях измерительных систем, исполнительных механизмов и удаляющих органов.

Сепараторы «РАДОС» для покусковой сортировки руд и техногенного сырья (табл. 8.7, рис. 8.8) отличаются от аналогов других производителей механическим способом удаления кусков (в качестве исполнительных механизмов используются быстродействующие электромагнитные шибберные устройства).

Таблица 8.7

Технические характеристики рентгенорадиометрических сепараторов для покусковой сепарации руд полезных ископаемых и техногенного сырья (СРФ)

Тип сепаратора	Двухпродуктовые			Трёхпродуктовые
	СРФ 4-50 СРФ 4/2-50	СРФ 4-100 СРФ 4/2-100 СРФ 4-150 СРФ 4/2-150	СРФ 2-300 СРФ 3-300	СРФ 4-3П-50 СРФ 4-3П-100 СРФ 4-3П-150
Классы крупности сортируемой руды, мм	10...60	20...150	60...300	10...150
Диапазоны класса крупности, мм	10-40	30-80	60-200	10-30, 30-80
	20-40	30-100	80-250	10-40, 30-100
	20-50	40-120	100-250	20-40, 40-120
	20-60	40-150	150-300	20-60, 50-150
Производительность, т/ч (в зависимости от диапазона)	3-8	8-20	20-50	3-8, 8-20
Количество каналов (ручьев) сортировки, шт.	4	4	2 (3)	4
Потребляемая мощность, кВт (не более)	3,0	5,0	5,0	7,0
Габаритные размеры, мм ($L \times B \times H$)	3520×1200×2240	5070×1500×2500	5070×1500×2500	5070×1500×2740
Масса, кг (не более)	1600	3900	4100	4400
Температурный диапазон, °С	-50 ÷ + 35			

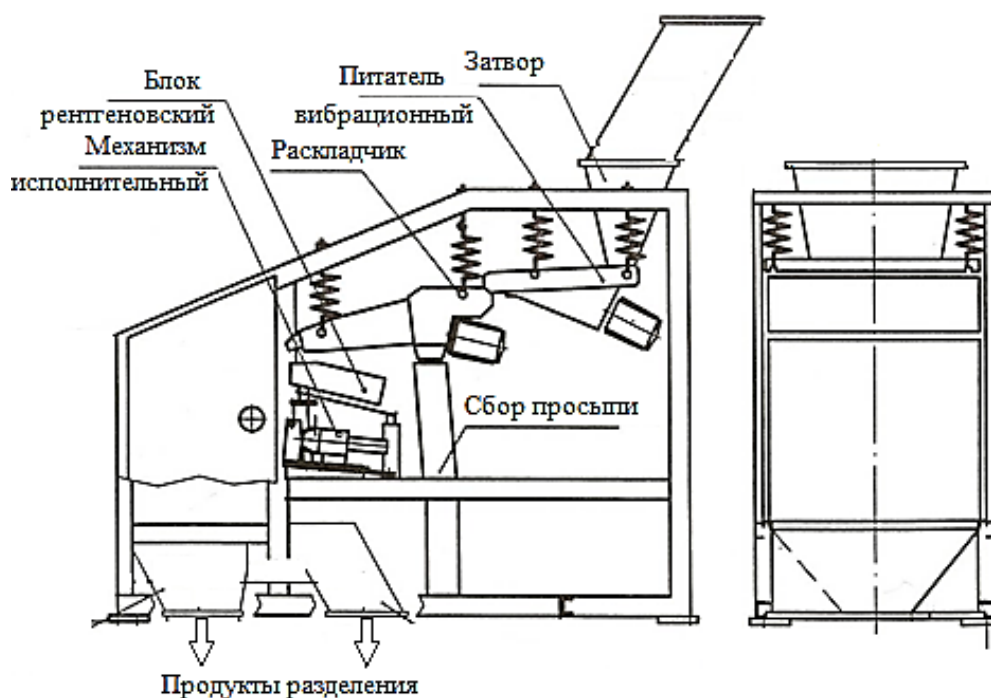


Рис. 8.8. Рентгенофлуоресцентный сепаратор СРФ 4-50 М ООО «РАДОС»

Организация движения кусков через зоны измерения и удаления обеспечивается вибрационными многоручьевыми питателем и раскладчиком. Измерение и удаление кусков производятся в фазе их свободного падения.

Обработка информации от кусков, принятие решения об удалении, выработка команд на удаление, накопление информации о работе осуществляются бортовым компьютером, настройка сепараторов, анализ эффективности их работы – персональным компьютером, установленным в операторском пункте.

В сепараторах компании «Интегра» (табл. 8.8) применяются два варианта движения материала через зоны измерения и удаления.

В первом варианте это обеспечивается конвейерной лентой, на которой получение информации может осуществляться с одной или двух сторон (рентгеновские облучатели и детекторы могут быть установлены с обеих боковых сторон конвейера), а удаление производится по аналогии с этой операцией в радиометрических сепараторах ФГУП «ВНИИХТ» и ООО «Консит-А». Конструктивно эти рентгенофлуоресцентные сепараторы аналогичны радиометрическим сепараторам УАС. В другом варианте (Микро-РС-50, рис. 8.9) используется вибрационная раскладка и многоручьевая подача кусков руды в зоны измерения и удаления.

И получение информации, и удаление кусков производятся в свободном падении. Удаление производится струями воздуха, генерируе-

мыми быстродействующими пневматическими устройствами. Компанией «Интегра» упоминается также о возможности применения в своих сепараторах фотометрического и радиометрического методов измерения.

Таблица 8.8

**Техническая характеристика
рентгенофлуоресцентных сепараторов компании «Интегра»**

Наименование параметра	Тип сепаратора			
	Микро-РС-50	PM-50P	PM-100P	PM-200P
Технические данные				
Сортируемые классы крупности, мм	-50+25	-50+25	-100+50	-200+100
Производительность, т/ч	8	2,5	7	14
Коэффициент обогащения исходной руды в пределах, отн. ед.	1,2-4			
Количество ручьев сортировки, шт.	8	1		
Количество продуктов сортировки, шт.	2	3		
Исполнительные механизмы:	Электропневмоклапаны			
Количество на ручей, шт.	2	4	6	4
Тип исполнительного механизма	MFH-3-1/4-S	MFH-3-1/4-S	MFH-3-1/4-S MFH-3-1/2-S	MFH-3-1/2-S
Расход сжатого воздуха, максимальный, м³/мин	4,35	1,15	3,15	3
Потребляемая мощность, кВт (не более)	8	6,6	7,5	8
Масса, т (не более)	3,5	1,2	1,2	1,4
Габаритные размеры, мм				
Длина	6400	7200	7200	7500
Ширина	1240	800	800	880
Высота	3560	1940	1940	1940

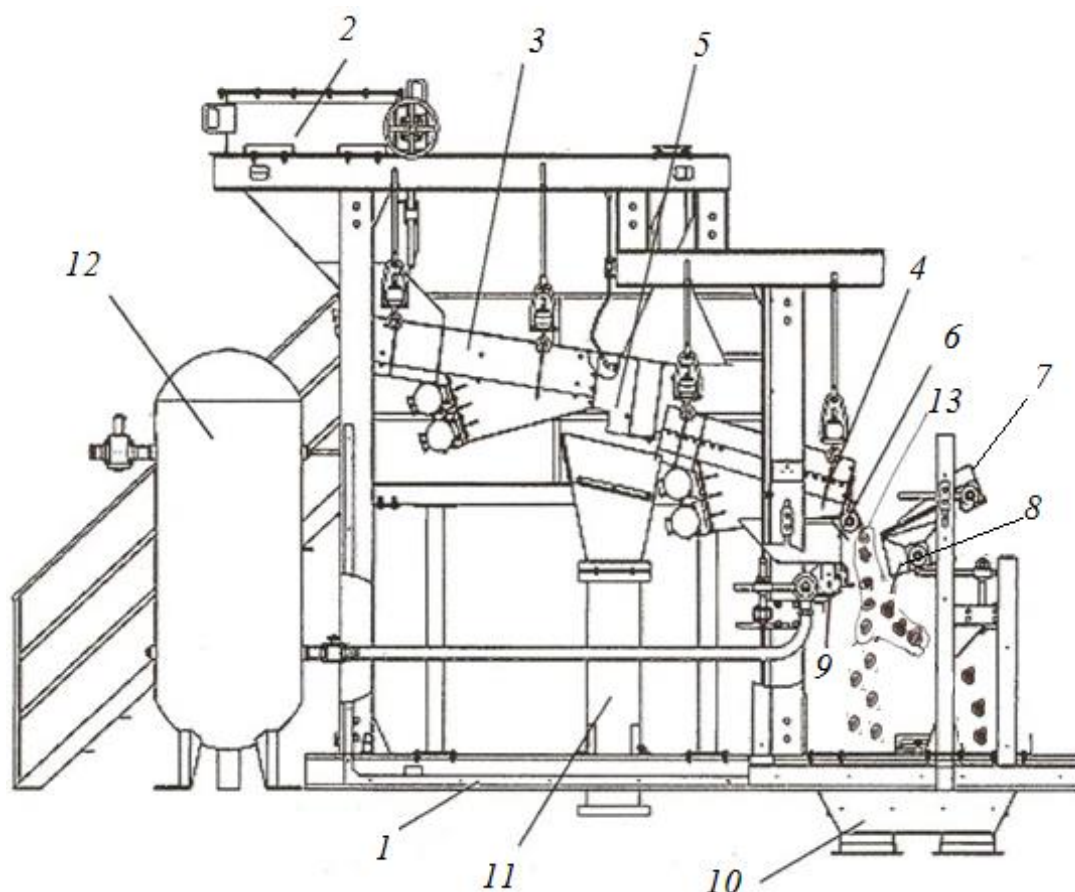


Рис. 8.9. Многоканальный рентгенорадиометрический сепаратор «Интегра» Микро-РС-50:

1 – рама; 2 – бункер; 3 – грохот-питатель; 4 – электромеханический виброраскладчик; 5 – короб разгрузки просыпей; 6 – формирователь траекторий падения кусков (склизы); 7 – облучательное устройство; 8 – блок детекторов; 9 – блок исполнительных механизмов (16 сопел); 10 – бункеры концентрата и хвостов; 11 – воздуховод аспирации; 12 – ресивер; 13 – поток кусков

Рентгеноспектральный сепаратор РСЭ-50 ООО «ЭГОНТ» блочно-го типа состоит из машины сортировочной (в едином кожухе) и стойки автоматического управления (рис. 8.10). Подача материала осуществляется вибратором с желобчатыми поверхностями, которые служат для формирования 8 ручьёв.

Получение информации и удаление кусков производятся в полёте, удаление ведётся сжатым воздухом с использованием быстродействующих электропневмоклапанов. Техническая характеристика приведена в табл. 8.9.

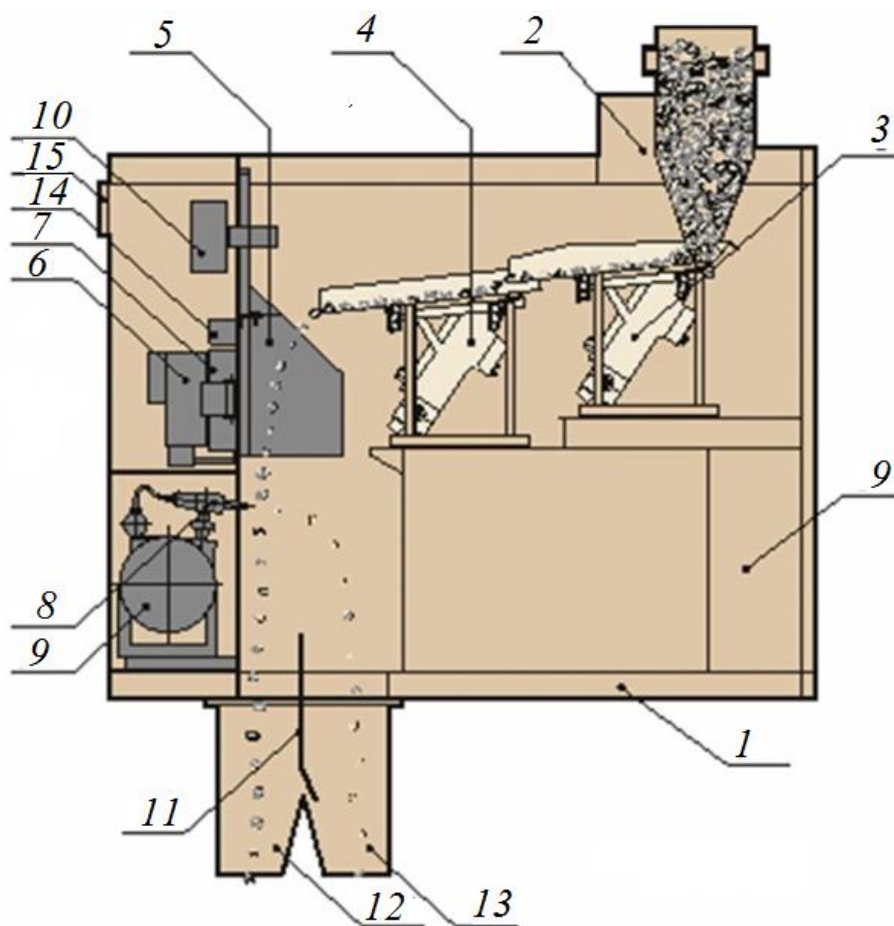


Рис. 8.10. Схема сепаратора РСЭ-50 для разделения кусковых продуктов крупностью от 10 до 50 мм:

- 1 – каркас; 2 – загрузочный бункер; 3 – подающий вибропитатель;
 4 – растягивающий вибропитатель; 5 – делительные перегородки;
 6 – рентгеновский моноблок; 7 – блок регистрации; 8 – электропневмоклапан;
 9 – система подготовки воздуха; 10 – блок управления электропневмоклапанами;
 11 – шиббер; 12 – приёмный желоб для хвостового продукта;
 13 – приёмный желоб для отобранного сепаратором продукта;
 14 – коробка соединительная; 15 – блок индикации

Разнообразие конструктивных особенностей рассмотренных сепараторов позволяет адаптировать их к обогащению многих видов различных полезных ископаемых в широком диапазоне крупности от 300 (350) до 10 мм.

8.3.8. Рентгенолюминесцентные сепараторы

В стадиях рудоподготовки для отдельных видов сырья могут быть использованы рентгенолюминесцентные сепараторы, производимые ООО «ЭГОНТ» и НПП «Буревестник».

**Характеристика рентгеноспектрального сепаратора
РСЭ-50 ООО «ЭГОНТ»**

Наименование		Значение показателей при крупности	
		от 50 до 20 мм	от 20 до 10 мм
Производительность при сепарации руд, т/ч		30	8
Содержание обнаруживаемых металлов (хром, железо, кобальт, никель, медь, цинк) в анализируемых кусках, %		Не менее 2	Не менее 3
Количество каналов сортировки, шт.		8	8
Извлечение обнаруженных кусков за 1 операцию, % (не менее)		95	95
Контроль		Автоматический всех каналов	
Время непрерывной работы, ч/сут		До 22	До 22
Потребление	электроэнергии, кВт·ч	1,2	1,2
	сжатого воздуха на 1 т концентрата, м ³	25	25
Габариты, мм	сепаратора,	1970 × 1220 × 1550	
	стойки управления	600 × 600 × 1900	
Масса, т	сепаратора	1,3	
	стойки управления	0,25	

Рентгенолюминесцентная технология обогащения алмазосодержащих материалов – базовый процесс обогащения в российской алмазодобывающей промышленности. Рентгенолюминесцентные сепараторы на предприятиях алмазодобывающей промышленности используют для обогащения крупных классов (-50+5 мм) исходной руды, для доводки концентрата крупностью -20+5 мм, для предокончатальной и окончательной доводок концентрата.

Рентгенолюминесцентные сепараторы, используемые собственно для обогащения алмазных руд, имеют следующие технологические характеристики (табл. 8.10). Сортировка ведётся после промывки руды на мокром сырье. Руда подаётся монослоем или поточно в потоке транспортной воды. Разделение может производиться в один или два приёма. Регистрация люминесценции может быть одно- или двухсторонней. Общий вид сепаратора ЛС-20-05 приведен на рис. 8.11.

Таблица 8.10

Технические характеристики рентгенолюминесцентных сепараторов НПП «Буревестник» для обогащения алмазных руд

Наименование показателя		Тип сепаратора					
		ЛС-50-05			ЛС-20-05Н		
Класс крупности, мм		-50+20	-20+10	-10+5	-20+10	-10+5	-50+20
Производительность, т/ч, до		30	20	9	45	25	100
Система подачи		Монослойная. Два приёма обработки			Поточная. Один приём обработки		
Регистрация		Односторонняя			Двухсторонняя		
Отсечка		Пневматическая, 4-канальный отсекатель (по клапану на один канал) на каждой стадии. Отсечка поканальная			Пневматическая. 4-канальный отсекатель. Отсечка всеми каналами одновременно		
Выход материала на одну отсечку, кг, не более		0,2	0,15	0,05	1,0	0,5	1,1
Извлечение %		Не менее 98			Не менее 98		
Потребляемая мощность, кВт		Не более 6			Не более 6		
Расход транспортной воды, м ³ /ч		Не более 1,8			Не более 1,2		
Габаритные размеры, мм $L \times B \times H$	машина сортировочная	2550×870×2580			2300×845×2300		
	стойка автоматического управления	760×550×1745			765×555×1745		
Масса, кг	машина сортировочная	1600			1100		
	стойка автоматического управления	230			230		
					230		



Рис. 8.11. Общий вид рентгенолюминесцентного сепаратора ЛС-20-05

В некоторых сепараторах реализуется не покусковой, а групповой режим сортировки, например, при включении всех (нескольких) удаляющих органов при обнаружении отдельного объекта, требующего удаления, что делается для повышения надёжности его удаления.

Рентгенолюминесцентные сепараторы могут быть использованы и для других видов сырья. ООО «ЭГОНТ» производит сепаратор для обогащения флюоритовых руд ЛСФ-50 (табл. 8.11), а также сепаратор ЛСМ-50 для получения кварц-полевошпатовых концентратов из пегматитов и гранитов (табл. 8.12). Оба сепаратора предназначены для сортировки в крупности -50+10 мм.

Таблица 8.11

Характеристики сепаратора ЛСФ-50

Наименование показателей		Значения показателей
Производительность на классах, т/ч	-50+20 мм	30
	-20+10 мм	5
Содержание флюорита в извлекаемых кусках, не менее, %		2
Количество каналов сортировки, шт.		8
Извлечение обнаруженных кусков за 1 операцию (не менее), %		97
Время непрерывной работы, ч/сут		До 24
Потребление	электроэнергии, кВт·ч	1,2
	сжатого воздуха на 1 т концентрата, м ³	25
Габаритные размеры сепаратора ($L \times B \times H$), м		1,97×1,22×1,55
Масса сепаратора, т		1,3

Характеристики сепаратора ЛСМ-50

Наименование показателей		Значение показателей
Производительность на классах, т/ч	-50+20 мм	10
	-20+10 мм	5
Количество каналов, шт.		2
Количество каналов сортировки руды		8
Количество кусков, отбираемых в концентрат на канал, не более на классе, шт./с	-50+20 мм	10
	-20+10 мм	20
Расход сжатого воздуха на 1 т концентрата, м ³ (не более)		25
Время включения в работу, мин (не более)		2
Время непрерывной работы, ч/сут		До 24
Степень автоматизации		Автомат
Потребляемая мощность, кВт		1,2
Габаритные размеры, м, $L \times B \times H$	сепаратора	1,97×1,22×1,55
	стойки управления	0,6×0,6×1,9
Масса, т	сепаратора	Около 1,3
	стойки управления	0,25

Использование рентгенолюминесцентных сепараторов для прочих видов люминесцирующего минерального сырья также является перспективным.

8.3.9. Оптические (фотометрические) сепараторы

Фотометрические сепараторы «Gunsons Sortex Ltd» получили широкое распространение в 70-80-е годы прошлого века. Применялись для обогащения материала крупностью -150+3 мм. В них интенсивность отражённого света измеряется в условиях свободного падения кусков. Для удаления используется сжатый воздух. Частота срабатывания воздушных клапанов для материала менее 20 мм 200 раз в секунду.

Несколько позже фирмами «Ore Sorters Ltd» и «Голдфилдс» разработан сепаратор с лазерным источником света и монослойной подачей материала (куски с разрядкой транспортируются лентой шириной 800 мм) М-16 (рис. 8.12). Благодаря монослойной подаче материала и высокой скорости движения ленты (4 м/с) значительно возросла производительность сепаратора.

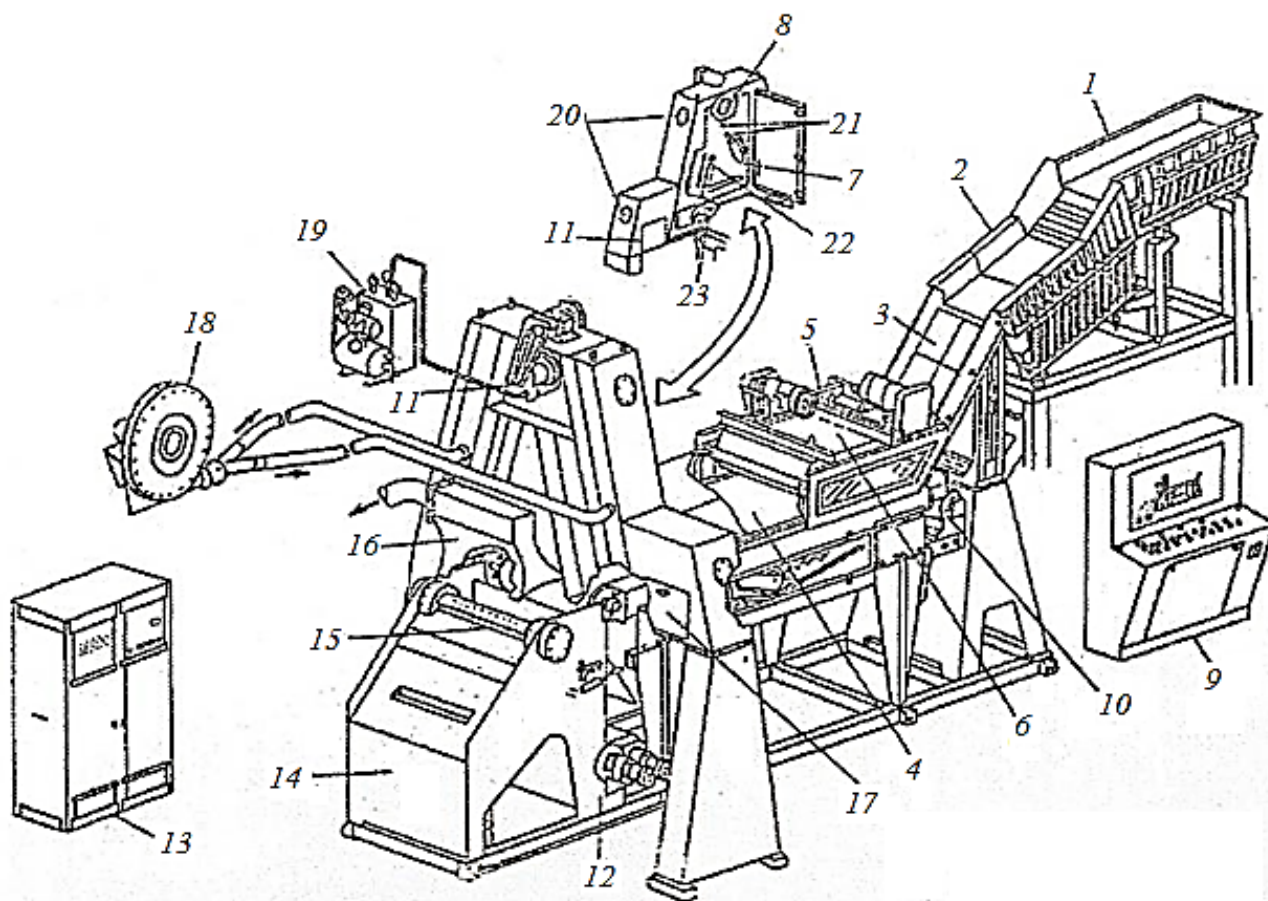


Рис. 8.12. Фотометрический лазерный сепаратор М-16:

1, 2 – вибрационные питатели; 3 – ускоряющая (наклонная) плита; 4 – конвейер; 5 – ускоряющий ролик; 6 – стабилизирующая лента; 7 – лазерный источник излучения; 8 – вращающееся многогранное зеркало; 9 – пульт оператора (панель управления); 10 – устройство очистки ленты конвейера; 11 – каркас оптической системы; 12 – фоновый чёрный стандарт; 13 – процессор; 14 – узел разделения материала воздушной струёй; 15 – воздухопровод; 16 – воздухосборник; 17 – узел вращающегося устройства; 18 – воздухоподающее устройство; 19 – блок подачи воздуха к зеркалу; 20 – отверстия для вывода кабеля; 21 – визир; 22 – фотоумножитель; 23 – «белый» стандарт

Существенно усложнились функции электронной системы, которая помимо измерения оптических характеристик кусков определяет также их размер и положение на ленте. Данная информация важна для синхронизации прохождения куска через зону удаления и самого удаляющего воздействия. Для удаления, в зависимости от крупности материала, применено от 40 до 80 клапанов.

Производительность сепаратора по классам, т/ч:

-45+20 мм	40;
-80+45 мм	80;
-150+80 мм	140.

Расход электроэнергии, кВт·ч/т – 1.

Расход сжатого воздуха, м³ на тонну выделяемого продукта – 42.

Эта же фирма изготовила сепараторы для реализации других методов.

В настоящее время фотометрические сепараторы нового поколения выпускаются за рубежом начиная с конца 1990-х годов. Сепараторы OptoSort производства компании AIS Sommer и сепараторы MicroSort компании Mogensen, в отличие от фотометрических сепараторов прошлых лет, монохромных и бихроматических, являются полихромными. Все сепараторы имеют монослойную подачу материала. Они могут иметь одно- и двухсторонний осмотр, работать в отражённом или прошедшем свете и в люминесцентном варианте.

Сущность технологии Mikrosort[®] поясняется на рис. 8.13, устройство и принцип работы оптического сепаратора наглядно показаны на рис. 8.14.

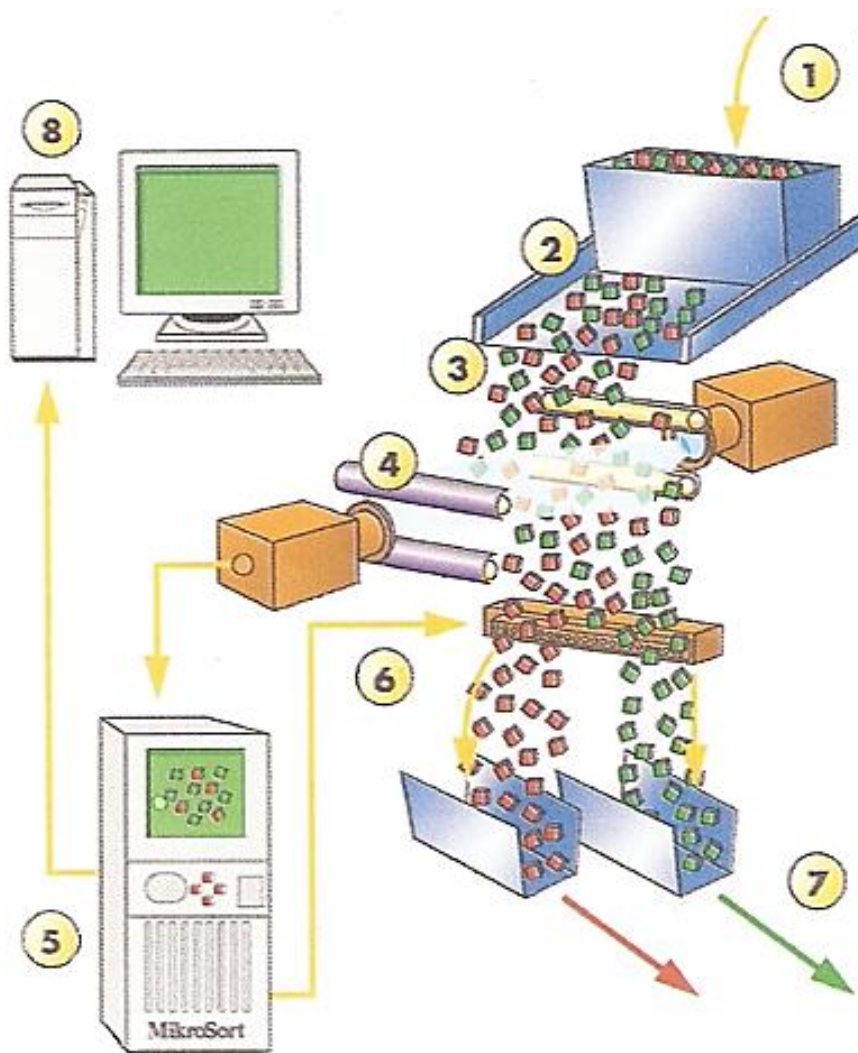


Рис. 8.13. Сущность технологии Mikrosort[®]

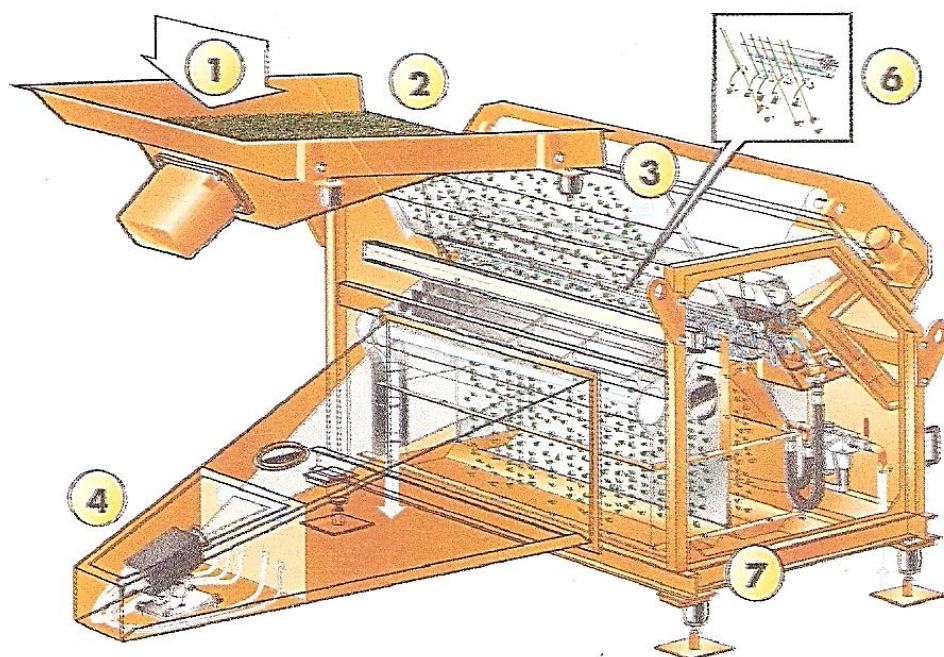


Рис. 8.14. Устройство и принцип работы оптического сепаратора

На рис. 8.13, 8.14 цифрами обозначены функции отдельных элементов и систем работающего по этому принципу сепаратора:

- 1 – обработка потока продукта: предварительное грохочение, обеспыливание и т. д.;
- 2 – распределение частиц по поверхности вибропитателя;
- 3 – свободное падение частиц;
- 4 – сканирование «завесы» потока материала оптической системой с высокой разрешающей способностью;
- 5 – обработка информации, принятие решения об удалении и управление процессом удаления;
- 6 – выделение продуктов при помощи высокоточных импульсных пневмоклапанов;
- 7 – разделение потоков готовых продуктов;
- 8 – обработка и накопление полученных данных (Field-bus Network Interface).

Исходный материал вибропитателем (модифицированный грохот, обеспечивающий подачу питания и отсеивание мелочи) подаётся либо на ленту (ленточный сепаратор), либо на дополнительный вибропитатель (гравитационный сепаратор). И на ленте, и на вибропитателе формируется монослой с коэффициентом загрузки 0,3-0,4. Лентой материал разгоняется для создания стабильной траектории полёта в области распознавания, а с вибропитателя материал свободно падает в область

распознавания. В зоне распознавания материал сканируется высокоскоростной камерой. Сигналы сенсоров обрабатываются компьютерами, и при принятии решения об удалении компьютеры включают нужную группу пневмоклапанов.

Производительности оптических сепараторов для различных классов крупности приведены в табл. 8.13.

Таблица 8.13

Характеристика оптических сепараторов

Модель сепаратора	Ширина полосы подачи материала, мм	Крупность материала, мм	Производительность, т/ч
Optosort μ GemStar	300	-15+0,5	0,3-1
Optosort GemStar 600R	600	-3+1	1,5
		-6+3	5
		-12+6	10
		-30+12	17
Commodas ConcSort 600 Mikrosort [®] ConcSort 600	600	1,5-40	2-20
Optosort BeltCompact 1200	1200	-6+3	12
		-12+6	23
		-30+12	56
		-60+30	110
Optosort 1200 P30	1200	3-32	2-25
Optosort 1200 P60	1200	8-60	10-100
Commodas Secondary Optical 1200	1200	20-80	до 100
Optosort Gravity 1200	1200	-60+30	35
		-150+60	65
		-350+150	200
Commodas Primary Optical 1200	1200	8-300	до 400
Mikrosort [®] Primary Optical 1200	1200	8-300	до 400
Optosort 1200 P60V	1200	4-60	2-25
Optosort 1200 P200V	1200	10-250	10-300
Optosort Gravity 1800	1800	-60+30	50
		-150+60	120
		-350+150	280

Современные оптические сепараторы предназначены для разделения руд по цветовым характеристикам, форме и симметричности частиц. Освещение частиц осуществляется тремя монохромными свето-

диодами (красное, голубое, зеленое свечение). Измерение оптических и геометрических параметров частиц в данных сепараторах осуществляется цифровой строчной широкополосной камерой (ПЗС-матрицей). Для контролируемого объёма (кусок или фрагмент куска) производится определение трёхцветных координат в системе RGB. Кроме того, возможно учесть несколько других оптических и геометрических признаков разделения с логическими функциями «и», «или» и «нет». Минимальная площадь оцениваемых фрагментов $0,3 \times 0,3$ мм. Кусок в целом (объект сортировки) путём математической обработки изображения оконтуривается, измеряются его морфологические признаки, что позволяет усилить уверенное распознавание минералов и оценить их условное содержание в куске, определяется его площадь, классифицируется форма и симметрия.

Все измеренные признаки для выделенного объекта (куска) могут объединяться логическими функциями в единый алгоритм принятия решения об удалении.

Благодаря позиционированию положения кусков в пространстве и оценке их геометрических характеристик, подаётся команда на открытие пневматических клапанов, расположенных по траектории движения частицы. Количество включаемых клапанов и время воздействия воздушной среды определяются геометрическими характеристиками куска.

8.3.10. Унификация сепараторов и комплексирование признаков разделения

Commodas UltraSort является подразделением компании TOMRA Sorting Solutions. Начиная с 1990-х годов компанией разработано много различных сепараторов с использованием разделительных признаков, таких как: цветовые характеристики и прозрачность; фотометрические (отражательный и абсорбционный); параметры рентгеновской люминесценции (рентгенолюминесцентный метод); удельная атомная плотность (рентгеновской двойной плотности – рентгеноабсорбционный метод); интенсивность γ -излучения при естественной радиоактивности (радиометрический метод); проводимость (радиорезонансный метод); оптические свойства в ближней ИК-области (инфракрасный метод). Компания также предлагает мультисенсорные сепараторы для комплексной сортировки по алгоритмам, сочетающим три признака разделения: рентгеновские, цветовые, электромагнитные.

Промышленные сортировочные машины для сортировки рудного сырья выпускаются в трёх сериях: Run-of-Mine (ROM) Series с усиленной мощной системой питания и транспортировки с крупностью питания -300+5 мм (могут оснащаться радиометрической, фотометрической, электромагнитной, рентгеновской и инфракрасной технологиями); Industrial Processing (PRO) Series для стандартной обработки материалов с разделением в падении частиц крупностью -300+3 мм (могут быть дополнительно оснащены цветовой, рентгеновской и инфракрасной технологиями); Gem (Gem) Series представляет собой специализированное оборудование для обогащения алмазов и других драгоценных камней (могут быть оснащены рентгенолюминесцентной, рентгеноабсорбционной и цветовой технологиями).

В каждой серии несколько моделей аппаратов.

В табл. 8.14 приведены характеристики двух моделей сепараторов этой серии. Они оснащены электромагнитной и оптической сенсорными системами.

Таблица 8.14

Технические характеристики сепараторов серии ROM Series EM

Показатель	ROM Secondary EM (Ultrasort Secondary EM)	ROM Primary EM (Ultrasort Primary EM)
Крупность, мм	6-65	40-250
Производительность (до), т/ч	60	250
Размеры (без питателей) ($L \times B \times H$), мм	4975×1685×3075	5650×2156×4332
Размеры (с питателями) ($L \times B \times H$), мм	7899×1685×3218	13487×2156×4332
Масса, кг	8000	20000
Потребляемая мощность, кВт	Одна и три фазы (около 10)	Одна и три фазы (около 12)
Сжатый воздух, м ³ /т концентрата	30	30
Система отсечки	Быстродействующая воздушная система отсечки	Быстродействующая воздушная система отсечки

МПП «Промтехнологии» (Украина) разработала модуль кусковой сортировки, использующий СВЧ-нагрев сортируемого материала и контроль инфракрасного излучения от кусков сырья с помощью тепловизора. Электрические и теплофизические свойства разделяемых фаз определяют температуру поверхности отдельных кусков, которая фикс-

сируется тепловизорными сенсорами. Схема модуля приведена на рис. 8.15.

Исходное сырьё крупностью $-100+10$ мм загружается в приёмный бункер. Оттуда конвейерным питателем подаётся на раскладчик с вибратором, который обеспечивает формирование монослоя кусков. Конвейером сырьё перемещается в СВЧ-камеру, где осуществляется нагрев сырья в потоке. Температура кусков контролируется тепловизором. Пневмоклапаны разделяют сырьё на продукты.

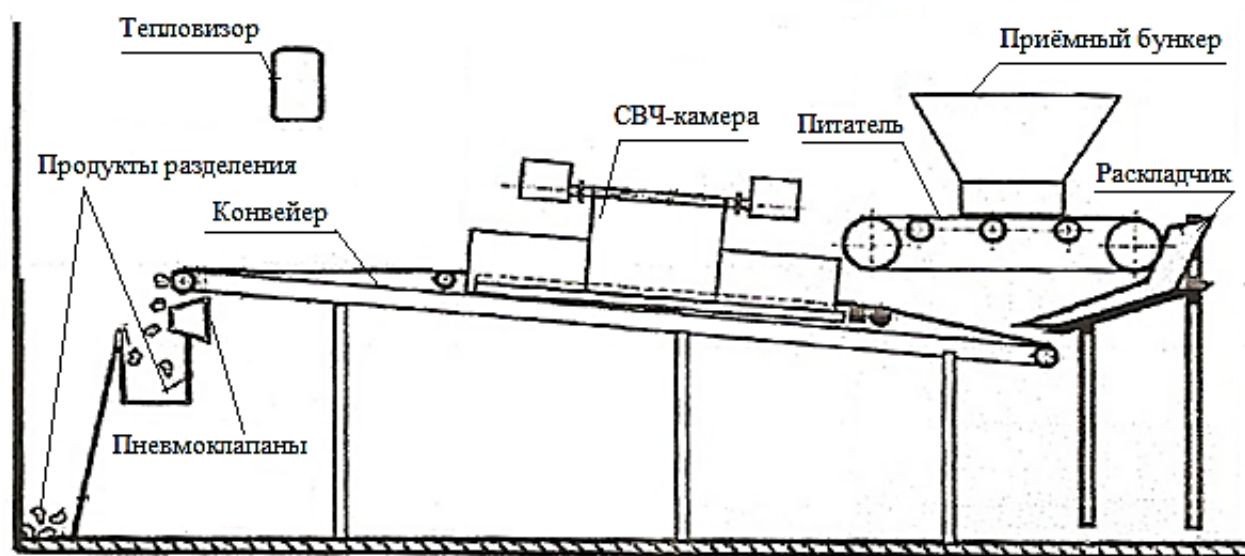


Рис. 8.15. Схема СВЧ-термометрического модуля

Технические характеристики установки:

- производительность по исходному сырью (крупностью $-60+40$ мм) – 30 т/ч;
- установленная электрическая мощность – 35 кВт;
- расход сжатого воздуха – 2200 л/мин;
- модуль размещается в контейнере размером $6,0 \times 3,0 \times 2,8$ м.

Модуль дополнительно оснащён компрессорной станцией и системой очистки воздуха.

Аппаратура испытана на различных феррошлаках, марганцевых и железных рудах.

9. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФОРМАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

Следует различать следующие группы факторов, определяющих результаты информационного обогащения:

- обогатимость по признакам информационного разделения;
- горно-геологические;
- физико-механические;
- технологические;
- радиологические;
- технические.

Свойства горно-рудной массы, определяющие возможность использования методов информационного обогащения, можно рассматривать как результат совместного воздействия состава и свойств рудного целика, процесса его дезинтеграции и первичной обработки на обогатительной фабрике. Разъединение рудной и нерудной масс происходит при дезинтеграции. Однако оно может проявиться лишь при неравномерном распределении ценного компонента в рудном теле и становится возможным при определенных текстурно-структурных свойствах руд и контурах рудного тела. При современных производительных неселективных способах отработки месторождений область применения таких методов существенно расширяется. Это происходит благодаря попаданию в отбитую горную массу нерудных образований, входящих в контуры выемки. Чем больше масса таких нерудных образований, тем больше нерудных кусков в отбитой руде, тем выше неоднородность порций кусков по содержанию ценного компонента, тем предпочтительней его обогащение информационными методами. На контактах рудных и нерудных образований при дезинтеграции целика образуются сростки руды и породы. Наличие сростков уменьшает неоднородность порций (кусков), снижает ее обогатимость. Чем больше соотношение поверхности рудного тела к его объему, тем выше доля сростков в отбитой руде. Это отношение зависит от формы рудного тела, т. е. от его морфологии, которая, в свою очередь, определяет систему разработки месторождения, а следовательно, и степень разубоживания руды при добыче. С увеличением разубоживания повышается потенциальная обогатимость.

Способы отбойки горной массы также влияют на результаты обогащения. Так, частота буровзрывных скважин регулирует гранулометрический состав руды.

Другая группа факторов, влияющих на обогатимость, включает физико-механические свойства рудного целика: крепость, степень трещиноватости горных пород и минералов. Чем крепче породы, тем больше кускового материала может быть подвергнуто обогащению. При избирательном разрушении предпочтительным случаем является тот, когда меньшей прочностью обладают полезные минералы. Это приводит к обеднению сортируемых классов и увеличению выхода хвостов.

К технологическим факторам относятся, с одной стороны, способы и режимы первичного дробления материала, эффективность грохочения, шкала грохочения, с другой – способы интенсификации различий рудных и нерудных кусков в радиометрических свойствах (промывка, очистка поверхности, направленное изменение поверхностных свойств рудных минералов). На основании анализа этой группы факторов формируется технологическая схема, выбираются режимы обогащения.

Неповторимость сочетаний рудных и нерудных минералов в горной массе, различие в физических свойствах минералов и горных пород придают особую важность группе радиологических факторов. В результате их изучения осуществляется выбор определенных оптимальных методов, синтезируются новые методы.

К техническим факторам можно отнести характеристики используемого оборудования: точность разделения, производительность, допустимые пределы крупности обогащаемого материала, перестраиваемость сепараторов на те или иные руды.

10. ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

10.1. Принципиальные схемы обогащения

Применение информационного обогащения в стадиях рудоподготовки позволяет решать различные технологические задачи.

На рис. 10.1-10.4 приведены примеры принципиальных технологических схем обогащения крупнокусковых материалов. На всех приведённых принципиальных схемах операция «Обогащение ИМ» осуществляется посредством информационных методов обогащения.

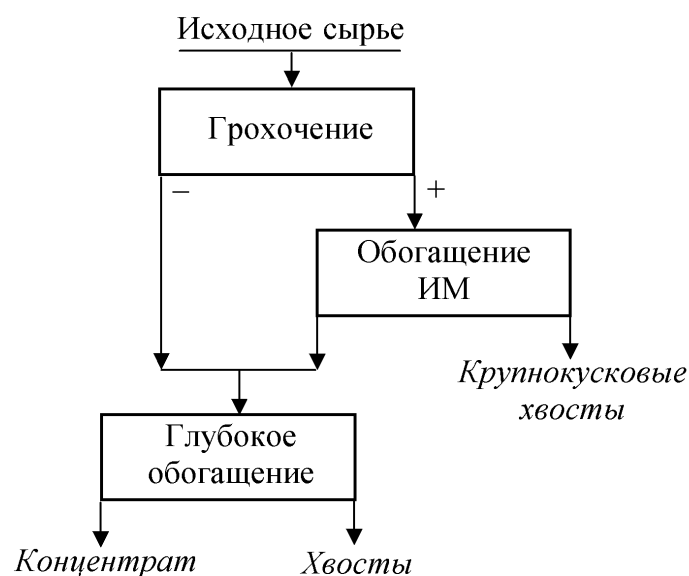


Рис. 10.1. Типовая принципиальная схема предварительного обогащения информационными методами крупных классов и совместного глубокого обогащения концентрата предварительного обогащения и несортируемого класса

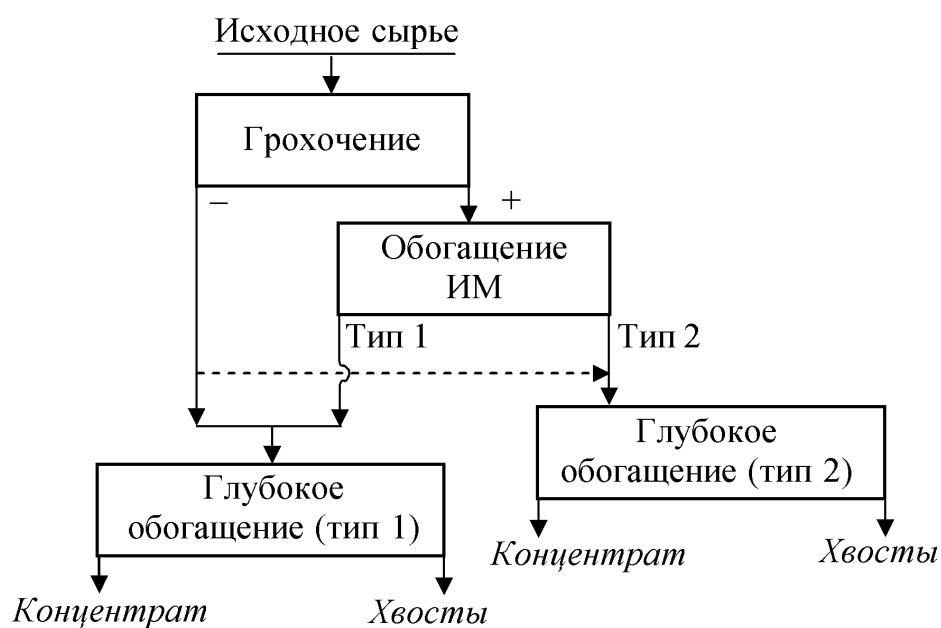


Рис. 10.2. Типовая принципиальная схема разделения сырья в рудоподготовительной стадии на технологические типы информационными методами с их последующим обогащением по различным технологиям

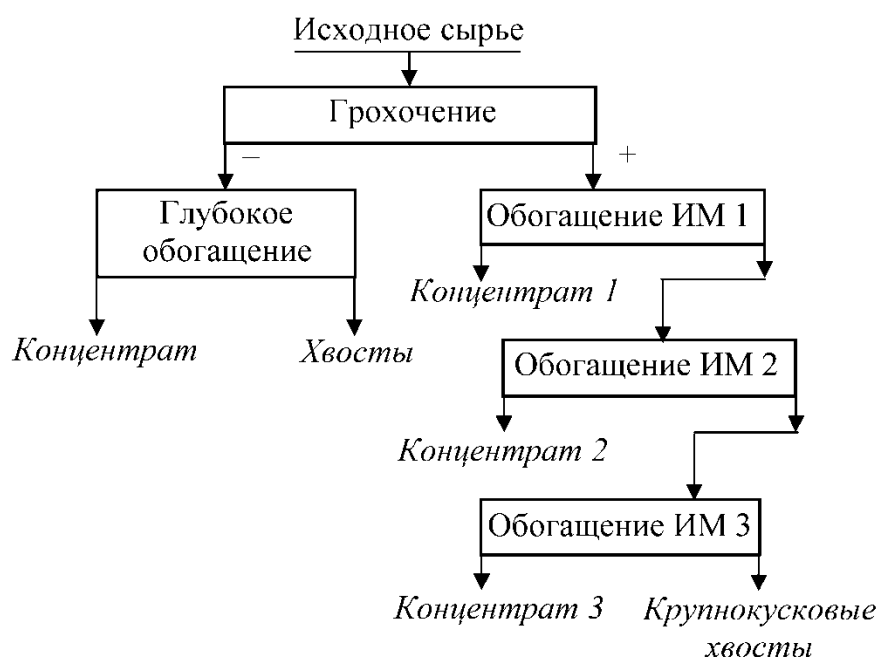


Рис. 10.3. Типовая принципиальная схема получения крупнокусковых концентратов и хвостов в рудоподготовительной стадии информационными методами

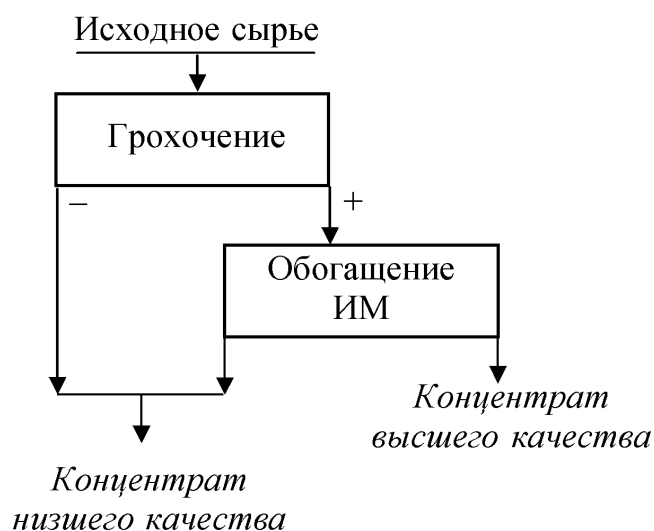


Рис. 10.4. Типовая принципиальная схема получения кусковых концентратов повышенного качества информационными методами

Решаемые технологические задачи:

- удаление породной массы в крупнокусковом виде (предварительная концентрация) – рис. 10.1;
- разделение на технологические типы и сорта, перерабатываемые в дальнейшем (глубокое обогащение 1 и 2) по различным технологическим схемам и режимам (рис. 10.2);

- выделение крупнокусковых концентратов из руд для плавки (хромовые, марганцевые, железные руды) или сортировка отходов металлургических производств (шлаков, огнеупоров) с получением отдельных концентратов их разновидностей (рис. 10.3);

- удаление вредных для последующих технологий компонентов, пород и минералов (рис. 10.4).

В комбинированных схемах обогащения процессы информационного разделения, наряду с любыми другими обогатительными процессами, могут выполнять функции основных, перечистных, доводочных, контрольных и межцикловых операций.

Для информационных процессов с покусковым режимом обязательно выделение несортируемых классов, которые обогащаются в дальнейшем совместно с одним из полученных продуктов обогащения более крупных классов либо перерабатываются отдельно.

Во всех схемах при грохочении может быть выделен не один, а несколько машинных классов, каждый из которых обогащается на аппаратах различных типоразмеров.

Использование информационных процессов разделения перед обогащением на несколько машинных классов – общепринятый технологический приём. Модуль шкалы грохочения может меняться в зависимости от требуемой точности разделения, ценности сырья, типоразмеров сепарационного оборудования.

Сортировка в порционных режимах не требует разделения на машинные классы и выделения несортируемого класса.

10.2. Руды чёрных металлов

Железные руды

Применительно к титаномагнетитовым рудам Гусевгорского месторождения можно рассматривать как перспективную задачу с использованием рентгенорадиометрической сепарации разделение их на технологические типы, существенно отличающиеся содержанием ванадия. Разделение ведётся либо на исходной руде, либо в мелкопорционном режиме на несортируемом классе, выделенном перед покусковой сепарацией.

На фабриках для обогащения окисленных руд Кривбасса, начиная с 70-х годов, использовалась гамма-абсорбционная сепарация.

Испытания, проведённые на сидеритовой руде Бакальского месторождения, показали, что на фоне снижения содержания железа в руде

(до 26 %) повышение качества руды может быть достигнуто за счёт применения рентгенофлуоресцентной сепарации (табл. 10.1).

Таблица 10.1

**Результаты испытаний по обогащению сидеритовой руды
Бакальского месторождения методом РРС на сепараторе СРФ**

Крупность, мм	Продукт	Выход продуктов, %		Содержа- ние Fe _{общ} %	Извлечение, %	
		к клас- су	к руде		к классу	к руде
150-300	Обогащённый	79,5	17,73	34,0	90,8	22,7
	Хвосты	20,5	4,57	13,4	9,2	2,3
	Исходный класс	100,0	22,30	27,4	100,0	25,0
40-150	Обогащённый	55,4	17,28	33,8	68,8	22,0
	Хвосты	44,6	13,92	19,0	31,2	10,0
	Исходный класс	100,0	31,20	27,2	100,0	32,0
20-40	Обогащённый	57,1	6,22	33,7	71,5	7,9
	Хвосты	42,9	4,68	17,9	28,5	3,2
	Исходный класс	100,0	10,90	26,9	100,0	11,1
20-300	Обогащённый	64,1	41,23	33,8	77,6	52,6
	Хвосты	35,9	23,17	17,7	22,4	15,5
	Итого	100,0	64,40	28,1	100,0	68,1
0-20	Несортируемый класс	-	35,60	23,8	-	31,9
	Всего	-	100,0	26,5	-	100,0

Марганцевые руды

Обогащение марганцевых руд в стадиях рудоподготовки занимает особое место в технологии их обогащения в целом.

При обогащении марганцевых руд для получения кусковых концентратов применяют промывку, информационные процессы, обогащение в тяжёлых средах, отсадку (+10 мм). Для марганцевых руд из информационных методов наиболее приемлемы рентгенофлуоресцентный, рентгеноабсорбционный, фотометрический, рентгенолюминесцентный.

При разделении смешанных руд Никопольского месторождения фотометрической сепарацией (по данным исследований ВИМСа) получают оксидный концентрат с содержанием 50 % Mn и карбонатный концентрат с содержанием 27 % Mn при общем извлечении Mn 61,8 %. Из карбонатных руд Тыньинского месторождения рентгенорадиометрической и фотометрической сепарацией получен концентрат с содер-

жанием 30 % Mn при извлечении 72,6 %. Схемы с использованием информационных методов для руд Порожинского месторождения приведены на рис. 10.5, 10.6.

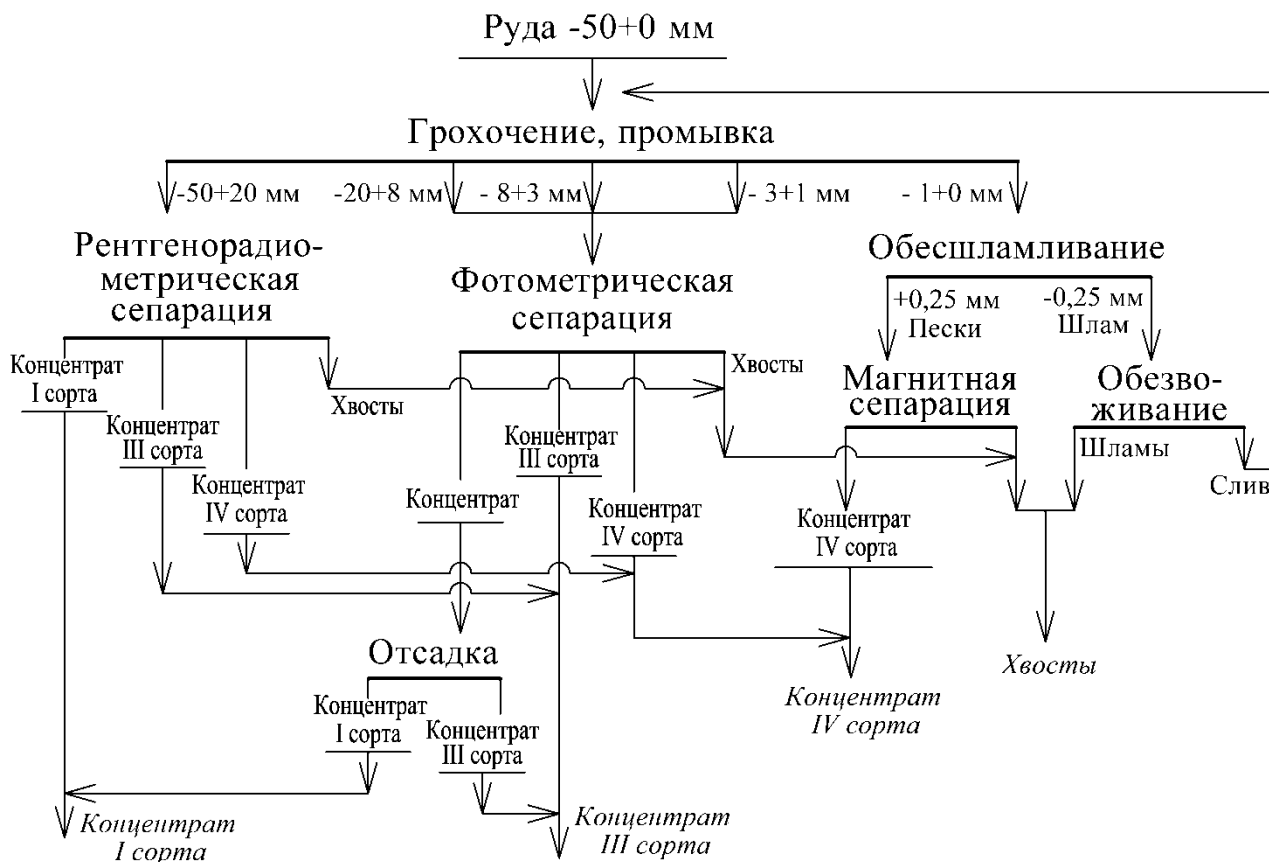


Рис. 10.5. Технологическая схема переработки малофосфористых руд Порожинского месторождения по полному циклу крупнокускового и глубокого обогащения с использованием информационных, гравитационных и магнитных методов

Следует отметить, что для повышения эффективности обогащения в схемах применены несколько разновидностей информационных методов.

Технологические показатели обогащения марганцевых руд с получением товарных концентратов различными информационными методами приведены в табл. 10.2, где ФММ – фотометрический метод; РРМ – рентгенорадиометрический метод; РЛМ – рентгенолюминесцентный метод.

Для переработки марганцевого сырья Усинского месторождения предложены технологии, использующие рентгеноабсорбционную сепарацию в узких классах крупности 4-10, 10-20, 20-50, 50-100 мм на основании результатов технологических испытаний, представленных в табл. 10.3.

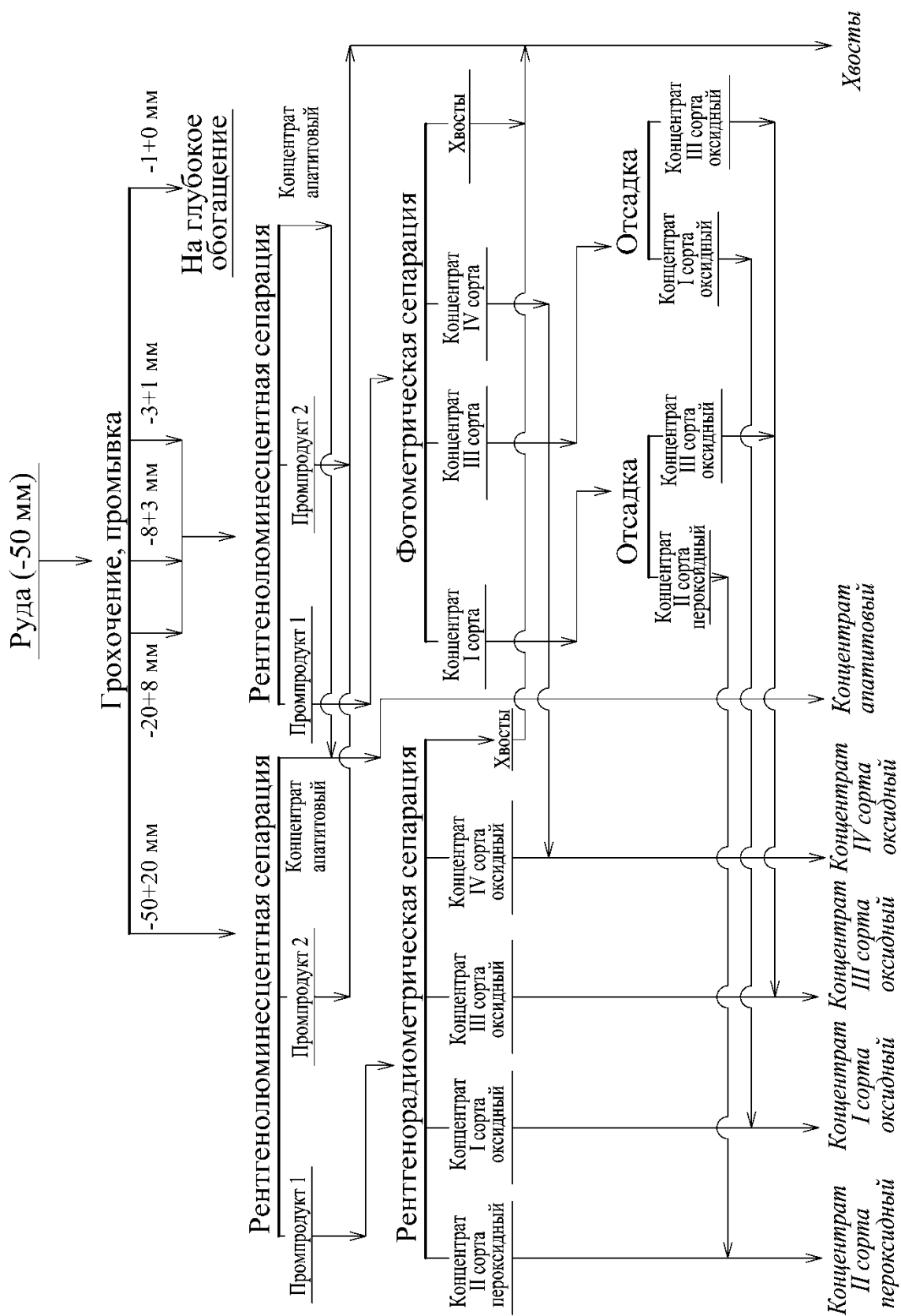


Рис. 10.6. Схема информационно-гравитационного обогащения фосфористых руд Порожинского месторождения

Таблица 10.2

**Показатели информационной сепарации
при получении товарных марганцевых концентратов**

Месторождение	Метод сепарации	Показатели сепарации, %			
		содержание Mn в исходном	выход концентрата	содержание Mn в концентрате	извлечение Mn в концентрат
Никопольское	ФММ	23,7	13,5 (окс.) 29,0 (карб.)	50,5 27,0	28,8 33,0
Порожинское: малофосфористые фосфористые	РРМ, ФММ	17,39 18,07	11,12; 14,61 20,39; 9,59	40,06; 28,63 45,26; 25,27	27,21; 25 51,12; 13
Николаевское (-75+10 мм)	РРМ	35,34	8,35; 30,35	55,08; 50,98	13,01; 43
Рудное (-30+20 мм)	РРМ	16,94	19,53	43,23	48,8
Сунгайское (-5+3 мм)	ФММ	19,51	35,6	34,64	52,9
Дурновское	ФММ	30,43	26,96	45,26	40,1
Южно-Хинганское (-50+30 мм)	РРМ	20,5	11,0; 15,0	42,73; 36,21	22,93; 26
Усинское	РРМ	20,15	14,46; 12,28	37,69; 33,48	27,05; 20
Тынбинское (-70+8 мм)	РРМ, РЛМ	25,5	60,9	30,4	72,6

Таблица 10.3

Результаты технологических испытаний по сепарации марганцевых руд Усинского месторождения на рентгеноабсорбционном сепараторе «PROSecondary / TertiaryXRT»

Класс крупности руды, мм	Наименование продукта (сорт концентрата)	Выход продукта от класса, %	Содержание Mn _{общ} , %	Извлечение от класса Mn _{общ} , %	Производительность сепаратора по исходному питанию в зависимости от ширины питателя, т/ч	
					600 мм (при испытаниях)	1200 мм (промышленный сепаратор)
Окисленная руда						
-100+50	Концентрат (1)	26,6	38,76	41,2	-	-
	Концентрат (2)	56,8	23,90	54,3	21,1*	42,2*
	Хвосты	16,6	6,79	4,5	26,0**	52,0**
Исходный класс		100	25,01	100,0	-	-
-50+20	Концентрат (1)	21,4	39,83	27,1	-	-

Окончание табл. 10.3

Класс крупности руды, мм	Наименование продукта (сорт концентрата)	Выход продукта от класса, %	Содержание $Mn_{общ}$, %	Извлечение от класса $Mn_{общ}$, %	Производительность сепаратора по исходному питанию в зависимости от ширины питателя, т/ч	
					600 мм (при испытаниях)	1200 мм (промышленный сепаратор)
	Концентрат (2) Хвосты	63,6 15,0	33,98 8,87	68,7 4,2	14,5* 25,4**	29,0* 50,8**
Исходный класс		100	31,47	100,0	-	-
-20+10	Концентрат (1)	14,8	40,86	17,7	-	-
	Концентрат (2)	67,8	36,68	72,8	4,5*	9,0*
	Хвосты	17,4	18,80	9,5	7,1**	14,2**
Исходный класс		100	34,18	100,0	-	-
-10+4	Концентрат (1)	88,7	36,03	91,0	-	-
	Концентрат (2)	11,3	27,85	9,0	3,9*	-
Исходный класс		100	35,11	100	-	-
Карбонатная руда						
-100+50	Концентрат (1)	12,35	34,27	21,3	-	-
	Концентрат (2)	41,98	29,98	63,2	35,2*	70,4*
	Хвосты	45,67	6,76	15,5	31,4**	62,8**
Исходный класс		100,0	19,91	100,0	-	-
-50+20	Концентрат (1)	14,9	34,08	25,0	-	-
	Концентрат (2)	41,0	29,47	59,4	21,6*	43,2*
	Хвосты	44,1	7,19	15,6	17,6**	35,2**
Исходный класс		100,0	20,33	100,0	-	-
-20+10	Концентрат (1)	10,3	37,13	14,0	-	-
	Концентрат (2)	43,4	33,57	53,5	6,6*	13,2*
	Хвосты	46,3	19,10	32,5	6,7**	13,4**
Исходный класс		100,0	27,24	100,0	-	-
-10+4	Концентрат (2)	55,6	26,68	67,0	-	-
	Хвосты	44,4	16,46	33,0	3,5**	5,3** (ширина питателя 900 мм)
Исходный класс		100,0	22,14	100,0	-	-

* Производительность по исходному питанию при разделении на сорта.

** Производительность по исходному питанию при выделении хвостов.

Хромовые руды

При обогащении бедных хромовых руд глубокое обогащение гравитационными методами может сочетаться с рентгенофлуоресцентной сепарацией, осуществляемой в стадии предварительного обогащения.

Рентгенофлуоресцентная сепарация проводится в двух-трёх машинных классах. Она позволяет выделить отвальные хвосты, а её концентраты после объединения с несортируемым классом направляются на измельчение и глубокое обогащение. Результаты исследований рентгенорадиометрической обогатимости хромовой руды Курмановского месторождения на сепараторах СРФ-4-150 (ООО «РАДОС») представлены в табл. 10.4.

Таблица 10.4

**Результаты испытаний
рентгенорадиометрической сепарации хромовой руды**

Продукт	Выход, %		Содержание Cr ₂ O ₃ , %	Извлечение Cr ₂ O ₃ , %
	от операции	сквозной		
Класс крупности 40-90 мм				
Концентрат	44,2	22,2	20,2	73,3
Промпродукт 1	11,1	5,5	12,6	11,4
Промпродукт 2	13,7	6,9	9,5	10,7
Хвосты	31,0	15,5	1,8	4,6
Итого по классу 40-90 мм	100,0	50,1	12,2	100,0
Класс крупности 20-40 мм				
Концентрат	32,4	7,9	17,6	59,4
Промпродукт	23,5	5,8	8,9	21,8
Хвосты	44,1	10,8	4,1	18,8
Итого по классу 20-40 мм	100,0	24,5	9,6	100,0
Сортируемые классы 20-90 мм				
Концентрат	40,3	30,1	19,5	69,4
Промпродукт	15,2	11,3	10,3	22,1
Хвосты	44,5	33,2	2,7	8,5
Итого по классу 20-90 мм	100,0	74,6	11,3	100,0
Несортируемый класс 0-20 мм				
Класс крупности 0-20 мм	-	25,4	12,1	26,6
Итоговые результаты обогащения хромовой руды крупностью 0-90 мм				
Концентрат	66,8	66,8	16,2	93,7
Хвосты	33,2	33,2	2,7	6,3
Исходная руда	100,0	100,0	11,5	100,0

Использование рентгенорадиометрического метода сепарации позволяет получить товарные хромовые концентраты из руд Центрального и Хойлинского месторождений (табл. 10.5).

Таблица 10.5

**Показатели рентгенорадиометрической сепарации хромовых руд
с получением товарных концентратов**

Месторождение	Метод сепарации	Показатели сепарации, %			
		содержание Cr_2O_3 в исходном	выход концентрата	содержание Cr_2O_3 в концентрате	извлечение Cr_2O_3
Центральное	РРМ	40,91	47,74	48,05	56,05
		32,33	18,04	47,96	26,72
		23,37	24,95	48,21	51,47
Хойлинское (-100+20 мм)	РРМ	39,08	14,5	45,17	16,8

Таким образом, обогащение руд чёрных металлов с использованием информационных методов сепарации позволяет решать как технологическую задачу предварительного обогащения с удалением хвостов, так и получение готовых кусковых концентратов.

10.3. Руды цветных, редких и благородных металлов

Свинцовые, свинцово-цинковые и полиметаллические руды

Высокие показатели получают при обогащении свинцово-цинковых руд рентгенофлуоресцентным методом.

С использованием рентгенорадиометрического метода можно получать товарные свинцовые концентраты (табл. 10.6).

Испытания рентгенорадиометрической сепарации бедных, рядовых и забалансовых свинцово-цинковых руд месторождения «Учкулач» (табл. 10.7), с которым связаны перспективы развития сырьевой базы для Алмалыкского ГМК, проведены на рентгенорадиометрических сепараторах «Интегра».

Полученные результаты указывают на целесообразность их предварительного обогащения рентгенорадиометрическим методом.

Таблица 10.6

**Показатели рентгенорадиометрической сепарации свинцовых руд
с получением товарных концентратов**

Месторождение	Показатели сепарации, %			
	содержание Pb в исходной руде	выход концентрата	содержание Pb в концентрате	извлечение Pb
Горевское (-100+50 мм)	5,98	9,9	28,4	47,0
Цав (-50+30 мм)	8,31	17,3	28,62	59,6

Таблица 10.7

**Показатели обогащения свинцово-цинковых руд
рентгенорадиометрической сепарацией**

Наименование продуктов	Выход, %	Содержа- ние, %		Извлече- ние, %		Кoeffици- ент обога- щения, отн. ед.	
		Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
Забалансовые руды							
Исходная руда	100,0	0,43	0,58	100,0	100,0	1,00	1,00
Класс крупности -10 мм	20,0	0,43	0,58	20,0	20,0	1,00	1,00
Класс крупности -200+25 мм							
Pb-Zn концентрат сортировки класса крупности -200+25 мм	15,0	1,40	1,80	49,8	46,4	3,26	3,10
Отвальный продукт сортировки класса крупности -200+25 мм	65,0	0,20	0,30	30,2	33,6		
Бедные балансовые руды							
Исходная руда	100,0	1,50	1,55	100,0	100,0	1,00	1,00
Класс крупности -10 мм	25,0	1,50	1,55	25,0	25,0	1,00	1,00
Класс крупности -200+25 мм	75,0	1,50	1,55	75,0	75,0	1,00	1,00
Pb-Zn концентрат сортировки класса крупности -200+25 мм	20,0	4,80	4,90	64,0	64,0	3,20	3,22
Отвальный продукт сортировки класса крупности -200+25 мм	55,0	0,30	0,30	11,0	10,6		
Объединённый обогащённый продукт (класс крупности -25 мм и концентрат сортировки класса крупности -200+25 мм)	45,0	3,00	зд	89,0	89,4	2,00	2,00
Рядовые балансовые руды							
Исходная руда	100,0	1,80	1,90	100,0	100,0	1,00	1,00
Класс крупности -10 мм	25,0	1,80	1,90	25,0	25,0	1,00	1,00
Класс крупности -200+25 мм	75,0	1,80	1,90	75,0	75,0	1,00	1,00
Pb-Zn концентрат сортировки класса крупности -200+25 мм	30,0	4,00	4,25	66,7	67,1	2,22	2,24
Отвальный продукт сортировки класса крупности -200+25 мм	45,0	0,33	0,33	8,3	7,9		
Объединённый обогащённый продукт (класс крупности -25 мм и концентрат сортировки класса крупности -200+25 мм)	55,0	3,00	3,20	91,7	92,1	1,67	1,68

Медные, медно-цинковые руды

В 90-е годы прошлого века доказана возможность предварительного обогащения медных и медно-цинковых руд ряда месторождений Советского Союза с использованием рентгенофлуоресцентного метода сепарации. Крупнотоннажные испытания рентгенорадиометрической сепарации были проведены в Кольском филиале института «Механобр», в частности на рудах Гайского месторождения, в 1991 году. При этом технологическая задача заключалась в выделении крупнокусковых отвальных хвостов.

Перед испытаниями руду дробили по крупности $-50+0$ мм, грохочением выделяли сортируемый класс $-50+25$ мм.

Материал класса $-50+25$ мм поступал на рентгенорадиометрическую сепарацию, которую осуществляли на установке, собранной на базе макета 4-канального рентгенорадиометрического сепаратора РРС-50, разработанного НПО «Сибцветметавтоматика», прообразы ныне производимых сепараторов типа СРФ ОАО «РАДОС». Результаты сепарации представлены в табл. 10.8.

Полученные результаты указывают на принципиальную возможность применения предварительной концентрации руд Гайского месторождения рентгенорадиометрическим методом. Для оценки её влияния на показатели традиционного обогащения выполнены технологические флотационные испытания исходных руд и черновых концентратов, представляющих смесь соответствующего концентрата сепарации и несортируемого класса в условиях непрерывного процесса по технологическим схемам, применяемым на Гайской обогатительной фабрике.

Результаты флотационных опытов (табл. 10.9) показывают, что технологические показатели, получаемые при обогащении медной руды с использованием предварительной концентрации, несколько выше показателей флотационного обогащения исходной руды.

При флотации чернового концентрата возрастает извлечение меди в медный концентрат от операции на 1,9 %, серы в пиритный концентрат на 6 %. При этом сквозное извлечение меди увеличивается на 0,5 %, серы – на 2,8 %. При использовании комбинированной технологии выход отвальных крупнокусковых хвостов составил 9,5 % при потерях в них 1,4 % Cu, 1,6 % Zn, 4,1 % S.

Таблица 10.8

Результаты крупнотоннажных испытаний рентгенорадиометрической сепарации руд Гайского месторождения подземной добычи

Продукт	Выход, %		Массовая доля, %			Извлечение, %		
	к операции	к руде	Cu	Zn	S	Cu	Zn	S
Медная руда								
Концентрат сепарации	84,1	50,46	1,92	0,64	31,25	63,7	56,6	59,4
Хвосты сепарации	15,9	9,54	0,19	0,11	10,44	1,2	1,8	3,7
Питание сепарации	100,0	60,00	1,64	0,56	27,94	64,9	58,4	63,1
Несортируемый класс		40,00	1,34	0,58	24,50	35,1	11,6	36,9
Черновой концентрат		90,46	1,66	0,61	28,27	98,8	98,2	96,3
Исходная руда		100,00	1,52	0,57	26,56	100,0	100,0	100,0
Медно-цинковая руда								
Концентрат сепарации	65,5	39,3	3,61	1,98	24,65	64,5	59,8	51,8
Хвосты сепарации	34,5	20,7	0,19	0,08	5,30	1,8	1,3	5,9
Питание сепарации	100,0	60,0	2,43	1,32	17,97	66,3	61,1	57,7
Несортируемый класс		40,0	1,86	1,27	19,80	33,7	38,9	42,3
Черновой концентрат		79,3	2,73	1,62	22,20	98,2	98,2	94,1
Исходная руда		100,0	2,20	1,30	18,70	100,0	100,0	100,0
Забалансовая руда								
Концентрат сепарации	25,0	17,50	0,98	0,53	9,47	42,11	44,13	24,44
Хвосты сепарации	75,0	52,50	0,18	0,08	5,27	23,53	0,05	40,80
Питание сепарации	100,0	70,00	0,38	0,19	6,32	65,64	64,18	65,24
Несортируемый класс		30,00	0,46	0,25	7,86	34,36	35,82	34,76
Черновой концентрат		47,50	0,65	0,25	8,45	76,47	79,95	59,60
Исходная руда		100,00	0,40	0,21	6,78	100,00	100,0	100,00

Применение рентгенорадиометрической сепарации медно-цинковых руд также позволяет повысить извлечение полезных компонентов в цикле флотации меди в медный концентрат на 2,3 %, цинка в цинковый – на 5,3 % и серы в пиритный – на 7,2 %. При этом увеличивается сквозное извлечение меди на 0,6 %, цинка – на 4,2 %, серы – на 1,8 % при некотором улучшении качества концентратов (табл. 10.10). Выход крупнокусковых отвальных хвостов составил 20,7 %, а выход хвостов флотации снизился на 15,4 %.

Результаты флотационных исследований исходной забалансовой медной руды и чернового концентрата (табл. 10.11) указывают на то, что комбинированная технология позволяет выделить на стадии рент-

генорадиометрической сепарации 52,5 % крупнокусковых отвальных хвостов при потерях меди 12,9 %, сократить в 2 раза объём руды, поступающей на переработку флотационным способом, повысить качество медного концентрата с 16,5 до 18,8 %.

Таблица 10.9

**Показатели обогащения медной руды
по традиционной и комбинированной схемам, %**

Продукт	Вы- ход	Массовая доля			Извлечение		
		Cu	Zn	S	Cu	Zn	S
Медный концентрат Пиритный концентрат Хвосты коллективной флота- ции Исходная руда	Традиционная технология						
	7,25	15,04	6,22	39,46	82,6	67,3	11,6
	43,75	0,37	0,37	42,14	12,3	24,2	75,0
	49,00	0,14	0,12	6,70	5,1	8,5	13,4
	100,00	1,32	0,67	24,58	100,0	100,0	100,0
Медный концентрат Пиритный концентрат Хвосты коллективной флота- ции Черновой концентрат Хвосты сепарации Исходная руда	Комбинированная технология						
	7,20	15,23	6,25	37,8	83,1	67,2	11,1
	45,44	0,31	0,37	42,1	10,7	25,4	77,8
	37,82	0,16	0,10	4,57	4,8	5,8	7,0
	90,46	1,44	0,73	26,07	98,6	98,4	95,9
	9,54	0,19	0,11	10,44	1,4	1,6	4,1
	100,0	1,32	0,67	24,58	100,0	100,0	100,0

Таблица 10.10

**Показатели обогащения медно-цинковой руды
по традиционной и комбинированной схемам, %**

Продукт	Вы- ход	Массовая доля			Извлечение		
		Cu	Zn	S	Cu	Zn	S
Медный концентрат Цинковый концентрат Пиритный концентрат Хвосты коллективной флота- ции Исходная руда	Традиционная технология						
	9,9	16,21	3,24	33,66	87,3	32,8	23,0
	0,9	3,93	52,10	24,44	2,0	52,2	1,6
	26,9	0,38	0,30	37,15	5,8	8,5	71,2
	62,6	0,14	0,10	0,93	4,9	6,5	4,2
	100,0	1,78	0,95	14,03	100,0	100,0	100,0

Окончание табл. 10.10

Продукт	Вы- ход	Массовая доля			Извлечение		
		Cu	Zn	S	Cu	Zn	S
Медный концентрат Цинковый концентрат Пиритный концентрат Хвосты коллективной флота- ции Черновой концентрат Хвосты сепарации Отвальные хвосты Исходная руда	Комбинированная технология						
	9,4	16,7	2,72	39,88	87,9	29,8	14,7
	1,0	3,83	53,10	27,47	2,1	56,4	1,7
	21,7	0,33	0,25	39,77	4,0	6,4	73,0
	47,2	0,14	0,10	1,20	3,7	5,5	3,6
	79,3	2,20	1,06	18,64	97,7	98,1	93,0
	20,7	0,19	0,08	5,30	2,3	1,9	7,0
	67,9	0,16	0,09	4,76	6,0	7,1	20,4
	100,0	1,78	0,86	15,88	100,0	100,0	100,0

Таблица 10.11

**Показатели обогащения забалансовой руды
по традиционной и комбинированной схемам, %**

Продукт	Выход	Массовая доля			Извлечение		
		Cu	Zn	S	Cu	Zn	S
Медный концентрат Отвальные хвосты Исходная руда	Традиционная технология						
	3,6	16,53	8,96	32,74	80,4	73,6	14,7
	96,4	0,15	0,12	7,06	19,6	26,4	85,3
	100,0	0,74	0,44	7,98	100,0	100,0	100,0
Медный концентрат Хвосты флотации Черновой концентрат Хвосты сепарации Отвальные хвосты Исходная руда	Комбинированная технология						
	3,5	18,85	8,00	33,06	77,4	70,1	14,3
	44,0	0,19	0,13	10,30	9,7	14,2	55,8
	47,5	1,57	0,71	11,50	87,1	84,3	70,1
	52,5	0,21	0,12	4,61	12,9	15,7	29,9
	96,5	0,20	0,12	7,20	22,6	29,9	85,7
	100,0	0,86	0,40	8,11	100,0	100,0	100,0

Несмотря на рост извлечения меди в цикле флотации на 8,4 %, сквозное извлечение меди снижается на 3 %, что обусловлено большим выходом крупнокусковых хвостов (52,5 %). Комбинированная технология позволяет вовлечь в переработку бедные забалансовые руды.

Данные исследования создали базу для последующего внедрения промышленных образцов рентгенофлуоресцентных сепараторов на ряде горно-обогатительных предприятий нынешнего УГМК.

Первые промышленные образцы рентгенофлуоресцентных сепараторов начало выпускать предприятие «РАДОС» в 1995 г.

В настоящее время этот процесс применяется для предварительного обогащения с удалением кусковых отвальных хвостов на нескольких предприятиях УГМК (Гайский ГОК, Учалинский ГОК, «Святогор»).

Принципиальная схема использования рентгенофлуоресцентной сепарации включает операции дробления до 300 мм, грохочения на 2-3 машинных класса с выделением несортируемой мелочи (-30(20) мм), рентгенофлуоресцентной сепарации в машинных классах. Хвосты сепарации являются отвальными, а концентраты сепарации объединяются с несортируемым классом и отправляются на глубокую переработку.

Руды редких металлов

Для руд редких металлов эффективным является использование для предварительного обогащения рентгенофлуоресцентной сепарации (табл. 10.12).

Крупнопорционную сортировку руд в транспортных ёмкостях широко применяют на месторождениях различных руд.

На одном из комбинатов, перерабатывающих оловянные руды, было осуществлено разделение исходной горной массы по содержанию олова на три сорта (табл. 10.13). Сортировка проведена по результатам рентгенорадиометрического опробования с поверхности 94 самосвалов. В результате получено три продукта, существенно отличающихся по содержанию олова.

Крупнопорционная сортировка в вагонетках ещё эффективней, чем сортировка в самосвалах, поскольку порции существенно меньше по массе, их неоднородность выше, и могут быть выделены как более бедные, так и более богатые продукты (табл. 10.14).

Технологическая эффективность крупнопорционной сортировки определяется соотношением неоднородности содержания компонента в порциях и их объёмом, а также способом получения информации (поверхностное или глубинное зондирование). Эффективность процесса возрастает с уменьшением содержания ценных компонентов в рудах.

Таблица 10.12

Результаты испытаний рентгенофлуоресцентной сепарации руд редких металлов, проведённых с использованием сепараторов СРФ

Месторождение, руда	Класс крупности, мм	Продукт	Выход, %	Содержание основного компонента, %	Извлечение основного компонента, %
Хрустальненский ГОК (Приморский край), оловосодержащая бедная	-50+25	Обогащённый	22,8	0,37	71,5
		Хвосты	77,2	0,04	28,5
		Исходный	100,0	0,12	100,0
Валькумей (Чукотка), оловосодержащая бедная	-50+25	Обогащённый	10,0	1,35	84,3
		Хвосты	90,0	0,03	15,7
		Исходный	100,0	0,16	100,0
Светлое, Иультинский ГОК (Чукотка), вольфрамсодержащая бедная	-150+25	Обогащённый	16,8	0,58	72,0
		Хвосты	83,1	0,04	28,0
		Исходный	100,0	0,14	100,0
Жирекен (Забайкалье), молибденсодержащая балансовая	-50+25	Обогащённый	59,4	0,125	91,0
		Хвосты	40,6	0,018	9,0
		Исходный	100,0	0,082	100,0
Сорский молибденовый комбинат (Хакасия), молибденовая некондиционная	-100+30	Обогащённый	8,0	0,073	48,6
		Хвосты	92,0	0,007	51,4
		Исходный	100,0	0,012	100,0
		Обогащённый	30,0	0,023	77,0
		Хвосты	70,0	0,003	23,0
		Исходный	100,0	0,009	100,0
		Обогащённый	13,0	0,029	63,0
		Хвосты	87,0	0,003	37,0
		Исходный	100,0	0,006	100,0

Таблица 10.13

Результаты рентгенорадиометрической сортировки и опробования оловянных руд в самосвалах (по В. Б. Юшко), %

Показатели	Сорт руды (содержание олова)		
	забалансовая (<0,2)	бедная (0,2-0,3)	кондиционная (>0,3)
Число самосвалов	53	32	4
Среднее содержание олова	0,11	0,25	0,37
Среднеквадратичная погрешность:			
абсолютная	0,057	0,033	0,054
относительная	52	13	14,5
Общее число порций	837	415	44
Число (доля) порций с содержанием олова:			
меньше 0,2	740 (88,4)	73 (17,6)	1 (2,3)
больше 0,2	97 (11,6)	342 (82,4)	43 (97,7)

Таблица 10.14

**Распределение горнорудной массы по интервалам содержания олова
на основании рентгенорадиометрической сортировки
руд в вагонетках, %**

Интервал содержаний олова	Среднее содержание олова	Выход фракций	Извлечение олова во фракции
<0,1	0,04	33,5	7,6
0,1-0,15	0,12	18,3	12,9
0,15-0,30	0,21	37,4	39,3
0,3-0,4	0,34	8,8	17,0
0,4-0,6	0,51	6,8	19,7
>0,6	0,89	0,9	4,5

Степень концентрации ценного компонента при выделении отвальных хвостов невелика, выход же хвостов может быть весьма значительным.

Из руд редких металлов можно получать товарные концентраты основного компонента, используя методы информационной сепарации (табл. 10.15).

Таблица 10.15

**Показатели сепарации с использованием информационных методов
при получении товарных концентратов основного компонента из руд
цветных и редких металлов, %**

Типы руд	Месторожде- ние	Метод сепарации	Исходное содержание компонента	Показатели сепарации (по концентрату)		
				выход	содержание компо- нента	извлечение компо- нента
Оловянно- вольфрамовые	Трудовое	PPM	0,52	1,1	15,25	32,5
	Хопун-Ваара	PPM	0,59	8,0	5,05	68,5
	Мушистон	PPM	0,81	7,2	5,85	49,7
Оловянные	Лысогорское	PPM	0,41	1,9	5,7	26,4
	Одинокое	PPM	0,13	1,2	5,3	48,9
Стронциевые	Арикское (-50+30 мм)	РЛМ	9,85	6,3	50,7	32,4
Сурьмяные	Анзобское	PPM	2,5	2,80	32,0	34,9
	Джижикрут	PPM	3,72	3,71	30,0	29,9
	Скальное	PPM	7,5	13,3	30,0	53,2

Примечание: PPM – рентгенорадиометрический метод;
РЛМ – рентгенолюминесцентный метод.

Золотосодержащие руды

При обогащении коренных золотосодержащих руд в рудоподготовке применяют гравитационные (отсадку) и информационные (рентгенофлуоресцентный и фотометрический) методы.

В области переработки золотосодержащих руд с использованием рентгенофлуоресцентной сепарации накоплен наибольший практический опыт. Изучено более 50 золоторудных месторождений и рудопроявлений, отработаны оригинальные методология и технология. Эти работы начаты в 70-е годы прошлого века в институте «Иргиредмет» и в институте «ЦНИИОлово». В первом из них разрабатывается рентгенофлуоресцентный метод, а во втором – фотометрический. В 70-80-е годы были созданы опытные образцы рентгенофлуоресцентного и фотометрического сепараторов. С начала 1990-х годов работы по совершенствованию рентгенофлуоресцентного метода были продолжены в НПО «Алмаззолотоавтоматика» и ООО «РАДОС».

Малые содержания золота в кусках руды не позволяют вести сортировку прямым методом. Особенности рентгенофлуоресцентной и фотометрической сепарации состоят в том, что используются природные свойства и особенности, которые обусловлены генезисом золоторудных месторождений и проявляются наличием у золота неотъемлемых генетических спутников (минералов и элементов), ассоциирующих и коррелирующих с золотом не только в пределах рудного поля (оруденения), но и на уровне каждого куска. Естественно, это корреляция нелинейна, носит пороговый характер, но в целом позволяет уверенно выделять рудную (куски, обогащённые золотом) и нерудную (породу, отвальный продукт, бедные куски) части.

Многочисленные исследования, проведённые на различных типах золотосодержащих руд (кварцевые, сульфидные, смешанные, убого-сульфидные, сланцевые и пр.), позволили установить целый ряд элементов, так или иначе связанных с золотом (или ассоциированных с ним). В основном кварц и сульфидные минералы (пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, антимонит) чаще и надёжней всего определяют наличие золота в куске. При этом сами эти минералы в РРС распознаются через элементы Fe, Cu, Zn, Pb, As и Sb. Дополнительно выявлены антикоррелирующие с золотом элементы Ca, Sr и иногда Zr, Rb (элементы вмещающих пород), которые, наоборот, при наличии их в кусках «сигнализируют» об отсутствии (или малом количестве) там золота.

Отдельные примеры эффективности РРС для золоторудных месторождений приведены в табл. 10.16. Для сортировки используется в основном крупнокусковой материал +20 мм, так как на классе -20 мм резко падает производительность.

В Навоийском ГМК на месторождении «Кокпатас» действует рудосортировочный комплекс предварительного обогащения золотосодержащих сульфидных руд. Технологическая схема предварительного обогащения приведена на рис. 10.7, а в табл. 10.17 показаны производственные показатели комплекса.

Таблица 10.16

Результаты испытаний рентгенофлуоресцентной сепарации золотосодержащих руд, проведённых с использованием сепараторов СРФ

Месторождение	Класс крупности, мм	Продукт	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
Наталкинское (Чукотка)	-100+25	Обогащённый	57,6	3,79	93,4
		Хвосты	42,4	0,36	6,6
		Исходный	100,0	2,34	100,0
Токурское («Амурзолото»)	-60+25	Обогащённый	20,5	4,80	84,9
		Хвосты	79,5	0,22	15,1
		Исходный	100,0	1,16	100,0
Кокпатаасское (Узбекистан)	-60+20	Обогащённый	63,1	4,93	97,5
		Хвосты	36,9	0,21	2,5
		Исходный	100,0	3,19	100,0
Кочкарское (Урал)	-60+20	Обогащённый	24,8	2,32	57,4
		Хвосты	75,2	0,71	42,6
		Исходный	100,0	1,26	100,0
Даугызтауское (Узбекистан)	-60+20	Обогащённый	59,0	4,42	79,7
		Промпродукт	30,8	1,90	17,8
		Хвосты	10,2	0,80	2,5
		Исходный	100,0	3,26	100,0
Участок «Верный» (Иркутская область)	-40+20	Обогащённый	11,3	35,56	70,0
		Промпродукт	25,3	2,90	12,2
		Бедная руда	63,4	1,55	17,2
		Исходный	100,0	5,74	100,0
	-100+40	Обогащённый	4,0	46,57	54,7
		Бедная руда	96,0	1,59	45,3
Нежданинское (Иркутская область)	-40+20	Исходный	100,0	3,41	100,0
		Обогащённый	27,9	32,42	65,2
		Промпродукт	39,4	8,94	27,6
		Бедная руда	32,7	2,80	7,2
Майское (Сибирь)	-60+25	Исходный	100,0	12,80	100,0
		Обогащённый	27,9	20,00	60,7
		Промпродукт	53,5	6,87	35,7
		Бедная руда	18,6	1,30	3,6
		Исходный	100,0	9,49	100,0

Главными золотоносными минеральными ассоциациями руд являются: пирит-арсенопиритная с коллоидно-дисперсным золотом, сингенетичным с сульфидами; кварц-доломит-золото-арсенопиритная с субдисперсным и микроскопическим видимым золотом.

В схеме рудоподготовки используется рентгенорадиометрическая крупнопорционная сортировка (РКС «РАДОС») и покусковая сепарация (сепараторы корпорации «Интегра»).

Таблица 10.17

Производственные показатели рудосепарационного комплекса (РКС+РСК) обогащения сульфидных руд месторождения «Кокпатас»

Наименование показателей	Ед. изм.	Величина
Исходная масса руды, поступающей на РКС:		7440
- балансовой руды	тыс. т/год	4675
- забалансовой руды		1630
- минерализованной массы		1135
Среднее содержание золота в руде		2,13
в том числе:		
- балансовой	г/т	2,77
- забалансовой		1,19
- минерализованной массе		0,86
Исходная масса руды, поступающей на РСК	тыс. т/год	5878
Содержание золота в руде, поступающей на РСК	г/т	2,60
Масса продукта, обогащённого на РСК	тыс. т/год	2900
Выход обогащённого продукта (от поставок на РСК)	%	49,3
Содержание золота:		
- в продукте обогащения	г/т	4,59
- в отвальных хвостах		0,66
Извлечение золота в концентрат	%	84,0
Коэффициент обогащения	ед.	1,77
Расход материалов на тонну руды, поступающей на РСК:		
- электроэнергия	кВт·ч	6,8
- вода техническая	м ³ /т	0,08
- вода питьевого качества	тыс. м ³ /год	50
Численность персонала (РКС+РСК):		288
- ИТР	чел.	18
- основные рабочие		234
- вспомогательные рабочие		36
Режим работы круглосуточный:		
- рабочих дней в году	дни	357
- часов в сутки	часы	24
- смен в сутки	смены	3



Рис. 10.7. Принципиальная технологическая схема рентгенометрического обогащения золотосодержащей руды месторождения «Кокпатас»

Для золотосодержащей руды месторождения «Сухой Лог» предложено использовать для предварительного обогащения полихромную фотометрическую сепарацию.

Испытания проводились на различных по содержанию золота рудах на сепараторах Optosort. В табл. 10.18 приведены результаты фотометрической сепарации рядовой руды в узких машинных классах. Для различных сортов руды в табл. 10.19 даны технико-экономические показатели их переработки с предварительным обогащением фотометрическим методом.

Для предварительного обогащения руды месторождения «Сухой Лог» предложена схема предварительного обогащения (рис. 10.8).

Таблица 10.18

Результаты полихромной фотометрической сепарации

Крупность питания, мм	Продукт	Выход, %		Содержание золота, г/т	Извлечение золота, %	
		от класса крупности	от исходной руды		от класса крупности	от исходной руды
-100+75	Концентрат	71,23	6,66	4,27	95,93	8,59
	Промпродукт	9,53	0,89	0,81	2,43	0,22
	Хвосты	19,24	1,80	0,27	1,63	0,15
	Исходный продукт	100,00	9,35	3,17	100,00	8,96
-75+50	Концентрат	60,23	10,71	5,64	95,79	18,25
	Промпродукт	9,86	1,75	0,82	2,27	0,43
	Хвосты	29,91	5,32	0,23	1,94	0,37
	Исходный продукт	100,00	17,78	3,54	100,00	19,05
-50+25	Концентрат	46,60	12,78	6,90	94,64	26,68
	Промпродукт	9,06	2,49	0,77	2,05	0,58
	Хвосты	44,34	12,17	0,25	3,31	0,93
	Исходный продукт	100,00	27,44	3,40	100,00	28,19
-25+10	Концентрат	38,39	10,63	7,72	89,56	24,81
	Хвосты	61,61	17,05	0,56	10,44	2,89
	Исходный продукт	100,00	27,68	3,31	100,00	27,70
-10+5	Концентрат	36,09	2,89	5,86	92,45	5,11
	Хвосты	63,91	5,12	0,27	7,55	0,42
	Исходный продукт	100,00	8,01	2,29	100,00	5,53
-5+0	Отсев	-	9,74	3,59	-	10,57
-100+5	Концентрат	-	43,67	6,32	-	83,44
	Промпродукт	-	5,13	0,79	-	1,23
	Хвосты	-	41,46	0,38	-	4,76
	Отвальные хвосты (хвосты и промпродукт)	-	46,59	0,42	-	5,99
	Исходная руда	-	100,00	3,31	-	100,00

Технико-экономические показатели переработки золотосодержащих руд месторождения «Сухой Лог» при различных режимах и глубине предварительного фотометрического обогащения

Показатели	Рядовая руда						Бедная руда						Убогая руда						Рядовая+бедная руды			Рядовая+бедная +убогая руды																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	без ПФМС	вар. 1		вар. 2	вар. 3	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б	вар. 1	б	вар. 2	без ПФМС	б

Примечания: 1. Варианты 1, 2, 3 – сепарация при граничном содержании золота соответственно 0,5; 1 и 1 г/т с дроблением хвостов и повторной сепарацией.

- а, б, в, – крупность сепарируемой руды -200+25; -200+10 и -200+5 мм соответственно.
- Нерен. – нерентабельно

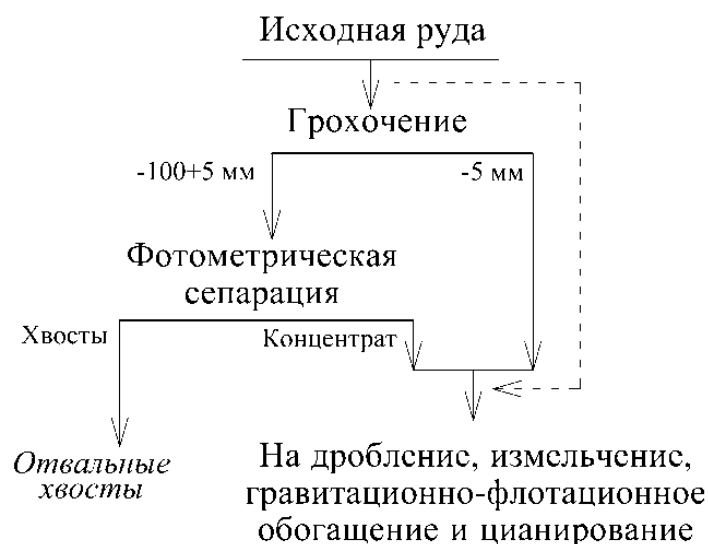


Рис. 10.8. Технологическая схема обогащения золотосодержащих руд с предварительной фотометрической сепарацией

Основным назначением информационных методов обогащения применительно к рудам цветных и благородных металлов является предварительная концентрация. К перспективным задачам их использования для этого вида минерального сырья следует отнести разделение добытой руды на технологические типы, поступающие в дальнейшем на раздельную глубокую переработку, а также выделение в стадиях рудоподготовки части готовых концентратов.

10.4. Урановые руды

Обогащение урановых руд является обычно подготовительной стадией перед их химической переработкой и наиболее широко применяется в следующих случаях:

- переработка бедных руд с целью последующего снижения расхода реагентов на их химическую переработку и транспортировку;
- переработка комплексных руд, содержащих (кроме урана) золото, серебро, цветные, редкие и другие металлы, с целью извлечения всех ценных компонентов в самостоятельные концентраты. Сопутствующие ценные минералы могут быть извлечены из урановых руд с помощью обогатительных процессов не только перед выщелачиванием, но и после выщелачивания урана, особенно при очень тонкой вкрапленности и тесной ассоциации минералов урана с другими ценными минералами;
- разделение руды на продукты различного состава, например, на карбонатный флотационный концентрат и силикатные хвосты с

целью последующей химической переработки их щелочными и кислотными методами соответственно;

- удаление вредных примесей (карбонатов, сульфидов, оксидов железа, апатита, хлорита и др.) с целью снижения расхода реагентов при гидрометаллургической переработке, сокращения числа операций при очистке урана и улучшения качества готового продукта;
- извлечение пирита и других сульфидов железа для производства серной кислоты, которая используется для выщелачивания урана.

Большое распространение имеют технологии обогащения урановых руд с использованием в стадиях предварительного обогащения радиометрического и рентгенорадиометрического разделения кусков руды крупностью от 25 до 250 мм покусковой, порционной и поточной сортировками.

Технология обогащения зависит от типа минералов, их вкрапленности и равномерности распределения урана в руде.

Схемы переработки обычно комбинированные с включением операций информационного, гравитационного, флотационного, магнитного обогащения с гидрометаллургической переработкой продуктов обогащения кислотным или содовым способом. Варианты сочетаний процессов в зависимости от типа руд и их вещественного состава приведены на рис. 10.9.

Урановые руды перед гидрометаллургической обработкой подвергают комплексному многостадийному обогащению с использованием информационных методов и гравитации. Радиометрическую сепарацию и порционную сортировку в крупнокусковом виде ведут по типовой схеме, показанной на рис. 10.10.

Разработанный во ФГУП «ВНИИХТ» радиометрический сепаратор УАС-50 и созданный на его базе сепарационный модуль РСМ-10 подтверждают возможности использования этого оборудования для обогащения урановых руд.

В табл. 10.20 приведены результаты сепарации класса -50+25 мм урановых руд различных типов Стрельцовского месторождения (Забайкалье) и Эльконского ураново-рудного района (Восточная Сибирь).

Указанные руды значительно отличаются по технологическим характеристикам. Руды Стрельцовского месторождения являются сильноконтрастными (показатель $M = 1,4 \div 1,6$) легкообогащаемыми. Руды Эльконского района среднеконтрастные ($M = 1,1 \div 1,2$) и, в зависимости

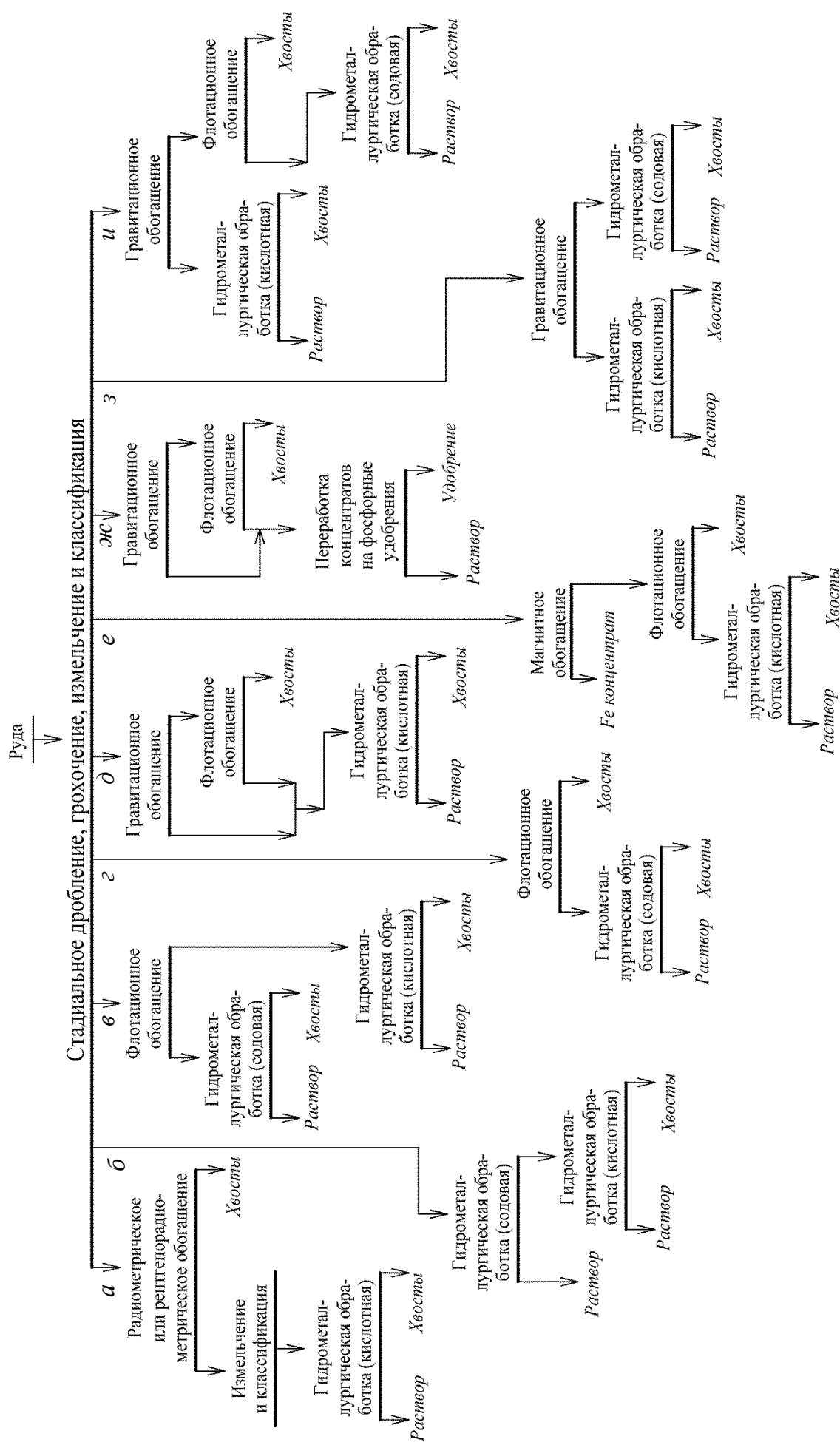


Рис. 10.9. Принципиальные схемы переработки урановых руд:

силикатных и алюмосиликатных (а), карбонатных с низким (б), средним (в) и высоким (г) содержанием карбонатов, сульфидных (д), железокислых (е), фосфатных (ж), урановых углей и битуминозных сланцев и песчаников (и)

от содержания в исходной руде, относятся к разным типам: легко-, средне- и труднообогатимым.



Рис. 10.10. Типовая технологическая схема радиометрического обогащения урановых руд

Результаты сепарации свидетельствуют о технологических возможностях сепаратора УАС по выделению отвальных хвостов и концентратов с различным содержанием урана из руд, значительно отличающихся по обогатимости и исходному содержанию урана.

Руды Стрельцовской группы месторождений в Приаргунском горно-химическом комбинате (ПГХК) в разные годы обогащались радиометрическим методом на сепараторах конусного типа «Гранат», «Агат», «Вихрь» (НПК автоматики и метрологии Восточного ГОКА, г. Желтые воды), затем сепараторами ленточного типа «Лотос» разработки ПГХК, а далее сепараторами УАС (ВНИИХТ) и собранными на их основе модулями РСМ-100, РСМ-200 и на рудосортировочном оборудовании.

довании «Уранит», «Азурит», «Минерал Р50», созданном НПК АиМ. В последние годы радиометрические сепараторы заменены рентгено-радиометрическими сепараторами разработки ООО «РАДОС», имеющими ряд преимуществ перед радиометрическими аналогами. Рудообога- тительная фабрика работает по схеме, приведённой на рис. 10.11.

Таблица 10.20

Результаты сепарации урановых руд

Продукты	Выход, %	Содержа- ние урана, %	Извлече- ние урана, %	Эффективность выделения концентрата (хвостов)	Производи- тельность на 1 ручей, т/ч
Стрельцовское месторождение (M=1,4÷1,6)					
Концентрат	18,6	0,384	87,1	84 (92)	4,0
Хвосты	81,4	0,013	12,9		
Исходная руда	100,00	0,082	100,0		
Эльконский ураново-рудный район (M=1,1÷1,2)					
Концентрат	33,6	0,177	89,9	77 (93)	3,2
Хвосты	66,4	0,010	10,1		
Исходная руда	100,0	0,066	100,0		
Концентрат	48,0	0,287	93,0	90 (88)	2,6
Хвосты	52,0	0,020	7,0		
Исходная руда	100,0	0,148	100,0		

Производственно-технологический комплекс ПГХК по добыче, обогащению и глубокой переработке руд имеет принципиальную схему, показанную на рис. 10.12.

Следует подчеркнуть, что для урановых руд информационные методы являются одними из основных и могут быть применены в нескольких стадиях их переработки.

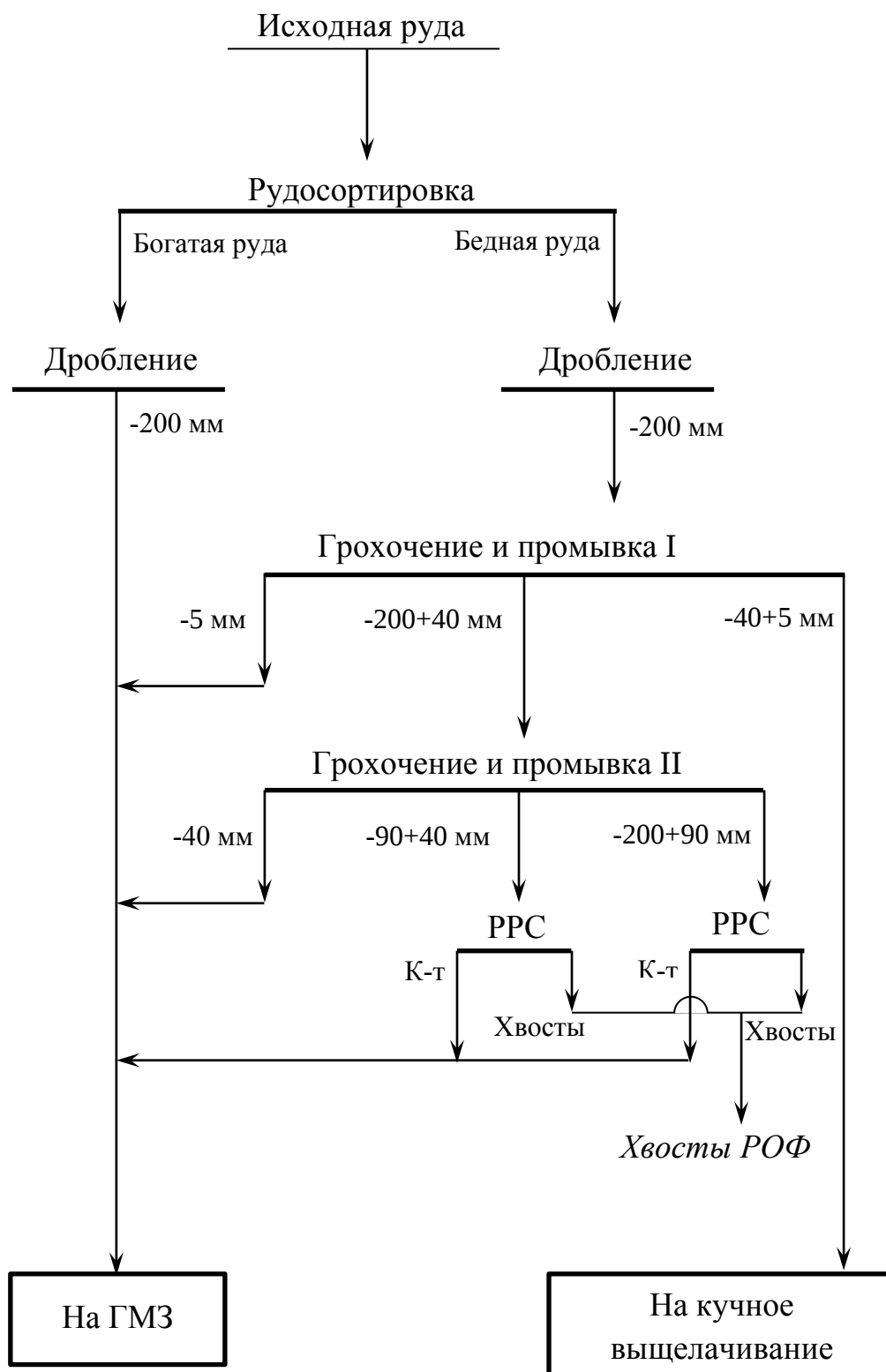


Рис. 10.11. Принципиальная технологическая схема урановой рудообогатительной фабрики



Рис. 10.12. Производственно-технологический комплекс по добыче, обогащению и гидрометаллургической переработке урановых руд

10.5. Алмазосодержащие руды

Технологические схемы обогащения алмазов обычно включают дезинтеграцию или дробление (измельчение), первичное обогащение, доводку первичных концентратов, очистку и разделение алмазов по крупности, цвету, чистоте и т. д.

Первичное обогащение может осуществляться стадийно либо в замкнутом цикле «самоизмельчение – грохочение – сепарация» с возвратом хвостов в голову самоизмельчения с использованием промывки, ручной выборки алмазов, тяжелосредной сепарации, отсадки, рентгенолюминесцентной или фотометрической сепарации. Конечными продуктами предварительного обогащения в этом случае являются концентраты, направляемые на обогащение на жировых столах и на доводку с применением винтовой сепарации, рентгенолюминесцентной сепарации, пенной сепарации, электрической сепарации, магнитной сепарации, а также хвосты (как правило, сливы операций обесшламливания, промывки, классификации).

На рис. 10.13 приведена технологическая схема обогащения алмазосодержащих руд трубки «Мир».

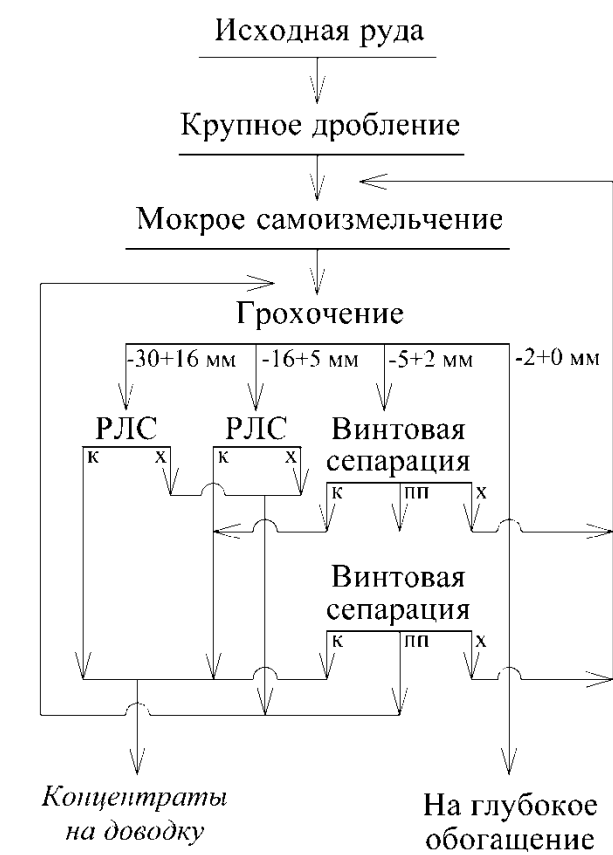


Рис. 10.13. Схема предварительного обогащения кимберлитов трубки «Мир»

Руду дробят в щековой дробилке ЩДП 15×21 до крупности 350 мм, затем измельчают в ММС 70×23 до крупности 50 мм и классифицируют на четыре класса: -50+16; -16+5; -5+2; -2+0 мм.

Первые два класса обогащают на рентгенолюминесцентных сепараторах, концентраты которых доводят на таких же сепараторах; класс -5+2 мм обогащают на винтовых сепараторах СВ-2-2000 с возвратом хвостов на самоизмельчение; концентрат и промпродукт отдельно доводят на сепараторах СВ-2-2000. Концентраты винтовой сепарации промпродукта снова доводят на винтовых сепараторах, промпродукт которых возвращают в цикл первичного грохочения, а хвосты – в операцию самоизмельчения. Качество разделения рентгенолюминесцентной сепарацией (РЛС) во многом зависит от природы алмазов (окраски, трещин, микровключений примесей, крупности и т. д.). С большей вероятностью при этом извлекают высококачественные и крупные алмазы. В хвосты сепарации переходят в основном алмазы технического назначения. Класс -2+0 мм головного грохочения подаётся на глубокое обогащение.

На действующей обогатительной фабрике № 12 схема предварительного обогащения алмазосодержащих руд трубки «Удачная» включает операции дробления, самоизмельчения, грохочения, РЛС крупных классов, отсадки и обесшламливания (рис. 10.14).

Алмазы трубки «Удачная» имеют высокие рентгенолюминесцентные характеристики и легко могут быть извлечены современными рентгеновскими сепараторами, рудный материал крупностью до 5 мм обогащают на рентгенолюминесцентных сепараторах ЛС-50-02 М, ЛС-20-04 М, концентраты которых впоследствии переочищают на аппаратах ЛС-20-04 М, при этом уровень извлечения алмазов составляет 96-98 %. Зернистый материал крупностью -5+2 мм подвергают гравитационному обогащению на отсадочных машинах, концентраты которых направляют на предварительную доводку с использованием РЛС и липкостной сепарации.

Конечными продуктами предварительного обогащения являются концентраты РЛС и отсадки, класс -2+0 мм операции «Грохочение II», подаваемые на доводку или глубокое обогащение, а также сливы операций обесшламливания, являющиеся отвальными хвостами.

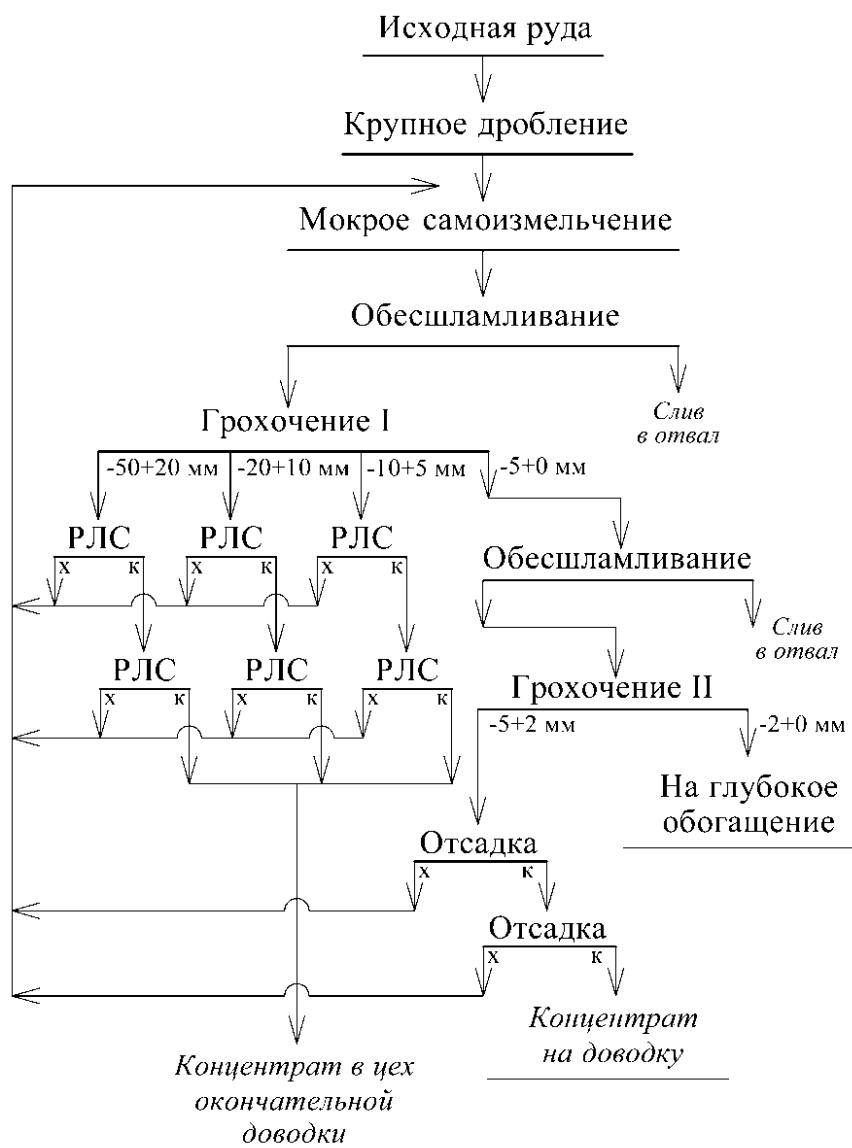


Рис. 10.14. Схема предварительного обогащения кимберлитов трубки «Удачная»

Для повышения полноты извлечения алмазов из продуктов переработки разрабатываются новые способы возбуждения люминесценции, например, применяют облучение мощным лазером с измерением параметров комбинированного рассеяния света; испытывают сепараторы рентгеноабсорбционного типа; используют комплексные алгоритмы принятия решения.

10.6. Изумрудно-бериллиевые и бериллиевые руды

Основным промышленным минералом бериллиевых руд является берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Содержание оксида бериллия в рудах изменяется в пределах от 0,02 до 2 %. Основным методом обогащения является флотация. В стадиях рудоподготовки для получения кусковых концентратов применяют фотонейтронную сортировку в вагонетках и фото-

нейтронную покусковую сепарацию или ручную сортировку (рис. 10.15).

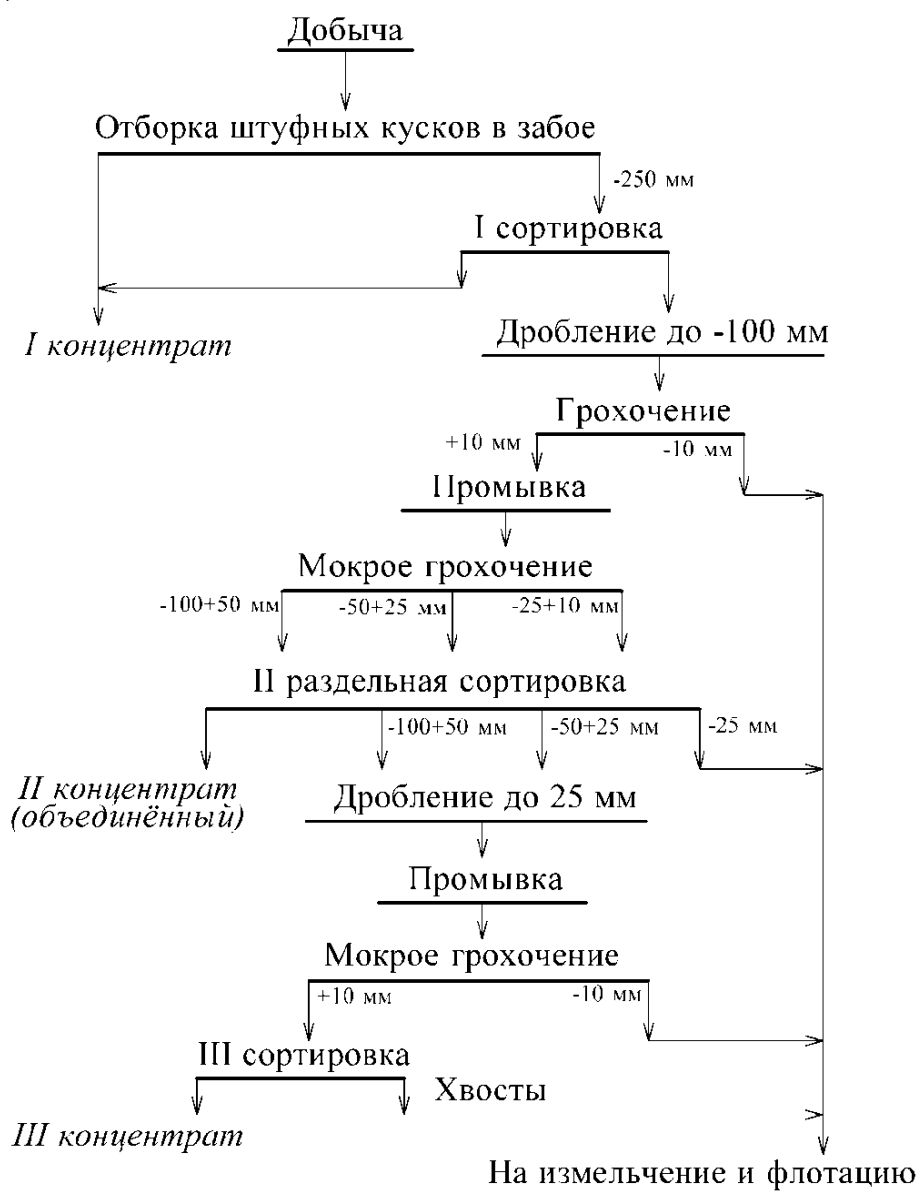


Рис. 10.15. Схема обогащения бериллиевых руд в стадиях рудоподготовки методами сортировки

Для удаления шламовых хвостов в отвал – избирательное измельчение с грохочением и классификацией (используется высокая твёрдость берилла и мелких вмещающих пород – слюдитов, талька и т. д.). Остальные продукты сортировок и плюсовой класс избирательного измельчения-грохочения и классификации подаются на измельчение и глубокое обогащение.

Специфика обогащения изумрудно-бериллиевой руды Малышевского месторождения связана с весьма высокой стоимостью изумрудов и с необходимостью минимизации их потерь как с хвостами обогащения, так и при технологических воздействиях (например, дезинтегра-

ция, дробление). Поэтому после операций информационной сепарации (рентгенофлуоресцентной, оптической или какой-либо другой), которые позволяют резко снизить нагрузку на ручную сортировку, тем самым повысив её эффективность, предусматривают контрольные операции ручной рудосортировки: на хвостах рентгенофлуоресцентной сепарации после выделения всех слюдистосодержащих кусков в циркуляционный продукт дробления и дезинтеграции в скруббере, а также для выделения из слюдистосодержащего продукта рентгенофлуоресцентной сепарации кусков с видимыми обнажёнными кристаллами изумрудов, александритов, хризобериллов, фенацитов и т. п. (что необходимо для предотвращения их разрушения в операциях дробления и дезинтеграции); на хвостах оптической сепарации после выделения в концентрат кристаллосырья (рис. 10.16).

Конечными продуктами рудоподготовки являются кристаллосырьё (изумруды, хризоберилл, фенацит, александрит) для гранильной фабрики, рудоразборный штучовой бериллиевый концентрат, кусковые отвальные хвосты из цикла дезинтеграции.

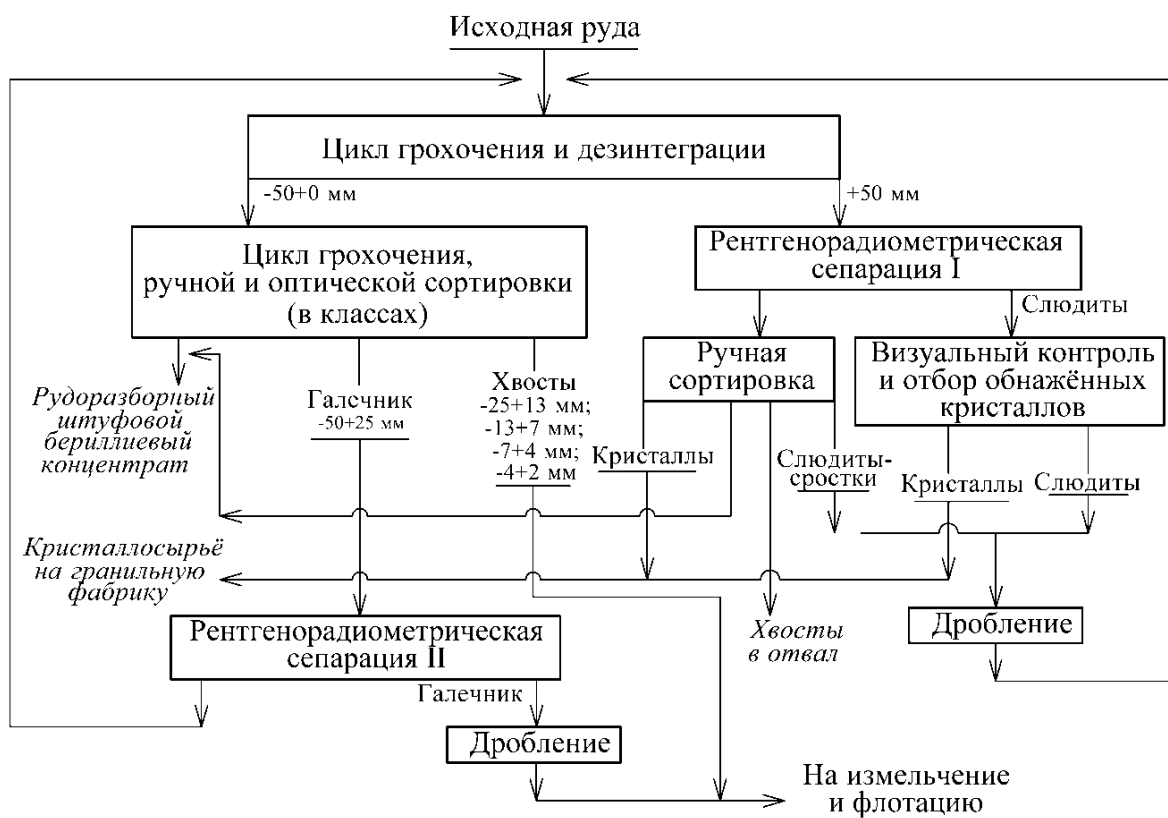


Рис. 10.16. Принципиальная схема отделения рудоподготовки и сортировки изумрудно-бериллиевой руды

Галечник (хвосты сортировок классов -25+13; -13+7; -7+4; -4+2 мм и класс -2+0 мм грохочения), а также хвосты рентгенорадиометриче-

ской сепарации II после дробления подаются на измельчение и флотационное обогащение для получения бериллиевого флотационного концентрата.

10.7. Бокситы

При испытаниях по обогащению бокситов Северного Урала ставилась задача снижения содержания карбонатов (известняка, кальцита) в товарной продукции, направляемой на переработку в глинозём на алюминиевые заводы Урала.

Многократно проведённые ЗАО НПК «Техноген» опытно-промышленные испытания по обогащению бокситового сырья Северного Урала различного качества (байеровского, высококарбонатного, шахтной породы) методом рентгенорадиометрической сепарации позволили выявить возможность снижения содержания CO_2 в товарной руде с 4,2-4,3 до 3,2-3,4 %, выделения из высококарбонатных бокситов (ВКБ) до 20 % байеровских сортов и из шахтной породы – до 15 % ВКБ (табл. 10.21).

Таблица 10.21

Результаты опытно-промышленных испытаний по сепарации бокситов

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание, %		Кремниевый модуль, ед.
		Al ₂ O ₃	CO ₂	
Обогащённый продукт в ветвь Байера Хвосты обогащения на спекание Исходная руда	Высококарбонатные бокситы Северного Урала			
	20,0	50,2	4,18	13,3
	80,0	34,3	17,71	9,6
	100,0	37,5	15,00	10,4
Обогащённый продукт Хвосты обогащения Исходная руда	Бокситы Среднего Тимана			
	44,3	49,65	-	7,4
	55,7	48,50	-	4,9
	100,0	49,01	-	5,8

Из бокситов Среднего Тимана с кремниевым модулем 5,8 ед. методом рентгенорадиометрической сепарации удалось выделить в обогащённый продукт более 44 % байеровских бокситов с кремниевым модулем 7,4 ед. и в хвосты обогащения – около 56 % спекательных бокситов с кремниевым модулем 4,9 ед.

По результатам опытно-промышленных испытаний по обогащению бокситов Среднего Урала и Среднего Тимана были выполнены технологические регламенты строительства рудосортировочных комплексов на шихтовальном складе ОАО «СУБР» и промплощадке ОАО «Боксит Тимана».

10.8. Неметаллические полезные ископаемые

Из этих видов сырья можно получать товарные концентраты с использованием информационной сепарации.

Особые требования к кварцу и кварцевому сырью предъявляются по содержанию железа. Рентгенофлуоресцентная сепарация кварцевого сырья Черемшанского месторождения позволяет при содержании железа в исходном классе крупностью -120+30 (40) мм 0,1-0,14 % получить концентрат с содержанием железа не более 0,06 %. Результаты получены на сепараторе СРФ-4-150.

Высокая эффективность рентгенофлуоресцентной сепарации (СРФ) кварцевого сырья месторождения «Гора Хрустальная» достигнута при опытно-промышленных испытаниях, проведённых ЗАО НПК «Техноген» на сепараторе СРФ-4-150 (табл. 10.22). Впоследствии рентгенофлуоресцентная сепарация кварцевого сырья реализована в промышленных условиях.

Таблица 10.22

Результаты опытно-промышленных испытаний по СРФ кварцевого сырья месторождения «Гора Хрустальная»

Продукты сепарации	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Fe	Ca	Fe	Ca
Концентрат	74,9	0,07	0,009	22,7	8,2
Хвосты сепарации	25,1	0,71	0,300	77,3	91,8
Исходные машинные классы	100,0	0,23	0,082	100,0	100,0

Обогащение кварцевого и полевошпатового сырья рентгенолюминесцентным, рентгенофлуоресцентным и фотоабсорбционным методами, как показано исследованиями ВИМС, позволяет получать товарные концентраты. Возможности иллюстрируются показателями, приведёнными в табл. 10.23.

Таблица 10.23

**Показатели информационной сепарации кварцевого
и полевошпатового сырья с получением товарных концентратов**

Типы руд	Место- рождение	Метод се- парации	Содержа- ние ком- понента или его каче- ственная характе- ристика в исходном, %	Показатели сепарации, %		
				выход концен- трата	содержа- ние ком- понента или его каче- ственная характе- ристика в концент рате	извлече- ние ком- понента в концен- трат
Пег- мати- товые	Куру-Ваара	РЛМ	1,77*	50,8	4,82	90,5 (МК)
	Линна-Ваара	РЛМ, РРМ	0,97*	8,5	2,43	15,0 (K ₂ O)
	Хетоламбино	РЛМ	1,25*	29,0	3,65	58,8 (K ₂ O)
	Б. Северное	РЛМ	1,19*	36,4	3,81	87,4 (МК)
Квар- цевое сырьё	Додо	ФАС	43,34**	1,2; 16,3	70,0; 55,0	1,9; 20,7
	Пуйва	ФАС	53,48**	7,5; 31,1	69,1; 56,1	9,7; 32,6
	Кефталык	ФАС	51,8**	2,0; 25,5	69,0; 56,7	2,7; 27,9

Примечание: * отношение K₂O/N₂O; ** светопропускание, %; МК – микроклин; РЛМ – рентгенолюминесцентный метод; РРМ – рентгенорадиометрический метод; ФАС – фотоабсорбционный метод.

Применительно к неметаллическим полезным ископаемым информационные методы обогащения используют в следующем основ-
ных направлениях:

- повышение качества концентратов;
- получение кондиционных концентратов;
- предварительная концентрация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшее развитие обогащения связано с использованием последних достижений науки и техники. Широкие возможности разработки новых обогатительных процессов и аппаратов дают информационные технологии. Благодаря их использованию формируется принципиально новая ветвь процессов обогащения, отличительным признаком которой является использование информационных процедур при выделении в продукты каждого из разделяемых объектов.

Получение информации от объектов основано на сборе данных о составе и свойствах вещества как с использованием эффектов взаимодействия излучения разных энергий с веществом, так и с контактным измерением физических характеристик вещества.

Физические основы информационных методов обогащения, подробно рассмотренные в учебном пособии, дают возможность ввести классификацию этих методов и прогнозировать возможность их развития с использованием новых физических эффектов.

Особая многооперационная структура рассматриваемых процессов приводит к формированию нового типа сепарационной характеристики, а потенциальное многоканальное получение информации о нескольких физических признаках объекта позволяет заменить одной обогатительной операцией целую схему из операций с различными разделительными признаками и их граничными значениями.

Приводимые в пособии технические характеристики современных сепараторов, технологические схемы и показатели, получаемые при использовании информационных методов обогащения для различных видов минерального сырья, подчёркивают их эффективность и перспективу широкого применения в обогатительной отрасли.

Дальнейшее развитие информационных методов обогащения направлено на увеличение производительности сепараторов, снижение минимальной крупности обогащаемого материала, повышение селективности при идентификации элементов, совершенствование алгоритмов сортировки, в том числе с комбинированием признаков разделения. Этому может способствовать бурно развивающаяся и быстро изменяющаяся электронная техника, которая позволяет постоянно совершенствовать аппаратную и компьютерную базу сепараторов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Раздел 1.

1. Для каких минералов был создан первый рентгенолюминесцентный сепаратор?
2. С какими рудами связано первое промышленное внедрение радиометрических методов обогащения в СССР?
3. Какой метод разработан для обогащения бериллиевых руд?
4. Приведите примеры контактных методов сепарации.
5. Сепараторы какого типа используют для обогащения окисленных железных руд?

Раздел 2.

1. В каких вариантах используется информация в обогатительных процессах?
2. В чём сущность элементарного акта информационного процесса разделения частиц минералов?
3. В чем различие силовых воздействий прямых и информационных методов?
4. Какие информационные процедуры используются в информационных методах разделения?
5. Для каких целей используется информация при осуществлении прямых методов разделения минералов?

Раздел 3.

1. Каково соотношение между радиусами ядра и атома?
2. Каков радиус действия ядерных сил?
3. Каковы физические свойства веществ, используемые для их идентификации?
4. Приведите примеры свойств минеральных агрегатов и горных пород как физических тел.
5. Дайте понятие изотопа.

Раздел 4.

1. Каковы частные диапазоны электромагнитного излучения?
2. Каково соотношение энергий квантов и длины волны излучения?
3. Перечислите названия основных элементарных частиц.
4. Какова энергетическая характеристика нейтронов различных классов и групп?
5. Перечислите контактные виды воздействий на вещество.

Раздел 5.

1. Приведите конкретный пример получения информации при бесконтактных воздействиях на вещество и измерения свойств.
2. Каково соотношение физического свойства и признака разделения?
3. Приведите примеры алгоритмов разделения частиц.
4. Какой из режимов информационных процессов разделения обеспечивает наиболее высокие технологические показатели?
5. Каковы особенности фракционных характеристик информационных методов разделения?
6. Какие погрешности разделения влияют на вид сепарационной характеристики информационного сепаратора?

Раздел 6.

1. Какие существуют виды радиоактивных превращений?
2. В чём физический смысл термина «эффективное сечение»?
3. Назовите виды записи ядерных реакций.
4. Каковы особенности взаимодействия заряженных частиц с веществом?
5. Перечислите виды взаимодействия нейтронов с веществом.
6. Дайте понятие фотоэлектрического поглощения, назовите его следствия.
7. Какова суть γ -флуоресцентного метода измерения?
8. Приведите математическую запись закона Мозли.
9. В чём сущность фотонейтронного метода измерения?
10. Запишите формулу интенсивности прошедшего через слой вещества γ -излучения.
11. Какие физические эффекты учитывает полный массовый коэффициент ослабления γ -излучения веществом?
12. В чём различие рентгеновского и γ -излучений?
13. В чём различие тормозного и вторичного рентгеновских излучений?
14. Дайте определение люминесценции.
15. Охарактеризуйте признаки разделения при люминесценции.
16. Перечислите эффекты взаимодействия видимого излучения с веществом.
17. Назовите виды индикатрис рассеяния.
18. Каковы длины волны в системе RGB?
19. Перечислите способы нагрева тел.

20. Что такое степень черноты?

21. Какие свойства веществ идентифицируются радиорезонансными методами?

Раздел 7.

1. По какому признаку классифицируются группы информационных методов обогащения?
2. Какие свойства вещества используются в радиометрических методах обогащения?
3. Какие группы методов позволяют оценивать содержания элементов?
4. В чем отличие радиометрических от прочих информационных методов обогащения?
5. Какие свойства веществ используются в оптических методах разделения?

Раздел 8.

1. Каковы виды порционной сортировки?
2. Назовите различные сочетания способов получения информации и удаления кусков в сепараторах.
3. Назовите основные узлы рентгенофлуоресцентного сепаратора.
4. Объясните сущность технологии Mikrosort.
5. Какие методы сочетаются в конструкциях информационных сепараторов?

Раздел 9.

1. Какие факторы определяют результаты информационного разделения?
2. Какие физико-механические свойства руды влияют на выход сортируемых классов?
3. Какими факторами определяется гранулометрический состав подготовленной к сепарации руды?
4. Каково влияние содержания компонента в руде на результаты сепарации?
5. Перечислите технические факторы, определяющие результаты информационного разделения.

Раздел 10.

1. Какие технологические задачи могут решаться с использованием информационных методов в стадиях рудоподготовки?

2. Какие типы железных руд перспективны для применения информационных методов обогащения?
3. Какие методы информационного обогащения используют для марганцевых руд?
4. Какие методы информационного обогащения используют для золотосодержащих руд?
5. Какие методы информационного обогащения используют для медных и медно-цинковых руд?
6. Какие методы информационного обогащения используют для бериллиевых руд?
7. Каковы особенности схем обогащения алмазосодержащих руд?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. Т. 1. М.: Руда и металлы, 2007. 2. 952 с.
2. Газалеева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А. Рудоподготовка: Дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: ОАО «УЦАО», 2014. – 914 с.
3. Лагов Б. С., Лагов П. Б. Радиометрическая сортировка и сепарация твёрдых полезных ископаемых. М.: Учёба, 2007. 155 с.
4. Новиков Г. Ф. Радиометрическая разведка. Л.: Недра, 1989. 407 с.
5. Теория и практика рентгенорадиометрического обогащения / В. С. Шемякин, Е. Ф. Цыпин, Ю. О. Фёдоров и др. Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2013. 255 с.
6. Цыпин Е. Ф., Морозов Ю. П., Козин В. З. Моделирование обогатительных процессов и схем: учебник. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та, 1996. 386 с.

Учебное издание

Цыпин Евгений Федорович
доктор технических наук, профессор

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Учебное пособие

Редактор *Л. В. Устьянцева*

Компьютерная вёрстка *Т. Ю. Овчинниковой*

Подписано в печать 10.09.2015 г. Бумага писчая. Формат 60 × 84 1/16.
Гарнитура Times New Roman. Печать на ризографе.
Печ. л. 12,9. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 100. Заказ № _____

Издательство ФГБОУ ВПО «УГГУ»
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Отпечатано с оригинал-макета
в лаборатории множительной техники
Уральского государственного горного университета