



Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО
«Уральский государственный горный
университет»

**Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева,
Л. К. Катанова**

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 4

Атом, твердое тело, атомное ядро

***Учебно-методическое пособие
к лекциям по дисциплине «Физика»
для преподавателей кафедры физики
и студентов всех направлений
специалитета и бакалавриата***

**Екатеринбург
2013**

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО
«Уральский государственный горный университет»

ОДОБРЕНО
Методической комиссией
факультета геологии
и геофизики УГГУ
«22» *февраль* 2013 г.
Председатель комиссии

Проф. В. И. Бондарев

Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева,
Л. К. Катанова

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 4

Атом, твердое тело, атомное ядро

Учебно-методическое пособие
к лекциям по дисциплине «Физика»
для преподавателей кафедры физики
и студентов всех направлений
специалитета и бакалавриата

Рецензент: *Е. В. Коророва*, ст. преподаватель кафедры литологии и геологии
горючих ископаемых УГГУ

Учебно-методическое пособие рассмотрено на заседании кафедры физики
19 февраля 2013 г. (протокол № 63) и рекомендовано для издания в УГГУ.

Лукашевич Л. Н., Садырева О. В., Катанова Л. К.

Л 84 ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ. Часть 4.
Атом, твердое тело, атомное ядро: учебно-методическое пособие к лекциям по дисциплине «Физика» для преподавателей кафедры физики и студентов всех направлений специалитета и бакалавриата / Л. Н. Лукашевич, О. В. Садырева, Л. К. Катанова. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – 44 с.

В пособии приведены примеры использования электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, эффекта Холла в геологических исследованиях.

Также приведены примеры применения естественной радиоактивности горных пород в горном деле, рассмотрены радиационные методы контроля за составом полезных ископаемых, радиоактивные методы исследования скважин.

Все разделы составлены совместно коллективом авторов.

© Лукашевич Л. Н., Садырева О. В.,
Катанова Л. К., 2013

© Уральский государственный
горный университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| 1. АТОМНАЯ ФИЗИКА | 5 |
| 1.1. Применение электронной микроскопии в геологических исследованиях.... | 5 |
| 1.2. Приборы для проведения спектрального анализа..... | 6 |
| 1.3. Атомно-флуоресцентный анализ | 7 |
| 1.4. Инфракрасная спектроскопия..... | 7 |
| 1.5. Люминесцентно-битуминологический метод..... | 8 |
| 1.6. Люминесцентный метод сортировки полезных ископаемых..... | 9 |
| 2. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА..... | 10 |
| 2.1. Природные кристаллы..... | 10 |
| 2.2. Полиморфизм..... | 10 |
| 2.3. Примеры применения рентгено-структурного анализа..... | 11 |
| 2.4. Рентгенометрический метод изучения остаточных деформаций горных пород по кернам..... | 12 |
| 2.5. Рентгенотелевизионная микроскопия..... | 13 |
| 2.6. Влияние дефектов кристаллических решеток минералов на их флотационные свойства..... | 13 |
| 2.7. Методы наблюдения дислокаций в твердых телах..... | 14 |
| 2.8. Характеристическая температура..... | 14 |
| 2.9. Тепловые свойства горных пород..... | 15 |
| 2.10. Электрическая проводимость минералов..... | 17 |
| 2.11. Влияние различных факторов на электрические свойства минералов..... | 17 |
| 2.12. Использование электрических свойств минералов в горной науке и производстве..... | 19 |
| 2.13. Эффект Холла, датчики Холла..... | 20 |
| 2.14. Термоэлектрические явления..... | 22 |
| 3. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА..... | 23 |
| 3.1. Применение, естественной радиоактивности горных пород в практике горного дела..... | 23 |
| 3.2. Определение возраста горных пород и Земли | 24 |

| | |
|--|----|
| 3.3. Радиоуглеродный метод хронологической маркировки ископаемых находок органического происхождения | 25 |
| 3.4. Поглощение излучения веществом..... | 26 |
| 3.5. Метод измерения напряжений в массиве горной породы..... | 28 |
| 3.6. Просвечивание торфа γ -лучами..... | 28 |
| 3.7. Методы измерения радиоактивности и определения содержания радиоактивных элементов..... | 29 |
| 3.8. Естественная радиоактивность (радиоактивный фон)..... | 31 |
| 3.9. Радиационные методы контроля за составом полезных ископаемых..... | 32 |
| 3.10. Радиоактивные методы исследования скважин..... | 32 |
| 3.11. Метод меченых атомов..... | 37 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 42 |

1. АТОМНАЯ ФИЗИКА

1.1. Применение электронной микроскопии в геологических исследованиях

Электронная микроскопия применяется для решения самых разнообразных геологических проблем в таких областях, как кристаллография, минералогия, петрография, геофизика, палеонтология [1].

С помощью оптического микроскопа можно изучать морфологию и оптические свойства минералов, двойники и ламели, если они по размеру превышают длину волны падающего света.

Для исследования неоднородностей структуры размерами 10–1000 нм применяется электронный микроскоп. Такие исследования — один из важных источников геологической информации, характеризующей параметры охлаждения и образования минералов и горных пород или условия их деформации. Электронная микроскопия используется в петрографии. Характеристика доменов, ламелей, дислокаций дает важную геологическую информацию о структуре, которая не может быть получена стандартными минералогическими и геохимическими методами. Наиболее важные проблемы связаны с историей изменения горных пород после кристаллизации минералов и определением таких параметров, как скорость охлаждения изверженных пород, время и температура закалки, температура и скорость деформации во время изменения метаморфических пород.

Геофизики уделяют большое внимание изучению микротрещин в горных породах, пытаясь выявить и объяснить изменения упругих характеристик породы непосредственно перед началом землетрясения, чтобы использовать эти наблюдения для предсказания землетрясений. Микротрещины можно исследовать количественно с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). В палеонтологии СЭМ служит основным средством для классификации микроокаменелостей.

Электронная микроскопия применяется также для определения возраста земных, лунных и метеоритных пород. При этом используется то обстоятельство, что во время радиоактивного распада ядра высвобождаются частицы, которые проникают в окружающий материал с высокой скоростью и оставляют видимый «след» в кристалле. Эти треки можно увидеть с помощью электронного микроскопа, используя его в режимах сканирования или на просвет. Плотность треков распада вокруг радиоактивного включения пропорциональна возрасту кристалла, а их длина является функцией энергии частицы.

1.2. Приборы для проведения спектрального анализа

Спектральный анализ в геологии применяется на всех стадиях поисковых и разведочных работ — от изучения состава горных пород поисковых площадей до исследования отдельных зерен минералов. В отобранных образцах горных пород, минералах оценивается содержание химических элементов [2].

Спектрографические методы дают возможность проводить анализ руд и минералов с высокой чувствительностью и надежностью.

Для проведения спектрального анализа применяются следующие приборы [3]:

1. *Атомно-абсорбционный спектрофотометр* предназначен для определения концентрации химических элементов в жидких пробах различного происхождения в условиях химико-аналитических лабораторий, осуществляющих элементный анализ проб в геологии, металлургии, агрохимслужбе, биологии, экологии и др. отраслях народного хозяйства.

2. *Масс-спектрометры* предназначены для прецизионных измерений изотопного состава твердых и газообразных веществ в минералогии, геохимии, космохимии, ядерной физике, биохимии и др. областях науки и техники, в которых используется масс-спектрометрический метод анализа изотопного состава веществ.

1.3. Атомно-флуоресцентный анализ

Это метод количественного элементного анализа с помощью атомных спектров флуоресценции. Физическую основу его составляют два процесса: резонансное поглощение излучения внешнего источника, в результате которого атомы переходят в возбужденное состояние, и спонтанный переход возбужденных атомов в исходное энергетическое состояние, сопровождающийся излучением квантов света той же частоты, что и в поглощенном излучении [4].

Флуоресценцию анализируемого образца обычно вызывают ультрафиолетовым излучением от ртутно-кварцевых и ксеноновых ламп или лазеров. Свечение анализируется на спектрофотометре. Мерой концентрации элемента является интенсивность флуоресценции. Для градуировки прибора применяют стандартные образцы известного химического состава, соответствующего составу пробы.

Атомно-флуоресцентный анализ используют для диагностики минералов (шеелита, циркона, апатита, урановых солей и др.) в горных выработках, определения микропримесей элементов (Ag, Cd, Cu, Zn), в дефектоскопии и т. д. С помощью этого анализа определяют примерно 50 элементов в различных горных породах, нефтепродуктах, почвах и т. д.

1.4. Инфракрасная спектроскопия

Это раздел молекулярной оптической спектроскопии, рассматривающий взаимодействие вещества с электромагнитным излучением в инфракрасном диапазоне. Зависимость интенсивности линий инфракрасного спектра от концентрации вещества лежит в основе количественного анализа [5].

В основном применяются инфракрасные спектры поглощения, преимуществами которых является использование небольшого количества вещества (несколько миллиграммов), возможность получения спектра во всех агрегатных состояниях при разных температурах и давлениях. Инфракрасные спектры от-

ражения используются при исследовании твердых тел, особенно монокристаллов.

Успешно используются инфракрасные спектры для изучения поверхностных соединений, в частности, флотационных реагентов, адсорбированных на поверхности минералов.

Инфракрасные спектры применяются для идентификации и количественных измерений промышленных загрязнений, анализа воздуха в полевых условиях, изучения реакций в атмосфере и др.

1.5. Люминесцентно-битуминологический метод

При выделении нефтеносных горизонтов в разрезах скважин большую помощь оказывает лабораторный метод исследования бурового раствора и шлама. Многие вещества, в том числе нефть и битумы, обладают свойством светиться — люминесцировать — при облучении их невидимыми ультрафиолетовыми лучами (УФЛ). Люминесценция объясняется возбуждением молекул жестким ультрафиолетовым излучением. Возвращаясь к исходному состоянию, молекулы отдают приобретенную энергию в виде световых квантов видимой части спектра [6].

Для нефтей спектр свечения зависит от типа нефти (содержания в ней смол и асфальтов). Легкие нефти люминесцируют голубовато-желтым цветом, а тяжелые, смолистые и асфальтовые нефти — от оранжевого до темно-коричневого цвета. Таким образом, наблюдение за люминесценцией бурового раствора и шлама дает возможность установить присутствие и характер битуминозности пород пройденных скважин.

Изучение люминесценции производится кварцевым люминоскопом. Свет кварцевой лампы, установленной в светонепроницаемом ящике, проходит через фильтр из черного стекла, задерживающий подавляющее большинство лучей видимого спектра и пропускающий, в основном, УФЛ. Исследуемый раствор или порода облучаются этими лучами и далее визуально определяется интен-

сивность и цвет люминесцентного свечения. Полученные данные в заранее принятых условных единицах наносятся на диаграмму газометрии скважин. Для повышения точности люминесцентного анализа образцов пород и шлама последние предварительно обрабатываются хлороформом или эфиром.

1.6. Люминесцентный метод сортировки полезных ископаемых

Люминесцентная сортировка использует различия в холодном свечении (люминесценции) минералов, возникающем при облучении их рентгеновскими, ультрафиолетовыми или γ -лучами.

При рентгенолюминесцентной сортировке в качестве источников излучений используют рентгеновские трубки и изотопы. Облучение изотопами находит ограниченное применение, преимущественно в сепараторах для геолого-разведочных работ [7].

Явление люминесценции проявляется при облучении некоторых минералов. Спектральный состав генерируемого излучения зависит от свойств минерала и источника излучения.

К свойствам минералов, влияющим на интенсивность и спектральный состав генерируемого свечения, относятся: состав и строение кристаллической решетки, содержание люминесцирующих примесей (люминогенов), условие проведения опыта (температура, влажность).

К минералам, явление люминесценции которых обусловлено составом и строением кристаллической решетки, относят шеелит, алмазы и др. Явление люминесценции минералов может вызывать присутствие люминогена. В качестве люминогенов выступают уран, редкоземельные элементы, марганец, хром. Некоторые минералы люминесцируют за счет примесей, присутствующих в их разновидностях, например, кальцит, опал, топаз.

В основном люминесцентный метод сортировки применяют для алмазо-содержащих руд. На стадии промышленного освоения люминесцентной сортировки находится технология обогащения флюоритовых и шеелитовых руд.

2. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

2.1. Природные кристаллы

Болев 95 % всех горных пород, из которых сложена Земная кора, образовались непосредственно при кристаллизации природного расплава, т. е. магмы. Кристаллизация магмы — сложное явление. При остывании и затвердевании магма разделяется на части: первыми в магме возникают и начинают расти кристаллы того вещества, у которого температура кристаллизации самая высокая. По мере остывания магмы начинают кристаллизоваться и остальные вещества. Чем медленнее застывает магма, тем больше успевают вырасти кристаллические зерна составляющих ее минералов. Поэтому при медленном затвердевании магмы образуются крупнозернистые горные породы, а при быстром — мелкозернистые [8].

Если магма застывает внезапно, то могут образоваться некристаллические минералы или горные породы. Внезапное застывание магмы наблюдается при извержении вулканов. Штоки застывшей лавы на склонах вулканов дают начало не кристаллическим, а стекловидным горным породам.

Кристаллическая структура обнаружена не только в природных многогранниках камней, в кристаллических горных породах и в металлах, но и во многих других телах. Например, глина состоит из мельчайших кристаллических частичек. Большинство твердых веществ на Земле являются кристаллами.

2.2. Полиморфизм

Полиморфизмом называется свойство некоторых веществ существовать в нескольких кристаллических фазах. Каждая из этих фаз, стабильная в определенной области температур и давлений, называется полиморфной модификацией. Изменение внешних условий вызывает полиморфное превращение [4].

Известным примером существования полиморфных модификаций являются алмаз и графит — две кристаллические модификации углерода. Полиморфный переход графит — алмаз сопровождается изменением типа связи: в алмазе связи чисто ковалентные, в слоистой структуре графита связи между слоями Ван-дер-Ваальсовы, а внутри слоев — ковалентные и отчасти металлические.

При температуре выше 1000 °С алмаз легко и быстро переходит в графит. В противоположность этому превратить графит в алмаз удастся лишь при температуре более 3000 °С и давлениях до 10^8 Па. Поэтому долгие и многочисленные попытки синтеза кристаллов алмаза увенчались успехом лишь тогда, когда научились создавать такие высокие давления [9].

Обладая исключительно высокой твердостью, алмазы незаменимы при изготовлении различных инструментов и приборов (буровые коронки и долота, сверла, резцы, стеклорезы и т. д.).

2.3. Примеры применения рентгеноструктурного анализа

С помощью рентгеноструктурного анализа изучено атомное строение многих кристаллических веществ. По симметрии рентгенограммы, по взаимному расположению пятен или линий на ней и по их относительной яркости можно определить симметрию кристалла, взаимное расположение атомных плоскостей, расстояния и углы между этими плоскостями в структуре [8].

Методы рентгеноструктурного анализа находят широкое применение для исследования молекулярной структуры различных органических веществ и соединений. Основным преимуществом методов рентгенографии в отличие от методов химического анализа является то, что исследуемый материал не подвергается при анализе воздействию реагентов, изменяющих его первоначальное физическое строение. Рентгеновский — это косвенное, но точное воспроизведение состояния вещества, подвергающегося исследованию этим методом.

Большой интерес представляет применение методов рентгеноструктурного анализа для исследования твердых горючих ископаемых, в частности, для выяснения вопросов их строения, генезиса и метаморфизма. Эти методы применялись для изучения структур бурых и каменных углей и антрацитов, строения растений — торфообразователей, торфяных битумов и восков [10].

Для получения рентгенограмм дисперсионных материалов применяется метод Дебая и Шерера — метод порошков. Он применяется, в частности, и для исследования торфа.

2.4. Рентгенометрический метод изучения остаточных деформаций горных пород по кернам

Этот метод основан на явлении интерференции рентгеновских лучей, проходящих через кристаллическую решетку составляющих породу (минерал) кристаллов. В образце горной породы, на который не действуют механические напряжения, расположение атомов и расстояния между ними одинаковы во всех одноименных кристаллах, а характерный линейный размер атомной решетки остается неизменным независимо от его ориентации в образце. При создании в образце механических напряжений характерный линейный размер решетки изменяется в зависимости от его ориентирования под действием деформаций породы. Измеряя характерный линейный размер кристаллической решетки в различных направлениях под углом к поверхности образца, можно определить деформации горной породы и на основании соответствующих постоянных упругости установить напряженное состояние горных пород. В зависимости от различной степени сжатия горной породы пластическая деформация кристаллов сопровождается скольжением (сдвигом) ее частей, двойникованием или смещением решетки части кристалла в новое положение. Эти свойства кристаллов положены в основу изучения остаточных деформаций горных пород в массиве [11].

2.5. Рентгентелевизионная микроскопия

Применение рентгеновского излучения для получения увеличенного изображения исследуемого объекта имеет ряд важных преимуществ перед оптической и электронной микроскопией. Основным преимуществом является возможность исследования внутренней структуры непрозрачных объектов значительной толщины, деталей миниатюрных механизмов, кристаллических пластин и других при расположении объектов на воздухе (а не в вакууме, как в электронной микроскопии). По физическим принципам рентгентелевизионная микроскопия подразделяется на *просвечивающую, дифракционную и электронно-зондовую*. Наиболее эффективно просвечивающие микроскопы используются для контроля качества изделий электронной техники [12].

Дифракционные микроскопы применяются для массового контроля полупроводниковых кристаллов в цеховых условиях, при этом возможно выявление таких несовершенств кристаллов, как дефекты упаковки, скопления дислокаций, границы субзерен и др. Время формирования изображения составляет 5–10 минут.

Электронно-зондовые микроскопы широко применяются при изучении коррозии и диффузии металлов, состава тонких пленок, распределения элементов в минералах, структуры композиционных материалов и др. Современные микроскопы позволяют определять элементы от лития до урана с пространственным разрешением до 5 нм.

2.6. Влияние дефектов кристаллических решеток минералов на их флотационные свойства

В горных породах, состоящих из множества кристаллов, к дефектам относятся границы между зернами, трещины, вызванные разного рода подвижками, а в более крупных объемах — границы между слоями разного состава, жилы, заполненные слабыми минералами, а также другие различные нарушения правильной структуры.

В последнее время отклонение структуры кристаллов от идеальной является одним из самых важных вопросов в минералогии. Установлена связь между дефектами кристаллов сфалерита, пирротина и пирита и их флотированностью [13].

Дефекты в кристаллах пирротина вызывают уменьшение симметрии внутри кристаллов и оказывают заметное влияние на смачиваемость. Дефекты кристаллов пирита оказывают влияние на его термоэлектрический потенциал и смачиваемость.

2.7. Методы наблюдения дислокаций в твердых телах

Современная физика располагает хорошо разработанными методами непосредственного наблюдения дислокаций в твердых телах, в том числе в минералах. К таким методам относится изучение поверхности кристалла с помощью оптического и электронного микроскопов, а также электронного и ионного проекторов, микрорентгенографические исследования, изучение дислокаций в электронном микроскопе на просвет, декорирование (осаждение на дислокациях хорошо заметных примесей) [14].

Современный электронный микроскоп позволяет разглядеть объекты порядка ангстрема (1 ангстрем равен 10^{-10} м). Поэтому теперь наблюдают чередование атомных плоскостей в кристаллах, например, в золоте, где межплоскостное расстояние составляет 0,2 нм. В закономерном чередовании рядов видят обрывы и сдвиги плоскостей — дислокации в структуре. С помощью электронного микроскопа удастся различать и группы точечных дефектов [15].

2.8. Характеристическая температура

Характеристическая температура Θ является температурным рубежом, ниже которого начинает проявляться квантовый характер теплоемкости.

Характеристическая температура зависит от величины связи между узлами кристаллической решетки и является параметром твердого тела, который

применяется в описании ряда свойств твердого тела (электропроводность, теплопроводность и др.). Для большинства веществ характеристическая температура лежит в пределах 300–800 °С. Но есть такие вещества, для которых она значительно выше. Например, у алмаза характеристическая температура около 2000 °С [16].

Таблица 2.1

Значения характеристических температур для некоторых веществ

| Вещество | Θ, К | Вещество | Θ, К |
|----------|------|----------|------|
| Медь | 339 | NaCl | 320 |
| Алюминий | 418 | Кремний | 658 |
| Железо | 467 | Алмаз | 2000 |

Примечательно, что исследование именно кристаллов минералов природного происхождения, например, алмаза, позволило выявить несоответствие результатов экспериментальных определений теплоемкости законам классической физики. Это привело к созданию квантовой теории твердого тела.

2.9. Тепловые свойства горных пород

К основным параметрам тепловых свойств относят коэффициенты тепло- и температуропроводности, удельную теплоемкость.

Согласно закону Фурье, плотность теплового потока пропорциональна температурному градиенту с обратным знаком.

$$q = -\lambda \text{ grad } T.$$

Коэффициент пропорциональности λ характеризует способность среды передавать теплоту и называется коэффициентом теплопроводности. Обратную величину называют удельным тепловым сопротивлением.

Теплопроводность λ является основным параметром, определяемым в терморазведке. При температурах до 1000 °С теплопроводность обратно пропорциональна температуре. В связи с этим средняя теплопроводность до глу-

бин около 100 км, где ожидаются также температуры, понижается примерно в три раза по сравнению со средней теплопроводностью поверхностных отложений. На глубинах свыше 100 км λ постепенно повышается, что объясняется ростом с глубиной давления и лучистого теплообмена. Эта зона пониженной теплопроводности в мантии служит препятствием для оттока тепла к поверхности и способствует возрастанию температур с глубиной [17].

В целом теплопроводность горных пород не зависит от минерального состава, структуры, текстуры, плотности, пористости, влажности, температуры. Минеральный состав магматических, метаморфических и осадочных пород не очень влияет на их теплопроводность. При повышении плотности и давления, а значит, понижении пористости теплопроводность пород повышается. Резко увеличивается λ с увеличением влажности горных пород (в 2–4 раза при изменении влажности с 10 до 50 %). Повышение температуры снижает теплопроводность кристаллических и сухих осадочных пород и увеличивает — у водонасыщенных.

В целом влияние различных природных факторов на теплопроводность горных пород весьма сложно и недостаточно изучено. Магматические и метаморфические породы обладают коэффициентом теплопроводности 0,2–0,4 Вт/(м·К), осадочные — 0,03–0,5 Вт/(м·К), нефтегазонасыщенные — меньше 0,05 Вт/(м·К).

Теплоемкостью горных пород объясняется их способность поглощать тепловую энергию. Она отличается сравнительным постоянством и возрастает с увеличением водонасыщенности. У магматических и метаморфических пород при обычных температурах удельная теплоемкость c изменяется в пределах $(0,6 \div 0,9) \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), у осадочных — $(0,7 \div 1,0) \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), у металлических руд — $(0,9 \div 1,4) \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). С ростом температуры она увеличивается.

Коэффициент температуропроводности a характеризует скорость изменения температуры единицы объема породы при поглощении или отдаче тепла. У различных горных пород она изменяется в пределах $(4 \div 7) \cdot 10^{-7}$ м²/с. Температуропроводность горных пород

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot D},$$

где D – плотность породы.

2.10. Электрическая проводимость минералов

Горные породы и слагающие их минералы очень различны по своим электрическим свойствам. Ток проводимости в чистых самородных металлах обусловлен переносом зарядов электронами, проводимость минералов-диэлектриков в основном ионная, в полупроводниковых минералах электропроводность может быть обусловлена как электронами, так и ионами. Различие в проводимости веществ объясняется различием в энергетической структуре их кристаллов, в ширине запрещенной зоны ΔE . Для горных пород — полупроводников ширина этой зоны лежит в пределах 0,1–2 эВ [18].

Электропроводность минералов обусловлена в основном примесями, поэтому она изменяется в широких пределах [19].

Главные породообразующие минералы (кварц, слюда, кальцит, полевые шпаты, сильвин) имеют низкую электропроводность порядка $10^{-12} \div 10^{-20} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Высокую электропроводность имеют рудные минералы (магнетит, халькозин, халькопирит, пирротин). Например, у магнетита электропроводность составляет $\sim 10^2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Большинство минералов и горных пород по своим электрическим свойствам относятся к классу полупроводников и диэлектриков.

2.11. Влияние различных факторов на электрические свойства минералов

Электропроводность минералов сильно зависит от различных факторов (температуры, влажности, давления, пористости, дефектности структуры, примесей, величины зерен, частоты приложенного поля) и генезиса горных пород.

С повышением температуры электропроводность металлов уменьшается, а у полупроводниковых минералов экспоненциально возрастает. Например, у кварца, кальцита электрическая проводимость изменяется в 10^4 – 10^5 раз при нагревании от 20 до 600 °С. Температурная зависимость электропроводности сказывается на характере преобразования электрической энергии в тепловую, что необходимо учитывать при электрических методах разрушения горных пород. Породы с более выраженной зависимостью $\sigma(T)$ обладают большей способностью разогреваться при прохождении тока [20].

Наличие примесей в проводниках всегда снижает их электрическую проводимость, а в полупроводниках — повышает ее. Так в породообразующих минералах ток проводимости обусловлен, в основном, примесными ионами и атомами, и лишь незначительная его часть — свободными электронами самого минерала. Примесная проводимость характерна и для других минералов, так как ионы и электроны примесей менее связаны в решетке кристалла. Поэтому электропроводность минералов изменяется в больших пределах.

Удельная электропроводность плотных пород находится в прямой зависимости от объемного содержания хорошо проводящих минералов. Наличие в породе рудных минералов в виде прожилков резко повышает электрическую проводимость пород. Электрическая проводимость сцементированных осадочных пород низкая, так как обычно цементирующими веществами являются слабопроводящие минералы — кварц, гипс, кальцит и др. Увеличение зольности углей понижает их электропроводность. Выветривание пород, повышение пористости, трещиноватости, понижение влажности также уменьшают электрическую проводимость породы. Мелкозернистые породы имеют при прочих равных условиях большую электропроводность, чем крупнозернистые. Например, из осадочных пород, не содержащих рудных минералов, наибольшей электрической проводимостью обладает глина [21].

Электропроводность минералов может сильно изменяться при наличии внешнего электромагнитного поля. Так, у минералов-диэлектриков с ростом частоты электромагнитного поля электрическая проводимость возрастает на

несколько порядков, у минералов-полупроводников наблюдается такой же эффект при увеличении напряженности приложенного электрического поля. Это необходимо учитывать при использовании электродинамических методов разрушения горных пород.

2.12. Использование электрических свойств минералов в горной науке и производстве

Знание электрических свойств минералов и их взаимосвязи с другими свойствами позволяет изучать и прогнозировать процессы, происходящие в массивах горных пород.

Электрические свойства минералов широко используются для решения многих практических задач горного производства. Это разведка месторождений полезных ископаемых электрическими и магнитными методами, подземная газификация углей, оттаивание уступов карьеров, укрепление слабых пород (глинистых), обогащение и разделение минералов.

Например, в настоящее время с успехом применяется электроразведка для поисков месторождений нефти и газа в благоприятных условиях их скопления, а также для оконтуривания обнаруженных залежей. Применение этого метода основано на следующем. Слои известняков и песков, насыщенные нефтью или газом, обладают высоким электросопротивлением, но там, где эти слои погружаются и насыщены подпорающей нефть минерализованной водой, они становятся хорошими проводниками. Так были открыты многие месторождения газа. Значительно снизился объем буровых работ при подсчете запасов подобных месторождений.

Данные о закономерностях электрических свойств позволяют управлять процессом разрушения горных пород электрофизическими методами.

Электрические свойства горных пород определяют взаимодействие между породами и внешним электромагнитным полем (способность пород уменьшать напряженность электрического поля, пропускать электрический ток, поляризоваться, поглощать электромагнитную энергию и т. д.). Электромагнитные поля широко используются при электроразведке, при изучении разрезов скважин, разрушении горных пород и т. д.

В последнее время появился интерес к методу электрической сепарации, который используют для разделения минералов, электрообеспыливания, электрофилтрования, очистки растворителей, обезвоживания масел, при обогащении железных руд, извлечении алмазов и т. д. В отличие от флотации этот метод не требует расхода воды, очистки сточных вод, вызывает меньшую запыленность воздуха. Метод основан на различии в электрических свойствах разделяемых компонентов, поэтому для его совершенствования и широкого использования необходимо изучение электромагнитных свойств минералов, особенностей поведения заряженных минеральных частиц в электрическом и магнитном полях [21].

2.13. Эффект Холла, датчики Холла

Эффект Холла — наиболее надежный метод изучения энергетического спектра носителей заряда в металлах и полупроводниках, поэтому он широко применяется для исследования электрофизических свойств минералов и горных пород. По измеренному значению коэффициента Холла R_x можно определить знак, концентрацию и подвижность носителей тока. Если проводимость обусловлена в основном электронами, то $U_x < 0$ и $R_x < 0$, если преимущественно положительными зарядами, то $U_x > 0$ и $R_x > 0$. Для металлов R_x равна $1/ne$, для полупроводников она значительно больше и является сложной функцией концентрации и подвижности [13].

С помощью эффекта Холла исследуют зависимости концентраций и подвижностей носителей от температуры, давления и других факторов.

Знание электрических свойств минералов необходимо для объяснения механизма их электропроводности, что в свою очередь способствует выявлению закономерностей электрических и электрохимических процессов в массивах горных пород.

На эффекте Холла основано действие полупроводникового прибора-датчика Холла. Он представляет собой плоскую тонкую пластинку или пленку из веществ, в которых постоянная Холла отличается от нуля.

Датчики Холла используются в горном деле для регистрации смещений элементов горных пород, вызванных волновыми процессами. Пластика наклеивается на подложку и вместе с ней механически перемещается в неоднородном магнитном поле. Ток поддерживается постоянным, напряжение Холла U_x измеряется в момент установки датчика и при перемещении через определенные промежутки времени. Используют такие магнитные схемы, т. е. индукция магнитного поля так меняется вдоль оси перемещения элемента породы, что зависимость U_x от величины смещения линейная. По регистрируемому смещению датчика и времени перемещения вычисляется скорость движения элемента породы с датчиком. Далее рассчитывается напряжение, создаваемое взрывом, ударом, вибрацией при производстве горных работ. Достаточно высокая чувствительность и малые размеры датчика позволяет измерять смещения при распространении сферических или цилиндрических волн. В магнитных полях напряженностью $(2,5 \div 4) \cdot 10^5$ А/м можно получить чувствительность порядка 10 мВ/мм.

Датчики Холла нашли широкое применение в технике для измерения магнитных полей в широком диапазоне температур и частот, измерения постоянных и импульсных токов в десятки и сотни тысяч Ампер, измерения мощности СВЧ-колебаний.

Незначительные размеры датчиков позволяют использовать их для измерения распределения тока в пространстве, например, внутри электролитических ванн.

Преобразователь на основе датчика Холла нашел применение в области геофизических измерений, он используется в схеме сейсмографа. Сейсмограф с датчиком Холла имеет чувствительность (т. е. коэффициент усиления) приблизительно в 100 раз большую, чем электродинамический.

Датчик Холла используется в приборах — акселерометрах, позволяющих измерять земное ускорение. Прибор работает в интервале ускорений 0–5g и в интервале частот 0–25 Гц. На выходе напряжение Холла достаточно велико, чтобы привести в действие стрелочный прибор или самописец без

усиления. Например, при ускорении свободного падения g напряжение Холла U_x порядка 80 мВ, при ускорении $10^{-3}g$ — 80 мкВ. Разработаны акселерометры, которые благодаря датчику Холла позволяют измерять малые ускорения порядка $10^{-3} \div 10^{-4} g$.

2.14. Термоэлектрические явления

Явление возникновения термоэдс имеет широкое практическое применение, в том числе в горной науке и технике, как лежащее в основе простого электрического метода измерения температур. Метод имеет большую чувствительность, малую инерцию, применим в широком диапазоне температур, позволяет измерять температуры малых объемов среды, допускает дистанционные измерения. Коэффициент полезного действия металлических термопар мал $\sim 0,1\%$; при разности температур спаев, равной 100 К, термоэдс не превышает нескольких милливольт [24].

С открытием полупроводников это явление используют для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, КПД таких термопар достигает $\sim 8\%$. Устройства такого рода называют термоэлектрогенераторами. Их используют для питания радиоприемников и небольших радиостанций.

При нагревании контактов различных минералов возникает термоэдс вследствие различия концентрации носителей зарядов минералов и увеличения их подвижности.

Данные измерения термоэдс позволяют получить полную характеристику электрофизических свойств полупроводниковых минералов: тип проводимости, концентрацию носителей тока, эффективную массу носителей, положение уровня Ферми в запрещенной зоне.

Исследование термоэдс минералов помогает объяснить некоторые закономерности природных электрохимических явлений, например, природу земных токов.

3. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

3.1. Применение естественной радиоактивности горных пород в практике горного дела

Естественная радиоактивность пород обусловлена наличием в их составе либо минералов, содержащих радиоактивные элементы (уран U, торий Th, радий Ra), либо радиоактивных изотопов калия, кальция, рубидия, циркония, олова, теллура, вольфрама, рения и висмута [19].

Кроме того, ряд минералов обладает способностью адсорбировать из окружающей среды радиоактивные элементы и изотопы, вследствие чего наличие таких минералов в породах также повышает их радиоактивность. Так, повышенной радиоактивностью в результате сорбции элементов обладают глина и глинистые сланцы. Поэтому присутствие глины в осадочных породах (например, в мергелях) увеличивает их радиоактивность.

Радиоактивных элементов в земной коре очень мало. В литосфере содержится приблизительно U^{235} $2,1 \cdot 10^{-6}$ %, U^{238} — $3 \cdot 10^{-4}$ %, тория Th^{237} — 8 %, радия Ra^{226} — $1 \cdot 10^{-4}$ %.

Для определения процентного содержания радиоизотопа в руде используется метод относительной активности. В этом методе сравнивают активность пробы с активностью эталона, в котором известно содержание данного радиоизотопа. Этот метод используется и в случае экспресс-анализов руд в больших емкостях (вагонетках, автомашинах).

Измерение естественной γ -активности позволило создать метод для экспресс-анализов руд в емкостях, который в настоящее время является важной и неотъемлемой частью технологии добычи, обогащения и переработки уранового сырья [25].

Физические методы анализа, основанные на измерении естественной радиоактивности руд, позволяют вести не только лабораторный количественный анализ, но и управлять технологическим процессом при добыче и обогащении

урановых руд, дают возможность проводить оконтуривание месторождений и выяснять характер радиоактивных аномалий в полевых условиях и с воздуха.

Естественная радиоактивность используется для автоматизации процесса обогащения кусковой урановой руды. Кусковая руда, падающая из бункера с определенным интервалом, попадает на соответствующий транспортер в зависимости от содержания радиоизотопа в руде. Разделение на богатую и бедную руду производится воздуходувками, куда поступает сжатый воздух. Команду на включение воздуха (в случае бедной руды) дает специализированная электронно-счетная машина, анализирующая сигналы, поступающие с фотоэлемента и детектора излучения. Подобный принцип положен в основу работы сепараторов углей по естественной радиоактивности, так как радиоактивность каменных углей значительно меньше радиоактивности вмещающих пород. Используется также повышенная радиоактивность калийных солей для их сортировки.

3.2. Определение возраста горных пород и Земли

Основное свойство естественной радиоактивности — независимость вероятности распада от времени — дает возможность измерить возраст горной породы, т. е. определить время, прошедшее с момента образования породы до момента измерения.

Наилучшие результаты дал «свинцовый метод», т. е. метод, основанный на измерениях изотопного состава свинца. Как известно, родоначальники трех радиоактивных семейств U^{238} , U^{235} и Th^{232} путем последовательных превращений переходят в стабильные изотопы свинца Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208} . Рассмотрим, например, урановое семейство. Если U_0^{238} — количество атомов урана в момент образования породы, а U^{238} — количество атомов урана, оставшегося по истечении времени t , то $U^{238} = U_0^{238} e^{-\lambda_1 t}$, где λ_1 — постоянная распада. Учитывая, что каждый распавшийся атом U^{238} дает в конечном итоге атом свинца Pb^{206} , можно записать равенство $U_0^{238} e^{\lambda_1 t} - U^{238} = Pb^{206}$, где Pb^{206} означает количест-

во атомов радиогенного изотопа свинца. Отсюда получаем уравнение $Pb^{206}/U^{238} = e^{\lambda_1 t} - 1$. Если известно количество атомов Pb^{206} , то возраст минерала определяется немедленно [25].

Поскольку задача определения абсолютного количества атомов свинца сложна, то можно воспользоваться двумя другими радиоактивными семействами и написать для них аналогичные отношения:

$$Pb^{207}/U^{235} = e^{\lambda_2 t} - 1, \quad Pb^{208}/Th^{232} = e^{\lambda_3 t} - 1,$$

где λ_2, λ_3 — соответствующие постоянные распада.

Для рядов урана и актиноурана (U^{235}) получаем уравнение

$$Pb^{207}/Pb^{206} = U^{235} (e^{\lambda_2 t} - 1) / U^{238} (e^{\lambda_3 t} - 1).$$

Это уравнение позволяет производить вычисления возраста только лишь по отношению Pb^{207}/Pb^{206} , поскольку отношение изотопов урана U^{238}/U^{235} равно 137,7 практически во всех минералах. Для удобства возраст t по отношениям Pb^{206}/U^{238} ; Pb^{208}/Th^{232} ; Pb^{207}/U^{235} ; Pb^{207}/Pb^{206} вычисляется по заранее составленным номограммам и графикам.

Полагая, что в момент образования Земли существовал только нерадиогенный стабильный изотоп свинца Pb^{204} , можно определить возраст Земли. Отношение радиогенных изотопов свинца Pb^{206} , Pb^{207} к Pb^{204} составляет 15–18 % и 15,3 % соответственно. Это дало для возраста Земли значение $t = 4,35 \cdot 10^9$ лет.

3.3. Радиоуглеродный метод хронологической маркировки ископаемых находок органического происхождения

Идея этого метода заключается в измерении остаточной радиоактивности A найденного предмета и сравнении ее с некоторым стандартным значением A_0 . Чем сильнее отличается радиоактивность найденного предмета от стандартной, тем предмет старше. Поясним, почему так получается [26].

В процессе обмена веществ живое растение усваивает из воздуха углекислоту CO_2 . Основная часть углерода, входящего в состав углекислоты, представлена стабильными изотопами C^{12} (99 %) и C^{13} (≈ 1 %). Однако, кроме них в составе CO_2 имеется еще очень небольшая (10^{-10} %) примесь радиоактивного изотопа углерода C^{14} (он может возникать в реакции $\text{N}_7^{14}(n, p)\text{C}_6^{14}$, идущей на атмосферном азоте. Нейтроны, необходимые для этой реакции, появляются в атмосфере за счет процессов, вызываемых космическими протонами).

Так как содержание C^{14} в атмосфере с течением времени почти не изменяется (средняя интенсивность космических лучей мало меняется со временем), то и процентное содержание C^{14} в живом растении также является практически неизменным (не зависящим от исторической эпохи).

Поэтому исследование радиоактивности $A(t)$ найденного древнего деревянного предмета и сравнение полученного значения с величиной A_0 , известной для живой древесины, позволяет определить время t , прошедшее с момента, когда было срублено дерево, из которого изготовлен этот предмет.

Аналогичным способом можно определить и дату смерти живого существа, если измерить радиоактивность его останков. Такая возможность связана с тем, что животное (пока оно живет), так же как и растение, имеет постоянное количество ядер C^{14} на 1 г углерода. (Травоядное животное получает C^{14} через растительные продукты питания, плотоядное — через травоядных животных).

3.4. Поглощение излучения веществом

При прохождении γ -лучей через слой вещества происходит их поглощение за счет трех факторов: фотоэффекта, эффекта Комптона и образования пар частиц (электрон-позитрон). В результате действия этих трех факторов интенсивность γ -лучей экспоненциально убывает в зависимости от толщины x слоя вещества:

$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\mu' \rho x}, \quad (3.1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, зависящий от природы поглощающего и рассеивающего вещества и энергии падающих квантов;

μ' – массовый коэффициент;

ρ – плотность поглощающего материала.

После логарифмирования (3.1) получаем

$$\rho x = \frac{1}{\mu'} \ln \frac{I_0}{I}. \quad (3.2)$$

Формула (3.2) дает надежный и довольно точный метод определения толщины или плотности поглотителя, если μ' можно считать постоянным. Измерив отношение интенсивности излучения в отсутствие поглотителя и излучения, прошедшего сквозь поглотитель, можно определить плотность, если известна толщина слоя, или определить толщину слоя, если известна плотность [25].

Разработаны плотностемеры для измерения и регулирования плотности пульпы на обогатительных фабриках и плотности различных жидкостей на заводах цветной металлургии.

На обогатительных и агломерационных фабриках применяются γ -реле для контроля за заполнением бункеров, при автоматизации их загрузки и выгрузки, для контроля наличия руды на транспортерах, автоматизации загрузки скипа и цеховых дробилок.

Радиоактивное излучение дает возможность следить за уровнем шихты в доменных печах. Если по одну сторону печи поместить радиоактивное вещество, испускающее γ -лучи (например, кобальт-60), а по другую сторону — счетчик Гейгера-Мюллера, то, так как шихта поглощает значительную часть проходящих через нее γ -лучей, показания счетчика резко изменяются при опускании шихты ниже заданного уровня. Сигнал от счетчика заставит сработать автоматическое устройство, управляющее загрузкой печей, и нужный уровень шихты будет немедленно восстановлен. Радиоактивные уровнемеры могут быть использованы и в целом ряде других производств.

Уровнемеры могут вести постоянный контроль уровня жидкости в резервуарах или трубопроводах.

3.5. Метод измерения напряжений в массиве горной породы

На использовании зависимости поглощения γ -излучения от плотности пород основан радиометрический метод измерения напряжений. Наибольшее распространение в современной практике получил метод просвечивания материалов потоком γ -излучения, обладающего большой проникающей способностью [13].

Исследуемый материал помещается при этом между источником γ -излучения, в качестве которого используется обычно радиоактивный изотоп кобальта Co^{60} или цезия Cs^{137} , и детектором излучения — счетчиком Гейгера, сцинтилляционным счетчиком или ионизационной камерой. Чем больше плотность породы, тем больше поглощение γ -лучей. В стенке горной выработки бурят две неглубокие скважины на некотором расстоянии друг от друга. В одну скважину помещают радиоактивный источник, в другую — датчик радиометра. По интенсивности излучения, регистрируемого радиометром, судят о плотности горной породы между скважинами. А зная, как изменяется плотность с увеличением давления, действующего на породу, оценивают, насколько велики напряжения в данном участке массива. Радиометрический метод можно использовать для контроля за пучащими, т. е. выпирающими под действием горного давления, породами, так как пучение пород всегда сопровождается их разрыхлением и, следовательно, снижением плотности [19].

3.6. Просвечивание торфа γ -лучами

Лабораторные опыты по просвечиванию торфа γ -лучами, проводившиеся в условиях, обеспечивающих получение тонкого пучка γ -излучения Co^{60} , показали, что для торфа $\mu' = 0,054 \text{ см}^2/\text{г}$ [10].

Для почв, грунтов и строительных материалов значения μ' близки к полученным значениям для торфа и составляют $0,050\text{--}0,054 \text{ см}^2/\text{г}$.

Метод лабораторного просвечивания может быть использован в исследовательских работах для систематических наблюдений за изменениями влажности и объемного веса торфа в процессе сушки, сжатия торфа под нагрузкой, искусственного обезвоживания, брикетирования и т. п. К преимуществам метода следует отнести возможность наблюдений за изменением этих параметров в отдельных точках или слоях торфа без нарушения его структуры и отбора проб.

3.7. Методы измерения радиоактивности и определения содержания радиоактивных элементов

Естественная радиоактивность пород обуславливается наличием в их составе минералов, содержащих радиоактивные элементы либо радиоактивные изотопы.

Радиационные свойства (естественная радиоактивность и поглощательная способность) используются для определения плотности горных пород, а также для создания безопасных условий разработки радиоактивных руд. Широко применяются радиационные свойства для сортировки руд и их обогащения.

Радиоактивные изотопы используются для контроля заполнения бункеров; контроля запыленности воздуха; контроля весового содержания руды в пустой породе; для определения плотности пульпы; определения количества прошедших вагонеток через данный участок с разделением их на «порожние» и «груз»; контроля движения забойных машин по геометрии пласта [18].

Радиоактивные изотопы обладают рядом достоинств при использовании их в горнодобывающей промышленности: на работу аппаратуры не влияют высокая влажность, пыль, грязь, агрессивные среды.

При изучении радиоактивности горных пород и минералов и определения содержания в них радиоактивных элементов применяются различные методы, использующие разнообразные физические (в первую очередь, радиоактивные) и другие свойства урана, тория и продуктов их распада, а также последствия

радиоактивности (радиационные дефекты кристаллической решетки минералов, радиогенные продукты распада и т. д.) [27].

Основными методами, используемыми в ядерной геофизике и ядерной геохимии, являются следующие:

- радиометрические (полевые и лабораторные) методы определения α -, β -, γ -активности и оценки содержания радиоактивных (естественных и искусственных) элементов по уровню активности препаратов;

- радиохимические (лабораторные) методы определения содержания радиоактивных элементов, включающие химическое выделение изотопов и последующее измерение их активности;

- радиографические (лабораторные) методы оценки пространственного распределения урана и тория в горных породах и минералах;

- люминесцентные (полевые и лабораторные) методы определения содержания урана;

- калориметрические (лабораторные) методы оценки содержания урана и тория с предварительным химическим концентрированием элементов;

- рентгеноспектральные (лабораторные) методы определения урана и тория;

- нейтронно-активационные (преимущественно лабораторные) методы определения содержания и формы нахождения урана.

Основными методами изучения естественной радиоактивности земной коры и поисков скоплений радиоактивных минералов являются радиометрические методы, в первую очередь, различные модификации γ -съемки (пешеходной, автомобильной, воздушной, глубинной). С помощью методов полевой γ -съемки получен материал о γ -активности почв, рыхлых отложений пор выветривания и материнских горных пород большинства геологических структур континентов.

3.8. Естественная радиоактивность (радиоактивный фон)

Радиоактивные изотопы, входящие в состав различных горных пород, вместе с природными водами выносятся на поверхность Земли и в виде примесей рассеиваются в почве и водоемах [6]. Излучение этих изотопов составляет естественный, радиоактивный фон в нижних слоях атмосферы и в почве. К этому фону следует добавить проникающую радиацию в виде космических лучей, приходящих на Землю из мирового пространства. Возникающий при этом общий фон вполне ощутим и может быть обнаружен с помощью специальных приборов. Путем исследования интенсивности этого фона в настоящее время производят разведку естественно-радиоактивных элементов с самолетов, на которых для регистрации радиоактивного фона устанавливаются чувствительные к β - и γ -лучам приборы, которые непрерывно регистрируют степень радиоактивности. Если приборы регистрируют аномально высокий фон, то место, где это обнаружено, особенно тщательно исследуется с целью обнаружения источника повышения радиоактивности.

Радиоактивные методы разведки дают возможность выявить залегающие каменного угля, руды, изучить структуру горных пород при бурении, установить скорость, границы и закономерности движения подземных вод, определить положение нефтяного пласта [28].

Промысловая геофизика располагает сейчас большим комплексом радиоактивных методов разведки полезных ископаемых. В сочетании с другими геофизическими методами они дают надежные данные при поисковых работах.

Наиболее употребительные приемы радиоактивной разведки: метод естественного γ -излучения, нейтронный и метод изотопов.

3.9. Радиационные методы контроля за составом полезных ископаемых

Эти методы основаны на действии ядерных излучений на ядра и оболочки атомов различных элементов. За счет ядерных реакций возникает поток вторичных частиц, а в ряде случаев наводится вторичная радиоактивность. При этих методах изучается интенсивность вторичных излучений [19].

Методы ядерных реакций на нейтронах состоят в облучении вещества потоком нейтронов и фиксации ответных потоков α -частиц, протонов, γ -лучей, тепловых нейтронов.

α -частицы регистрируют следовыми детекторами; β -частицы — ионизационными приборами, фотографическими методами, сцинтилляционными растворами ; γ -лучи и рентгеновские лучи — по получающимся фотоэлектронам, которые вызывают разряд газонаполненного счетчика; изменяя величину напряжения на счетчике, регистрируют фотоны определенной энергии; нейтроны — по получающимся α -частицам, которые образуются при взаимодействии с бором, заполняющим газоразрядный счетчик; меченые изотопы — при помощи фотопленки.

Дозы радиоактивного поглощения определяют калориметром (по замеру количества теплоты), фотографическим способом (по интенсивности почернения фотоматериала), ионизационным способом (ток, проходящий через камеру, пропорционален энергии излучения, поглощенной в камере).

3.10. Радиоактивные методы исследования скважин

Радиоактивные методы исследования скважин по числу методов и их модификаций, объему и важности решаемых задач на всех этапах поиска, разведки, освоения, разработки и эксплуатации месторождений нефти и газа, а также

контроля технического состояния скважин занимают особое положение в комплексе методов геофизического исследования скважин (ГИС).

Это связано с тем, что в отличие от всех других методов ГИС ряд радиоактивных методов относится к категории прямых методов, т. е. их показания пропорциональны содержанию того или иного определенного породообразующего элемента (C, O, Al, Si, Ca, Mg, Na, K, Fe, Th, U и др.).

Важным преимуществом радиоактивных методов (в отличие от электрических) является то, что практически все они могут проводиться в обсаженных скважинах. Это связано с тем, что используемые в нефтегазовой геофизике радиоактивные методы ГИС основаны на регистрации нейтронного и гамма-излучения, а, как известно, нейтроны и гамма-кванты являются электрически нейтральными частицами и поэтому обладают высокой проникающей способностью [29].

В основе используемых в ядерной геофизике методов лежат процессы естественной и искусственной радиоактивности, эффекты взаимодействия радиоактивных излучений с веществом.

3.10.1. Гамма-каротаж

Под каротажем понимают изучение физических свойств горных пород без извлечения их на поверхность.

Гамма-каротаж (ГК) заключается в измерении γ -излучения естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), содержащихся в горных породах, пересеченных скважиной. Интенсивность и энергетический спектр регистрируемого излучения зависит от состава, концентрации и пространственного распределения ЕРЭ, а также от плотности и эффективного атомного номера горных пород [30].

Наиболее распространенными ЕРЭ являются: U, Ra, Th и K. Каждая из разновидностей горных пород характеризуется своим диапазоном изменений содержания ЕРЭ и, соответственно, своим диапазоном естественной радиоактивности.

У магматических пород максимальной активностью отличаются кислые породы (в основном, из-за повышенного содержания калия, в котором содержится около 0,012 % радиоактивного изотопа K^{40}), минимальной — ультраосновные породы. Среди осадочных пород наиболее активны глины, обладающие высокой адсорбционной способностью, менее активны песчаники, и, наконец, наименьшей активностью обладают гидрохимические осадки (гипс, ангидрит, каменная соль). Исключение составляют только калийные соли, отличающиеся повышенной активностью, благодаря содержащемуся в них калию.

Гамма-гамма-каротаж (ГГК) заключается в облучении горных пород γ -квантами искусственного источника и измерении γ -излучения, рассеянного породами.

3.10.2. Плотностной гамма-гамма-каротаж

Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) основан на изучении комптоновского рассеяния γ -квантов в горных породах. Поскольку этот эффект наблюдается при достаточно высокой энергии γ -квантов, то в ГГК-П используют источники с энергией $E_{\gamma} > 0,5$ МэВ. Такими источниками являются искусственные изотопы Co^{60} , Cs^{137} и естественный ЕРЭ — Ra^{226} .

ГГК-П находит применение при исследовании нефтяных и газовых, углеводородных и рудных скважин.

На нефтяных и газовых месторождениях ГГК-П применяют для дифференциации разрезов скважин по плотности и для определения пористости пород-коллекторов [30].

3.10.3. Рентгенорадиометрический каротаж

Этот метод основан на изучении результатов взаимодействия мягкого γ -излучения с электронами внутренних оболочек атомов вещества.

Это взаимодействие заключается в фотоэлектрическом поглощении γ -квантов электронами какой-либо внутренней оболочки. В результате электрон вылетает из атома, а атом переходит в возбужденное состояние. Место, с кото-

рого удален электрон в результате поглощения γ -кванта, может быть заполнено электроном с другой, более далекой от ядра электронной оболочки. Например, если при фотопоглощении выбит электрон с K -оболочки, то его место может быть занято электронами с L -, M -, N -оболочек. При таких переходах электронов испускаются фотоны рентгеновского излучения.

Совокупность фотонов рентгеновского излучения, возникающих при переходах электронов на один общий, более глубокий уровень, носит название характеристической серии рентгеновского спектра.

Энергия линии K -серии (E_K), наиболее жесткой для всех элементов, не превышает 140 кэВ. Для свинца она составляет 73–85 кэВ, а для легких элементов всего лишь 0,05–0,87 кэВ. Таким образом, рентгеновское излучение является «мягким» и слабопроникающим.

Обычные счетчики Гейгера его не фиксируют и для регистрации применяются пропорциональные или сцинтилляционные детекторы (NaI+Tl), которые в состоянии регистрировать излучение с энергией не менее 0,5 кэВ. Поэтому рентгенорадиометрический метод применим только для элементов с атомным номером $Z > 25$ –30.

Еще один недостаток метода РРК — невозможность разделить излучение близких по атомному номеру элементов. Она связана с низкой разрешающей способностью по энергии у сцинтилляционных детекторов.

В РРК используются зонды, в которых осуществлена геометрия «прямой видимости»: детектор регистрирует вторичное излучение (характеристическое и рассеянное) с того же участка изучаемой поверхности, который подвергается γ -облучению источника. Измерения интенсивности характеристического и рассеянного излучения производят с помощью скважинных гамма-спектрометров [30].

3.10.4. *Нейтронный гамма-каротаж*

Метод нейтронного гамма-каротажа (НГК) является одним из ведущих методов исследования скважин нефтяных и газовых месторождений. В комплексе с другими методами НГК применяется для литологического расчлене-

ния разрезов скважин, выделения коллекторов, оценки пористости, отбивки водо- и газонефтяного контактов и т. п.

В нейтронном γ -каротаже измеряется искусственно вызванное гамма-излучение горных пород. Для возбуждения этого излучения стенки скважины бомбардируют обычно быстрыми нейтронами с энергиями от 3,5 до 6 МэВ [30].

Проникающая способность нейтронов из-за отсутствия у них заряда очень велика. Проходя по породам, нейтроны сталкиваются с ядрами атомов различных элементов. От тяжелых ядер нейтроны отскакивают, не теряя энергии и скорости; легким ядрам они передают часть энергии и замедляются, превращаясь в так называемые тепловые нейтроны, которые затем поглощаются ядрами других элементов. При этом возникает вторичное γ -излучение, интенсивность которого прямо пропорциональна числу тепловых нейтронов.

Известно, что больше всего нейтроны замедляются ядрами водорода, так как последние по своей массе близки к нейтронам. Содержание водорода в разных горных породах различно. Например, у пород, содержащих кристаллизационную воду (гипсы), водорода намного больше, чем у других пород. Это обстоятельство позволяет диагностировать породы при обследовании скважин.

Количество водорода в породах связано также с их влажностью. Это означает, что нейтронным способом можно оценивать влажность или пористость пород и на основании этого обнаруживать нефтяные или водоносные пласты при обследовании скважин.

При захвате ядрами элементов нейтронов большинство новых ядер становится радиоактивными с определенным периодом полураспада и энергией испускаемых частиц. Это позволяет, изучая периоды полураспада и энергии излучения образовавшихся искусственно-радиоактивных элементов, определять химический состав исследуемых пород [30].

К числу реакций радиационного захвата относится, например, реакция на алюминии — основном элементе глин:



Возникающий при этом радиоактивный изотоп Al^{28} распадается с периодом полураспада 2,3 мин. Последнее дает возможность оценить содержание Al в породе.

Примером ядерной реакции с γ -квантами может служить (γ, n) -реакция с бериллием:



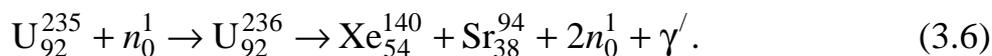
Эта реакция позволяет установить наличие Be в породах при облучении пород γ -квантами достаточно высоких энергий.

Среди большого разнообразия искусственных ядерных реакций в геологической практике часто используются, например, следующие:

ядерные реакции на быстрых или медленных нейтронах



деление тяжелых ядер при захвате тепловых нейтронов



3.11. Метод меченых атомов

Добавление небольшого количества атомов радиоактивного изотопа к нерадиоактивным изотопам того же самого элемента составляет основу метода «меченых атомов». Во всех дальнейших физических и химических процессах меченые атомы движутся вместе с немечеными и позволяют по своему излучению следить за движением данного элемента [31].

Этот метод дает возможность проследить за движением подземных вод, определить нефтяные или газовые пласты. Радиоактивные изотопы используются при обогащении полезных ископаемых. Геофизики стали широко использовать радиоактивные изотопы при исследовании скважин, для решения ряда задач по изучению технического состояния скважин. Процессы бурения и последующей эксплуатации скважин иногда сопровождаются крупными ослож-

нениями и авариями, исключающими дальнейшее использование этих скважин. Чтобы ликвидировать осложнения, нужно знать состояние скважины, ее диаметр, высоту подъема цементного кольца, места разрушения колонны обсадных труб и цементного кольца, уровень жидкости, давление в скважине и др.

В методе изотопов изучается интенсивность γ -излучения пород в скважине, бурившейся на растворе, содержащем радиоактивные изотопы, или обработанной радиоактивным раствором после бурения. Активированный буровой раствор, проникая в поровое пространство пород, например, в трещины, повышает их радиоактивность. Это дает возможность по кривым интенсивности γ -излучения выделять проницаемые и пористые породы. С помощью метода изотопов может быть установлен характер искусственной трещиноватости, созданной гидроразрывом.

Методом меченых атомов удастся установить такие важные для инженерно-геологических и гидрологических исследований данные, как направление и пути фильтрационного потока, скорость его движения и расход. В свою очередь, эти данные позволяют определить коэффициент фильтрации и значение активной пористости грунтов.

3.11.1. Применение метода фильтрации меченой жидкости для изучения свойств торфа

Особенно плодотворными для изучения физических свойств торфа и физических процессов в нем протекающих оказались методы, связанные с применением радиоактивных изотопов. Применение метода радиоактивных индикаторов дало возможность проследить за процессами передвижения воды в торфяной залежи при ее осушении и работой осушительных устройств. Этот метод используется при определении характеристик пористой структуры образцов торфа. Для исследования пористой структуры влажного торфа наиболее эффективным оказался метод «меченой воды».

Изучение физических и физико-химических свойств торфа непосредственно связано с созданием теоретических основ полевой сушки, брике-

тирования и химической технологии торфа.

В опытах используется меченая индикатором вода. В качестве метки применяют тростниковый сахар или радиоактивный индикатор. Наиболее удачным индикатором для торфяных грунтов оказалось соединение Na_2SO_4 , меченое по радиоактивному изотопу S^{35} , являющееся источником β -излучения. Этот индикатор практически не поглощается торфом и имеет период полураспада $T = 87$ дней, что позволяет использовать его для проведения длительных полевых экспериментов. Для этих же целей могут быть использованы радиоактивные изотопы йода I_{131} в соединении NaI или KI , а также радиоактивный бром Br^{82} . I_{131} и Br^{82} являются источниками не только β -излучения, но и γ -излучения, что облегчает проведение радиометрических измерений. Используется также иридий Ir^{192} .

При использовании в качестве метки тростникового сахара используются специальные приборы — сахариметры (рефрактометры), а при использовании радиоактивных меток радиоактивность измеряется радиометрическими методами.

Механизм фильтрации жидкости через образец торфа может быть представлен следующим образом. Передвигаясь по водопроводящим порам, меченая вода вытесняет из них чистую воду. Чем больше размер пор, тем выше скорость передвижения в них воды и тем скорее закончится вытеснение. В начале опыта меченая жидкость вытесняет подвижную воду из наиболее крупных пор образца. Появление метки в фильтрате как раз связано с прохождением ее по этим порам, а в дальнейшем — по все более мелким каналам. Активность фильтрата все более увеличивается. Вытеснение закончится, когда меченая вода заменит чистую и в порах самых мелких размеров, а концентрация станет равной исходной в меченой воде.

Методы, основанные на использовании радиоактивных измерений, все чаще начинают применяться в практике гидротехнических и гидрогеологических изысканий для исследования процессов движения грунтовых вод.

3.11.2. Исследование процесса флотации

Довольно широкое применение метод меченых атомов нашел при изучении процесса флотации. В качестве активных веществ используются β -активные препараты: C^{14} , Ca^{45} , P^{35} , S^{35} , что исключает необходимость громоздкой и тяжелой защиты. Одной из задач, решаемых при помощи меченых атомов, является определение количества поглощенного минералами реагента. Для этого в раствор помещают определенное количество реагента с радиоактивными добавками, затем измеряют активность единицы объема раствора. Поместив в раствор исследуемый минерал, перемешивают смесь и затем минерал отфильтровывают и вновь определяют активность оставшегося раствора. Зная разность активностей исходного и получившегося растворов, можно определить количество поглощенного реагента [25].

Радиоактивные изотопы помогают решить другую важную задачу теории и технологии флотационного процесса — выяснение характера распределения реагентов как на поверхности отдельных частиц минералов, так и между различными частями флотационной пульпы. В состав флотационного реагента вводится изотоп, радиоактивные излучения которого регистрируют благодаря их способности ионизировать вещества, в которые они проникают, вызывая в них химические и физические изменения (засвечивание фотоэмульсии, свечение некоторых составов, возникновение ионного тока в газах и т. д.). Например, в методе микроавтордиографии после контакта минералов с раствором радиоактивного реагента частицы минералов равномерно насыпают на предметное стекло и прижимают к фотопластинке для экспонирования, затем фотопластинка (с толщиной эмульсионного слоя около 10 мкм) проявляется. Полученная автордиограмма дает возможность судить о распределении реагента на частицах минералов.

3.11.3. Исследование перемещения газов, жидкостей и горных пород

Для исследования движения газов применяют изотоп криптона Kr^{85} . Для изучения движения метана по порам и газовой выделению из угольного пласта вводят изотоп Kr^{85} в специально пробуренные скважины и по выделению его из пласта определяют скорость движения метана. Этот же изотоп используется

для изучения вопросов, связанных с шахтной вентиляцией. Для изучения путей движения шахтных вод используются изотопы J^{131} и Br^{82} , которые слабо поглощаются горными породами [25].

Метод меченых атомов применяется для изучения подвижек горных пород внутри массива, возникающих при разработке угольных пластов. В качестве реперов используются эмулированные источники Co^{60} , которые вводятся в изучаемый массив. Для помещения реперов внутри массива и для наблюдения за их подвижками бурится скважина. Наблюдения за перемещениями реперов проводятся каротажными приборами. Эти перемещения привязываются к отметке поверхностного геодезического репера, который считают неподвижным.

3.11.4. Обнаружение эндогенных пожаров в угольной шахте

Подземные пожары приносят огромные убытки государству, поэтому обнаружение пожаров на ранней стадии — одна из важнейших задач горного дела. В качестве меченого соединения используют ацетилен с радиоактивным изотопом C^{14} . Реакция окисления ацетилена начинается при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Радиоактивный газ вводится в поступающую струю газа. На выходе струи установлен индикатор, который фиксирует появление радиоактивного изотопа. Пропуская исходящий поток через баритовую воду, получают осадок карбоната бария. Появление в осадке радиоактивного углерода показывает, что поток газа, проходящий через пласт, подвергся воздействию повышенной температуры ($>80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отсутствие в осадке отмеченного изотопа дает основание делать вывод о том, что на пути газовой струи эндогенного пожара нет [25].

3.11.5. Контроль качества обогащения и эффективности работы смесительных аппаратов

При контроле качества обогащения метки должны обладать плотностью, близкой к плотности полезного продукта. Зная число меток на входе в обогатительную установку и регистрируя число радиоактивных меток в «хвостах», можно определить эффективность обогатительного процесса и выявить опти-

мальный режим обогащения. Регистрация меток может быть осуществлена при помощи гамма-реле. Используются обычно короткоживущие изотопы. Подобный метод может быть применен при любом способе обогащения.

Для определения эффективности работы смесительных аппаратов одна из смешиваемых фракций помечается радиоактивными изотопами P^{32} или S^{35} путем обработки ее водным раствором одного из этих изотопов. Отбирая пробы на выходе смесительной машины, можно судить о равномерности перемешивания и производить настройку аппарата. Этот метод может быть использован для исследования эффективности перемешивания любых смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Электронная микроскопия в минералогии* / под ред. Г. Р. Венка. М.: Мир, 1979. 541 с.
2. *Хохлов В. В.* Многоэлементный спектральный анализ в геологии. Л.: Недра, 1986. 199 с.
3. *Приборы для определения состава и свойств газов, жидкостей, твердых и сыпучих веществ. Номенклатурный каталог.* М.: ЦНИИТЭН приборостроения, 1984. С. 48–76.
4. *Горная энциклопедия* / гл. ред. Козловский Е. А. Т. 1. М.: СЭ, 1984. С. 166.
5. *Горная энциклопедия* / гл. ред. Козловский Е. А. Т. 2. М.: СЭ, 1986. С. 447.
6. *Дахнов В. Н.* К познанию недр Земли (геофизические исследования скважин). М.: Недра, 1968. 144 с.
7. *Кравец Б. Н., Эрдэнэцогт П., Пелевин А. Е.* Специальные и комбинированные методы обогащения: учебно-научное издание. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. 314 с.
8. *Шаскольская М. П.* Кристаллы. М.: Наука, 1985. 208 с.
9. *Шаскольская М. П.* Кристаллография. М.: Высшая школа, 1984. 375 с.
10. *Новые физические методы исследования торфа:* (сб. статей). М.-Л.: Гостехиздат, 1980. 228 с.
11. *Ямщиков В. С.* Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов: учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 296 с.
12. *Леонов Б. И.* Неразрушающий контроль. Сер. Радиоэлектроника и связь. (Новое в жизни, науке, технике). 1985. № 11. С.64.
13. *Турчанинов И. А., Медведев Р. В.* Физики в шахтерских касках. М.: Недра, 1986. 128 с.
14. *Смирнов А. А.* Физика металлов. Современные представления о природе металлов. М.: Наука, 1971. 111 с.

15. *Шаскольская М. П.* Очерки о свойствах кристаллов. М.: Наука, 1987. 172 с.
16. *Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А.* Физика твердого тела: учебное пособие для втузов. М.: Высшая школа, 1971. 224 с.
17. *Геофизические методы исследования* / под ред. В. К. Хмелевского. М.: Недра, 1988. 396 с.
18. *Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика.* /под ред. Н. Б. Дортмана. М.: Недра, 1984. 326 с.
19. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород. М.: Недра, 1984. 359 с.
20. *Мисник Ю. М., Хоминский В. А.* Разрушение горных пород электрофизическим методом: учебное пособие. Л.: ЛГИ, 1984. 94 с.
21. *Физические основы электрической сепарации.* / под ред. В. И. Ревнивцева. М.: Недра, 1983. 271 с.
22. *Ямщиков В. С.* Волновые процессы в массиве горных пород. Учебник для втузов. - М.: Недра, 1984. 271 с.
23. *Левинштейн М. Е., Силин Г. С.* Знакомство с полупроводниками. М.: Наука, 1984. 240 с.
24. *Грабовский Р. И.* Курс физики: учебник. СПб.: Лань, 2006. 608 с.
25. *Применение методов атомной и ядерной физики в горном деле* /А. Д. Суханов, Р. И. Баранов [и др.]. М.: Наука, 1969. 206 с.
26. *Мухин К. Н.* Занимательная ядерная физика. М.: Энергоатомиздат, 1985. 311 с.
27. *Физика горных пород (лабораторные работы).* Кривой Рог.: КРГИ, 1977. 96 с.
28. *Физика раскрывает тайны Земли.* С. В. Темко [и др.]. М.: Просвещение, 1976. 128 с.
29. *Стрельченко В. В.* Геофизические исследования скважин: учебник для вузов. М.: ООО «Недра-Бизнес-центр», 2008. 551 с.
30. *Сковородников И. Г.* Геофизические исследования скважин. Екатеринбург: Институт испытаний и сертификации минерального сырья, 2009. 471 с.
31. *Справочник по инженерной геологии* / под ред. М. В. Чуринова. М.: Недра, 1974. 407 с.
32. *Физические основы торфяного производства.* Калинин: КГУ, 1986. 127 с.

Учебное издание

Лидия Николаевна Лукашевич
Ольга Владимировна Садырева
Людмила Кузьминична Катанова

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
ЯВЛЕНИЙ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Часть 4

Атом, твердое тело, атомное ядро

Учебно-методическое пособие
к лекциям по дисциплине «Физика»
для преподавателей кафедры физики и
студентов всех направлений
специалитета и бакалавриата

Редактор *В. В. Баклаева*

Подписано в печать

Бумага писчая. Формат бумаги 60×84 1/16. Печать на ризографе.

Гарнитура Times New Roman

Печ. л. 2,75. Уч.-изд.л. 2,44. Тираж 80 экз. Заказ №

Издательство УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Уральский государственный горный университет

Отпечатано с оригинал-макета

в лаборатории множительной техники УГГУ