

«Утверждаю»  
директор ГЕОХИ РАН  
академик  
Э.М.Галимов  
" " \_\_\_\_\_ 2003 г.

# РАДИОХИМИЯ

*Составитель:*

*академик Мясоедов Б.Ф.*

## **Состояние и ближайшие перспективы радиохимического образования.**

В настоящее время в России система радиохимического образования включает университетскую подготовку специалистов в областях радиохимии и химических аспектов ядерной технологии, обучение в аспирантуре по этим специализациям и курсы обучения для специалистов с целью повышения их квалификации.

Университеты готовят хорошо адаптирующихся специалистов широкого профиля. Это профессиональные радиохимики и химики, обладающие хорошими знаниями современной радиохимии и методов ее использования в научных и прикладных исследованиях в различных областях химии (химия твердого тела, ядерная медицина, радиоаналитическая химия, радиоэкология и т.д.).

В целом сравнение учебных программ показывает, что система российского радиохимического образования не уступает передовым зарубежным системам. Может быть, она даже более четкая и целеустремленная. В России наблюдаются схожие с западными тенденции в образовании в области радиохимии и ядерной технологии: подчеркиваются аспекты охраны окружающей природной среды, применение ядерных методов в биологии и медицине и т.п. Негативные факторы также подобны: уменьшение интереса студентов к специальности из-за падения престижа ядерных наук, радиофобии, одностороннего обсуждения риска, связанного с ядерной энергией и технологией, в средствах массовой информации. В России данные факторы особенно усугубились после аварии в Чернобыле. На образовательном уровне возникают большие проблемы с оборудованием и поддержанием лабораторий на должном уровне из-за резкого сокращения финансирования. Сегодня не удовлетворяются полностью требования в специалистах для научно-исследовательских и проектных институтов. Исследователи и технологи в области радиохимии продолжают требоваться, как и ранее. А возможна ситуация, когда нужда в молодых специалистах-ядерщиках не будет удовлетворяться системой обучения. И тогда через несколько лет, не окажется ли Россия перед лицом серьезных и суровых проблем со своим ядерным наследием? Специалисты должны быть способны адекватно анализировать геохимическую, экономическую и социаль-

ную информацию для принятия решений, обеспечивающих радиохимическую безопасность.

Программа должна помочь экзаменуемому в получении систематических знаний в области современной радиохимии. При этом экзаменуемый при условии полного усвоения материала должен показать высокий уровень теоретической и профессиональной подготовки, знание общих концепций и методологических вопросов радиохимии, а также умение применять свои знания для решения исследовательских и прикладных задач, планирования эксперимента и применения современных методов обработки результатов.

## 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОХИМИИ

Радиоактивные превращения. Нуклиды и изотопы. Стабильные и радиоактивные ядра. Типы ядерных превращений:  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -превращения, изомерный переход, другие виды превращений. Правила сдвига. Схемы распада. Явление внутренней конверсии, электроны конверсии.

Взаимодействие излучения с веществом. Поглощение  $\alpha$ -частиц. Потери энергии  $\beta$ -излучения при прохождении через вещество. Тормозное излучение. Максимальный пробег  $\beta$ -частиц. Связь между пробегом и энергией  $\beta$ -частиц. Экспоненциальная формула для ослабления  $\beta$ -частиц. Массовый коэффициент ослабления. Образование непосредственно ионизирующего излучения при прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество. Экспоненциальный закон ослабления  $\gamma$ -излучения.

**Законы радиоактивных превращений.** Основной закон радиоактивного распада. Радиоактивная постоянная и период полураспада. Абсолютная радиоактивность и единицы радиоактивности. Определение периода полураспада долгоживущих и короткоживущих радионуклидов. Накопление дочернего нуклида в результате распада материнского радионуклида. Вековое и подвижное радиоактивные равновесия.

Ядерные реакции. Запись ядерных реакций. Эффективное сечение. Расчет выходов ядерных реакций. Использование ядерных реакций для получения радионуклидов. Краткое знакомство с работой ядерного реактора. Нейтронные генераторы. Другие источники нейтронов.

**Регистрация излучений.** Ионизационные методы регистрации. Ионизационные камеры и счетчики. Принцип работы газовых счетчиков. Счетная характеристика, фон и разрешающее время счетчика. Пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера - Мюллера, механизм регистрации излучения счетчиком Гейгера - Мюллера. Эффективность счетчиков. Счетчики для регистрации  $\beta$ - и  $\alpha$ -излучения. Полупроводниковые детекторы, их преимущества по сравнению с детекторами других типов. Сцинтилляционные методы. Принцип работы сцинтилляционных детекторов. Механизм регистрации. Классификация сцинтилляторов. Характеристики основных сцинтилляторов. Фон и счетная характеристика сцинтилляционных счетчиков. Выбор оптимального режима работы сцинтилляционного счетчика. Лабораторные уста-

новки для регистрации излучения со сцинтилляционными детекторами. Жидкостный сцинтилляционный счет.

**γ-спектроскопия** с использованием сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов. Регистрация радионуклидов по излучению Черенкова. Радиографические методы регистрации излучений. Макро- и микроавторадиография.

**Относительные и абсолютные измерения радиоактивности.** Связь между абсолютной и регистрируемой активностью. Коэффициент регистрации и методы его определения. Учет ослабления излучения в стенках детектора и в воздухе. Самоослабление излучения. Обратное рассеяние. Гашение в случае сцинтилляционных детекторов. Поправка на схему распада радионуклида. Учет геометрических условий измерения. Расчеты с использованием зависимости между абсолютной и регистрируемой радиоактивностью. Условия проведения относительных измерений. Особенности измерения малых активностей.

**Обработка результатов измерения радиоактивности.** Погрешности измерений (случайные, систематические, грубые). Нормальный закон распределения. Генеральная и выборочная совокупность. Статистический характер радиоактивного распада и распределение Пуассона. Некоторые методы статистического анализа: оценка генерального среднего на основании выборочных данных, проверка гипотезы о пуассоновском характере распределения результатов измерения радиоактивности. Оценка точности результатов косвенных измерений; закон накопления погрешностей. Выбор оптимальной продолжительности измерения препарата с фоном и фона.

## 2. ЭЛЕМЕНТЫ ОБЩЕЙ РАДИОХИМИИ

**Изотопный обмен.** Причины протекания изотопного обмена и равновесное распределение изотопов. Кинетика гомогенного изотопного обмена. Степень обмена. Механизмы реакций изотопного обмена. Использование реакций гомогенного изотопного обмена для выяснения химической природы соединения. Гетерогенный изотопный обмен. Использование изотопного обмена для синтеза меченых соединений.

**Особенности поведения радиоактивных веществ.** Особенности поведения радиоактивных веществ в ультраразбавленных растворах. Растворы радионуклидов без носителей. Образование твердых высокодисперсных фаз (псевдо- и истинных коллоидов). Адсорбция радиоактивных веществ. Соосаждение и кристаллизация. Особенности поведения соединений при электрохимических процессах в ультраразбавленных растворах. Радиационные эффекты. Радиационно-химический выход. Эффекты, обусловленные радиоактивной отдачей. Химия горячих атомов. Изотопные эффекты.

**Методы выделения, разделения и концентрирования радионуклидов.** Понятие о радиохимически чистом и ядерно-физически чистом состоянии радионуклидов. Разделение, выделение и концентрирование радионукли-

дов. Использование носителей (изотопных, изоморфных и инертных). Экстракционные методы. Методы хроматографии. Основные электрохимические методы. Методы соосаждения, дистилляции и выщелачивания, сорбционные методы.

## **ХИМИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Элементы, не имеющие стабильных изотопов.** Технеций, прометий, полоний, астат, радон, франций, радий, актиний, торий, протактиний, уран, нептуний, плутоний и трансплутониевые элементы: история открытия и положение их в Периодической системе, электронная структура, основные изотопы, методы идентификации, физические и химические свойства. Практическое использование изотопов.

**Актиниды и периодическая система Д.И. Менделеева.** Возникновение актинидной гипотезы (Бор, Сиборг). Общая характеристика гипотезы. Характеристика электронных структур элементов. Химические и физические доказательства актинидного характера элементов с порядковыми номерами 90-104. (изменение устойчивости валентных состояний, поведение на ионообменной колонке, кристаллографические данные об актиноидном сжатии, спектры поглощения растворов, магнитная восприимчивость и др.). Особенности первых членов ряда (торий, уран). “уранидная” и “торидная” гипотеза (Гайсинский, Захариазен). Современные данные о состояниях окисления актинидных элементов и закономерностях их изучения. Трансактиниды (104-109). Их место в периодической таблице элементов. Электронные конфигурации. Экспериментально доказанные (для 104 и 105 элементов) и предсказанные (для 106-109 элементов) химические свойства трансактинидов.

**Химия урана и трансурановых элементов.** Ядерные свойства. Разделение изотопов, выделение изотопов, образующихся при радиоактивном распаде. Распространенность в природе: минералы, экономически рентабельные месторождения, низкосортные месторождения. Получение и очистка. Предварительное концентрирование. Извлечение из руд. Простые и сложные соединения: гидриды, дейтериды карбиды силициды пниктиды халькогениды галогениды. Химия растворов. Состояния окисления. Термодинамические параметры. Электродные потенциалы.

## **3. МЕТОД РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ**

**Применение радионуклидов в аналитической химии.** Основные направления использования радионуклидов для анализа вещества. Преимущества использования радионуклидов в химическом анализе. Анализ с использованием природной радиоактивности; пределы обнаружения радионуклидов с разными значениями периодов полураспада. Анализ с использованием искусственной радиоактивности: определение малого содержания вещества по известной удельной радиоактивности, метод изотопного разбавления, методы

анализа, основанные на использовании стехиометрических реакций (анализ, основанный на использовании избытка осадителя; радиометрическое титрование). Активационный анализ. Использование эффекта обратного рассеяния  $\beta$ -излучения в химическом анализе.

**Применение радиоактивных индикаторов в неорганической и физической химии.** Особенности синтеза меченных радионуклидами неорганических соединений и их номенклатура. Определение растворимости малорастворимых веществ. Определение давлений насыщенных паров. Определение коэффициентов диффузии и самодиффузии в твердых телах (метод снятия слоев) и в жидкостях (капиллярный метод). Определение удельной поверхности порошков. Определение состава и констант образования комплексных ионов. Использование радиоактивных индикаторов в химической кинетике (определение констант скоростей обратимых реакций при равновесии, кинетический изотопный метод М.Б.Неймана). Использование радионуклидов в электрохимии (изучение адсорбции на электроде, определение чисел переноса). Возможности мессбауэровской спектроскопии при изучении твердых тел.

**Применение радиоактивных индикаторов в органической химии.** Синтез меченых органических соединений (прямой химический синтез, специфические радиохимические методы, биосинтез). Особенности номенклатуры меченых органических соединений. Основные типы задач, решаемых с помощью радиоактивных индикаторов в органической химии. Изучение с использованием радионуклидов механизмов органических реакций; идентификация места разрыва или образования химических связей. Типичные примеры. Другие области применения радионуклидов в органической химии.

#### **4. ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

**Основные понятия дозиметрии.** Передача энергии излучения веществу. Статистический характер микродозиметрических величин. Качество излучения. Единицы дозы.

**Основы биологического действия излучения.** Прямое и не прямое действие излучения. Реакция клеток на облучение. Радиочувствительность органов и тканей. Острое и хроническое действие излучения; лучевая болезнь человека. Стохастический характер радиобиологического эффекта при малых дозах. Отдаленные соматические последствия облучения. Действие ионизирующего излучения на растения и животных. Пути поступления радионуклидов в организм.

**Расчет доз от источников  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.** Доза, создаваемая параллельным потоком моноэнергетических  $\gamma$ -квантов. Доза от точечного источника со сложным составом  $\gamma$ -излучения. Ионизационная постоянная и гамма-эквивалент. Доза от внешнего источника  $\beta$ -излучения.

**Основы нормирования радиационного воздействия на человека и объекты окружающей среды.** Уровни риска при радиационном воздействии.

Эквивалентная, эффективная и коллективная дозы. Расчет допустимых уровней облучения. Нормы радиационной безопасности.

**Защита от ионизирующих излучений.** Защита временем, расстоянием, с использованием экранов. Расчет защиты от внешнего  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения.

**Дозиметрические измерения.** Приборы дозиметрического контроля. Измерение мощности дозы и плотности потока, дозы и флюэнса.

**Организация работы с радиоактивными веществами в лаборатории.** Классификация работ с радиоактивными веществами. Оборудование и средства защиты. Правила работы с радиоактивными веществами (ОСП и НРБ). Предельно допустимые уровни загрязнения. Дезактивация и удаление радиоактивных отходов. Трудовое законодательство, регламентирующее работы с радиоактивными веществами, льготы для работающих.

## 5. РАДИОАКТИВНОСТЬ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Естественные радионуклиды в окружающей среде.** Ядерные реакции во Вселенной. Космическое излучение. Концентрирование радионуклидов в природных резервуарах. Уран, торий и радиоактивные продукты их распада (радий, радон и др.) в окружающей среде. Поступление естественных радионуклидов в окружающую среду в результате производственной деятельности человека: при сгорании ископаемого топлива, при производстве удобрений и строительных материалов, переработке полиметаллических руд. Калий-40, углерод-14, тритий и другие природные радионуклиды в живых организмах. Роль естественных радионуклидов в формировании дозовых нагрузок.

**Техногенные радионуклиды в окружающей среде.** Источники загрязнения окружающей среды техногенными радионуклидами. Ядерные взрывы и глобальные радиоактивные загрязнения. Ядерный топливный цикл. Радиоактивные загрязнения при добыче и переработке урансодержащего сырья. Выбросы искусственных радионуклидов при нормальной работе ядерных реакторов. Экологические проблемы переработки облученного ядерного топлива. Радиационные аварии, их классификация. Радиационное воздействие на население при авариях. Сопоставление радиационных рисков от различных источников техногенных радиоактивных загрязнений и ионизирующих излучений.

**Радиоактивные отходы, их переработка, хранение и захоронение.** Транспортировка радиоактивных отходов. Классификация радиоактивных отходов по радиоактивности и химическому составу, агрегатному состоянию. Метод многобарьерной защиты хранилищ радиоактивных отходов.

**Кругооборот радионуклидов в природе.** Миграция, рассеяние радионуклидов в атмосфере: радон, криптон-85, иод-129, 131. Радиоактивные аэрозоли. Радиоактивные атмосферные выпадения. Распространение и концентрирование радионуклидов в водных экосистемах. Цезий-137 и другие радионуклиды в донных отложениях. Миграция и накопление радионуклидов в почвах. Вынос радионуклидов из почв в природные воды и атмосферу. Поступление радионуклидов из почв в растения. Классификация радионуклидов по типам

биомиграции. Камерные модели пищевых цепей. Защитные механизмы биосферы.

## 6. РАДИАЦИОННЫЙ И РАДИОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

**Радиационный контроль на местности.** Аэросъемка дозных полей. Типовые программы мониторинга. Карты радиоактивных загрязнений. Текущий, ретроспективный и прогнозный мониторинг. Служба мониторинга в России.

**Отбор и консервация проб при радиохимическом мониторинге.** Пробы атмосферных осадков, аэрозолей, отходящих газов, воды, донных осадков, почв. Биообразцы. Схемы анализа.

## 7. ПРИНЦИПЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Соотношение "выгода-ущерб" как основа экологического регулирования ядерной энергетики.** Прогноз развития ядерной энергетики и динамики радиоактивного загрязнения среды обитания.

**Административно-законодательный механизм регулирования.** Экологическая экспертиза, экологический аудит источников ионизирующих излучений и радиоактивных загрязнений. Экономические санкции. Финансирование охраны окружающей среды. Международные программы.

## Рекомендуемая литература

1. *Химия актиноидов*: В 3-х т. Т.1. Пер. с англ./ Под ред. Дж.Каца, Г.Сиборга, Л.Морсса. – М.: Мир 1991. – 525 с.
2. *Химия актиноидов*: В 3-х т. Т.2. Пер. с англ./ Под ред. Дж.Каца, Г.Сиборга, Л.Морсса. – М.: Мир 1997. – 664 с.
3. *Химия актиноидов*: В 3-х т. Т.3. Пер. с англ./ Под ред. Дж.Каца, Г.Сиборга, Л.Морсса. – М.: Мир 1999. – 670 с.
4. Несмеянов А.Н., *Радиохимия*, 2-е изд. - М.: Химия, 1978 г.
5. Нефедов В.Д., Текстер Е.Н., Торопова М.А. *Радиохимия*. М.: Высш. шк., 1987 г. – 272 с.
6. *Современные методы разделения и определения радиоактивных элементов*. – М.: Наука, 1989. – 312 с.
7. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О., *Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода*. 3 изд. М.: Высш. шк., 1985 г. – 287 с.
8. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О. *Радиоактивные индикаторы в химии. Проведение эксперимента и обработка результатов*. М.: Высш. шк. 1977 г. – 280 с.
9. Чоппин Г., Ридберг Я. *Ядерная химия. Основы теории и применения*. М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. Эмсли Дж. *Элементы*. М.: Мир, 1993. – 256 с.

11. Козлов В.Ф. *Справочник по радиационной безопасности*. 4-е изд. Перераб. и допол. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 352 с.
12. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-96). Гигиенические нормативы.*, М.: Госатомэнергонадзор России, 1996. – 127 с.
13. Старик И.Е. *Основы радиохимии*. М.-Л.: Изд.АН СССР, 1960. С.459.