КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Основные ядерно-физические термины и определения.

Лекция 2. Общие физико-химические свойства радиоактивных соединений.

Лекция 3. Радиоактивность и закон радиоактивного распада.

Лекция 4. Основы ядерных реакций.

Лекция 5. Радиоактивное мечение химических соединений.

Лекция 6. Производство радионуклидов на циклотроне.

Лекция 7. Производство радионуклидов на реакторе.

Лекция 8. Применение медицинских генераторов радионуклидов.

Лекция 9. Контроль качества радиоактивных изотопов.

Лекция 10. Применение радиоактивных изотопов.

Лекция 11. Радиационная безопасность и обращение с радиоактивными материалами.

Лекция 2. Общие физико-химические свойства радиоактивных соединений.

Цель лекции: познакомить обучающихся с общими физико-химическими свойствами радиоактивных соединений, раскрыть взаимосвязь между радиоактивностью и структурой вещества, а также показать влияние радиоактивного распада на физические и химические характеристики веществ.

Введение: Радиоактивные вещества представляют собой соединения, в состав которых входят изотопы с нестабильными атомными ядрами. Эти ядра способны самопроизвольно изменяться, при этом выделяя ионизирующее излучение – альфа-, бета- или гамма-лучи. Радиоактивность относится к свойствам атомного ядра, а не к химическим особенностям элемента. Тем не менее, она тесно связана с физико-химическими характеристиками вещества, которые определяют его поведение в природных условиях и при использовании в технологических процессах.

Основная часть:

Атом представляет собой сложную систему, состоящую из трёх основных типов элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Эти частицы различаются по массе, электрическому заряду и расположению внутри атома. Протоны и нейтроны объединяются в центральную часть атома – ядро, которое занимает крайне малый объём по сравнению с размерами всего атома, но содержит практически всю его массу. Эти частицы называют нуклонами (от лат. nucleus – ядро).

Радиоактивные элементы – это химические элементы, атомные ядра которых способны самопроизвольно превращаться (распадаться), испуская радиоактивное излучение: альфа-частицы, бета-частицы и гамма-кванты. Радиоактивность – фундаментальное свойство некоторых атомов, связанное с неустойчивостью их ядер. По происхождению радиоактивные элементы делятся на естественные и искусственные (индуцированные).

Естественные радиоактивные элементы – это элементы, существующие в природе с момента образования Земли. Их радиоактивность не является результатом человеческой деятельности, а обусловлена природными процессами. К ним относятся уран (U), торий (Th), радий (Ra), полоний (Po), радон (Rn) и др. Их соединения встречаются в земной коре и играют важную роль в геохимических процессах. Соединения урана, тория и других элементов образуют радиоактивные минералы – уранинит, карнотит, монацит, торит и др. Они служат источниками сырья для ядерной энергетики и исследований. Радиоактивными семействами (рядами) называют связанные последовательным радиоактивным распадом цепочки ядер естественного происхождения (рисунок 1).

Искусственные радиоактивные элементы – это элементы, которых в природе либо нет, либо они встречаются в ничтожно малых количествах. Они получаются искусственно в результате ядерных реакций, когда стабильные ядра превращаются в нестабильные при облучении нейтронами, протонами или другими частицами. Получаются в результате ядерных реакций

(например, технеций Tc, прометий Pm, плутоний Pu). Используются в медицине, энергетике и промышленности.

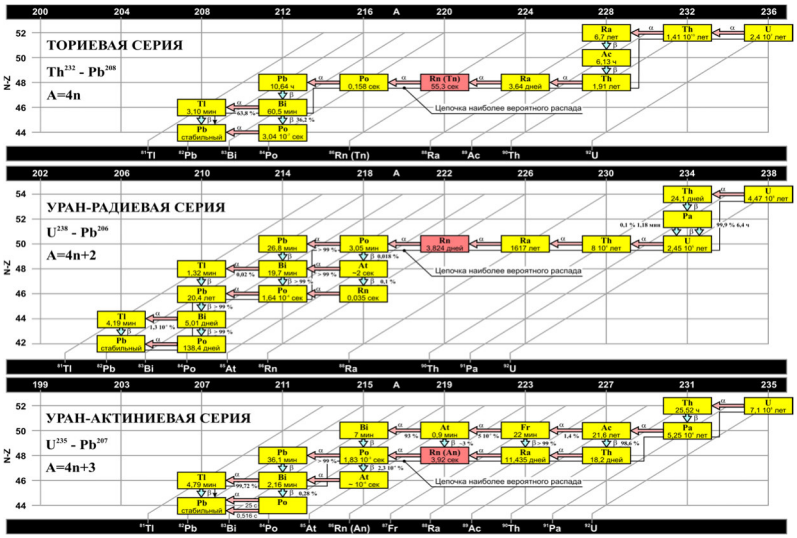

Рисунок 1. – Естественные природные радиоактивные ряды.

Радиоактивные соединения обладают не только обычными физико-химическими свойствами, присущими аналогичным стабильным веществам, но и рядом особых свойств, связанных с радиоактивным распадом их атомных ядер.

1. *Изотопный эффект*: Радиоактивные элементы могут иметь несколько изотопов – разновидностей атомов одного и того же химического элемента, различающихся по массовому числу (то есть по числу нейтронов в ядре). Хотя химические свойства изотопов практически идентичны, их физические свойства (плотность, температура плавления и кипения, давление пара, скорость диффузии и т.д.) зависят от массового числа изотопа. Например, соединения урана-235 (^{235}U) и урана-238 (^{238}U) имеют одинаковое химическое поведение, но различаются: по массе атома (что используется при разделении изотопов методом газовой диффузии или центрифугирования); по скорости диффузии и испарения; по физическим константам – например, плотности и теплопроводности.

2. Различие свойств молекул с разным изотопным составом называется изотопным эффектом (ИЭ). Так как отношение масс изотопов уменьшается с увеличением атомной массы элементов, ИЭ наиболее велики для изотопов легких элементов. Термодинамический ИЭ (ТИЭ) отражает различие в константах равновесия. Кинетический ИЭ (КИЭ) отражает различие в скоростях процессов (скорости реакции). Примеры величин кинетических и термодинамических эффектов. Изотопный эффект зависит от трех факторов:

• MMI (mass-moment of inertia) – отражает вклад в изотопный эффект энергии поступательного движения и вращения молекулы или ее части.

• ZPE (zero-point energy) – отражает вклад в изотопный эффект энергии нулевых колебаний изотопных форм для исходной молекулы.

• EXC (excited vibrational states) – отражает вклад в изотопный эффект энергии возбужденных колебательных состояний.

Изотопный эффект лежит в основе:

– методов разделения изотопов (газовая центрифуга, диффузионные процессы);

– изотопного анализа в химии, геохронологии и экологии;

– определения происхождения веществ по их изотопному составу.

Обогащение и разделение изотопов возможно благодаря изотопным эффектам. Примеры: обогащение урана по изотопу ^{235}U, получение тяжелой воды D_2O. Мировое производство дейтерия составляет десятки тысяч тонн в год, в основном, путем изотопного обмена: 1) между водой и сероводородом $HDS + H_2O \leftrightarrow H_2S + HDO$, $K_p = 2.3$; 2) между аммиаком и водородом $HD + NH_3 \leftrightarrow H_2 + NH_2D$, $K_p = 2.9$.

3. *Тепловыделение*: Каждый акт радиоактивного распада сопровождается выделением энергии, которая частично превращается в тепло. Это происходит из-за того, что энергия связи в ядре уменьшается, а разность выделяется в виде кинетической энергии частиц и электромагнитного излучения. Это свойство используется в атомных реакторах и радиоизотопных термоэлектрических генераторах (РИТЭГ).

4. *Ионизирующее излучение***:** Радиоактивные соединения являются источниками α-, β- и γ-излучений. Влияние ионизирующего излучения приводит к:

- изменению структуры кристаллической решётки (дефекты, дислокации);
- радиолизу – разрушению химических связей под действием излучения (например, разложение воды на водород и кислород);
- изменению окраски кристаллов (появление цветовых центров);
- разрушению органических веществ или образованию новых фаз в неорганических соединениях

Несмотря на особое физическое поведение (радиоактивность, излучение, тепловыделение), их химические свойства в целом определяются электронным строением атомов и не зависят от радиоактивности. Однако воздействие собственного излучения может постепенно изменять состав и структуру этих соединений.

1. *Химическая активность*: Радиоактивность не оказывает прямого влияния на валентность и типичные химические свойства элемента, так как она связана с изменениями в ядре атома, а химическое поведение определяется электронами внешней оболочки. Например, уран в соединениях проявляет валентности +4 и +6, независимо от изотопа. Таким образом, химическая активность радиоактивных элементов определяется их положением в Периодической системе и электронным строением, а не радиоактивным распадом.

2. *Радиолиз и радиационная деструкция:* Собственное ионизирующее излучение радиоактивных веществ способно вызывать разрушение химических связей как в самих соединениях, так и в окружающих веществах (растворителях, органических матрицах и т. д.). Этот процесс называется радиолизом (для жидких и газообразных систем) или радиационной деструкцией (для твёрдых тел). Эти процессы необходимо учитывать при хранении

радиоактивных веществ, при создании радиационно-стойких материалов и в радиационной химии, где радиолиз используется для изучения механизмов реакций.

3. *Комплексообразование*: Радиоактивные элементы (особенно актиниды) склонны образовывать устойчивые комплексные соединения с лигандами – фосфатами, карбонатами, фторидами и органическими веществами. Напри мер, уран(VI) образует устойчивые уранил-комплексы $[UO_2]^{2+}$ с фосфатами и карбонатами.

4. *Гидролиз и сорбция*: Ионы радионуклидов активно сорбируются глинами, гидрооксидами железа и алюминия, что определяет их миграцию в биосфере. Радиоактивные элементы часто гидролизуются в водных растворах, образуя малорастворимые гидроксиды.

Все радионуклиды существуют в какой-то химической форме. Химические соединения, имеющие в своем составе радионуклиды, называются мечеными соединениями. То есть, меченые соединения – химические соединения, в которых атомы одного или нескольких элементов имеют изотопный состав, отличающийся от природного. Все молекулы с измененным изотопным составом делят на две категории.

1. Изотопно-замещённые (isotopically substituted)

$^{14}CH_4$	CH_3-$^{14}COOH$	$^{14}CH_3$-COOH	^{2}H-CH_2-CH_2-COOH
(^{14}C) метан	*(1-^{14}C) уксусная кислота*	*(2-^{14}C) уксусная кислота*	*(3-$^{2}H_1$) пропионовая кислота*

2. Изотопно-меченные (isotopically labeled)

Типы изотопно-меченных соединений

Тип	Написание формулы
Специфично-меченные	$CH_3C[^2H_3]$ [1-$^2H_3$] этан
Селективно-меченные	[1-^{2}H]CH_3CH_3 [1-^{2}H] этан
Неселективно-меченные	[^{2}H]CH_3CH_3 [^{2}H] этан
Равномерно-меченные	[U-^{2}H]CH_3CH_3 [U-^{2}H] этан
Обще-меченные	[G-^{2}H]CH_3CH_3 [G-^{2}H] этан
Изотопно-дефицитные	[*def* -^{2}H]CH_3CH_3 [*def* -^{2}H] этан

Способы получения радионуклидов:

• выделение из природных объектов (полезные ископаемые).

• выделение из отработанного ядерного топлива.

• облучение материалов в ядерном реакторе (например, с получением Mo, I), реакция (n,γ) и др.

• облучение мишеней на циклотронах потоками заряженных частиц (протоны, дейтроны, более тяжелые ядра), реакции (p,n), (d,n) и др.

• фотоядерные реакции (γ,n), (γ,p) и др.

• особый случай: изотопные генераторы (при распаде материнского ядра образуется дочернее, извлекаемое хроматографией или экстракцией).

Радиоактивные соединения широко применяются в различных областях науки, техники, медицины и энергетики. Их использование основано на способности радиоактивных изотопов испускать ионизирующее излучение, которое можно регистрировать, а также на выделении тепловой энергии при распаде ядер. Основные направления применения: медицина, энергетика, наука и промышленность.

1. *В медицине*: Радиоактивные изотопы и их соединения нашли широкое использование в диагностике, лечении и научных исследованиях в области биологии и фармакологии.

а) Диагностика (радионуклидная диагностика)

Используются радиофармацевтические препараты (РФП) – вещества, содержащие радиоактивные изотопы, которые вводятся в организм для отслеживания их распределения и изучения функций органов. С помощью специальных детекторов (гамма-камер, томографов) регистрируется излучение, испускаемое радионуклидом. Преимущества: Позволяет выявлять нарушения на ранних стадиях; Обеспечивает высокую чувствительность и точность; Минимальная лучевая нагрузка при правильном дозировании.

Примеры:

- Технеций-99m (^{99m}Tc) – наиболее часто применяемый изотоп в ядерной медицине (период полураспада составляет 6 часов) $^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + \gamma$ (140 кэВ) - 88%, $^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + e^-$ - 12%. Используется для сцинтиграфии печени, почек, костей, сердца.
- Йод-131 (^{131}I) – применяется для диагностики и лечения заболеваний щитовидной железы (так как йод избирательно накапливается в её тканях) $^{131}I \rightarrow {}^{131}Xe + e^- + \nu$.

б) Лечение (радионуклидная терапия)

Используются излучатели, которые оказывают локальное воздействие на поражённые ткани, разрушая опухолевые клетки. Преимущества: Высокая избирательность действия; Минимальное повреждение здоровых тканей при правильной локализации источника.

Примеры:

- Иттрий-90 (^{90}Y) – применяется для лечения опухолей печени, лимфом, синовитов суставов $^{90}Y \rightarrow {}^{90}Zr + e^- + \nu_e$.
- Фосфор-32 (^{32}P) – используется для терапии заболеваний крови (лейкемий, полицитемии) $^{32}P \rightarrow {}^{32}S + e^- + \nu$.
- Йод-131 (^{131}I) – эффективен при лечении гипертиреоза и рака щитовидной железы.

2. *В энергетике:*

а) Ядерное топливо

Основное использование радиоактивных соединений связано с производством энергии в атомных реакторах. Основные соединения: Оксид урана (UO_2); Оксид плутония (PuO_2).

б) Радиоизотопные источники тепла

Некоторые радиоактивные изотопы (например, плутоний-238) применяются для создания радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ) – источники энергии для космических аппаратов, спутников, зондов, где невозможно использование солнечных батарей (например, на Марсе, в глубоких космических миссиях).

3. *В науке и промышленности:*

а) Радиоактивные индикаторы

Используются как трассеры (отслеживающие вещества) для исследования различных процессов:

- химических реакций (определение механизмов и скоростей реакций);
- биологических процессов (изучение обмена веществ, кровообращения, распределения лекарств в организме);
- геохимических и гидрологических процессов (прослеживание движения подземных вод, миграции загрязнений).

Например, изотоп фосфора-32 (^{32}P) применяется для исследования фосфатного обмена в растениях и животных.

б) Контроль и измерения

Ионизирующее излучение радиоактивных веществ используется для неразрушающего контроля материалов и изделий.

Основные направления:

- Контроль толщины и плотности материалов (в бумажной, металлургической, текстильной промышленности).
- Дефектоскопия – выявление трещин, пустот и дефектов в сварных швах и металлических конструкциях с помощью γ-излучения (источники: Co-60, Ir-192).
- Стерилизация медицинских инструментов и продуктов питания с помощью γ-излучения (Co-60).

Заключение:

Радиоактивные соединения занимают особое место среди химических веществ, поскольку их свойства определяются не только электронным строением атомов, но и процессами, происходящими в их нестабильных ядрах. Радиоактивность – это фундаментальное физическое свойство, связанное с самопроизвольным распадом атомных ядер, сопровождающимся выделением энергии и испусканием ионизирующего излучения. Несмотря на то, что радиоактивность является ядерным, а не химическим явлением, она оказывает заметное влияние на физико-химическое поведение веществ. Радиоактивные соединения обладают рядом характерных особенностей: тепловыделением при распаде, изменением структуры под действием

собственного излучения, а также изотопным эффектом, который проявляется в различиях физических свойств изотопов одного элемента. Эти эффекты лежат в основе методов разделения изотопов и радиохимических технологий.

Химические свойства радиоактивных элементов определяются их положением в Периодической системе и электронным строением, а не самим фактом радиоактивности. Тем не менее, излучение, испускаемое при распаде, может вызывать радиолиз, разрушение химических связей и изменение структуры вещества, что важно учитывать при хранении и обращении с радиоактивными материалами. Благодаря своим особым свойствам радиоактивные соединения нашли широкое применение в различных областях науки и техники. В медицине они используются для диагностики и терапии заболеваний, в энергетике – как топливо и источники тепла, в промышленности – для контроля качества и стерилизации, а в научных исследованиях – как индикаторы и трассеры для изучения химических и биологических процессов.

Таким образом, радиоактивные соединения представляют собой уникальный класс веществ, сочетающих в себе физические и химические особенности, которые не только раскрывают фундаментальные законы природы, но и имеют огромное практическое значение для развития современной науки, техники и медицины.

Контрольные вопросы:

1. Что представляет собой радиоактивность и чем она отличается от обычных химических свойств вещества?
2. Чем различаются естественные и искусственные радиоактивные элементы? Приведите примеры.
3. Что такое изотопы и в чём заключается изотопный эффект?
4. Какие физические свойства веществ зависят от изотопного состава?
5. Что такое радиолиз и как он проявляется в радиоактивных соединениях?
6. В чём заключается влияние ионизирующего излучения на структуру и свойства вещества?
7. Какие особенности комплексообразования характерны для радиоактивных элементов (например, урана)?
8. Каковы основные способы получения радионуклидов?
9. В каких областях науки, техники и медицины применяются радиоактивные соединения?

Список использованных источников:

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.
2. Калмыков С.Н., и др. Основы радиохимии и радиоэкологии. – М.: МГУ. – 134 с. https://teach-in.ru/course/fundamentals-of-radiochemistry-and-radioecology-kalmykov
3. Кислов, А. Н. Атомная и ядерная физика: учеб. пособи. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 271 с.

4. Черняев А.П., Белоусов А.В., Лыкова Е.Н. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. – М.: ООП физического факультета МГУ, 2019. – 104 с.

5. Atkins P., de Paula J. Physical Chemistry. – Oxford University Press, 2022. – 976 p.