

## RADIOACTIVE INDICATORS IN CHEMICAL RESEARCHES

S. S. BERDONOSOV

*The basic approaches of radioactive indicators in chemistry for research chemists are considered. Examples of radioactive indicator applications in analytical, physical, organic and other areas of chemistry are given.*

**Рассмотрены основные возможности, которые открывает перед химиками-исследователями использование радиоактивных индикаторов в различных областях химии. Приведены примеры применения радиоактивных индикаторов в аналитической, физической, органической и других областях химии.**

## РАДИОАКТИВНЫЕ ИНДИКАТОРЫ В ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

С. С. БЕРДОНОСОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

В первой четверти XX века было установлено, что атомы, занимающие одну и ту же клетку Периодической системы элементов, могут различаться по таким важным характеристикам, как масса и радиоактивные свойства входящих в их состав ядер. Явление существования разных видов атомов одного и того же элемента получило название изотопии. Сначала в природе были обнаружены изотопы некоторых тяжелых природных элементов (свинца, тория, урана). Так, оказалось, что у свинца кроме четырех природных стабильных изотопов с массовыми числами 204, 206, 207 и 208 (напомним, что массовое число атома — это сумма чисел протонов и нейтронов в его ядре, а вид атомов с определенным значением массового числа называют нуклидом) в природе в ничтожных количествах имеются и радиоактивные изотопы этого элемента (его радио-нуклиды): свинец-212, свинец-210 и др.

Так как химическое поведение стабильных и радиоактивных нуклидов одного элемента идентично, а о присутствии радиоактивных атомов можно судить по испускаемому этими атомами в момент распада ядер излучению, оказывается возможным надежно зафиксировать наличие ничтожно малых количеств таких атомов. Поэтому возникла идея применения радиоактивных атомов как меток для изучения различных химических процессов. Используемые при этом радиоактивные атомы служат меткой, индикатором, и поэтому применение радиоактивных индикаторов в химии получило название метода радиоактивных индикаторов. Одним из пионеров использования радиоактивных индикаторов в химии был российский ученый Вл.И. Спицын, который еще в 1917 году использовал при изучении растворимости в воде малорастворимых соединений тория в качестве радиоактивных меток сравнительно короткоживущие радионуклиды тория, выделенные из урановых руд.

Широкое применение радиоактивных индикаторов в химии началось после того, как в результате работ французских исследователей Ф. Жолио и И. Кюри была доказана возможность искусственного получения не встречающихся в природе радиоактивных атомов “обычных”, стабильных элементов. Эти ученые в 1934 году за счет взаимодействия ядер алюминия с ядрами гелия (то есть за счет ядерной

реакции)  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} = {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0n$  или, в краткой записи,  ${}^{27}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}\text{P}$  (здесь  $n$  – символ нейтрона) получили радиоактивные атомы  ${}^{30}\text{P}$ , широко распространенного в природе стабильного элемента фосфора. Вскоре были разработаны и другие способы искусственного приготовления радиоактивных атомов-меток многих стабильных элементов. Особенно эффективным оказалось введение радионуклидных меток за счет облучения стабильных атомов потоком нейтронов. При этом ядро стабильного элемента поглощает нейтрон, испускает  $\gamma$ -квант и превращается в радиоактивное ядро того же элемента, но имеющее на единицу большее массовое число, чем исходное ядро. Например, при облучении нейтронами стабильные ядра брома-79 превращаются в радиоактивные ядра брома-80:  ${}^{79}\text{Br}(n, \gamma){}^{80}\text{Br}$ . Благодаря этому в органическое соединение, содержащее атомы брома, можно ввести радиоактивную метку  ${}^{80}\text{Br}$ , облучив это соединение нейтронами.

В настоящее время радиоактивные атомы, удобные для проведения различных исследований (то есть радиоактивные атомы, характеризующиеся сравнительно большими периодами полураспада  $T_{1/2}$  и обладающие излучением, которое удобно регистрировать на радиометрической аппаратуре), получены для подавляющего большинства элементов Периодической системы (кроме десяти легких, к числу которых относятся Li, B, N, O, F и некоторые другие).

Однако следует иметь в виду, что в физико-химическом поведении атомов разных изотопов одного элемента существуют и некоторые различия (так называемые изотопные эффекты). Эти эффекты связаны с различиями масс радиоактивных и стабильных атомов изотопов одного и того же элемента. Существенны изотопные эффекты для легких элементов. Так, в случае водорода различие масс атомов стабильного протия  ${}^1\text{H}$  и радиоактивного трития  $\text{T} ({}^3\text{H})$  достигает 300%. Поэтому, например, в поведении молекул воды, содержащих два атома или протия ( ${}^1\text{H}{}^1\text{HO}$ ), или трития ( $\text{T}_2\text{O}$ ), наблюдаются определенные различия как химических, так и физических свойств. Правда, в этом случае масса одной молекулы больше массы другой молекулы примерно на 20%. А для элементов с атомными номерами, большими 15–20, относительные различия в массах радиоактивных и стабильных атомов одного и того же элемента малы (не больше нескольких процентов), и обусловленные этими различиями изотопные эффекты незначительны. Поэтому вполне оправданно пренебречь ими и принять, что физико-химическое поведение радиоактивных атомов в большинстве случаев точно такое же, как и стабильных.

Для регистрации ионизирующего излучения радиоактивных атомов физики разработали чрезвычайно чувствительную радиометрическую аппаратуру, которая позволяет фиксировать излучение

буквально считанного числа радиоактивных атомов. Если, например, удастся надежно зафиксировать в течение 1 с акты радиоактивного распада пяти атомов такого радионуклида, как иод-131 (радиоактивность  $a$ , равную 5 расп/с, то есть 5 беккерелям), то можно, зная период полураспада иода-131 ( $T_{1/2} = 8$  сут), рассчитать, что в образце присутствует число атомов иода-131  $N$ , равное  $N = aT_{1/2}/\ln 2 = 5 \times 8 \cdot 24 \cdot 3600/0,693 \approx 10^6$ . Число  $10^6$  может показаться большим, но нетрудно найти, что масса такого числа атомов иода ничтожно мала и составляет около  $10^{-15}$  г (в стакане обычной водопроводной воды содержание иода значительно выше). Обнаружить столь малое количество иода, не содержащего радиоактивных атомов, аналитическими методами невозможно.

Важно еще и то, что введение небольшого числа радиоактивных атомов в систему не приводит к каким-либо ее изменениям, при соблюдении элементарных требований техники безопасности полностью безопасно и сравнительно дешево (если учесть стоимость аппаратуры, необходимой для многих других современных методов исследования, например аппаратуры для рентгеноструктурного анализа, ядерного магнитного резонанса).

По этим причинам радиоактивные индикаторы с середины XX века широко вошли в практику физико-химического эксперимента. Это в равной степени относится почти ко всем областям химии – неорганической, органической, аналитической, биохимии, физической химии. Рассмотрим некоторые примеры, показывающие возможности метода радиоактивных индикаторов в различных областях химии.

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Использование радионуклидов в аналитической химии очень разнообразно, недаром один из международных журналов подробно освещает все вопросы, связанные с радиоаналитической химией, то есть с использованием радионуклидов в аналитической химии.

Так, широкое практическое применение имеет метод количественного анализа, основанный на том, что в различных химических процессах удельная радиоактивность  $I_{уд} = a/m$  ( $a$  – радиоактивность образца, выраженная в беккерелях,  $m$  – масса образца) определяемого вещества, в котором равномерно распределен радионуклид, остается постоянной как для всего образца, так и для любой его части (обычно используют термин “активность” вместо “радиоактивность”).

Пусть, например, речь идет об опытах по определению давления паров такого крайне труднолетучего и тугоплавкого металла, как вольфрам. В качестве метки можно использовать искусственно получаемый  $\beta$ -радиоактивный вольфрам-185. Приготовим

металлический вольфрам, содержащий эту метку, и определим его удельную активность  $I_{уд}$ . Далее соберем пары металла, испарившиеся с поверхности вольфрама при выбранной температуре и содержащиеся в определенном объеме пара. В тех же условиях, в которых определяли  $I_{уд}$ , найдем активность этих паров  $I_n$ . Очевидно, что масса паров  $m_n = I/I_{уд}$ . Далее, зная объем паров, можно найти их плотность при температуре опыта, а затем, используя сведения о составе пара, и их давление.

Аналогичным образом с помощью радиоактивной метки можно найти концентрацию какого-либо вещества в растворе и определить, например, его концентрацию в насыщенном растворе. Так, используя радиоактивный индикатор сера-35, можно найти растворимость  $BaSO_4$  в водных растворах. Важно отметить, что на результаты подобных экспериментов никак не влияет наличие в паре или растворе посторонних примесей. Более того, оказывается возможным количественно охарактеризовать влияние на растворимость, например, ионной силы раствора, то есть наличия в нем ионов посторонних веществ.

Сходным образом можно найти массу вещества, как оставшуюся после экстракции в водной среде, так и перешедшую в органическую фазу. Далее удастся рассчитать коэффициенты распределения между фазами экстрагируемого вещества (здесь применение радиоактивных индикаторов важно тогда, когда коэффициенты распределения очень высоки и других аналитических методов определения сверхнизких количеств экстрагируемого вещества, оставшегося в водной фазе, нет).

Оригинально использование радиоактивных индикаторов в так называемом методе изотопного разбавления. Пусть нужно определить содержание какой-либо аминокислоты в смеси сходных по свойствам аминокислот, причем химическими методами выполнить полное (количественное) разделение аминокислот нельзя, но есть способ, позволяющий выделить из смеси в чистом виде небольшую долю этой аминокислоты (например, с помощью хроматографии). Сходная проблема возникает при определении содержания какого-либо лантаноида в смеси лантаноидов и при определении того, в каких именно химических формах содержится тот или иной элемент в природе, например в речной или морской воде.

Воспользуемся для определения общего содержания иода в морской воде порцией иодид-ионов массой  $m_0$  и активностью  $I$ . Введем эти меченые иодид-ионы в анализируемую пробу и нагреем ее для того, чтобы радиоактивная метка равномерно распределилась по всем содержащим иод химическим формам, находящимся в морской воде (такими формами в данном случае служат иодид-, иодат-, и периодат-ионы). Далее с помощью нитрата серебра выделим небольшую часть иодид-ионов в виде

осадка  $AgI$  и определим его массу  $m_n$  и радиоактивность  $I_n$ . Если общее содержание иода в пробе равно  $x$ , то оказывается, что

$$I/(x + m_0) = I_n/m_n.$$

Решая это уравнение относительно  $x$ , находим

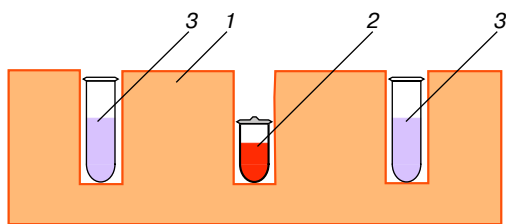
$$x = m_n(I/I_n) - m_0.$$

Используя несколько отличающуюся методику, можно найти содержание иода в морской воде в форме иодид-ионов. Для этого после введения радиоактивной метки в пробу следует создать такие условия, при которых изотопный обмен (обмен атомами иода) между иодид-ионами и другими содержащими иод формами (иодат- и периодат-ионами) не протекает (для этого надо использовать холодный раствор с нейтральной средой). Выделив далее из морской воды небольшую порцию иодид-ионов с помощью осадителя – нитрата серебра в виде  $AgI$  (масса порции  $m_{ни}$ ) и измерив ее радиоактивность  $I_{ни}$ , по формуле  $m_{иод} = m_{ни}(I/I_{ни}) - m_0$  можно найти содержание иодид-ионов в образце  $m_{иод}$ .

На использовании радиоактивных атомов основан и такой универсальный чрезвычайно чувствительный метод аналитической химии, как активационный анализ. При выполнении активационного анализа необходимо с помощью подходящей ядерной реакции активировать атомы определяемого элемента в пробе, то есть сделать их радиоактивными. Чаще всего активационный анализ выполняется с использованием нейтронного источника. Если, например, необходимо найти содержание в твердой породе редкоземельного элемента диспрозия  $Du$ , то поступают следующим образом.

Сначала готовят серию образцов, содержащих известные различные количества  $Du$  (взятого, например, в форме  $DuF_3$  или  $Du_2O_3$  – атомы кислорода и фтора нейтронами не активируются). Эти образцы в одинаковых условиях облучают одним и тем же нейтронным потоком. Необходимый для этих экспериментов источник нейтронов представляет собой небольшую (размером с авторучку) ампулу, в которой находится материал, испускающий нейтроны (например, смесь америция-241 и бериллия). Безопасно хранить такой источник нейтронов можно, поместив его в отверстие, сделанное в центре парафинового блока размером с ведро для воды.

Для облучения образцы с известным содержанием диспрозия размещают в лунки, имеющиеся в парафиновом блоке и расположенные на одинаковом расстоянии от источника (рис. 1). В такие же лунки размещают и пробы анализируемой породы. Под воздействием нейтронов в образцах протекает ядерная реакция  $^{164}Du(n, \gamma)^{165}Du$ . Через определенное время (например, через 6 ч) все образцы вынимают из лунок и их активности измеряют в одинаковых условиях. По данным измерений активности препаратов строят калибровочный график в координатах “содержание диспрозия в пробе – активность

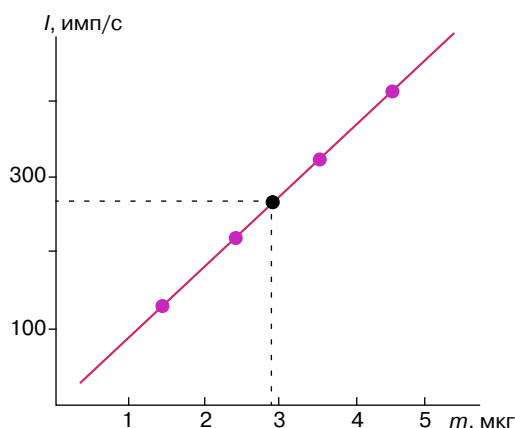


**Рис. 1.** Схема проведения нейтронного активационного анализа: 1 – парафиновый блок, 2 – ампульный источник нейтронов, 3 – облучаемые образцы

препарата”, и по нему находят содержание диспрозия в анализируемом материале (рис. 2).

Метод активационного анализа хорош не только высокой чувствительностью. Так как излучение образующихся при активации радионуклидов различается по виду и энергии, при использовании спектрометрической радиометрической аппаратуры оказывается возможным определять в пробе после ее активации одновременно до 10–15 элементов. И еще одно важное достоинство активационного анализа: часто образующиеся в результате активации нейтронами радионуклиды довольно быстро распадаются, так что спустя некоторое время анализируемый объект оказывается нерадиоактивным. Таким образом, во многих случаях активационный анализ – это анализ, не связанный с разрушением анализируемого объекта. Это особенно важно, когда речь идет об определении состава археологических находок, метеоритов и других уникальных образцов. Именно таким образом, например, было найдено избыточное содержание ядовитого мышьяка в волосах Наполеона (сохранившихся в медальоне до наших дней).

То обстоятельство, что энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых радионуклидом, строго индивидуальна,



**Рис. 2.** График зависимости регистрируемой активности  $I$  активированных нейтронами образцов от массы  $m$  диспрозия в образцах. В анализируемом образце около 3 мкг диспрозия

позволяет осуществить экспрессный качественный анализ многих объектов. Например, с автоматической станцией на поверхность Луны был доставлен прибор, который фиксировал  $\gamma$ -излучение от окружающих прибор лунных пород. Далее информация об этом излучении передавалась на Землю, и оказалось возможным выяснить, какие именно радионуклиды присутствуют на поверхности спутника Земли. Так как некоторые природные элементы содержат  $\gamma$ -радиоактивные нуклиды, по этим измерениям были сделаны выводы о качественном составе Луны.

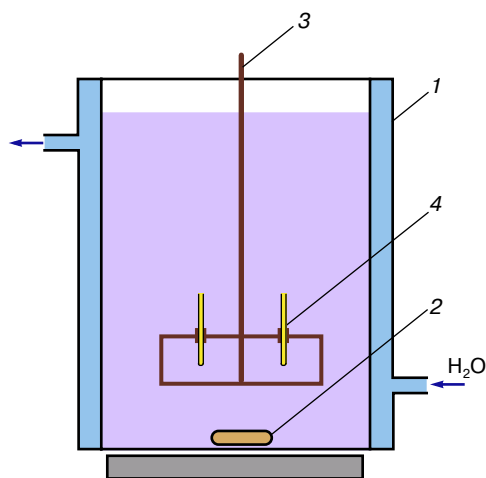
## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ В ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Среди многочисленных примеров использования радиоактивных индикаторов при изучении термодинамики (определение давлений насыщенных паров, парциальных давлений паров компонентов различных смесей), кинетики (выяснение скоростей превращений и их механизмов) и электрохимии можно выделить следующие, позволяющие проиллюстрировать возможности метода в физической химии.

Начнем это рассмотрение с рассказа о том, как радионуклиды используют для определения такой важной кинетической характеристики, как коэффициент диффузии или самодиффузии  $D$  атомов, ионов, молекул в твердых телах, растворах или расплавах. Правда, охарактеризовать способность диффундировать атомы, ионы или молекулы среди других атомов, ионов или молекул можно и без радиоактивных меток, хотя экспериментально это довольно сложно, так как при этом речь идет об определении чрезвычайно малых количеств диффундирующего вещества. Но получить информацию о миграции указанных микрочастиц в среде собственного вещества, то есть определить коэффициент самодиффузии  $D$ , без использования радионуклидов совершенно невозможно.

Для определения коэффициента диффузии молекулы или иона в растворе заполняют меченым раствором диффундирующего вещества капилляр, измеряют его активность  $I_0$ . Затем размещают капилляр в термостатированном сосуде (рис. 3) и дают время  $t$  диффундировать веществу из капилляра в окружающую жидкость. В конце опыта измеряют активность капилляра  $I_t$  и, зная длину капилляра, рассчитывают значение  $D$ .

С использованием радиоактивных индикаторов найти, например, значение  $D$  атомов меди в этом металле можно так. Используют образец меди с гладкой, хорошо отполированной чистой поверхностью. На эту поверхность электролизом наносят тонкий слой меди, меченной радионуклидом медь-64. Далее образец определенное время выдерживают (отжигают) при той температуре, при которой необходимо определить  $D$ . Далее специальным приспособлением – микротомом или путем электрохимического



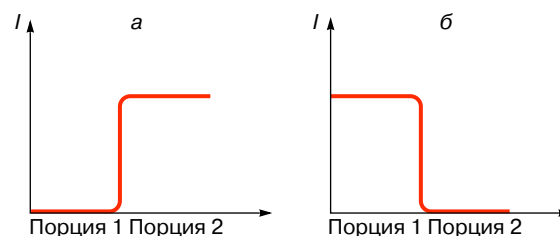
**Рис. 3.** Схема проведения эксперимента по определению коэффициента самодиффузии иона в растворе: 1 – термостатированный сосуд с раствором, 2 – магнитная мешалка, 3 – держатель капилляров – контейнер радиоактивного раствора, 4 – капилляр, установленный в держателе

растворения снимают тонкие (толщиной от нескольких микрометров до 50–100 мкм) слои металла и определяют радиоактивность каждого микрослоя. По зависимости изменения удельной радиоактивности слоя  $I_{уд}$  от глубины его расположения  $l$  можно найти значение  $D$  атомов меди при данной температуре.

На использовании меченных радионуклидами соединений основан кинетический изотопный метод, предложенный М.Б. Нейманом. Этот метод позволяет установить, какие именно промежуточные вещества образуются в данной химической реакции и какова скорость их образования и расходования. Пусть, например, высказана гипотеза, что при фотосинтезе на промежуточной стадии образуется и тут же расходуется муравьиная кислота. Для того чтобы проверить, правильна ли эта гипотеза или нет, зеленые водоросли помещают в водный раствор, в который добавлено микроколичество муравьиной кислоты, меченной радионуклидом  $^{14}C$  с известной удельной активностью  $I_{уд.о}$  (с известным значением отношения радиоактивности кислоты к ее массе). В течение некоторого времени дают возможность протекать фотосинтезу, а затем выделяют из раствора порцию кислоты и находят ее удельную радиоактивность  $I_{уд.выд}$ . Если это значение оказывается равно  $I_{уд.о}$ , то это означает, гипотеза неверна и муравьиная кислота не выступает как промежуточный продукт в процессе фотосинтеза. Если бы оказалось, что  $I_{уд.выд} < I_{уд.о}$ , то можно было сделать вывод, что эта кислота выступает как промежуточный продукт превращения. По скорости изменения  $I_{уд}$  с течением времени можно найти скорость образования и расходования кислоты.

Другой советский исследователь – С.З. Рогинский предложил дифференциальный изотопный метод изучения энергетики поверхности твердого тела. Сущность метода можно пояснить на таком примере. Пусть имеется порошок, необходимо выяснить, однородна или нет его поверхность (то есть различается или нет энергия адсорбции атомов или молекул газа-сорбата на разных микроучастках поверхности данного порошка).

С этой целью используют газ ксенон, меченный и немеченный радионуклидом  $^{133}Xe$ . Сначала на поверхности порошка, помещенного в сосуд, из которого удален воздух, сорбируют небольшую порцию немеченого ксенона, а затем порцию этого газа, меченного радионуклидом, с известной удельной радиоактивностью  $I_{уд.о}$ . Далее порошок немного нагревают, при этом ксенон десорбируется с поверхности. Измеряют удельную радиоактивность  $I_{уд}$  первой порции десорбированного ксенона. Если оказывается, что  $I_{уд} = I_{уд.о}$ , то можно заключить, что поверхность порошка энергетически неоднородна: атомы ксенона, сорбированные из второй порции на местах с более низкой энергией сорбции, первыми и десорбируются с поверхности (рис. 4). В противном случае удельная радиоактивность десорбированного ксенона  $I_{уд}$  будет меньше, чем удельная радиоактивность ксенона  $I_{уд.о}$ , сорбированного из второй порции: десорбция с однородной поверхности как нерадиоактивного, так и радиоактивного ксенона протекает с равной вероятностью.



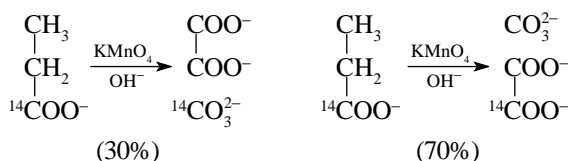
**Рис. 4.** Удельная радиоактивность двух последовательно сорбированных порций газа (а) и удельная радиоактивность двух последовательно десорбированных порций газа (б) в случае энергетически неоднородной поверхности

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ В ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ И БИОХИМИИ

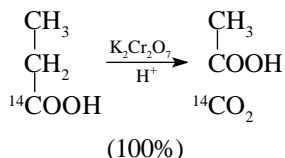
С использованием таких радиоактивных меток, как тритий, углерод-14, сера-35, фосфор-32 и некоторых других исследовано огромное число органических реакций и биохимических процессов. Классическим примером таких исследований может служить определение того, где происходит разрыв углеродной цепочки пропионовой кислоты при ее окислении перманганатом в щелочной среде и образуется ли возникающий при этом карбонат-ион

из группы  $\text{COO}^-$  или за счет окисления какого-либо другого атома С.

Для ответа на данный вопрос использовали пропионовую кислоту, меченную  $^{14}\text{C}$  в карбоксиле. Образующийся в результате окисления оксалат-ион осадил в виде оксалата кальция, а карбонат-ион — в виде карбоната бария. Измерения радиоактивности полученных образцов показали, что около 30% исходной радиоактивности оказывается в составе  $\text{BaCO}_3$ , а около 70% — в составе  $\text{CaC}_2\text{O}_4$ . На этом основании можно заключить, что отношение вероятностей разрыва связей  $\text{CH}_2\text{—COO}^-$  и  $\text{CH}_3\text{—CH}_2$  в пропионат-ионе при его окислении в щелочной среде равно 3/7:



Аналогичным образом можно установить, что при окислении пропионовой кислоты дихроматом калия в кислой среде разрыв связей в углеродной цепочки происходит только между  $\text{COOH}$  и  $\text{CH}_2$ . Если использовать для такого эксперимента пропионовую кислоту, меченную  $^{14}\text{C}$  в карбоксиле, то вся радиоактивность после окисления переходит в  $\text{CO}_2$  (который далее количественно улавливают раствором  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  и радиоактивность полученного  $\text{BaCO}_3$  измеряют):



По результатам наблюдений за перемещением радиоактивных меток при органических превращениях были установлены механизмы многих реакций. Применение метода радиоактивных индикаторов позволило лучше понять процессы, протекающие в растениях и организмах животных. Например, применение  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ , меченного радионуклидом  $^{14}\text{C}$ , позволило установить, что растения усваивают не только газообразный  $\text{CO}_2$ , но и растворенные карбонаты, содержащиеся в почве. Кроме того, выяснено, что корневая система растений может также поглощать из почвы углерод в составе сложных органических соединений, входящих в состав почвенного гумуса.

Сходная картина наблюдается и при усвоении растениями фосфора из почвы. До опытов с использованием в качестве метки радионуклида  $^{32}\text{P}$  считали, что растения усваивают из почвы фосфор только в виде фосфат-ионов, а далее в самом растении фосфор преобразуется в сложные органические вещества. Но опыты с почвой, содержащей меченные по фосфору-32 нуклеиновые кислоты, показали, что

корни растений способны усваивать и уже готовый фосфорсодержащий строительный материал для построения своих клеток.

До внедрения в исследовательскую практику радиоактивных индикаторов считали, что ткани живого организма обновляются через сравнительно большой промежуток времени, измеряемый годами. В действительности оказалось, что в теле теплокровного животного обмен (замена старых на новые) всех жиров происходит не более чем за две недели, а обмен 50% белков печени обезьяны протекает также за две недели.

Интересны результаты опытов, выполненных с радионуклидами железа  $^{55}\text{Fe}$  и  $^{59}\text{Fe}$ . Известно, что железо входит в состав гемоглобина крови. Если подопытному животному, обладающему нормальной жизнедеятельностью, вводить с пищей соединения железа, меченные радионуклидом  $^{59}\text{Fe}$ , то железо в кровь практически не поступает. Если же содержание гемоглобина в крови животного снижено тем или иным образом, то сначала усвоения меченого железа тоже не наблюдается. Когда же концентрация гемоглобина в крови достигает нормы, наблюдается усиленная ассимиляция (усвоение) железа. Оказалось, что поступающее железо откладывается в организме про запас в виде сложного соединения ферритина. Только тогда, когда содержание гемоглобина вновь начинает снижаться, наблюдается поступление в кровь меченого железа из ферритина.

Опыты, проведенные с использованием соединений двух- и трехвалентного железа, меченных радиоактивными индикаторами, показали, что организмы одних животных усваивают обе валентные формы железа примерно одинаково, а других животных — по-разному, причем, как правило, предпочтение отдается двухвалентному железу. С использованием радионуклидной метки удалось проследить за поведением введенной в организм подопытного животного крови и за тем, как быстро происходит перемешивание “своей” и введенной в организм “чужой” крови. Метод изотопного разбавления позволил определить объем крови в организмах различных животных, решить другие важные для науки и практики вопросы.

В последние десятилетия радионуклиды находят широкое применение в медицинской практике. Обнаружено, что онкологические опухоли неустойчивы к действию излучения, возникающего при радиоактивном распаде, а некоторые соединения, содержащие радиоактивную метку, при их внутривенном введении в кровь способны избирательно сорбироваться злокачественными опухолями. Это явление можно использовать при ранней диагностике соответствующих заболеваний: опухоль, поглотившую радионуклид, можно определить по результатам радиометрического сканирования тела пациента. Далее, добившись поглощения опухолью введенного в кровь меченого препарата, можно

достичь внутреннего облучения опухоли и в отдельных случаях ее разрушения.

Препараты, меченные иодом-131, широко используют в практике обследования больных, у которых нарушена работа почек. В этом случае в вену вводят радиоактивный иод в составе соединения, которое не поглощается щитовидной железой. Далее около почек пациента размещают два радиометрических датчика, позволяющие контролировать скорость прохождения через почки введенного радионуклида. Результаты позволяют установить, какая из почек поражена и сколь оперативно должно быть проведено лечение.

### СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ХИМИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Возникшие в последние десятилетия новые направления в применении радионуклидов как меток при изучении различных превращений связаны с успехами в создании радиометрической аппаратуры, позволяющей, во-первых, надежно регистрировать излучение таких радионуклидов, как тритий Т и углерод  $^{14}\text{C}$ , и, во-вторых, проводить регистрацию радиоактивности экспрессно, что позволяет использовать для исследований короткоживущие радионуклиды с периодами полураспада от нескольких минут до нескольких десятков минут или одного—трех часов.

Тритий и особенно углерод-14 — крайне удобные радиоактивные индикаторы для изучения биохимических процессов и органических реакций, так как атомы и водорода, и углерода обязательно входят в состав органических веществ. Но эти радионуклиды испускают  $\beta^-$ -частицы небольшой энергии: максимальная энергия  $\beta^-$ -частиц, возникающих при распаде ядер  $^{14}\text{C}$ , составляет около 158 кэВ, а при распаде ядер трития — всего 17,6 кэВ. Такие  $\beta^-$ -частицы легко поглощаются в самом регистрируемом препарате, а также воздухом и стенками детектора (например, ионизационного счетчика Гейгера—Мюллера). Поэтому длительное время регистрация излучения этих радионуклидов представляла собой сложную проблему. В последние годы в исследовательскую практику вошли приборы, позволяющие осуществить жидкостной сцинтилляционный счет числа распадающихся ядер. Такой прибор имеется, например, в Центре радионуклидной диагностики, организованном несколько лет назад Российской Академией наук на базе химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. При измерении радиоактивности с помощью этих приборов препарат вводят в раствор сцинтиллятора (обычно приготовленный на основе толуола или диоксана). В объеме

сцинтиллятора при прохождении через него  $\beta^-$ -частиц возникают вспышки света — сцинтилляции. Эти вспышки света выбивают из фотокатода ФЭУ (фотоэлектронного умножителя) электроны, которые далее фиксируют с помощью радиометрической аппаратуры. Важно, что при использовании жидкостного сцинтилляционного счета можно зарегистрировать практически все  $\beta^-$ -частицы, испущенные ядрами радионуклида в препарате.

Использование экспрессной аппаратуры, дающей возможность регистрировать излучение короткоживущих радионуклидов, позволяет проводить исследования с использованием радионуклидов в разных системах, в том числе *in vivo* в живых организмах. Если период полураспада радионуклида составляет не более 2–3 ч, то уже приблизительно через 1–2 сут в организме, в который были введены такие радионуклиды, радиоактивных атомов нет — они полностью распались. Поэтому применение таких радионуклидов безопасно. Оказывается возможным применять радионуклиды для медицинской диагностики, анализа продуктов питания и других веществ. Возможности такой аппаратуры можно проиллюстрировать следующим примером. Французские ученые создали аппаратуру, которая позволяет всего за 10–12 с выполнить три экстракции, разделить фазы и найти коэффициенты распределения меченого вещества между фазами во всех трех случаях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов В.Д., Торопова М.А., Кривохатская И.В. и др. Радиоактивные изотопы в химических исследованиях. Л.; М.: Химия, 1965. 246 с.
2. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О. и др. Радиоактивные индикаторы в химии: Основы метода. М.: Высш. шк., 1985. 287 с.
3. Лукьянов В.Б., Бердоносков С.С., Богатырев И.О. и др. Радиоактивные индикаторы в химии: Проведение эксперимента и обработка результатов. М.: Высш. шк., 1977.

\* \* \*

Сергей Серафимович Бердоносков, кандидат химических наук, доцент кафедры радиохимии химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, руководитель и преподаватель химической школы при химфаке МГУ, зав. лабораторией химического образования Московского института развития образовательных систем (МИРОСа). Лауреат Государственной премии СССР. Область научных интересов — изучение гетерогенных процессов с участием твердых дисперсных фаз. Автор и соавтор более 150 научных работ, ряда учебников и учебных пособий для студентов-химиков, учителей и учащихся средних школ.