

сфере под действием нейтронов космич. лучей идёт ядерная реакция $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. В результате воздух, растения и животные содержат радионуклид ^{14}C ($T_{1/2} = 5700$ лет) в определённой и постоянной (в расчёте на 1 моль углерода) концентрации. В мёртвых организмах обмен с атмосферой прекращается и содержание ^{14}C постепенно падает. По концентрации ^{14}C можно установить возраст органич. остатков.

Лит.: Изотопная геология, под ред. Э. Йегера, И. Хунцикера, пер. с англ., М., 1984. С. С. Бердоносков.

ИЗОТОПНЫЕ ИНДИКАТОРЫ (меченые атомы) — вещества, имеющие отличный от природного изотопный состав, используемые в качестве «метки» при исследовании разл. процессов. Метод И. и. был предложен Д. Хевеши (G. Hevesy) и Ф. Панетом (F. Paneth, 1913). В качестве метки чаще используются радионуклиды, к-рые могут быть легко обнаружены и измерены количественно. Реже используются стабильные нуклиды, техника обнаружения к-рых сложнее (*масс-спектроскопия*). В качестве радиоакт. меток применяют: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{95}Zr , ^{99}Nb , ^{110m}Ag , ^{131}I и др. Выбор радионуклида определяется гл. обр. периодом его полураспада, типом и энергией излучения. Для обнаружения излучения используют газоразрядные и сцинтилляционные счётчики, ядерные фотогр. эмульсии и др. *детекторы*. С помощью И. и. изучают распределение вещества в системе и пути их перемещения. Для количеств. анализа пользуются, напр., методом изотопного разбавления — к анализируемой пробе добавляют порцию меченого вещества и по степени его разбавления судят о содержании анализируемого вещества в пробе. Метод И. и. позволяет выяснить механизм хим. реакций и структуру молекул. Он широко используется в физике, химии, биологии (процессы синтеза и распада хим. соединений в живой клетке, обмена веществ и др.), в технике, медицине (изотопная диагностика) и т. д.

Лит.: Лукьянов В. Б. и др., Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода, 3 изд., М., 1985; Остерман Л. А., Исследование биологических макромолекул электрофокусированием, иммуноэлектрофорезом и радиоизотопными методами, М., 1983. С. С. Бердоносков.

ИЗОТОПОВ РАЗДЕЛЕНИЕ, выделение отдельных изотопов из естеств. их смеси или обогащение смеси отдельными изотопами. Первые попытки И. р. сделаны Ф. У. Астоном (F. W. Aston, 1919) и др. гл. обр. для обнаружения изотопов у стабильных элементов, точного измерения массы их атомов и относит. содержания (см. *Масс-спектроскопия*). В 30-х гг. фундам. исследования в области ядерной физики потребовали выделения отдельных изотопов в кол-вах порядка неск. мг (*дейтерий* производился в промышл. масштабах). Дальнейшее развитие методов И. р. обусловлено развитием ядерной энергетики, для к-рой требовался уран, обогащённый ^{235}U и др. (см. *Ядерное горючее*), а также примененем в физике, химии, биологии и др. метода изотопных индикаторов [1, 4].

Классификация и характеристики методов. И. р. основано на различиях физ. и хим. свойств изотопов и их соединений. Эти различия, обусловленные разницей масс атомов, для большинства элементов невелики, что обычно приводит к необходимости многократного повторения единичной операции. Во всякой разделит. установке исходная смесь делится не менее чем на 2 фракции, одна из к-рых обогащается концентрируемым изотопом за счёт других. Эффективность работы разделит. установки определяется её производительностью G и коэф. разделения α . Так, при разделении бинарной смеси:

$$\alpha = \frac{C'(1-C')}{C''(1-C'')}, \quad (1)$$

где C' и $1-C'$ — доли лёгкого и тяжёлого изотопов во фракции, обогащённой лёгким изотопом; C'' и $1-C''$ — в тяжёлой фракции. Если $\alpha-1 \ll 1$, что имеет место для большинства методов (см. ниже), то обычно пользуются коэф. обогащения $\varepsilon = \alpha - 1$.

Повышение α обычно связано с уменьшением G . Поэтому методы, обеспечивающие большие α , не всегда оказываются экономически выгодными. Выбор метода определяется свойствами элемента, содержанием в смеси концентрируемого изотопа, заданной степенью разделения $q = \alpha^N$ (N — число ступеней разделения).

Различают молекулярно-кинетич., физико-хим. и электромагн. методы И. р. Первые два метода основаны на различии ср. статистич. свойств изотопных соединений, обусловленном разницей масс изотопов. Для этих методов ε , как правило, невелики, а G могут быть большими. Электромагн. методы основаны на разл. поведении изотопов в электрич. и магн. полях. Как правило, эти методы позволяют получить высокие значения α при малых G в 1 цикле И. р.

Молекулярно-кинетические методы

Газовая диффузия через пористые перегородки (фильтры). Газообразное соединение прокачивается через пористую перегородку. При достаточно низких давлениях, когда длина свободного пробега молекул значительно превышает ср. диаметр пор (молекулярное течение, кнудсеновская диффузия или эффузия, см. *Динамика разреженных газов*), каждый компонент смеси газов движется независимо от др. под действием градиента парциального давления. Скорость движения пропорц. частоте столкновений молекул с поверхностью пор, т. е. ср. тепловой скорости молекул:

$$\bar{v} = \sqrt{8RT/\pi M}. \quad (2)$$

Здесь T — темп-ра, R — газовая постоянная, M — масса молекулы. Т. к. $\bar{v}_1 > \bar{v}_2$ при $M_1 > M_2$, то часть смеси, прошедшая через фильтр, обогащается лёгким изотопом. При истечении в abs. вакуум достигается макс. значение:

$$\alpha_0 = \sqrt{M_2/M_1}. \quad (3)$$

Для большинства элементов

$$\alpha_0 - 1 = \varepsilon_0 \approx \Delta M/2M, \quad (4)$$

где $\Delta M = M_2 - M_1$. Т. к. диффузия через фильтр происходит в пространстве, заполненное тем же газом при пониженном давлении, то реальный коэф. обогащения $\varepsilon < \varepsilon_0$ из-за частичного обратного перетекания обогащённой смеси.

Метод газовой диффузии впервые осуществили Линдeman (Lindemann) и Астон (1913). В дальнейшем он был разработан для промышл. произ-ва урана, обогащённого ^{235}U . Для разделения применяется газ UF_6 .

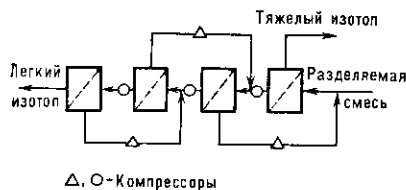


Рис. 1. Схема газодиффузионной установки.

При этом $\Delta M/2M = 3/2 \cdot 350 = 0,0043$. Для получения из природного U с обогащением по ^{235}U порядка 4% требуется от 1000 до 1500 ступеней (рис. 1). Газодиффузионные заводы для промышл. разделения изотопов U действуют в СССР [1], США, Франции, Англии и Китае [2, 7].

Масс-диффузия (диффузия в потоке пара). Различие скоростей диффузии 2-х изотопов в потоке 3-го (разделительного) газа приводит к частичному разделению изотопной смеси; эффект И. р. при диффузии в струю пара был открыт Г. Герцем (H. Hertz) в 1922. Коэф. обогащения:

$$\varepsilon_0 = \frac{D_{13} - D_{23}}{D_{23}} = \frac{(M_2 - M_1) M_3}{2M(M_1 + M_3)}, \quad (5)$$