



ГЛОБА
Ольга Федорівна,
канд. іст. наук, доцент
ДВНЗ «Переяслав-
Хмельницький державний
педагогічний університет
імені Григорія Сковороди»

МЕТОД МІЧЕНИХ АТОМІВ: ІСТОРИЧНИЙ І ПРАКТИЧНИЙ АСПЕКТ

Стаття висвітлює відкриття ізотопів та застосування методу мічених атомів в біологічних дослідженнях.

Статья освещает открытие изотопов и использование метода меченых атомов в биологических исследованиях.

The article deals with the discovery of isotopes and the use of the tracer in biological research.

Метод мічених атомів має тісний зв'язок із відкриттям ізотопів. І тому пропонуємо спочатку згадати історію відкриття ізотопів, їх дослідження.

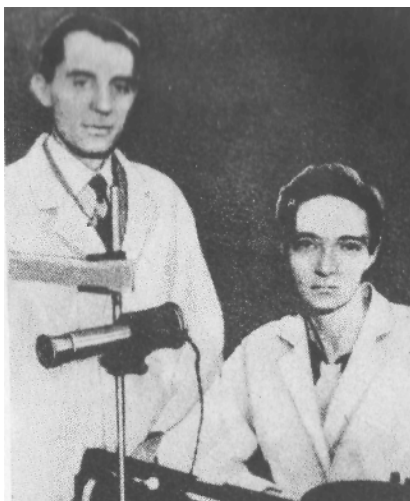
У січні – лютому 1913 р. науковий світ облетіла сенсація. Було опубліковано чотири наукові статті, автори яких наполегливо твердили: у кожному клітинку кінця періодичної системи потрібно вмістити кілька радіоелементів (до 1913 р. вчені різних країн відкрили близько 40 радіоелементів (пізніше названих ізотопами), найважчим серед яких був уран, найлегшим – свинець. У періодичній системі в той час між свинцем і ураном було порожніх тільки 7 клітинок) [1, с. 224]. І не просто кілька, а тільки хімічно невіддільні радіоелементи, незважаючи на те, що атомна маса і фізичні властивості цих радіоелементів були різні. Англійський хімік Фредерік Содді (1877–1956), якого за це відкриття нагородили в 1921 р. Нобелівською премією з хімії, запропонував називати такі хімічно невіддільні радіоелементи ізотопами [9]. У перекладі з грецької це коротке слово буквально означає «однаково місцеві» [1,

с. 224]. Отже, ізотопи цього елемента повинні займати в періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва одне місце.

Спершу явище ізотопії було виявлене для радіоактивних елементів від полонію до урану, тобто для найважчих елементів періодичної системи. Але в тому ж 1913 р. співвітчизник Фредеріка Содді, видатний фізик Джозеф Джон Томсон (1856–1940), довів, що й стабільні елементи можуть мати ізотопи. За допомогою тонких експериментів з каналовим промінням Дж. Томсон виявив ізотопію неону, що міститься на початку таблиці Д. І. Менделєєва. А незабаром учень Томсона, видатний англійський фізик Френсіс Уільям Астон (1877–1945), розробив чутливий і надійний метод електромагнітного поділу ізотопів – мас-спектрографічний метод. За допомогою мас-спектрографа Ф. Астон «обійшов» усю періодичну систему в пошуках ізотопів у інших елементів. Учений виявив явище ізотопії майже в усіх відомих хімічних елементів. За відкриття ізотопів у багатьох стабільних елементів Ф. Астон нагороджений Нобелівською премією з хімії в 1922 р. [1, с. 225].

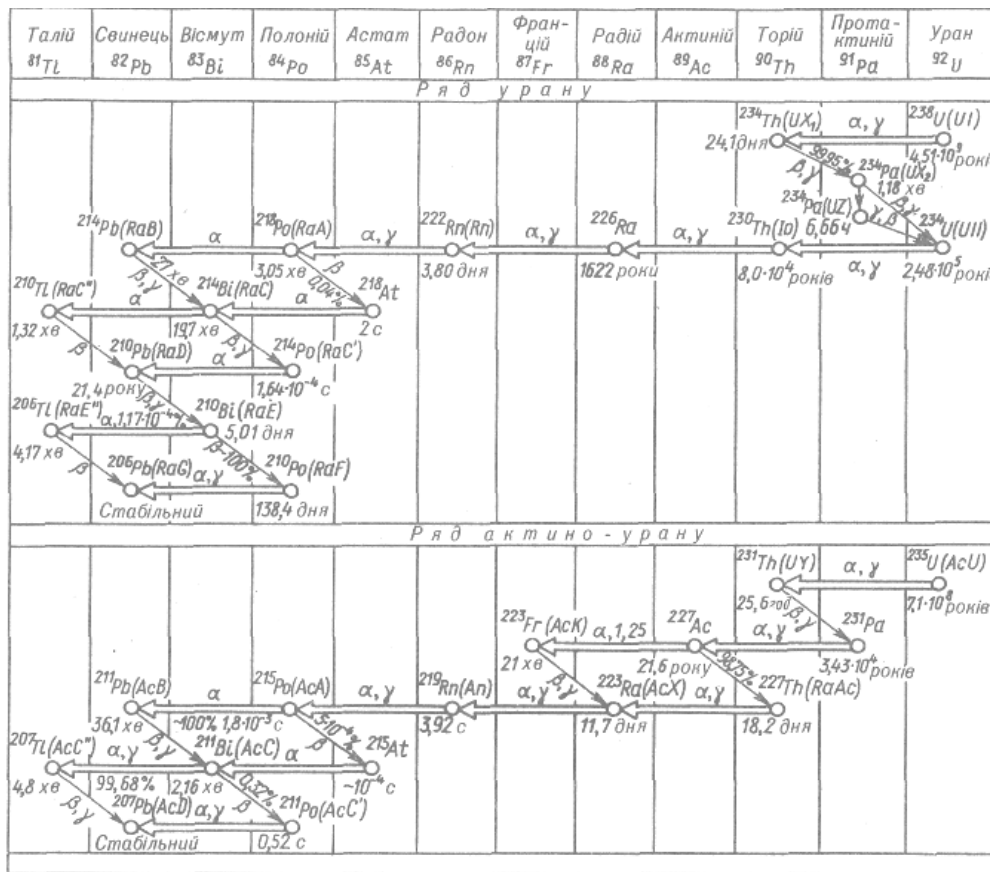
Минуло 10 років. У 1932 р. було відкрито нейтрон – одну з головних елементарних частинок. У 1934 р. французькі фізики Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі відкрили явище штучної радіоактивності й спостерігали новий вид радіоактивних перетворень – позитронний, або β^+ - розпад. Досліди французьких учених було повторено в лабораторіях усього світу: звідусюди в пресу надходили підтвердження правоти подружжя Жоліо-Кюрі, яким за це відкриття Шведська Академія наук присудила в 1935 р. Нобелівську премію з хімії. Найбільшого розмаху вивчення штучної радіоактивності набуло в Італії,

де група захоплених молодих фізиків під керівництвом Енріко Фермі (1901–1954) опромінювала потоками нейтронів багато елементів періодичної системи й виявила появу радіоактивних атомів цих же елементів; тим самим було відкрито штучні радіоактивні ізотопи досі стабільних елементів. За це відкриття ядерних



Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі в лабораторії

реакцій, що ведуть до створення штучних ізотопів, Енріко Фермі був нагороджений у 1938 р. Нобелівською премією. Проте справжнє пояснення явище штучної радіоактивності дістало не відразу, хоч багато дослідників догадувались, що причина ізотопії криється в різній будові ядер атомів даного елемента [1, с. 225].



Природні радіоактивні ряди

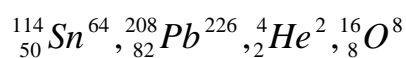
Як же пояснює явище ізотопії сучасна фізика? Чому в цих хімічних близнюків так несхожі фізичні властивості?

Почнемо з означень. Ізотопами називаються різновиди атомів хімічного елемента, що мають різні масові числа A , але однаковий заряд ядра Z . У ядрах ізотопів одного елемента міститься завжди однакова кількість протонів (Z), а кількість ядерних нейтронів $A - Z = N$ може трохи змінюватись залежно від масового числа.

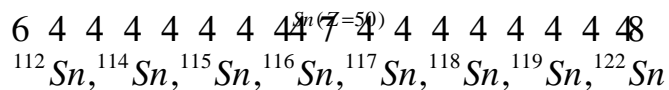
Звичайнісінький свинець, з якого так легко можна відлити фігурки або важок для вудки, має кілька ізотопів. У ядрах ізотопів свинцю завжди 82 протони ($Z = 82$), а от кількість нейтронів може змінюватись: атоми свинцю з

масовим числом 206 мають 124 нейтрони, з масовим числом 207–125 нейтронів, і т. д. [1, с. 226].

Ізотопи кожного хімічного елемента завжди відрізняються один від одного атомною масою, складом ядра та ядерно-фізичними властивостями, але всі вони мають однаковий заряд ядра й однакову будову електронної оболонки атома, отже, хімічні властивості і залежні від електронної оболонки фізичні властивості (наприклад, оптичний спектр) у них майже тотожні. Наприклад, обидва ізотопи водню – протій, що має в своєму ядрі один нейтрон, і дейтерій, який має в ядрі два нейтрони, при збудженні випромінюють однакові оптичні спектри, але точки плавлення й кипіння в цих ізотопів і їхніх сполук різні. Тому, щоб підкреслити повну хімічну тотожність їх, усі ізотопи хімічного елемента позначають символом цього елемента, причому вгорі ліворуч від символу ставлять масове число A , унизу ліворуч – порядковий номер Z , а вгорі праворуч – кількість ядерних нейтронів N :



Оскільки символ елемента завжди однозначно відображає заряд ядра атома (який чисельно дорівнює порядковому номеру елемента в періодичній системі), а кількість ядерних нейтронів легко обчислити ($N = A - Z$), то порядковий номер і кількість нейтронів часто не зазначають. Так, ізотопи олова ми можемо тепер позначити простіше:



Тепер у періодичній системі хімічних елементів Д. І. Менделєєва розміщені 107 елементів. Для кожного з них відомі ізотопи. Кількість їх коливається від одиниці до кількох десятків. Так, у водню відомі три ізотопи, в алюмінію – шість, в олова – десять, у полонію – сім.

Наша Земля з її океанами, горами, рослинним і тваринним світом містить лише близько 350 ізотопів для 94 елементів. Використовуючи методи добування штучних ізотопів, учені дістали ще близько 1200 радіоактивних ядер

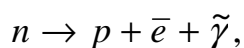
уже для 107 елементів. Вважають, що буде відкрито ще принаймні стільки ж ізотопів.

Ядерний склад і ядерно-фізичні властивості у всіх ізотопів різні. Найважливіша характеристика ядра – його стійкість проти радіоактивного розпаду. Критерієм стійкості є відношення кількості наявних у ядрі нейтронів до кількості ядерних протонів. Це відношення неоднакове для всіх ядер: воно зростає зі збільшенням порядкового номера елемента. Для гелію воно дорівнює одиниці, а для останнього стабільного ізотопу свинцю $^{208}\text{Pb} = 1,54$ [1, с. 227].

Разом з тим ретельні дослідження показали, що в усіх стабільних ізотопів будь-якого елемента відношення N/Z лежить у точно визначених межах. Якщо в ядра відношення N/Z більше або менше від граничних значень, то таке ядро здатне до β -розпаду. Причому, якщо це співвідношення порушене внаслідок великої кількості нейтронів у ядрі, то ізотоп буде β -активним, якщо ж нейтронів у ядрі не досить, то спостерігається або β^+ -розпад, або К-захват. Можна зазначити, що (β^+ -розпаду в природних радіоактивних ізотопів немає.

Ще одна чудова закономірність у поведінці атомних ядер пов'язана з парністю чисел Z і N . Доведено, що ядра з парним Z мають більше стабільних ізотопів і більше поширені в природі, ніж ядра з непарними Z . Найбільш стійкі ядра з парним Z і парним N (так звані парно-парні ядра), і, навпаки, найменш стійкі ядра з непарним Z і непарним N (непарно-непарні ядра). Усі ці властивості атомних ядер учені побачили вже в перших систематиках ізотопів.

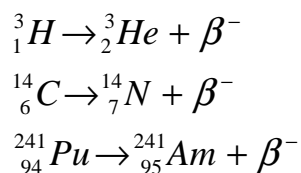
Наочно можна зобразити всі знайдені ізотопи, а також область існування передбачуваних атомних ядер. Для цього вчені використовують так звану нейтронно-протонну діаграму. По осі ординат відкладають кількість ядерних нейтронів, по осі абсцис – кількість ядерних протонів. Тоді будь-яке існуюче або передбачуване ядро атома на цій діаграмі буде зображене крапкою. Стабільні ізотопи тут матимуть вигляд ламаної ступінчастої лінії. Ядра, що лежать над цією кривою, здатні до β^- -розпаду. У таких ядрах нейтрони n розпадаються за схемою:



де $\tilde{\gamma}$ – антинейтрино, p – протон, \bar{e} – електрон.

Нове ядро, що утворюється, належить елементові, який займає в періодичній системі одну клітинку праворуч від родоначального β^- -активного елемента, тобто заряд нового ядра став більшим на одиницю. Зазначимо, що 46 % усіх вивчених ядер зазнають β^- -розпаду.

Щоб записати реакцію β^- -розпаду, використовуючи хімічні символи, треба пам'ятати, що масові числа в попереднього і нового ядер збігаються, а порядковий номер нового ядра збільшується на одиницю, наприклад:



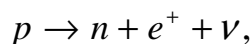
Ядра, що лежать під кривою стабільності, можуть зазнавати або *K-захвату*, або β^+ -розпаду. При *K-захваті* ядра переходять у ділянку стабільності внаслідок захвату електрона ядром з найближчої електронної *K*-оболонки. Дуже рідко ядро може захопити електрон з наступної, *L*-оболонки [1, с. 228].

У результаті *K-захвату* один ядерний протон нейтралізується і перетворюється в нейтрон. При цьому порядковий номер елемента зменшується на одиницю. *K-захват* характерний для чверті всіх радіоактивних ядер, але серед природних елементів тільки три ізотопи – ${}^{40}\text{K}$, ${}^{138}\text{La}$, ${}^{176}\text{Lu}$ – зазнають *K-захвату*.

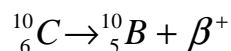
Якщо розглядати *K-захват* на фоні періодичної системи, то ми побачимо, що цього перетворення зазнають елементи другої половини періодичної системи ($Z = 45 \div 105$).

При β^+ -розпаді близько 11 % відомих ізотопів випускають позитрон, тобто частинку з масою електрона, але одиничним позитивним зарядом (e^+). Майже всі β^+ -активні ізотопи містяться в першій половині періодичної системи ($Z < 45$), тобто в ділянці порівняно легких ядер.

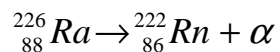
Ось як схематично записують процес перетворення ядерного протона (p) в нейтрон (n):



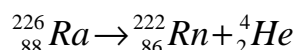
де ν — нейтрино. Як і в разі К-захвату, під час β^+ -розпаду порядковий номер елемента Z зменшується на одиницю. Як приклад позитронного β^+ -розпаду можна назвати β^+ -розпад вуглецю-10:



Понад 10 % радіоактивних ізотопів зазнають α -розпаду [1, с. 229], [8, с. 332]. Викинувши α -частинку, яка є ядром гелію, атом втрачає 4 одиниці маси, водночас заряд ядра зменшується на дві одиниці. Отже, дочірнє ядро розміститься в періодичній системі через одну клітинку вліво від материнського ядра. У формі закону порядок зміщення радіоелементів у періодичній системі сформулював у грудні 1913 р. Фредерік Содді. Наприклад, для радію наслідки α -розпаду можна записати у вигляді схеми:



Для наочності можна виразити α -частинку як ядро гелію ${}^4_2\text{He}$:

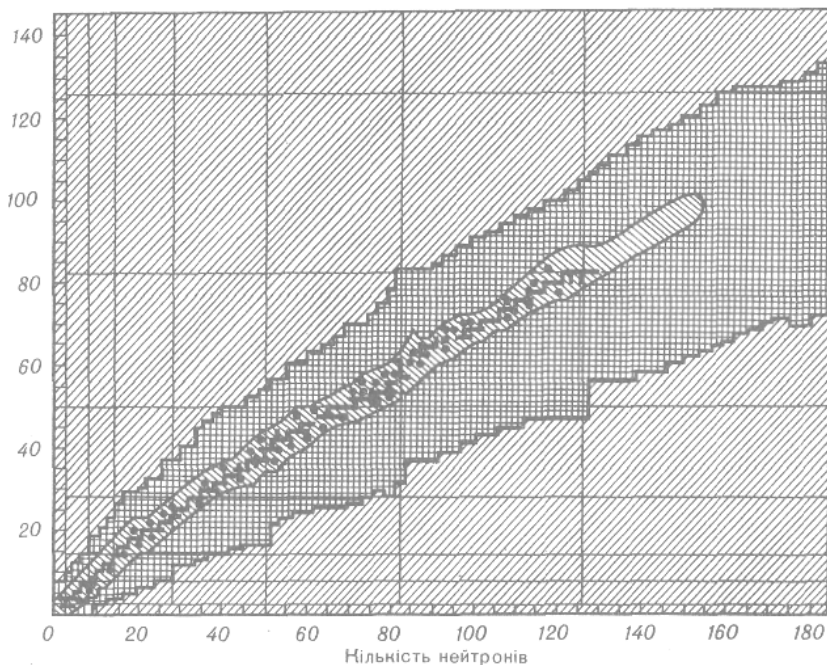


Слід зазначити, що більшість α -активних ізотопів належать елементам кінця періодичної системи з $Z > 82$.

Уважний розгляд нейтронно-протонної діаграми дав змогу виявити ще одну важливу закономірність у властивостях атомних ядер. При $N = 2, 8, 20, 50, 82, 126$ сходинки ламаної особливо довгі, на них лежить більше ядер, а при $Z = 2, 8, 20, 50, 82$ ці сходинки піднімаються на більшу висоту, «підминаючи» під себе більше ядер порівняно з сусідніми значеннями Z . Ці числа в ядерній фізиці називаються магічними. Що ж лежить в основі цього явища?

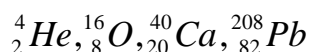
Коли ми звернемося до діаграми поширеності атомних ядер у природі, то переконаємося у тому, що піки на кривих відповідають ядрам з цими самими

кількостями нейтронів і протонів. Це підтверджується й для ізотопної поширеності в метеоритних тілах [1, с. 229].

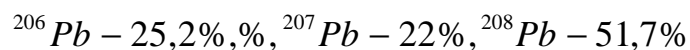


Нейтронно-протонна діаграма

Більше того, детальне вивчення зв'язку між кількістю нейтронів і протонів у ядрі і стійкістю ядер показало, що найстійкіші ядра, які містять по 2, 8, 20, 50, 82, 126 нейтронів і по 2, 8, 20, 50, 82 протони (так звані двічі магічні ядра):



Ці ядра найчастіше трапляються в природі. Наприклад, гелій має два ізотопи, серед них поширеність ізоотопу гелій-4 приблизно дорівнює 100 %. Серед трьох ізоотопів кисню найбільшу поширеність (> 99,75 %) має кисень з масою 16 (його ядро, отже, складається з 8 протонів і 8 нейтронів). Коли проаналізувати ізоотопний склад елемента № 20 – кальцію, що входить до складу звичайної шкільної крейди, то виявиться, що з дев'яти ізоотопів кальцію найбільше значення поширеності має двічі магічне ядро – кальцій-40. Його поширеність серед усіх інших ізоотопів кальцію в природі становить 96,97 %. Значення поширеності трьох стабільних ізоотопів свинцю (Z =82) становить:



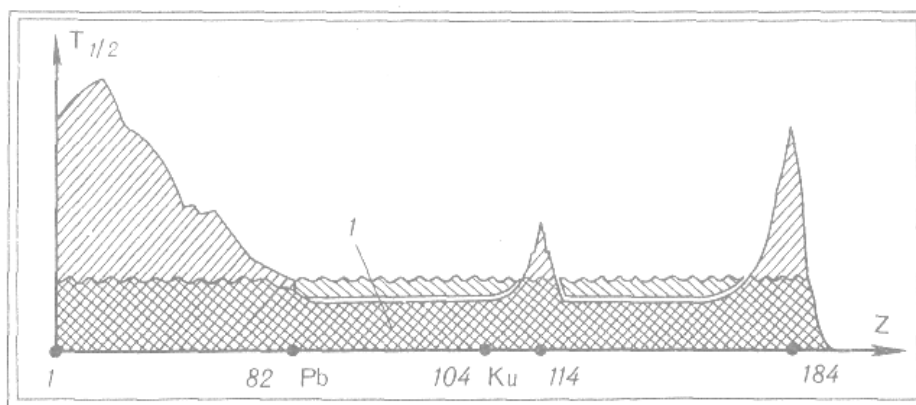
Отже, поширеність двічі магічного ядра найбільша. В елемента № 50 – олова в природі є 10 стабільних ізотопів [1, с. 230]. Це рекордна кількість стабільних ізотопів у елемента в періодичній системі Д. І. Менделєєва. Причина цього криється знову-таки в магічному числі 50.

Розгадка існування магічних чисел виявилась у самому атомі, тільки не в ядрі, а в електронних оболонках, які його оточують. Ми знаємо, що хімічна стійкість інертних газів зумовлена заповненістю їхніх електронних оболонок. Мимоволі напрошується сміливий висновок, що атомне ядро також має оболонкову структуру. Побудована на цій гіпотезі модель ядра показує, що близькі за енергією ядерні протони і нейтрони (які інакше називаються нуклонами) утворюють ядерну оболонку, повне заповнення якої приводить до утворення особливо стійких ядер. Те, що магічні числа для протонів і нейтронів однакові, є додатковим аргументом на користь цієї теорії.

Таким чином, тепер відомо понад 2000 різних ядер, серед яких близько 270 стабільних. Учені вважають, що з часом кількість відомих стабільних ядер зменшуватиметься. Тому, що вдосконалення техніки експерименту дає змогу вченим виявити слабку радіоактивність ізотопів, які раніше вважались стабільними. Таких ізотопів сьогодні вже більш як 50. Періоди піврозпаду (час, за який кількість атомів ізотопу зменшується вдвічі) цих ядер дуже великі: у ^{209}Bi – $2 \cdot 10^{17}$ років, у ^{48}Ca – $1 \cdot 10^{18}$ років, у ^{50}V – $6 \cdot 10^{15}$ років, у ^{184}W – $2,5 \cdot 10^{17}$ років, у ^{190}Pt – понад $7 \cdot 10^{11}$ років [3, с.159-160].

Є припущення, що всі атоми радіоактивні [9, с. 171-172], тільки ця радіоактивність у деяких атомів така мала, що експериментально виміряти період їхнього піврозпаду майже неможливо. Це наукове передбачення так і називається: гіпотеза загальної радіоактивності. Слід зазначити, що сучасні фахівці в галузі ядерної фізики мають більше доказів проти цієї гіпотези, ніж за.

Де ж застосовують відомі ізотопи? Більша частина радіоактивних ізотопів може бути використана в методі мічених атомів [6, с. 47], основи якого було закладено Г. Хевеші і Ф. Панетом у 1914 році.



Море ядерної нестійкості й острови ядерної стабільності.

Цей метод полягає в тому, що за рухом атомів елементів (або їхніх сполук) у різних хімічних і фізичних процесах удається простежити за допомогою радіоактивних ізотопних добавок, використовуючи відмінності ізотопів у радіоактивності, рівень якої реєструється вимірювальною апаратурою. Перші мічені атоми було виявлено в природі: це знайомі нам ізотопи хімічних елементів. Радіоактивні атоми можна виявити і навіть підрахувати за допомогою спеціальних лічильників радіоактивності, або детекторів випромінювань. Якщо ж до досліджуваного матеріалу піднести чутливу фотопластинку, то радіоактивні атоми залишать на ній свій слід, наче «розпишуться» про свою присутність [1, с. 232]. Існують лічильники різних конструкцій: один із найбільш поширених – лічильник Гейгера–Мюллера [6, с. 47].

На думку видатного американського хіміка і фізика Глена Теодора Сіборга, можливо, що найбільша користь, яку людство матиме від досліджень з атомної енергії, буде пов'язана не з використанням самої атомної енергії, а з широким

застосуванням ізотопних, так званих мічених атомів для розв'язання різних наукових і технічних проблем [1, с. 232].

Для мітки використовують такі радіоактивні ізотопи: вуглець ^{14}C , тритій ^3H , сірку ^{35}S , фосфор ^{32}P , натрій ^{24}Na , кобальт ^{60}Co , бром ^{82}Br , кальцій ^{45}Ca , йод ^{131}I , стронцій ^{89}Sr та ін. [6, с. 47–48], [8, с. 333]. Особливо часто використовують амінокислоти [8, с. 337] і цукри, мічені за карбоном (вуглецем). Так, в залежності від методу виготовлення сполуки і мети дослідження потрібно враховувати положення міченого атому в органічних сполуках. Наприклад, оцтова кислота може бути помічена C^{14} за карбоном карбоксильної або метальної групи. Відповідно позначається як ацетат-1- C^{14} або ацетат-2- C^{14} . Іноді використовують сполуки «мічені в ядрі». У останніх не можливо специфічно помітити один конкретний атом карбону в кільці. До таких сполук належить амінокислота пролін, яка буде мати позначення L-пролін (з міченим атомом в ядрі) [8, с. 337].

Наведемо декілька прикладів використання мічених атомів у фізіології рослин. За допомогою мічених атомів було показано, що в рослинах у процесі фотосинтезу вуглець вуглекислого газу є складовою часткою синтезованих цукрів (тріоз, тетроз, пентоз, гексоз) [6, с. 47–48].

Уявлення Ван Ніля про походження кисню (у процесі фотосинтезу) знайшло підтвердження в експериментах із міченим $^{18}\text{O}_2$, які незалежно в 1941 р. провели С. Рубен (США) та російські вчені О. П. Виноградов і Р. В. Тейс. За допомогою мас-спектрометричного аналізу було показано, що відношення $^{16}\text{O}_2$ до $^{18}\text{O}_2$ в кисні, який утворюється в процесі фотосинтезу, відповідає співвідношенню їх саме у воді, а не в CO_2 :



Коли ж ввести ізотоп $^{18}\text{O}_2$ у вуглекислий газ, то рівняння набуває іншого вигляду:



Це свідчить, що новоутворена молекула води відрізняється від тих двох молекул, що вступили в реакцію (рис. 1).

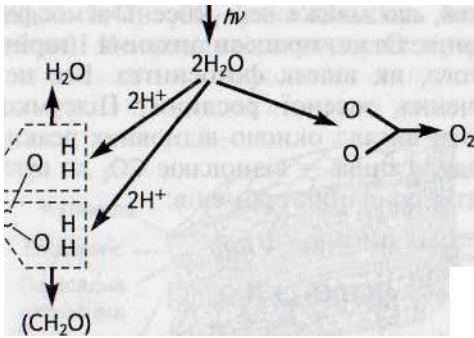


Рис. 1. Фотоліз води і виділення O_2 .

Отже, порівняльний аналіз ізотопного складу води, вуглекислого газу та O_2 , що виділяється під час фотосинтетичного процесу рослиною, підтвердив спорідненість кисню фотосинтезу з водою [7].

Механізм асиміляції CO_2 (цикл Кельвіна) також було розшифровано завдяки застосуванню міченого за ^{14}C вуглекислого газу, хроматографічного та радіоавтографічного методів аналізу [7].

Після перших дослідів Хевеши в 1923 р., в яких вивчалася здатність рослин накопичувати радіоактивний свинець, використання ізотопів стало стандартним методом в арсеналі біолога [8, с. 334].

У медицині метод мічених атомів [4] дає змогу лікарям швидко і точно поставити діагноз деяких складних захворювань і призначити пацієнтові правильне індивідуальне лікування. Наприклад, для виявлення пухлин можна використати ізотопи: йод-131, фосфор-32 або золото-198. Що ж до лікування виявлених пухлин, то тут на допомогу медикам приходять інші ізотопи – бор-10. Виявилось, що введений в організм бор більше концентрується в клітинах пухлини, ніж у навколишній здоровій тканині. Після того як у клітинах пухлини нагромадиться достатня кількість бору-10, пухлину пронизують пучком нейтронів. При зіткненні з нейтронами ядро бору-10 розлітається на два осколки. Потік цих «короткопробігових» іонів за кілька хвилин руйнує клітини пухлини [1, с. 232].

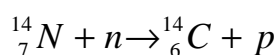
У добрій пригоді стали ізотопи й геологам. Застосування методів, що ґрунтуються на реєстрації природної або викликані радіоактивності гірських порід, дає змогу геологам значно швидше (а державі – значно дешевше) добути

інформацію про елементний і ізотопний склад досліджуваних геологічних пластів.

У методі природної радіоактивності гірських порід використовується здатність кожного радіоактивного ізотопу випромінювати тільки точно визначений, характерний спектр γ -випромінювання. Такий спектр, наче паспорт, повністю відображає індивідуальність будь-якого ізотопу. Якщо тепер опустити лічильник γ -випромінювання в свердловину, в якій є суміш радіоактивних ізотопів, то ми дістанемо загальний спектр – своєрідний «паспортний стіл» – усіх радіоізотопів, що «живуть» у цій свердловині. Зробивши відповідні приладові поправки, за цим спектром можна обчислити концентрацію певного ізотопу в товщі гірської породи, зробити висновок – чи має ця свердловина промислове значення. Деякі різновиди цього методу дають змогу робити пряму оцінку концентрації урану в рудному тілі.

У верстатобудівній промисловості в різних апаратах для γ -дефектоскопії використовують як джерела γ -випромінювання кобальт-60, цезій-137, церій-144, європій-155, тулій-170. Компактні й надійні, ці апарати дають змогу швидко вибракувати деталі, що мають усередині тріщини та інші дефекти [1, с. 233].

Застосування методів радіоізотопії в археології дало в руки вчених ряд дуже цінних, сенсаційних історико-наукових знахідок. Ідеться про «радіовуглецевий годинник», а точніше, про ізотоп вуглецю ^{14}C . Уперше цей метод був запропонований американським фізиком В. Ліббі і завдяки своїй простоті й ефективності тепер набув дуже великого поширення. Суть його проста. Під дією космічного проміння у верхніх шарах атмосфери невпинно утворюється радіоактивний ізотоп вуглецю ^{14}C :



У момент свого утворення збуджений ^{14}C сполучається з киснем, утворюючи оксид вуглецю CO_2 , який далі, опускаючись у нижчі атмосферні шари, потрапляє в клітини рослинних і тваринних організмів, надаючи їм своєї радіоактивності. Тепер, знаючи період піврозпаду ^{14}C та його вміст у процентах

в організмі, можна оцінювати вік будь-якої органічної речовини. За допомогою радіовуглецю було визначено вік дерев'яного саркофага з гробниці єгипетського фараона Сестоприса III [1, с. 233]. Для цього від дорогоцінного ложа відщепили маленький шматочок дерева, який «нашептав» надчутливому лічильникові свій вік, 3750 років. Здивовані історики підтвердили правильність цього результату.

Можна використовувати радіоактивні ізотопи в роботі атомних реакторів, для виготовлення надійних, компактних і довговічних нагрівачів [1, с. 233].

Отже, використання методу мічених атомів [10] стає необхідним з кожним днем. Типовими для біологічних і медико-біохімічних досліджень є речовини, мічені радіоактивними ізотопами водню (^3H), вуглецю (^{14}C), фосфору (^{32}P), сірки (^{35}S) або стабільними ізотопами азоту (^{15}N), кисню (^{18}O).

Реєструють радіоактивність за допомогою методів радіометрії, радіоавтографії, зокрема мікрорадіоавтографії, тощо. Мічені стабільними ізотопами речовини визначають методом мас-спектрометрії. За допомогою методу мічених атомів встановлено шляхи біосинтезу багатьох біологічно важливих речовин, розкрито механізми фотосинтезу, вивчено механізми багатьох біохімічних циклів та окремих реакцій, досліджено основні молекулярно-біологічні процеси і явища транспорту речовин у клітині.

Список використаної літератури

1. *Кривомазов А. Н.* Відкриття ізотопів та використання їх. / А. Н. Кривомазов // Книга для чтения по неорганической химии / сост. В. А. Крицман. – К. : Рад. шк., 1985. – С. 224–233.
2. *Камен М.* Радиоактивные индикаторы в биологии. / М. Камен. – М., 1948. – 434 с.
3. *Гродзинский Д. М.* Методика применения радиоактивных изотопов в биологии / Д. М. Гродзинский. – К. : УАСХН, 1962. – 170 с.
4. *Гродзенский Д. Э.* Радиоактивные изотопы в биологии и медицине / Д. Э. Гродзенский. – М. : Знание, 1955. – 40 с.
5. *Бланко М. А.* Меченые атомы в биохимии : ист. очерк / М. А. Бланко; отв. ред. А. Н. Шамин. – М. : Наука, 1988. – 119 с.
6. *Карузина И. П.* Биология / И. П. Карузина. – М. : Медицина, 1977. – 328 с.
7. *Мусієнко М. М.* Фізіологія рослин / М. М. Мусієнко. – К. : Вища шк., 1995. – 503 с.

8. *Клейн Р. М.* Методы исследования растений / Р. М. Клейн, Д. Т. Клейн. – М. : Колос, 1974. – 527 с.
9. *Радиоактивні ізотопи* // Екологічна енциклопедія. – К. : ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2008. – Т. 3 : О–Я. – С.171.
10. http://leksika.com.ua/19750412/ure/michenih_atomiv_metod