

## ІЗОТОПНИЙ ЕФЕКТ МАКРО- І МІКРОЕЛЕМЕНТІВ В ЕКОСИСТЕМАХ

О.Г. Мусич

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник  
ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» (м. Київ, Україна)  
e-mail: nad79eva@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3874-741X

О.В. Зубко

науковий співробітник  
ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» (м. Київ, Україна)  
e-mail: zubko2019alex@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2521-8087

О.С. Дем'янюк

доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН  
Інститут агроекології і природокористування НААН України (м. Київ, Україна)  
e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4134-9853

Проаналізовано ізотопні ефекти, що відбуваються в живих організмах, обумовлених метаболізмом. Явище метаболізму розглядається в класичному розумінні як поєднання біохімічних реакцій (головним чином ферментативних), що проходять у клітинах живих істот та забезпечують розщеплення, синтез і взаємоперетворення складних сполук. Сфера використання природних ізотопів широка та різноманітна. Ізотопи є носіями інформації про народження і перетворення молекул, а фракціонування ізотопів — це хімічна характеристика речовини. Ізотопний метаболізм полягає в міжмолекулярному фракціонуванні ізотопів на окремих стадіях біохімічних реакцій, а саме — розщеплення, синтез і взаємоперетворення складних сполук, викликаною відмінностями будови та фундаментальних властивостей ядер ізотопів. Доведено, що фракціонування ізотопів у хімічних і біохімічних реакціях, обумовлене ізотопними ефектами, ґрунтується на двох фундаментальних властивостях атомних ядер — масі і магнітного моменту. Кінетичний (масозалежний) ізотопний ефект розподіляє ізотопні ядра за їх масами, а магнітний — фракціонує ядра за їх магнітними моментами. Кінетичний ізотопний ефект залежить від величини різниці мас ізотопних молекул, температури і різниці енергій активації ізотопних форм. Магнітний ізотопний ефект залежить від швидкості реакції в окремо взятій клітині, його проєкції, магнітного моменту і енергії електрон-ядерної взаємодії. Визначено, що фракціонування ізотопів у живих організмах полягає в тому, що відносний вміст одного з ізотопів у цій сполуці збільшується за рахунок зменшення його вмісту в іншій. Як наслідок, відбувається фракціонування ізотопів у межах одного біологічного об'єкта.

**Ключові слова:** ізотопи, ізотопні ефекти, метаболізм, біологічне фракціонування, макро- та мікроелементи.

## ВСТУП

Планета Земля стоїть перед загрозою екологічної кризи через забруднення атмосфери і середовища, що заселене людиною, шкідливими викидами продуктів згорання природного газу, нафти, кам'яного та бурого вугілля, горючих сланців. Крім того, АЕС і ТЕЦ та інші способи отримання енергії є генераторами теплового забруднення планети. Природне середовище перестало бути загальним поглиначем відходів виробництва, транспорту, побуту і практично невичерпним джерелом сировини й енергії; виникли ознаки незворотних процесів у біосфері. Екосистеми, що формувалися мільйони років, зазнають істотних змін, стають нестійкими щодо до зовнішніх дій на глобальному рівні.

Еволюційний розвиток будь-якого живого організму залежить від стану навколишнього

середовища, від комплексу абіотичних та біотичних екологічних чинників, які превалюють в ньому в той або інший час. Природа структурована у вигляді певної системи і підсистеми строгої ієрархії. Оскільки хімічний елемент є складною системою, то в ролі його підсистеми виступають ізотопи, які відрізняються будовою електронних оболонок, масою та магнітними моментами, які визначають відмінності у хімічних властивостях елементу.

Практично всі біохімічно важливі елементи містять ізотопи, ядра яких розрізняються по ряду показників (маса, енергія та ін.). У біологічному фракціонуванні ізотопів виділяють два взаємозв'язані аспекти:

- розподілення ізотопів біогенних структурних елементів між організмом і середовищем його існування;

- розподілення ізотопів у біосистемах самого організму.

Розподіл ізотопів основних макро- і мікроелементів у біогенних молекулах має теоретичне і практичне значення:

- для встановлення факту і часу перетворення органічної речовини після відмирання організму (органічна геохімія);

- дослідження розподілу ізотопів у молекулах для вивчення метаболічних шляхів та істотних властивостей ферментативних реакцій (біохімія);

- розпізнавання біогенних і абіогенних сполук (еволюційна біохімія).

Метаболізм розглядається в класичному розумінні як поєднання біохімічних реакцій (головним чином ферментативних), що проходять у клітинах рослини, забезпечують розщеплення, синтез і взаємоперетворення складних сполук. Ізотопний метаболізм полягає в міжмолекулярному фракціонуванні ізотопів на окремих стадіях біохімічних реакцій, а саме — розщеплення, синтез і взаємоперетворення складних сполук, викликаному відмінностями будови та фундаментальних властивостей ядер ізотопів, такими як атомна маса і магнітний момент. Усі відомі живі організми Землі складаються з певного чітко визначеного набору хімічних елементів, що передається в однакових співвідношеннях від покоління до покоління, таким чином визначаючи хімічний склад будь-якого організму — як важливу систематичну ознаку [1].

Передача певного набору стабільних хімічних елементів від покоління до покоління, які потерпають змін у процесі геохімічної еволюції земної поверхні, але зі швидкістю, малодоступною людському сприйняттю, пов'язана з ізотопними ефектами. [2].

*Мета роботи* — проаналізувати сучасний стан явища ізотопії при застосуванні в біогеохімічних і біохімічних дослідженнях внутрішньоклітинного фракціонування ізотопів макро- та мікроелементів у живих організмах, з урахуванням властивості перерозподілу ізотопів як індикатора впливу умов навколишнього середовища на метаболічні процеси для ізотопної ідентифікації техногенного забруднення навколишнього середовища.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Під впливом двох процесів склався хімічний склад сучасних організмів. Це, з одного боку, еволюційні процеси в атмосфері, гідросфері і літосфері; з іншого — організму необхідна концентрація наявних всередині його співвідношень елементів. До органогенних елементів традиційно відносять кисень, вуглець,

водень і азот, враховуючи їх загальний вміст у живій речовині (98,72%). Саме вони є каркасом будь-якої органічної молекули. Причина того, що ці чотири елементи так ідеально підходять до виконання біологічних функцій, полягає в тому, що легко утворюють ковалентні зв'язки за допомогою спарювання електронів; легко реагують один з одним, заповнюючи свої зовнішні електронні оболонки. Крім того, три з них — вуглець, азот і кисень — утворюють і одинарні та подвійні зв'язки, завдяки чому з'являються найрізноманітніші хімічні сполуки [3]. Поява одноклітинних організмів сприяла розвитку першої системи внутрішнього мінерального гомеостазу; жива речовина відокремилася від зовнішнього середовища за допомогою створеної клітинної мембрани. За допомогою катіонів, концентрація яких у процесі вилуговування на ранніх етапах еволюції мінеральної гідросфери досягла оптимальної — калію, натрію, кальцію і магнію, а також аніонів вулканічної діяльності: фосфору, сірки, хлору — була створена буферна система.

Поява гетеротрофів сприяла тому, що система натрій-калій у рослинній клітині, яка забезпечує провідність клітинної мембрани, змінилася на систему водень-калій. До групи органогенних елементів належить також кремній завдяки здатності утворювати аналогічні ковалентні зв'язки.

Таким чином, катіони об'єднують шість елементів — калій, натрій, магній, хлор, кремній.

Аніони (Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Se, Mo, I, Co, F) — найбільш складний і гетерогенний клас хімічних елементів [4]. Біологічна значущість їх встановлена і задовольняє найголовнішій умові — і дефіцит, і надлишок провокують патологічні зміни в клітині.

Організми здатні до вибіркового поглинання і накопичення з навколишнього середовища деяких елементів; передусім, це стосується легких хімічних елементів, оскільки вміст хімічних елементів в організмах із зростанням атомної маси зазвичай зменшується. Однак, присутність деяких хімічних елементів (у кількості навіть декількох атомів на клітинну) призводить до значного впливу на процеси внутрішньоклітинного метаболізму.

Сфера використання людиною природних ізотопів широка та різноманітна. До неї включають як органічний, так і неорганічний світи. Сучасні дослідження доводять, що ізотопи є носіями інформації про народження і перетворення молекул, а фракціонування ізотопів — це хімічна історія речовини.

Для успішного використання ізотопів важливо мати уявлення про властивості і відмін-

ності не лише самих ізотопів, але також одних і тих самих сполук різного ізотопного складу. Це необхідно для аналізу хімічних реакцій, особливо вирішуючи складні біологічні проблеми.

Відомо, що фізичні і фізико-хімічні властивості речовин у випадку зміни ізотопного складу тим більші, чим менше номер хімічного елемента (при однаковій різниці атомних номерів) [5].

За допомогою стабільних ізотопів вирішують такі самі проблеми, що й радіоактивні, проте без викривлення результатів під впливом іонізуючого випромінювання. Велика складність вимірювань компенсується збільшенням надійності результатів.

Більшість хімічних елементів має певну кількість ізотопів, хімічні і фізичні властивості яких визначається електронною оболонкою, масою та магнітним моментом. Найвність ізотопів у хімічних елементах формує їх розширені можливості щодо перебігу тих чи інших хімічних реакцій, тобто ізотопи, що володіють різними масами і магнітними моментами, вдосконалюють механізм реакційної здатності природного хімічного елемента, збільшують стійкість існування самої системи загалом при зменшенні енергетичних витрат.

Таким чином, стабільні ізотопи використовують як індикатори в двох випадках:

1. При введенні відповідного ізотопу в живий організм у мікрокількостях із живленням, водою, повітрям чи спеціальними препаратами (т. з. зовнішня мітка); використання якої необхідно для з'ясування впливу ендогенних і екзогенних факторів навколишнього середовища.

2. При визначенні співвідношень власних ізотопів організму, що є внутрішньомолекулярним явищем (т. з. внутрішня мітка); використання якої необхідне для визначення і пояснення виникнення аномалій у живому організмі, вивчення послідовності біохімічних перетворень, встановлення конкуруючих паралельних реакцій та вимірювання швидкості утворення проміжних продуктів.

У світовій практиці для виміру ізотопного складу прийнято  $\delta$ -систему, в якій вміст ізотопу виражають через ізотопний склад певного стандарту і одиницею виміру використовують проміле (‰). Так, для ізотопу вуглецю  $^{13}\text{C}$

$$\delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{утв.}}/R_{\text{станд.}}) - 1] \times 10^3,$$

де  $R_{\text{утв.}} = (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{утв.}}$ , т. ч. виражає відносний вміст важкого і легкого ізотопу в зразку, а  $R_{\text{станд.}}$  — таке саме відношення для стандарту.

Інакше кажучи, при вимірюванні ізотопів використовують не абсолютні величини їх відношень, а відносні відхилення від ізотопного складу стандартного зразку. Додаткове зна-

чення  $\delta^{13}\text{C}$  вказує на збільшений вміст важкого ізотопу вуглецю відносно стандарту, а від'ємне — на зниження вмісту в зразку важкого ізотопу порівняно зі стандартом.

Фракціонування ізотопів в хімічних і біохімічних реакціях, обумовлене ізотопними ефектами, яке ґрунтується на двох фундаментальних властивостях атомних ядер — маси і магнітного моменту. Кінетичний (масозалежний) ізотопний ефект розподіляє ізотопні ядра за їх масами, а магнітний — фракціонує ядра за їх магнітними моментами [6].

Кінетичний ізотопний ефект обумовлений різною швидкістю реакцій різноманітних ізотопних форм, а саме — сполук, що мають повну аналогію за складом і будовою, але розрізняються присутністю в однієї чи декількох позиціях різних ізотопів даного елемента. В системі взаємодіючих часток частки меншої маси мають більшу швидкість, а молекули, що містять легкий ізотоп, більш рухливі, ніж молекули, що містять важкий ізотоп.

Другий чинник полягає в тому, що хімічні зв'язки, утворені важким ізотопом, більш міцні, ніж однойменні зв'язки, утворені легким ізотопом. Енергія активації відповідних реакцій за участю ізотопно-важкої форми більша, ніж за участю ізотопно-легкої. Кінетичний ізотопний ефект хімічної реакції чисельно визначається співвідношенням констант швидкостей реакцій ізотопних форм і залежить від різниці енергій активації, але не залежить від їх абсолютної величини. Інакше кажучи, кінетичний ізотопний ефект залежить не від кінетики реакції, а лише від різниці кінетики реакції ізотопних форм.

Якщо відношення констант швидкостей реакцій ізотопних форм більше одиниці, то продукти реакції збагачені легким ізотопом, а в непрореагованому залишку накопичується важкий ізотоп. В окремих випадках, це правило має винятки (наприклад, в деяких реакціях за участю іонів і радикалів). Крім того, відомо, що кінетичний ізотопний ефект залежить від величини різниці мас ізотопних молекул, температури і різниці енергій активації ізотопних форм. Розрахунок кінетичних ізотопних ефектів для різноманітних реакцій потребує знання швидкості протікання реакції та її стадійності, характеристики проміжних продуктів та ін.

Кінетичний ізотопний ефект має надзвичайно важливе значення в хімії, біохімії і описаний багатьма дослідниками [7–15]. З найбільш важливих і значних явищ слід відзначити збагачення ізотопом  $^{13}\text{C}$  атмосферного  $\text{CO}_2$  в результаті роботи ферменту рубиско (рибулозобисфосфат-карбоксилаза/оксигена-

за), який у первинних ферментативних актах фотосинтезу розподіляє ядра  $^{13}\text{C}$ , збіднюючи синтезовані вуглеводи цим ізотопом і збагачуючи ним вихідний  $\text{CO}_2$  [16].

Найбільш відомим критерієм кінетичного ефекту є співвідношення ізотопів у триадах  $^{16}\text{O} - ^{17}\text{O} - ^{18}\text{O}$ ,  $^{32}\text{S} - ^{33}\text{S} - ^{34}\text{S}$ ,  $^{42}\text{Ca} - ^{43}\text{Ca} - ^{44}\text{Ca}$ ,  $^{24}\text{Mg} - ^{25}\text{Mg} - ^{26}\text{Mg}$  та ін. У цих триадах з високою точністю виконуються співвідношення  $\delta^{17}\text{O} = 0,5\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{33}\text{S} = 0,5\delta^{34}\text{S}$  та ін.

Магнітний ізотопний ефект — залежність швидкості реакції (або ймовірності утворення молекули) від ядерного спіну, його проекції, магнітного моменту і енергії електрон-ядерної взаємодії [1].

#### Основні положення біологічного фракціонування ізотопів

Закономірності поширеності ізотопів у природі контролюються процесами, що відбуваються в біосфері. Біологічне фракціонування — це властивість, притаманна всім біохімічним реакціям, що протікають в організмі. Універсальність природи ізотопного ефекту пов'язана з ферментами, які контролюють різні біохімічні реакції.

Фракціонування ізотопів у живих організмах полягає в тому, що відносний вміст одного з ізотопів у цій сполуці збільшується за рахунок зменшення його вмісту в іншій, це наслідок їх фізико-хімічної нерівноцінності, що позначається на швидкості процесів, або на енергетичному стані системи.

Конфігурація електронних оболонок ізотопних атомів однакова. Тому вони мають схожі властивості хімічної поведінки елементу. Однак, різниця ізотопів (передусім за масою, а також за показником ядерного спіну) призводить до деякої відмінності в поведінці ізотопних форм сполук. У результаті, ізотопний склад продукту реакції може відрізнитися від початкового. Ця відмінність описується як ізотопний ефект [17; 18].

Поняття біологічного фракціонування ізотопів хімічних елементів, які утворюють живі речовини (H, C, N, O, S), пов'язане з двома фактами:

1. Виявленням відмінностей ізотопного складу зазначених елементів в організмах і сполуках неживої природи (переважна час-

тина результатів експериментів відноситься до вуглецю, що зумовлено його присутністю в усіх органічних сполуках, а також встановлено збагачення молекул вуглецю живих організмів легким ізотопом  $^{12}\text{C}$  відносно його частки в неорганічних сполуках).

2. Встановленням кінетичного ізотопного ефекту, що спряжений з ефектом карбоксилювання (інші ізотопні ефекти, які відбуваються в живих організмах зазвичай не розглядаються).

Дослідження ізотопних ефектів не зводиться до одного лише внесення поправок, викликаних відхиленням від «принципу індикаторності», а має глибокий самостійний сенс. Дослідження природи незвичайних ізотопних ефектів в організмі сприяє з'ясуванню механізмів найважливіших біологічних процесів.

#### ВИСНОВКИ

На основі проведеного науково-теоретичного пошуку сучасного стану явища ізотопії біогенних елементів в метаболізмі клітини встановлено, що:

- ізотопний ефект урізноманітнює реакційні можливості макро- та мікроелементів у живих організмах у процесі метаболізму;
- відображає найбільш тонкі аспекти біохімічних реакцій;
- посилює при цьому адаптаційні властивості живого організму;
- по відхиленнях в ізотопних співвідношеннях можна судити про стан метаболічних процесів, що є ефективним інструментарієм діагностики функціонального стану живих організмів в умовах техногенезу.

Внутрішньомолекулярні співвідношення ізотопів є новим джерелом хімічної інформації про організм, якому відведена більш значуща роль, ніж макро- і мікромолекули. Внутрішньомолекулярні співвідношення ізотопів містять інформацію (пам'ять), закладену в молекулу при її «народженні», тобто пам'ять про хімічну еволюцію речовини як сукупність величезної кількості хімічних реакцій. З цієї пам'яті шляхом ізотопії можна простежити походження речовин у природі.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бучаченко А. Л. Новая изотопия в химии и биохимии. Москва: Наука, 2007. 189с.
2. Коркушко О.В., Лысенко О.Б., Скульский Н.А., Соболевич Э.В., Шатило В.Б. Естественное внутри-молекулярное фракционирование стабильных изотопов биогенных элементов в организме человека. *Журнал Академии медицинских наук Украины*. 2009. Т. 15. № 4. С. 1–22.
3. Turro N.J. Magnetic field and magnetic isotope effects on cage reactions in micellar solutions. *Journal of the American Chemical Society*. 1980. Vol. 102. P. 4843–4845. <https://doi.org/10.1021/ja00534a052>



4. McCue M.D., Pollock E.D. Stable isotopes may provide evidence for starvation in reptiles. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: RCM*. 2008. Vol. 22. No. 15. P. 2307–2314. <https://doi.org/10.1002/rcm.3615>
5. Sobotovich E.V., Florinsky I.V., Lysenko O.V., Grodzinsky D.M. Role of isotopes in the biosphere. *Florinsky I.V. (Ed.). Man and the Geosphere*. New York: Nova Science Publishers, 2010. P. 33–68.
6. Соботович Е., Лисенко О., Деміхов Ю. та ін. Ізотопні співвідношення біогенних хімічних елементів у живому організмі як потенційний індикатор його фізіологічного стану. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. Вип. 68. С. 36–68.
7. Wahl S.A., Noh K., Wiechert W.  $^{13}\text{C}$  labeling experiments at metabolic nonstationary conditions: An exploratory study. *BMC Bioinformatics*. 2008. Vol. 9. No 152. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-152>.
8. Yuan Y., Yang T.H., Heinzle E.  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis for larger scale cultivation using gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry. *Metabolic Engineering*. 2010. Vol. 12. No. 4. P. 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2010.02.001>
9. Le Novere N., Hucka M., Mi H., Moodie S., Schreiber F., Sorokin A., et al. The Systems Biology Graphical Notation. *Nature Biotechnology*. 2009. Vol. 27. No. 8. P. 735–741. <https://doi.org/10.1038/nbt.1558>
10. Guerrasio R., Haberhauer-Troyer C., Steiger M., Sauer M., Mattanovich D., Koellensperger G., et al. Measurement uncertainty of isotopologue fractions in fluxomics determined via mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2013. Vol. 405. No. 15. P. 5133–5146. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-6910-5>
11. Millard P., Massou S., Wittmann C., Portais J.C., Letisse F. Sampling of intracellular metabolites for stationary and non-stationary  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis in *Escherichia coli*. *Analytical Biochemistry*. 2014. Vol. 465. P. 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.jab.2014.07.026>
12. Chokkathukalam A., Kim D.H., Barrett M.P., Breitling R., Creek D.J. Stable isotope-labeling studies in metabolomics: new insights into structure and dynamics of metabolic networks. *Bioanalysis*. 2014. Vol. 6. No. 4. P. 511–524. <https://dx.doi.org/10.4155%2Fbio.13.348>
13. Crown S.B., Ahn W.S., Antoniewicz M.R. Rational design of  $^{13}\text{C}$ -labeling experiments for metabolic flux analysis in mammalian cells. *BMC Systems Biology*. 2012. Vol. 6(1). No 43. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-6-43>
14. Taymaz-Nikerel H., de Mey M., Ras C., ten Pierick A., Seifar R.M., van Dam J.C., et al. Development and application of a differential method for reliable metabolome analysis in *Escherichia coli*. *Analytical Biochemistry*. 2009. Vol. 386. No. 1. P. 9–19.
15. Au J., Choi J., Jones S.W., Venkataramanan K.P., Antoniewicz M.R. Parallel labeling experiments validate *Clostridium acetobutylicum* metabolic network model for  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis. *Metabolic Engineering*. 2014. Vol. 26. P. 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2014.08.002>
16. Cleland W.W. Use of isotope effects to elucidate enzyme mechanisms. *CRC Crit Rev Biochem*. 1982. Vol. 13. P. 385–428. <https://doi.org/10.3109/10409238209108715>
17. Соботович Э.В., Лысенко О.Б. Изотопный сдвиг элементов в биологических процессах. *Доповіди НАН України*. 2001. № 4. С.114–119.
18. Лысенко О.Б., Деміхов Ю.Н., Борисова Н.Н., Кошлякова Т.Н. Изотопный состав живых организмов как перспективный источник информации об их физиологическом состоянии. *The Ukrainian Biochemical Journal*. 2014. Т. 86. № 5. С. 173–174.

#### IZOTOPIC EFFECT MACRO- AND MICROELEMENTS IN ECOSYSTEMS

Musich O.

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher

GU «Institute of Environmental Geochemistry» of the National Academy of Sciences of Ukraine  
(Kyiv, Ukraine)

e-mail: nad79eva@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3874-741X

Zubko A.

Researcher

GU «Institute of Environmental Geochemistry» of the National Academy of Sciences of Ukraine  
(Kyiv, Ukraine)

e-mail: zubko2019alex@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2521-8087

Demyanyuk O.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Corresponding Member of NAAS of Ukraine  
Institute of Agroecology and Nature Management of the National Academy of Sciences of Ukraine  
(Kyiv, Ukraine)

e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4134-9853

*Isotopic effects occurring in living organisms due to metabolism are analyzed. The phenomenon of metabolism is considered in the classical sense as a combination of biochemical reactions (mainly enzyma-*

tic) that take place in the cells of living beings and provide the cleavage, synthesis and interconversion of complex compounds. The scope of use of natural isotopes is wide and diverse. Isotopes are carriers of information about the birth and transformation of molecules, and isotope fractionation is a chemical characteristic of a substance. Isotope metabolism consists in the intermolecular fractionation of isotopes at separate stages of biochemical reactions, namely the cleavage, synthesis and interconversion of complex compounds caused by differences in the structure and fundamental properties of isotope nuclei. It is proved that the fractionation of isotopes in chemical and biochemical reactions due to isotopic effects is based on two fundamental properties of atomic nuclei — mass and magnetic moment. The kinetic (mass-dependent) isotopic effect distributes the isotopic nuclei by their masses, and the magnetic one fractionates the nuclei by their magnetic moments. The kinetic isotopic effect depends on the magnitude of the difference in the masses of isotopic molecules, temperature and the difference in the activation energies of isotopic forms. The magnetic isotope effect depends on the reaction rate in a single cell, its projection, magnetic moment and energy of electron-nuclear interaction. It is determined that the fractionation of isotopes in living organisms is that the relative content of one of the isotopes in this compound increases by reducing its content in the other. As a result, there is a fractionation of isotopes within one biological object.

**Keywords:** isotopes, isotope effects, metabolism, biological fractionation, macro- and microelements.

### REFERENCES

1. Buchachenko, A. L. (2007). *Novaya izotopiya v khimii i biokhimii* [New isotope in chemistry and biochemistry]. Moskva: Nauka [in Russian].
2. Korkushko, O.V., Lysenko, O.B., Skulskiy, N.A., Sobotovich, E.V. & Shatilo, V.B. (2009). Yestestvennoe vnutrimolekulyarnoe fraktsionirovanie stabilnykh izotopov biogenykh elementov v organizme cheloveka [Natural intramolecular fractionation of stable isotopes of biogenic elements in the human body]. *Zhurnal Akademii meditsynskikh nauk Ukrainy — Journal of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine*, 4, 1–22 [in Russian].
3. Turro, N.J. (1980) Magnetic field and magnetic isotope effects on cage reactions in micellar solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 102, 4843–4845. <https://doi.org/10.1021/ja00534a052> [in English].
4. McCue, M.D. & Pollock, E.D. (2008). Stable isotopes may provide evidence for starvation in reptiles. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: RCM*, 22, 15, 2307–2314. <https://doi.org/10.1002/rcm.3615> [in English].
5. Sobotovich, E.V., Florinsky, I.V., Lysenko, O.V. & Grodzinsky, D.M. (2010). *Role of isotopes in the biosphere*. Florinsky I.V. (Ed.). Man and the Geosphere. New York: Nova Science Publishers [in English].
6. Sobotovych, E., Lysenko, O., Demikhov, Yu. et al. (2014). Izotopni spivvidnoshennia biogenykh khimichnykh elementiv u zhyvomu orhanizmi yak potentsiinyi indykator yoho fiziologichnoho stanu [Biogenic chemical elements isotopic ratios in living organisms as a new potential indicator of physiological state]. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seriya biologichna — Visnyk of the Lviv University. Series Biology*, 68, 36–68 [in Ukrainian].
7. Wahl, S.A., Noh, K. & Wiechert, W. (2008).  $^{13}\text{C}$  labeling experiments at metabolic nonstationary conditions: An exploratory study. *BMC Bioinformatics*, 9, 152. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-9-152> [in English].
8. Yuan, Y., Yang, T.H. & Heinzle, E. (2010).  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis for larger scale cultivation using gas chromatography-combustion-isotope ratio mass spectrometry. *Metabolic Engineering*, 12, 4, 392–400. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2010.02.001> [in English].
9. Le Novere, N., Hucka, M., Mi, H., Moodie, S., Schreiber, F., Sorokin, A., et al. (2009) *The Systems Biology Graphical Notation*. *Nature Biotechnology*, 27, 8, 735–741. <https://doi.org/10.1038/nbt.1558> [in English].
10. Guerrasio, R., Haberhauer-Troyer, C., Steiger, M., Sauer, M., Mattanovich, D., Koellensperger, G., et al. (2013). Measurement uncertainty of isotopologue fractions in fluxomics determined via mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 405, 15, 5133–5146. <https://doi.org/10.1007/s00216-013-6910-5> [in English].
11. Millard, P., Massou, S., Wittmann, C., Portais, J.C. & Letiche, F. (2014). Sampling of intracellular metabolites for stationary and non-stationary  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis in *Escherichia coli*. *Analytical Biochemistry*, 465, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2014.07.026>
12. Chokkathukalam, A., Kim, D.H., Barrett, M.P., Breitling, R. & Creek, D.J. (2014) Stable isotope-labeling studies in metabolomics: new insights into structure and dynamics of metabolic networks. *Bioanalysis*, 6, 4, 511–524. <https://dx.doi.org/10.4155/bio.13.348> [in English].
13. Crown, S.B., Ahn, W.S. & Antoniewicz, M.R. (2012). Rational design of  $^{13}\text{C}$ -labeling experiments for metabolic flux analysis in mammalian cells. *BMC Systems Biology*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-6-43> [in English].

14. Taymaz-Nikerel, H., de Mey, M., Ras C., ten Pierick A., Seifar RM., van Dam J.C., et al. (2009). Development and application of a differential method for reliable metabolome analysis in *Escherichia coli*. *Analytical Biochemistry*, 386, 1, 9–19 [in English].
15. Au J., Choi J., Jones S.W., Venkataramanan K.P. & Antoniewicz M.R. (2014). Parallel labeling experiments validate *Clostridium acetobutylicum* metabolic network model for  $^{13}\text{C}$  metabolic flux analysis. *Metabolic Engineering*, 26, 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2014.08.002> [in English].
16. Cleland W.W. (1982). Use of isotope effects to elucidate enzyme mechanisms. *CRC Crit Rev Biochem*, 13, 385–428. <https://doi.org/10.3109/10409238209108715> [in English].
17. Sobotovich, E.V. & Lysenko O.B. (2001). Izotopnyy sdvig elementov v biologicheskikh protsessakh [Shift isotope elements in biological processes]. *Dopovidi NAN Ukrainy — Reports of the NAS of Ukraine*, 4, 114–119 [in Russian].
18. Lysenko, O.B., Demikhov, Yu.N., Borisova, N.N. & Koshlyakova, T.N. (2014). Izotopnyy sostav zhivykh organizmov kak perspektivnyy istochnik informatsii ob ikh fiziologicheskoy sostoyanii [Isotopic composition of living organisms as a promising source of information about their physiological state]. *The Ukrainian Biochemical Journal*, 86, 5, 173–174 [in Russian].

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Мусич Олена Григорівна**, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» (бульвар Академіка Вернадського, 38А, м. Київ, Україна, 02000; e-mail: nad79eva@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3874-741X).

**Зубко Олександр Вікторович**, науковий співробітник, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» (бульвар Академіка Вернадського, 38А, м. Київ, Україна, 02000; e-mail: zubko2019alex@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2521-8087).

**Дем'янюк Олена Сергіївна**, доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: demolena@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4134-9853).

## Новини

### Новини

## Новини • Новини • Новини

Україна може зменшити залежність від блакитного палива і створити нові робочі місця завдяки розвитку біоенергетики. Для біоенергетичних проєктів та зменшення споживання газу Україна має потужні ресурси, близько 40% агровідходів країни можуть замінити в еквіваленті до 10 млрд кубометрів газу на рік. Як зазначає **Юрій Шафаренко**, заступник голови Держенергоефективності, у 2019 році Україна використала майже 30 млрд м куб. газу. Цього року, щоб зменшити залежність від блакитного палива, потрібно активізувати розвиток біоенергетики. Це надасть змогу знизити ціни на біопаливо, підвищити його якість та забезпечити біопаливом «зелені» нові генеруючі потужності.