



**МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА КЛІНІЧНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ ДІАГНОСТИКИ,  
МІКРОБІОЛОГІЇ ТА БІОЛОГІЧНОЇ ХІМІЇ**



**MINISTRY OF HEALTH OF UKRAINE  
NATIONAL UNIVERSITY OF PHARMACY  
DEPARTMENT OF CLINICAL LABORATORY DIAGNOSTICS,  
MICROBIOLOGY AND BIOLOGICAL CHEMISTRY**



**ЗБІРНИК  
публікацій  
II Міжнародної науково-практичної  
*online* конференції  
«СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ,  
КЛІНІЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ БІОХІМІЇ ТА  
МОЛЕКУЛЯРНОЇ БІОЛОГІЇ»**

**BOOK  
of publications  
of II International scientific and practical  
*online* conference  
"MODERN ACHIEVEMENTS OF EXPERIMENTAL,  
CLINICAL, ENVIRONMENTAL BIOCHEMISTRY AND  
MOLECULAR BIOLOGY"**

**07 листопада 2025 р.  
м. Харків, Україна  
November 07, 2025  
Kharkiv, Ukraine**

## СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ЩОДО БІОХІМІЧНОЇ КОМПАРТМЕНТАЛІЗАЦІЇ

Сенюк І.В., Кравченко В.М., Щербак О.А.

Національний фармацевтичний університет, Харків, Україна

[citochrom@gmail.com](mailto:citochrom@gmail.com)

**Анотація.** Біохімічна компартменталізація є фундаментальним принципом організації живих клітин, який забезпечує просторову й функціональну впорядкованість метаболічних процесів. Завдяки компартменталізації клітина досягає ефективності обміну речовин, регуляції енергетичних потоків, синтезу макромолекул і підтримання гомеостазу. У статті розглянуто історію формування уявлень про компартменталізацію, її молекулярні механізми, типи клітинних компартментів, взаємозв'язок між метаболічними шляхами, роль мембран, ферментних комплексів і фазових конденсатів. Особливу увагу приділено сучасним уявленням про динамічну компартменталізацію та її значення для біотехнології, фармакології й патології клітини.

**Ключові слова:** компартменталізація, клітина, метаболізм, мембрана, органела, мікродомен, фазова сепарація, біохімія.

**Вступ.** Однією з основних характеристик живої матерії є її висока структурна впорядкованість. У клітині, на відміну від неживих систем, простір не є однорідним, він поділений на спеціалізовані зони, або компартменти, у яких відбуваються строго визначені біохімічні процеси. Такий розподіл функцій і простору створює умови для одночасного протікання взаємно несумісних реакцій, ефективного використання енергії та швидкої регуляції метаболізму. Саме цей принцип отримав назву біохімічної компартменталізації [1].

Ідея просторової організації клітини почала формуватись ще в середині ХХ століття, коли електронна мікроскопія дозволила побачити внутрішню архітектуру клітинних структур. Пізніше біохімічні дослідження показали, що певні ферменти локалізуються лише в окремих органелах – мітохондріях, пероксисомах, ендоплазматичному ретикулумі тощо. Ці спостереження стали підґрунтям для формування концепції метаболічної компартменталізації, що нині розглядається як універсальна властивість живих систем.

У сучасній біології компартменталізація трактується не лише як фізичне розділення реакцій за допомогою мембран, а й як динамічний механізм, який забезпечує тимчасову, умовну або фазову сегрегацію компонентів цитоплазми. Це включає формування так званих біомолекулярних конденсатів, немембранних структур, що виникають у результаті рідинно-рідинної фазової сепарації. Прикладами таких структур є ядрце, тільця Кахалія, stress-грані, Р-

тілця та інші функціональні мікродомени [2].

Біохімічна компартменталізація має виняткове значення для метаболізму, оскільки дозволяє: підтримувати концентраційні градієнти субстратів і коферментів; уникати небажаних побічних реакцій; регулювати швидкість і напрямок метаболічних шляхів; створювати мікросередовище з оптимальним рН, іонним складом або редокс-потенціалом; координувати енергетичні процеси між органелами [3].

Вивчення механізмів компартменталізації є важливим не лише для розуміння клітинної фізіології, але й для медицини, біотехнології та фармакології. Порушення просторової організації клітини лежить в основі багатьох патологій: нейродегенеративних, метаболічних, онкологічних, запальних. Отже, поглиблене розуміння сучасних уявлень про компартменталізацію є необхідним для створення нових підходів до діагностики й терапії.

**Мета дослідження.** Узагальнити сучасні наукові дані щодо біохімічної компартменталізації, її структурних та функціональних особливостей, механізмів формування і регуляції, а також визначити значення цього явища для нормальної та патологічної фізіології клітини.

**Матеріали та методи.** Під час підготовки роботи використано системний огляд сучасної літератури, включно з базами даних *PubMed*, *Scopus*, *Web of Science*. Проаналізовано результати експериментальних та теоретичних досліджень, опублікованих у 2005-2025 рр., що стосуються клітинної організації, метаболічної компартменталізації, рідинно-рідинної фазової сепарації та молекулярної динаміки. Методологічно дослідження базувалось на порівняльному аналізі механізмів компартменталізації в різних типах клітин, міжвидових аналогіях, а також на біохімічному й структурно-функціональному узагальненні отриманих даних.

**Результати та обговорення.** Компартмент у біохімічному сенсі це функціонально спеціалізована ділянка клітини, у межах якої створено певні умови для здійснення конкретних реакцій. Класично виділяють два основних типи компартментів: мембранні – органели, оточені ліпідними мембранами (ядро, мітохондрії, ЕПР, апарат Гольджі, лізосоми, пероксисоми, хлоропласти). Немембранні – тимчасові мікродомени або біомолекулярні конденсати, сформовані завдяки міжмолекулярним взаємодіям без участі мембран. Функціональна компартменталізація може також бути метаболічною (розподіл шляхів гліколізу, циклу Кребса,  $\beta$ -окиснення) та сигнальною (локалізація каскадів MAPK,  $Ca^{2+}$ -сигналізації тощо) [4].

Мембрани виконують роль бар'єрів і платформ для ферментів. У мітохондріях, наприклад, внутрішня мембрана формує кристи: ділянки інтенсивного окисного фосфорилування. У ендоплазматичному ретикулумі локалізуються ферменти синтезу ліпідів і білків, тоді як апарат Гольджі забезпечує посттрансляційну модифікацію та сортування. Такий розподіл реакцій дозволяє клітині створювати автономні мікросистеми, де одночасно підтримуються різні хімічні режими [5].

Рідинно-рідинна фазова сепарація (LLPS) – це сучасна концепція, яка пояснює утворення динамічних немембранних структур. Її рушійною силою є слабкі мультивалентні взаємодії між білками та нуклеїновими кислотами, що спричиняють конденсацію компонентів у щільні, але рухомі краплиноподібні домени. Такі структури швидко формуються і розпадаються у відповідь на зміни умов, тому вони є ідеальними регуляторними центрами клітинної активності [6-8].

Основними факторами, що визначають локалізацію реакцій, є: транспорт білків через сигнальні пептиди; посттрансляційні модифікації (фосфорилування, ацетилювання, убіквітинування); білок-білкові взаємодії; мембранний потенціал і локальні градієнти іонів. Завдяки цим механізмам клітина здатна швидко змінювати топологію своїх процесів, адаптуючись до зовнішніх впливів.

Відомо, що концентрація субстратів і ферментів у певному мікросередовищі може підвищувати швидкість реакцій у десятки разів. Наприклад, у гліколітичних комплексах ферменти зібрані в послідовні каскади, що мінімізує дифузійні втрати. У мітохондріях просторове зближення ферментів циклу Кребса і дихального ланцюга створює метаболічні «суперкомплекси», які підвищують продукцію АТФ [9].

Порушення компартменталізації є патогенетичним чинником багатьох хвороб. Наприклад: мітохондріальна дисфункція при нейродегенерації (альцгеймеризм, паркінсонізм); дефекти аутофагії та лізосом при ліпідозах; патологічна фазова сепарація при агрегації білків (TDP-43, FUS); зміна ядерно-цитоплазматичного транспорту при онкопроцесах. Отже, структурна цілісність компартментів є критичною для клітинного виживання [10-12].

Розуміння топології клітинних процесів відкриває нові можливості для створення таргетних лікарських засобів, спрямованих у певні компартменти, наприклад, мітохондріальні антиоксиданти, лізосомальні ферменти, нуклеарні інгібітори. У синтетичній біології на цій основі розробляють штучні мікрокомпартменти, нанокапсули та ферментні платформи для виробництва біомолекул.

**Висновки.** Біохімічна компартменталізація є ключовим принципом організації клітинного життя. Вона забезпечує просторову координацію метаболізму, підвищення ефективності реакцій та зниження енергетичних втрат. Сучасні дослідження доводять, що поряд із класичними мембранними органелами важливу роль відіграють немембранні конденсати. Порушення компартменталізації призводить до розвитку численних патологій, тому її вивчення має фундаментальне і прикладне значення. Перспективними напрямками є створення штучних компартментів і розробка препаратів, що цілеспрямовано діють у певних клітинних доменах.

#### Література.

1. Alberts B. *Molecular Biology of the Cell*. 7th ed. Garland Science, 2022.
2. Banani S.F. Biomolecular condensates: organizers of cellular biochemistry. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, 2017;18(5):285–298.
3. Hyman A.A., Brangwynne C.P. Beyond stereospecificity: phase separation in cell organization. *Science*, 2019;363(6432):eaaw8858.
4. Voit E.O. Biochemical systems theory: A review. *ISRN Biomathematics*, 2013;2013:897658.
5. Altschuler S.J., Wu L.F. Cellular organization by self-organization. *Science*, 2010;327(5965):427–431.
6. Boija A., Hnisz D., Young R.A. Transcriptional condensates and gene control. *Nat. Rev. Genet.*, 2022;23(6): 395–410.
7. Rowland M.A., Deeds E.J. Crosstalk and the evolution of specificity in two-component signaling. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2014;111(13):5550–5555.
8. Taniue K, Akimitsu N. Aberrant phase separation and cancer. *FEBS J.* 2022;289(1):17-39. doi: 10.1111/febs.15765.
9. Lyon AS, Peeples WB, Rosen MK. A framework for understanding the functions of biomolecular condensates across scales. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2021;22(3):215-235. doi: 10.1038/s41580-020-00303-z.
10. Ditlev JA, Case LB, Rosen MK. Who's In and Who's Out-Compositional Control of Biomolecular Condensates. *J Mol Biol.* 2018;430(23):4666-4684. doi: 10.1016/j.jmb.2018.08.003.
11. Gorsheneva NA, Sopova JV, Azarov VV. et al. Biomolecular Condensates: Structure, Functions, Methods of Research. *Biochemistry.* 2024;89(Suppl 1):S205-S223. doi: 10.1134/S0006297924140116.
12. Cable J, Brangwynne C, Seydoux G. et al. Phase separation in biology and disease- a symposium report. *Acad Sci.* 2019 Sep;1452(1):3-11. doi: 10.1111/nyas.14126.