

# Хемосинтез: історія інновацій

О.А. Параска<sup>1</sup>, А.Є. Горбань<sup>2</sup>, Б.П. Мацелюх<sup>3</sup>, С.А. Щур<sup>4</sup>, В.А. Шендеровський<sup>5</sup>

1. Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна
2. Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна
3. Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, м. Київ, Україна
4. Відділ культури, національностей, релігій та туризму Городецької міської ради, м. Городок, Україна
5. Інститут фізики НАН України, м. Київ, Україна

Конфлікт інтересів: відсутній

**ОБҐРУНТУВАННЯ.** Незважаючи на те, що процес хемосинтезу відомий понад сто років, він є важливим і сьогодні в перетворенні хімічних елементів у біогеохімічних циклах. Наразі потребують наукового обґрунтування та додаткових досліджень процеси життєдіяльності нітрифікувальних бактерій, у результаті яких відбувається окислення аміаку до нітратної кислоти. Здатність бактерій перетворювати неорганічні речовини на органічні дає змогу стверджувати, що хемосинтетичні організми можуть накопичувати цінні ресурси для потреб людства.

**МЕТА.** Проаналізувати історію відкриття хемосинтезу та визначити основні шляхи його впровадження в інноваційних технологіях.

**МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ.** Узагальнення, аналіз і синтез тематичних наукових публікацій.

**РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.** У статті представлено історію відкриття процесу хемосинтезу та його автора Сергія Виноградського. Наведено особливості й умови перетворення хімічних елементів у біогеохімічних циклах. Основними напрямками наукових досліджень є аналіз особливостей перебігу процесу хемосинтезу, причин їх виникнення, а також визначення основних можливостей застосування хемосинтезу в інноваційних технологіях. Підтверджено актуальність хемосинтезу в життєвих процесах та інноваційних технологіях сьогодення.

**ВИСНОВКИ.** Хемосинтетичні спільноти в різних середовищах являють собою важливі біологічні системи з погляду їхньої екології, еволюції та біогеографії, а також їхнього потенціалу як індикаторів наявності постійних джерел енергії на основі вуглеводнів. У процесі хемосинтезу бактерії продукують органічні речовини там, де фотосинтез неможливий. Виділення термофільних сульфатовідновлювальних бактерій *Thermodesulfovibrio yellowstonii* й інших видів хемосинтетиків відкриває перспективи для подальших наукових досліджень. Отже, хемосинтез залишається актуальним для інноваційних технологій, збереження екосистем, життєдіяльності людства загалом. Роль у відкритті явища хемосинтезу Сергія Виноградського є недооціненою та потребує подальшого дослідження та популяризації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** хемосинтез, мікроорганізми, біогеохімічний цикл, хемоавтотрофи, Сергій Виноградський, окиснення, інновації.

## Chemosynthesis: a history of innovation

O.A. Paraska<sup>1</sup>, A.Ye. Horban<sup>2</sup>, B.P. Matselyukh<sup>3</sup>, S.A. Shchur<sup>4</sup>, V.A. Shenderovskiy<sup>5</sup>

1. Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine
2. Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine
3. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
4. Department of Culture, Nationalities, Religions and Tourism of Horodok City Council, Horodok, Ukraine
5. Institute of Physics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Conflict of interest: none

**BACKGROUND.** Despite the fact that the process of chemosynthesis has been known for more than a hundred years, its significance and importance are still relevant today in the transformation of chemical elements in biogeochemical cycles. Today, the vital processes of nitrifying bacteria, which lead to the oxidation of ammonia to nitric acid, require scientific substantiation and additional research. The ability of bacteria to convert inorganic substances into organic ones suggests that chemosynthetics can accumulate valuable resources for human needs.

**OBJECTIVE.** To analyze the history of the discovery of chemosynthesis and identify the main ways of its implementation in innovative technologies.

**MATERIALS AND METHODS.** Generalization, analysis and synthesis of thematic scientific publications.

**RESULTS AND DISCUSSION.** The article presents the history of the discovery of the process of chemosynthesis and its author Serhiy Winogradsky. Peculiarities and conditions of transformation of chemical elements in biogeochemical cycles are given. The main directions of scientific research are the analysis of the peculiarities of the process of chemosynthesis, the reasons for their occurrence, as well as the definition of the main possibilities of chemosynthesis in innovative technologies. The relevance of chemosynthesis in life processes and innovative technologies of today is confirmed.

**CONCLUSIONS.** Chemosynthetic communities in different environments are important biological systems in terms of their ecology, evolution and biogeography, as well as their potential as indicators of the availability of permanent hydrocarbon-based energy sources. In the process of chemosynthesis, bacteria produce organic matter where photosynthesis is impossible. Isolation of thermophilic sulfate-reducing bacteria *Thermodesulfovibrio yellowstonii* and other types of chemosynthetics provides prospects for further research. Thus, the importance of chemosynthesis remains relevant for use in innovative technologies, conservation of ecosystems, human life in general. The role of Serhiy Winogradsky in discovering the phenomenon of chemosynthesis is underestimated and needs further research and popularization.

**KEY WORDS:** chemosynthesis, microorganisms, biogeochemical cycle, hemophthora, Serhiy Winogradsky, oxidation, innovation.

## Хемосинтез: история инноваций

О.А. Параска<sup>1</sup>, А.Е. Горбань<sup>2</sup>, Б.П. Мателюх<sup>3</sup>, С.А. Щур<sup>4</sup>, В.А. Шендеровский<sup>5</sup>

1. Хмельницький національний університет, г. Хмельницький, Україна

2. Черноморський національний університет ім. Петра Могили, г. Николаев, Україна

3. Інститут мікробіології та вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, г. Київ, Україна

4. Відділ культури, національностей, релігій та туризму Городоцького міського ради, г. Городок, Україна

5. Інститут фізики НАН України, г. Київ, Україна

**Конфлікт інтересів:** відсутній

**ОБОСНОВАНИЕ.** Несмотря на то, что процесс хемосинтеза известен более ста лет, он важен и сегодня в превращениях химических элементов в биогеохимических циклах. В настоящее время нуждаются в научном обосновании и дополнительных исследованиях процессы жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий, в результате которых происходит окисление аммиака до азотной кислоты. Способность бактерий превращать неорганические вещества в органические позволяет утверждать, что хемосинтетики могут накапливать ценные ресурсы для нужд человечества.

**ЦЕЛЬ.** Проанализировать историю открытия хемосинтеза и определить основные пути его внедрения в инновационных технологиях.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Обобщение, анализ и синтез тематических научных публикаций.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В статье представлена история открытия процесса хемосинтеза и его автора Сергея Виноградского. Приведены особенности и условия превращения химических элементов в биогеохимических циклах. Основными направлениями научных исследований являются анализ особенностей процесса хемосинтеза, причин их возникновения, а также определение основных возможностей применения хемосинтеза в инновационных технологиях. Подтверждена актуальность хемосинтеза в жизненных процессах и инновационных технологиях.

**ВЫВОДЫ.** Хемосинтетические сообщества в разных средах представляют важные биологические системы с точки зрения их экологии, эволюции и биogeографии, а также их потенциала как индикаторов наличия постоянных источников энергии на основе углеводов. В процессе хемосинтеза бактерии производят органические вещества там, где фотосинтез невозможен. Выделение термофильных сульфатовосстанавливающих бактерий *Thermodesulfovibrio yellowstonii* и других видов хемосинтетиков открывает перспективы дальнейших научных исследований. Таким образом, хемосинтез остается актуальным для инновационных технологий, сохранения экосистем, жизнедеятельности человечества в целом. Роль Сергея Виноградского в открытии явления хемосинтеза является недооцененной и нуждается в дальнейшем исследовании и популяризации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** хемосинтез, микроорганизмы, биогеохимический цикл, хемоавтотрофы, Сергей Виноградский, окисление, инновации.

## Вступ

Незважаючи на те що хемосинтез відомий понад сто років, цей процес є важливим і сьогодні в перетворенні хімічних елементів у біогеохімічних циклах [1-3]. Нині потребують наукового обґрунтування та додаткових досліджень процеси життєдіяльності нітрифікувальних бактерій, у результаті яких відбувається окислення аміаку до нітратної кислоти [4, 5]. Здатність бактерій перетворювати неорганічні речовини на органічні дає змогу стверджувати, що хемосинтезики можуть накопичувати цінні ресурси для потреб людства. Ці дані підтверджують актуальність хемосинтезу в життєвих процесах та інноваційних технологіях сьогодні.

**Мета дослідження** – проаналізувати історію виникнення хемосинтезу та визначити основні шляхи його впровадження в інноваційних технологіях.

## Результати та їх обговорення

Хемосинтезувальні мікроорганізми відіграють вагомую роль у процесах перетворення хімічних елементів у біогеохімічних циклах. Біогеохімічні цикли – це обмін речовинами та забезпечення потоку енергії між різними компонентами біосфери завдяки життєдіяльності різноманітних організмів, що має циклічний характер. Хемоавтотрофи (хемосинтезувальні мікроорганізми) для синтезу органічних речовин використовують енергію, яка вивільнюється під час перетворення неорганічних сполук [1, 2, 6].

Процес хемосинтезу в біології є унікальним явищем, адже це особливий тип харчування бактерій, заснований на засвоєнні карбону діоксиду завдяки окисленню неорганічних сполук. На думку вчених, хемосинтез є найдавнішим типом автотрофного харчування (коли організм сам синтезує органічні речовини з неорганічних), який міг з'явитися навіть раніше, ніж фотосинтез [2, 3, 7]. Отже, хемосинтез – це синтез органічних речовин із вуглекислого газу за допомогою енергії окислення аміаку, сірководню й інших речовин, який здійснюється мікроорганізмами в процесі їхньої життєдіяльності (рис. 1).

Процес хемосинтезу відкрив у 1887 р. український мікробіолог Сергій Виноградський – авторитетний у світовому науковому середовищі вчений, постать якого невід'язно стоїть в одному ряду з найвидатнішими науковцями в галузі мікробіології [3, 8-12]. Виноградський народився 13 вересня 1856 р. у м. Києві. Був другим сином юриста, титулярного радника Миколи Виноградського. Мати – Наталія Скоропадська – походила з гетьманського роду. По її лінії вчений був 5-рідним братом гетьмана Української держави Павла Скоропадського [8]. У 1873 р. вступає до Імператорського університету ім. святого Володимира в м. Києві.

Спочатку був студентом юридичного, а згодом перевівся на фізико-математичний факультет. Із часом узагалі залишає університет. Починає навчання в Санкт-Петербурзькій консерваторії, яка також невдовзі перестає задовольняти його вимоги, поновлює навчання в університеті [10, 12, 13].

У 1877 р. Сергій Виноградський вступає на 2-й курс природничого факультету Імператорського Санкт-Петербурзького університету та віддається студіям аналітичної хімії під керівництвом професора Меншуткіна. На 3-му курсі обирає дослідження фізіології рослин в Інституті експериментальної медицини (в лабораторії ботаніка Фамінцина). Восени 1884 р. отримує диплом магістра ботанічного відділення Петербурзького університету.

Усе це вказує на те, що в молодого Виноградського відбувався драматичний пошук свого призначення в житті.

Згодом Сергій переїхав у французький Страсбург, де головою ботанічного відділення працював відомий німецький ботанік А. де Барі. У 1887-1888 рр., працюючи в лабораторії де Барі, вперше показав можливість отримання енергії завдяки окисленню сірководню та використанню її для асиміляції карбону діоксиду, відкривши таким чином явище хемосинтезу. До цього єдиними автотрофними організмами вважалися фотосинтезувальні рослини, тому ці роботи забезпечили Виноградському світове визнання.

У 1889 р. в Інституті гігієни Цюрихського університету починає дослідити нітрифікувальними бактеріями. Тут він підтвердив спостереження Ворінгтона про те, що процес нітрифікації здійснюється у дві стадії та виділив культури бактерій-нітрифікаторів. Упродовж двох років учений розв'язує одну з найважливіших проблем тогочасної мікробіології, як і природничих наук узагалі. Унікальність цих бактерій полягала в тому, що, окислюючи амоній на нітрил, вони використовували одержану при цьому енергію для асиміляції атмосферного карбону діоксиду й інших реакцій, потрібних для клітин рослин. Цей процес був надзвичайно важливим у галузі метаболізму рослин, трансформації речовин у ґрунтах, процесах забруднення довкілля. За це Сергій Виноградський отримує престижні запрошення для подальшої наукової праці [11, 13, 14].

Потім учений був директором Інституту експериментальної медицини в Санкт-Петербурзі, де в 1892 р. довів існування анаеробних бактерій – фіксаторів азоту. Виділив він також і чисту культуру цих бактерій, що розмножувалися на безазотному поживному середовищі. Назвав ці бактерії *Clostridium pastorianum* – на честь Луї Пастера [13, 15]. У Петербурзі захворів на нефрит, а з початком Першої російської революції 1905-1907 рр. полишає успішну наукову кар'єру та переїжджає на Поділля (нині Хмельницька область) до подарованого батьком помістя в Городку.

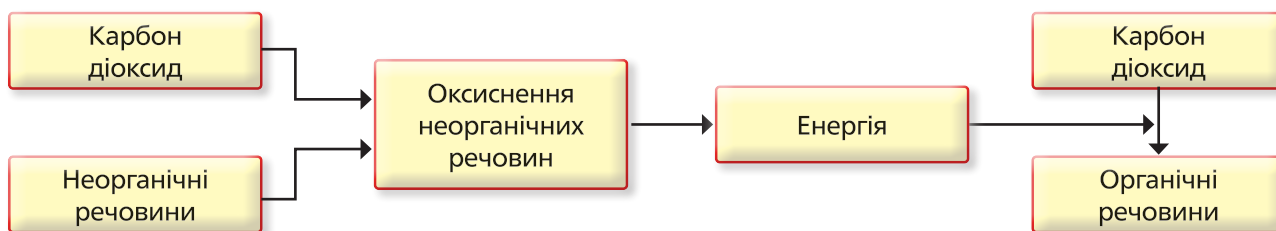


Рис. 1. Схематичне зображення процесу хемосинтезу

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Тут продовжує ґрунтознавчі дослідження. Маючи в місті три фільварки, в 1905-1916 рр. займався інноваційною сільськогосподарською та підприємницькою діяльністю. У 1916 р. в умовах Першої світової війни переїжджає в Одесу, а в 1920 р. через повсюдне встановлення більшовицької влади вченому довелося емігрувати з країни. У цьому самому році отримав запрошення з Інституту Луї Пастера (Франція), де одразу долучився до активної роботи, заснував при інституті відділ сільськогосподарської біології, яким керував до останніх років життя, облаштував лабораторію [15-17], репліку якої ретельно відтворено в експозиції Городоцького краєзнавчого музею G-museum на Хмельниччині.

Фундаментальна робота С. Виноградського «Мікробіологія ґрунту» користується великою популярністю серед мікробіологів. Сьогодні лише мізерна кількість мікроорганізмів ґрунту (близько 1 %) досліджена вченими. Багато з них не культивуються в лабораторних умовах і доступні лише завдяки методам метагеноміки. Нині швидкими темпами в багатьох лабораторіях світу відбувається секвенування або дослідження послідовності нуклеотидів у ДНК геномів різних представників мікроорганізмів. Це дасть змогу встановити таксономічні зв'язки або спорідненість між мікроорганізмами, виявити шляхи еволюції та побудувати найприроднішу систематику останніх.

У сотнях повністю секвенованих геномів мікроорганізмів виявлено багато пучків мовчазних генів біосинтезу невідомих продуктів, активація котрих дасть можливість одержати в майбутньому багато біологічно активних речовин, корисних для медицини, ветеринарії та сільського господарства. Зокрема, вже розроблено ефективні технології редагування геномів різних організмів *CRISPR/Cas 9* [18]

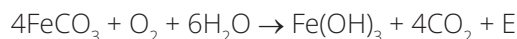
і виявлення пучків генів біосинтезу різних речовин *antiSMASH* [19], які значно прискорять можливість лікування різних патологій у медицині й одержання різноманітних і нових корисних сполук, які синтезуються мікроорганізмами.

Сергій Виноградський заклав фундамент ґрунтової мікробіології й екології та сьогодні залишається сучасним ученим за своїм світоглядом й ідеями природодослідника [11, 14, 17].

Хемосинтез, як і фотосинтез, є типами автотрофного харчування, коли організм утворює органічні речовини з неорганічних. Енергія цих реакцій накопичується в аденозинтрифосфорній кислоті (АТФ) і згодом використовується для синтезу органічних речовин. Однак між хемосинтезом і фотосинтезом існують певні відмінності (табл.) [1, 2, 7, 8].

Процес хемосинтезу здійснюють хемоавтотрофні бактерії. Свою енергію бактерії хемосинтетики отримують завдяки окисненню гідрогену, мангану, феруму, сульфуру, аміаку тощо. Залежно від окисленого субстрату хемоавтотрофні бактерії мають такі назви: залізобактерії, сіркобактерії (тіобактерії), метаноутворювальні археї, нітрифікувальні, водневі бактерії (рис. 2).

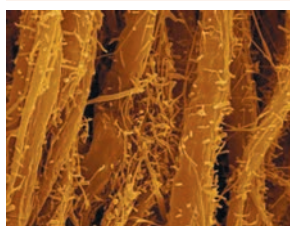
До залізобактерій належать нитчасті та залізоокислювальні лептотрикси, сферотилуси, галіонели, металогеніуми. Вони живуть у прісних і морських водоймах. Завдяки реакції хемосинтезу утворюються відкладення залізних руд шляхом окиснення двовалентного заліза в тривалентне:



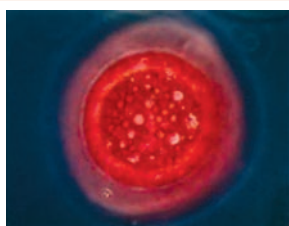
Крім енергії в цій реакції утворюється карбон діоксид. У процесі окиснення залізобактерії використовують енергію

**Таблиця.** Характерні відмінності хемосинтезу та фотосинтезу

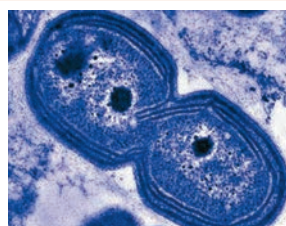
Хемосинтез	Фотосинтез
<b>Первинне джерело енергії</b>	
Хімічні реакції	Сонячне світло
<b>За участі</b>	
Бактерій і археї	Рослин
<b>Місце в клітині, де відбувається процес</b>	
На цитоплазматичній мембрані	Хлоропласти
<b>Наявність хлорофілу</b>	
Клітини бактерій не містять хлорофілу	Клітини бактерій містять хлорофіл
<b>Джерело карбону для синтезу органічних речовин</b>	
Карбон діоксид (CO <sub>2</sub> ), карбон оксид (CO), мурашина кислота, оцтова кислота, метанол, карбонати	Карбон діоксид (CO <sub>2</sub> )
<b>Використання кисню</b>	
Аеробний процес	Відбувається без використання кисню



Залізобактерії



Сіркобактерії



Нітрифікувальні

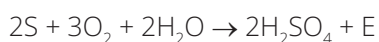


Водневі

**Рис. 2.** Основні види хемосинтезувальних бактерій

на засвоєння карбону з карбону діоксиду або карбонатів. Також окрім бактерій, які окиснюють ферум, є бактерії, що окиснюють манган.

Сіркобактерії являють собою велику групу мікроорганізмів [20, 21]. До них належать багато фототрофних, пурпурових і зелених бактерій, деякі ціанобактерії, а також низка нефотосинтезувальних бактерій, які живуть у прісних і солоних водах. Ці бактерії отримують енергію шляхом окиснення сполук із відновленням сульфуром:



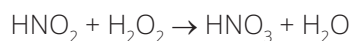
Сульфур, одержаний у результаті реакції, може накопичуватися в самих бактеріях і виділятися в навколишнє середовище у вигляді пластівців.

Нітрифікувальні бактерії живуть у ґрунті та воді, свою енергію отримують завдяки аміаку та азотній кислоті, саме вони відіграють дуже важливу роль у колообігу азоту [4, 6]. Нітрифікація відбувається у дві стадії, які здійснюються різними мікроорганізмами. Нітрифікувальні бактерії послідовно окиснюють аміак ( $NH_3$ ) до нітритів (солей  $HNO_2$ ), а потім – до нітратів (солей  $HNO_3$ ). Перша стадія – окиснення аміаку (здійснюють нітрозні бактерії) до нітритної кислоти:



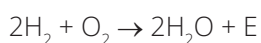
Нітритна кислота, отримана в ході реакції, утворює в землі солі та нітрати, які сприяють і покращують родючість ґрунтів.

Друга стадія – окиснення аніону нітритної кислоти (здійснюють нітратні бактерії) до нітратної кислоти:



Нітрифікувальні бактерії також беруть участь в утворенні гірських порід.

Водневі бактерії окиснюють водень. Вони використовують водень, який утворюється внаслідок розкладання залишків організмів іншими бактеріями. Гідроген окиснюють, а отриману енергію використовують для перетворення карбону діоксиду на метан та інші органічні сполуки:



У зв'язку зі здатністю синтезувати органічну речовину з карбону діоксиду водневі бактерії добре розвиваються на мінеральних середовищах. Також можуть зростати на пептонному агарі й інших живильних середовищах. Найвивченішою є *Hydrogenomonas eutropha* – поширена в ґрунті дрібна неспоронна рухлива, з полярним джгутиком паличка, твірна гладких блискучих колоній жовтого кольору. При такому окисненні водню споживається менше кисню, ніж виділяється при електролізі води. Тому апарати, в яких вирощуються водневі бактерії, запропоновані для регенерації повітря в кабіні космонавтів. Також відомо про застосування водневих бактерій для синтезу білка (харчового й кормового).

Одже, спектр перетворення та функціонування хемосинтезувальних організмів є досить широким [1, 22-24]. Енергія, що виділяється в зазначених вище реакціях, не використовується безпосередньо для синтезу органічних

сполук. Спочатку енергія акумулюється у зв'язках молекул АТФ, а потім використовується для синтезу органічних речовин із неорганічних.

Симбіотичні асоціації між бактеріями й еукаріотами є основою ключових екологічних та еволюційних інновацій. Одними з найяскравіших прикладів цих симбіозів є хемосинтезувальні бактерії та морські безхребетні, які живуть за відсутності сонячного світла в глибоководних гідротермальних джерелах і відкладеннях, багатих на відновлені сполуки сульфуру [21-23].

Хемоавтотрофні організми можуть жити в океанах на великих глибинах, де є отруйний сірководень. Вони окиснюють його й отримують важливі речовини для життєдіяльності. Значення хемосинтетиків є важливим у природі, оскільки вони беруть участь в утворенні гірських порід, спричиняють корозію металів.

Хемосинтезувальні бактерії, що окиснюють сполуки феруму та мангану, поширені в прісних водоймах. Імовірно, саме за їх участю впродовж мільйонів років на дні деяких боліт, озер утворилися поклади залізних і манганових руд. Окрім того, деякі хемосинтезувальні бактерії використовують у технологічних процесах очищення стічних вод.

Хемосинтезувальні спільноти в морських глибинах можна знайти в гідротермальних джерелах, холодних водоспадах. У той час як велика частина життя в глибоководних хемосинтетичних місцях проживання може бути пов'язана із сонцем і тому не може вижити без нього, невелика частина анаеробних хемосинтезувальних мікроорганізмів може зберігатися за його відсутності. Ці мікроорганізми розробили спосіб життя в морських глибинах, який передбачає використання ресурсів, що повністю походять із наземних джерел. Наприклад, поглиблені геофізичні й геохімічні дослідження та картографування дна найбільшого альпійського озера Єллоустоун у США виявили численні підземні гарячі джерела та гідротермальні особливості в геотермально активних ділянках на дні озера. Також виявлено широкий спектр гідротермальних особливостей, включаючи великі гідротермальні димоходи; газові фумароли; просочування гарячої води; мікробні килимки, що окиснюють сульфур, які ростуть навколо труб гарячої води та вентиляційних отворів [2, 20, 22]. Хоча систематичний аналіз гідротермальних мікробних спільнот озера Єллоустоун перебуває на ранніх стадіях, уже продемонстрували потенціал автотрофних, термофільних хемосинтезувальних мікробних угруповань. Зокрема, вентиляційні отвори на північному краю озера, а також глибоководні отвори в центрі озера містять хемосинтезувальні бактерії, які засвоюють розчинений неорганічний вуглець у темряві. Біорізноманіття мікробів у термальних джерелах озера Єллоустоун майже не вивчено. Виділення термофільної сульфатовідновлювальної бактерії *Thermodesulfovibrio yellowstonii*, глибоко розгалуженої бактеріальної лінії з термальних отворів озера, передбачає невикористаний потенціал для подальших досліджень.

### Висновки

Хемосинтезувальні угруповання в різних глибоководних середовищах являють собою важливі біологічні системи з погляду їхньої екології, еволюції та біогеографії, а також їхнього потенціалу як індикаторів наявності постійних джерел енергії на основі вуглеводнів.

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Хемосинтезувальні бактерії не засвоюють вуглеводні, а тільки вуглекислий газ. Хемосинтезувальні організми відіграють важливу роль у колообігу деяких хімічних елементів – нітрогену, сульфору, феруму. У процесі хемосинтезу бактерії продукують органічні речовини там, де фотосинтез неможливий. Наприклад, на дні океанів існують справжні островки життя навколо підводних гарячих джерел, насичених сполуками сульфору. Сіркобактерії використовують ці сполуки для свого росту, а ними живляться інші живі організми. Залізобактерії є творцями корисних копалин понад мільйон років. Більшість світових покладів залізних руд створено завдяки життєдіяльності цих мікроорганізмів. Водневі бактерії живуть у ґрунтах і відіграють важливу роль у процесах перетворення речовин.

Інновації в сучасному світі проникли в усі сфери економіки та життєдіяльності суспільства. Інноваційна діяльність має безліч позитивних як матеріальних, так і нематеріальних ефектів. Економічні, інфраструктурні, політичні, правові, соціальні, екологічні й інші позитивні ефекти інноваційної діяльності сприяють інтенсивному людському розвитку. Можна визначити такі інноваційні технології застосування процесу хемосинтезу:

- підвищення родючості ґрунтів;
- створення родовищ корисних копалин;
- трансформація сульфору, нітрогену, феруму;
- виробництво білка;
- біологічне очищення води.

Отже, хемосинтез залишається актуальним для інноваційних технологій, збереження екосистем і життєдіяльності людства загалом.

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

#### **Параска Ольга Анатоліївна**

*Професор кафедри хімії та хімічної інженерії Хмельницького національного університету.*

*Д-р техн. наук, доцент.*

11, вул. Інститутська, м. Хмельницький, 29016, Україна.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3803-0382](https://orcid.org/0000-0002-3803-0382)

#### **Горбань Андрій Євгенович**

*Професор кафедри гігієни, соціальної медицини, громадського здоров'я та медичної інформатики Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.*

*Академік Національної академії наук вищої освіти України, д-р мед. наук.*

68, вул. Десантників, м. Миколаїв, 54000, Україна.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3023-3505](https://orcid.org/0000-0002-3023-3505)

#### **Мацелюх Богдан Павлович**

*Завідувач лабораторії генетики мікроорганізмів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України.*

*Член-кореспондент НАН України, д-р біол. наук, професор.*

154, вул. Академіка Заболотного, м. Київ, 03680, Україна.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3239-701X](https://orcid.org/0000-0002-3239-701X)

#### **Щур Сергій Анатолійович**

*Заступник начальника відділу культури, національностей, релігій та туризму Городоцької міської ради.*

*Канд. істор. наук.*

51, вул. Грушевського, м. Городок, 32000, Україна.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-7735-1461](https://orcid.org/0000-0002-7735-1461)

#### **Шендеровський Василь Андрійович**

*Професор фізики Інституту фізики НАН України.*

*Д-р фіз.-матем. наук, професор.*

46, проспект Науки, м. Київ, 02000, Україна.

#### **Paraska Olga Anatoliivna**

*Professor of the department of chemistry and chemical engineering, Khmelnytskyi national university.*

*Dr. tech. sciences, associate professor.*

11, Instyutska st., Khmelnytsky, 29016, Ukraine.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3803-0382](https://orcid.org/0000-0002-3803-0382)

#### **Horban Andrii Yevhenovych**

*Professor of the department of hygiene, social medicine, public health and medical informatics, Petro Mohyla Black Sea national university.*

*Academician of the National academy of sciences of higher education of Ukraine, MD.*

68, Desantnykiv st., Mykolaiv, 54000, Ukraine.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3023-3505](https://orcid.org/0000-0002-3023-3505)

#### **Matselyukh Bohdan Pavlovych**

*Head of the department of genetics of microorganisms, Zabolotny Institute of microbiology and virology, National academy of sciences of Ukraine.*

*Corresponding member of the National academy of sciences of Ukraine, dr. biol. science, professor.*

154, Academician Zabolotny st., Kyiv, 03680, Ukraine.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-3239-701X](https://orcid.org/0000-0002-3239-701X)

#### **Shchur Serhii Anatoliyovych**

*Deputy head of the department of culture, nationalities, religions and tourism of Horodok city council.*

*PhD.*

51, Hrushevskoho st., Horodok, 32000, Ukraine.

ORCID iD: [orcid.org/0000-0002-7735-1461](https://orcid.org/0000-0002-7735-1461)

#### **Shenderovskiy Vasyl Andriyovych**

*Professor of physics, Institute of physics of the National academy of sciences of Ukraine.*

*Dr. phys.-math. science, professor.*

46, Nauki ave., Kyiv, 02000, Ukraine.

### КОНТАКТНА ІНФОРМАЦІЯ / CORRESPONDENCE TO

#### **Параска Ольга Анатоліївна**

11, вул. Інститутська, м. Хмельницький, 29016, Україна.

E-mail: [olgaparaska@gmail.com](mailto:olgaparaska@gmail.com)

DOI: [10.32902/2663-0338-2022-2-50-56](https://doi.org/10.32902/2663-0338-2022-2-50-56)

## Література

- Smith C. Chemosynthesis in the deep-sea: life without the sun. *Biogeosciences Discuss.* 2012; 9: 17037-17052. doi: 10.5194/bgd-9-17037-2012.
- Sogin E.M., Leisch N., Dubilier N. Chemosynthetic symbioses. *Current Biology.* 2020; 30 (19): R1137-R1142. doi: 10.1016/j.cub.2020.07.050.
- Ackert L. Sergei Vinogradskii and the cycle of life: from the thermodynamics of life to ecological microbiology. Dordrecht: Springer Science and media, 2013. 189 p. ISBN: 978-94-007-5197-2. doi: 10.1007/978-94-007-5198-9.
- Barney B.M. Aerobic nitrogen-fixing bacteria for hydrogen and ammonium production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2020 Feb; 104 (4): 1383-1399. doi: 10.1007/s00253-019-10210-9.
- Noar J.D., Bruno-Bárcena J.M. Protons and pleomorphs: aerobic hydrogen production in azotobacters. *World Journal Microbiology and Biotechnology.* 2016; 32 (2): 29. doi: 10.1007/s11274-015-1980-5.
- Chemosynthesis influences food web and community structure in high-Arctic benthos. *Marine Ecology Progress Series.* 2019; 629. doi: 10.3354/meps13101.
- Energy Flow and Ecosystems. Alan P. Covich. Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition), 2013.
- Відкриття хемосинтезу. Виноградський [Інтернет]. Доступно: <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
- Рослицький Є. Сергій Виноградський – передовий мікробіолог світу // Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України. – К.: Академперіодика, 2008. – 68 с.
- Кривий П. Вісник G-Club. Альманах. Вип. 1. Родина мікробіолога. – Городок: Клуб імені С.М. Виноградського, 2021. – 154 с.
- Мацелюх Б.П. Сергій Миколайович Виноградський. *Мікробіологічний журнал.* 2006; 5: 94-96.
- Гуменюк Г., Кривий П. Сергій Виноградський і містечко Городок. *Світогляд.* 2016; 5 (61): 42-45.
- Виноградський. У гармонії неба і землі. 2013 [Фільм. Продюсер М. Гуменюк]. Доступно: [https://youtu.be/G\\_5UxIKi5zc](https://youtu.be/G_5UxIKi5zc).
- Мацелюх Б. Клуб Виноградського в Городку. *Світогляд.* 2020; 4 (84): 67-68.
- Інститут Пастера [Інтернет]. Доступно: <https://www.pasteur.fr/fr>.
- Шендеровський В. Мікробіолог світу – Сергій Виноградський. *Світогляд.* 2016; 11 (5): 36-41.
- Клуб імені С.М. Виноградського [Інтернет]. Доступно: <https://gmuseum.org.ua>.
- Zhang Yu., Showalter A.M. CRISPR/Cas9 genome editing technology: a valuable tool for understanding plant cell wall biosynthesis and function. *Front. Plant Sci.* 2020; 11. doi: 10.3389/fpls.2020.589517.
- Blin K., Shaw S., Kloosterman M.A., Charlop-Powers Z., et al. AntiSMASH 6.0: improving cluster detection and comparison capabilities. *Nucleic Acids Research.* 2021; vol. 49, issue W1: W29-W35.
- Stewart F.J., Newton I.L., Cavanaugh C.M. Chemosynthetic endosymbioses: adaptations to oxic-anoxic interfaces. *Trends in Microbiology.* 2005; vol. 13, issue 9: 439-448. doi: 10.1016/j.tim.2005.07.007.
- Emmelie K.L., Åström M.L., Carroll A.S., Helge N., et al. Chemosynthesis-influenced trophic relationships and community structure at Barents Sea cold seeps. *Geophysical Research Abstracts.* 2019; vol. 21: EGU2019-16335. EGU General Assembly.
- Roeselers G., Newton I.L. On the evolutionary ecology of symbioses between chemosynthetic bacteria and bivalves. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2012; 94 (1): 1-10. doi: 10.1007/s00253-011-3819-9.
- Levin L.A., Michener R.H. Isotopic evidence for chemosynthesis-based nutrition of macrobenthos: the lightness of being at Pacific methane seeps. *Limnology and Oceanography.* 2002; 47 (5): 1336-1345.
- Morford S.L., Houlton B.Z., Dahlgren R.A. Increased forest ecosystem carbon and nitrogen storage from nitrogen rich bedrock. *Nature.* 2011; 7362: 78-81.

## References

- Smith C. Chemosynthesis in the deep-sea: life without the sun. *Biogeosciences Discuss.* 2012; 9: 17037-17052. doi: 10.5194/bgd-9-17037-2012.
- Sogin E.M., Leisch N., Dubilier N. Chemosynthetic symbioses. *Current Biology.* 2020; 30 (19): R1137-R1142. doi: 10.1016/j.cub.2020.07.050.
- Ackert L. Sergei Vinogradskii and the cycle of life: from the thermodynamics of life to ecological microbiology. Dordrecht: Springer Science and media, 2013. 189 p. ISBN: 978-94-007-5197-2. doi: 10.1007/978-94-007-5198-9.
- Barney B.M. Aerobic nitrogen-fixing bacteria for hydrogen and ammonium production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2020 Feb; 104 (4): 1383-1399. doi: 10.1007/s00253-019-10210-9.
- Noar J.D., Bruno-Bárcena J.M. Protons and pleomorphs: aerobic hydrogen production in azotobacters. *World Journal Microbiology and Biotechnology.* 2016; 32 (2): 29. doi: 10.1007/s11274-015-1980-5.
- Chemosynthesis influences food web and community structure in high-Arctic benthos. *Marine Ecology Progress Series.* 2019; 629. doi: 10.3354/meps13101.
- Energy Flow and Ecosystems. Alan P. Covich. Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition), 2013.
- Vidkrytyta khemosyntezu. Winogradsky [Internet]. Available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki>.
- Roslytskyy Ye. Serhiy Winogradsky – peredovyy mikrobioloh svitu // Instytut mikrobiolohiyi i virusolohiyi im. D.K. Zabolotnoho NAN Ukrayiny. K.: Akademperiodyka, 2008. 68 p.
- Kryvyy P. Visnyk G-Club. Almanakh. Vyp. 1. Rodyna mikrobioloha. Horodok: Klub imeni S.M. Winogradskogo, 2021. 154 p.
- Matselyukh B.P. Serhiy Mykolayovych Vinogradsky. *Mikrobiolohichnyy zhurnal.* 2006; 5: 94-96.
- Gumeniuk G., Kryvyy P. Serhiy Vinogradsky i mistechko Horodok. *Svitohlyad.* 2016; 5 (61): 42-45.
- Vinogradsky. U harmoniyi neba i zemli. 2013 [Film. Prodyuser M. Humenyuk]. Available at: [https://youtu.be/G\\_5UxIKi5zc](https://youtu.be/G_5UxIKi5zc).
- Matselyukh B. Klub Vinogradskoho v Horodku. *Svitohlyad.* 2020; 4 (84): 67-68.
- Pasteur Institute [Internet]. Available at: <https://www.pasteur.fr/fr>.
- Shenderovskyy V. Mikrobioloh svitu – Serhiy Vinogradsky. *Svitohlyad.* 2016; 11 (5): 36-41.
- Winogradsky club [Internet]. Available at: <https://gmuseum.org.ua>.
- Zhang Yu., Showalter A.M. CRISPR/Cas9 genome editing technology: a valuable tool for understanding plant cell wall biosynthesis and function. *Front. Plant Sci.* 2020; 11. doi: 10.3389/fpls.2020.589517.
- Blin K., Shaw S., Kloosterman M.A., Charlop-Powers Z., et al. AntiSMASH 6.0: improving cluster detection and comparison capabilities. *Nucleic Acids Research.* 2021; vol. 49, issue W1: W29-W35.
- Stewart F.J., Newton I.L., Cavanaugh C.M. Chemosynthetic endosymbioses: adaptations to oxic-anoxic interfaces. *Trends in Microbiology.* 2005; vol. 13, issue 9: 439-448. doi: 10.1016/j.tim.2005.07.007.
- Emmelie K.L., Åström M.L., Carroll A.S., Helge N., et al. Chemosynthesis-influenced trophic relationships and community structure at Barents Sea cold seeps. *Geophysical Research Abstracts.* 2019; vol. 21: EGU2019-16335. EGU General Assembly.
- Roeselers G., Newton I.L. On the evolutionary ecology of symbioses between chemosynthetic bacteria and bivalves. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2012; 94 (1): 1-10. doi: 10.1007/s00253-011-3819-9.
- Levin L.A., Michener R.H. Isotopic evidence for chemosynthesis-based nutrition of macrobenthos: the lightness of being at Pacific methane seeps. *Limnology and Oceanography.* 2002; 47 (5): 1336-1345.
- Morford S.L., Houlton B.Z., Dahlgren R.A. Increased forest ecosystem carbon and nitrogen storage from nitrogen rich bedrock. *Nature.* 2011; 7362: 78-81.