https://doi.org/10.51707/2618-0529-2026-35-06
УДК 37.016:550.47:579

Є. Ю. Пащенко,
Ж. І. Білик

STEM-ПІДХІД У ВИВЧЕННІ СПАДЩИНИ СЕРГІЯ МИКОЛАЙОВИЧА ВИНОГРАДСЬКОГО

Анотація. *У статті розглядається внесок Сергія Миколайовича Виноградського (1856–1953) у формування біогеохімічного підходу до вивчення залізних руд, зокрема родовищ України. Показано, що його дослідження залізобактерій і процесів мікробного окислення металів стали важливим підґрунтям для розуміння генезису залізистих мінералів і біогеохімічної ролі мікроорганізмів у рудоутворенні. Окрему увагу приділено колонці Виноградського як експериментальній моделі біогеохімічних процесів у природних осадах. Проаналізовано взаємозв'язок ідей ученого із сучасними підходами до вивчення рудних формацій, що дає змогу розглядати його спадщину як фундамент для розвитку біогеохімії та мікробної геології. За часів життя і роботи С. М. Виноградського панувала думка, що для доказу існування бактерій їх необхідно виділити у чистій культурі, виростити на поживному середовищі. Проте зараз стало зрозумілим, що майже 90 % мікроорганізмів не можна виростити на поживних середовищах, але їх можна досліджувати завдяки досягненням метагеноміки, тому вивчення колонки Виноградського не втрачає свого педагогічного потенціалу. У статті наведено методичну розробку двох занять, спроєктованих відповідно до STEM-підходу. Кожне заняття складається з постановки проблемного питання, пошуку інформації, розроблення плану дослідження, формування гіпотези, визначення матеріалів для проведення дослідження, виконання експерименту, аналізу інформації, побудови графіків, висновків та їх оприлюднення. Кожний етап містить необхідну інформацію для вчителя. Особливу увагу приділено морфології мікроорганізмів, які оселяються у різних шарах колонки Виноградського. При виконанні цих STEM-проєктів учні мають унікальну можливість побачити такі мікроорганізми: Desulfovibrio, Leptothrix, Gallionella, Clostridium septicum, Chrobium tepidum, Chromatium okenii, Rhodospirillum, Beggiatoa. Також у статті наведені основні рівняння процесів хемосинтезу, які відбуваються у різних шарах колонки Виноградського.*

Ключові слова: *Сергій Виноградський, біогеохімія, залізобактерії, мікробне окислення заліза, колонка Виноградського, геомікробіологія, залізні руди України.*

Вступ. Залізні руди протягом багатьох десятиліть визначають промисловий потенціал України, виступаючи ключовим компонентом економіки й техногенного розвитку. Разом з тим їхнє походження залишається об'єктом глибоких наукових досліджень, оскільки генезис цих формацій відбиває складну історію взаємодії геологічних, хімічних і біологічних процесів. У розумінні цих механізмів особливе місце належить біогеохімічному підходу, у контексті якого мікроорганізми є не пасивними елементами середовища, а активними чинниками, здатними впливати на мінералоутворення, трансформацію елементів і формування руд.

Фундатором цього напряму став український учений Сергій Миколайович Виноградський (1856–1953), чиї дослідження мікроорганізмів, що отримують енергію за рахунок окиснення неорганічних сполук, перевернули уявлення про межі життя та його роль у природі. Хоча він не займався безпосередньо мінералогією залізних руд, його відкриття залізобактерій, здатних перетворювати розчинні сполуки Fe^{2+} на нерозчинний $Fe(OH)_3$, стало першим науковим підтвердженням

© Пащенко Є. Ю., Білик Ж. І.

 ISSN 2786-4510 (Online)

біологічного механізму утворення нерозчинних сполук заліза [1–3]. Цей процес, виявлений у лабораторних умовах, став ключовим для розуміння генезису багатьох типів залізорудних формацій, зокрема осадових і гіпергенних [4].

Науковий експеримент С. М. Виноградського вийшов далеко за межі традиційної мікробіології, ставши першою спробою моделювання природних біогеохімічних систем як цілісних екосистем, де мікроорганізми виступають не ізольованими агентами, а частиною складної хімічної мережі. Колонка Виноградського втілює цей підхід, відтворюючи не окремі процеси, а їхню послідовну взаємодію в просторі й часі — від поверхневих окислювальних умов до глибинних відновних зон. Ця динамічна модель демонструє, як саморегульовані спільноти мікроорганізмів формують мінеральні асоціації, аналогічні тим, що спостерігаються в осадових товщах, роблячи лабораторний дослід не просто ілюстрацією, а інструментом для генерування гіпотез про еволюцію літосфери.

У міжнародній науці С. М. Виноградський визнаний засновником мікробної екології та біогеохімії [5; 6], а в українському контексті його ідеї набувають практичної реалізації у дослідженнях залізистих формацій, де мікробна активність визначається як чинник, що впливає на вторинне збагачення руд та їхню структурну організацію [7; 8]. Саме його піонерський підхід — інтеграція мікробіології з геохімією — став методологічною основою для сучасних геомікробіологічних досліджень.

Отже, аналіз наукової спадщини С. М. Виноградського сприяє не лише відновленню історичних витоків біогеохімії в Україні, але й демонстрації того, як ідеї науковця, закладені понад століття тому, залишаються актуальною основою для розуміння природи залізних руд і розвитку сучасної геобіології.

Вивчення спадщини С. М. Виноградського українськими учнями саме зараз є особливо актуальним, оскільки дає змогу:

1) продемонструвати роль вітчизняних учених у світовій науці, що може бути дієвим методом патріотичного виховання, підтримання авторитету науковця серед учнівської молоді;

2) мотивувати до вивчення природничих дисциплін;

3) ознайомити учнів з трансдисциплінарним підходом.

Академічна спадщина С. М. Виноградського описана в працях В. Широбокова, Г. Димент, Г. Гуменюка, Ю. Братчикової, П. Кривого, Б. Мацелюха, О. Параски, А. Горбань, В. Шендеровського, Я. Гадзало, В. Волкогон, М. Мандигори [9].

Проте не існує жодної методичної літератури, яка демонструвала б педагогу методи або методичні прийоми, за допомогою яких можна вивчати академічну спадщину С. М. Виноградського.

Мета статті: ознайомити з розробленою методологією вивчення спадщини С. М. Виноградського на основі STEM-підходу для учнів старших класів.

Сергій Миколайович Виноградський є засновником сучасної мікробної екології. Його дослідження заклали теоретичну основу для розвитку біогеохімії як науки про взаємодію живої речовини з геологічним середовищем. Хоча він не займався безпосередньо мінералогією залізних руд України, його відкриття мікроорганізмів, здатних до хемолітотрофного живлення, відкрило нові горизонти для розуміння біологічних механізмів рудоутворення.

С. М. Виноградський описав бактерії [1], які отримують енергію за рахунок окиснення двовалентного заліза (Fe^{2+}) до тривалентного (Fe^{3+}). Цей процес супроводжується утворенням важкорозчинних гідроксидів заліза, таких як гетит чи феригідрит, які відкладаються у вигляді осадів. Так було вперше доведено, що мікроорганізми можуть бути активними учасниками мінералоутворення, перетворюючи розчинні форми металів на стійкі оксиди та гідроксиди [2; 3]. Це відкриття стало ключовим для розуміння генезису болотних залізних руд і деяких типів осадових формацій, зокрема тих, що трапляються в гіпергенних зонах Криворізького басейну [7; 8].

Раніше домінувала думка, що всі живі організми залежать від сонячної енергії через фотосинтез. С. М. Виноградський зруйнував цю парадигму, довівши існування автотрофів, які використовують неорганічні джерела енергії. Його дослідження нітрифікуючих бактерій [1] стали першим кроком у цьому напрямі, але саме робота залізобактерій показала, що мікроби можуть бути чинником геохімічних трансформацій у водно-болотних і ґрунтових системах.

Експериментальна модель — колонка Виноградського, яка відтворює у лабораторних умовах складні біогеохімічні процеси, характерні для природних осадових середовищ, —

це пробірка або колба, заповнена водою, ґрунтом або болотним осадом із додаванням джерела органічних речовин (наприклад, целюлози) та сульфатів, що залишається відкритою для світла. З часом у такій колонці виникає вертикальна стратифікація за кисневим режимом: у верхніх шарах панує аеробне середовище, де активні залізобактерії та ціанобактерії, а в глибинних — анаеробні умови, сприятливі для сульфатредукуючих бактерій.

Ця стратифікація моделює умови, що існують у прибережних зонах водойм, болотах або донних відкладеннях, де поступове вичерпання кисню призводить до послідовної активації різних мікробних метаболічних шляхів. Завдяки цьому можна спостерігати, як угруповання мікроорганізмів поступово змінюють хімічний склад середовища, наприклад: у верхніх шарах утворюються буруваті осади гідроксидів заліза (Fe^{3+}), що візуально імітують початкові стадії формування болотних залізних руд, а в нижніх — сульфіди заліза (як-от пірит), характерні для анаеробного діагенезу. Отже, колонка демонструє, як мікробна активність може ініціювати циклічні трансформації заліза в осадових басейнах, відтворюючи ключові етапи біогенної мінералізації.

Ідеї С. М. Виноградського стали передумовою для сучасних геомікробіологічних досліджень, які виявляють сліди впливу мікроорганізмів в архейських стрічкових залізних формаціях (BIF) [10]. Хоча Криворізький залізорудний басейн належить до іншого типу родовищ, сучасні роботи доводять участь мікроорганізмів у гіпергенних перетвореннях руд, зокрема при вилуговуванні й утворенні вторинних збагачених зон [7; 8; 11]. У цих процесах відтворюються ті самі біогеохімічні принципи, які вперше були описані С. М. Виноградським: мікроорганізми як каталізатори окисно-відновних реакцій, що змінюють рухомість металів у літосфері.

Отже, науковий внесок С. М. Виноградського полягає не лише у відкритті окремих груп бактерій, а й в розробці цілісного підходу до вивчення взаємодії біоти з геохімічним середовищем. Саме цей підхід став методологічною основою для біогеохімічних досліджень залізних руд в Україні, дозволяючи інтерпретувати рудоутворення як результат складної дії геологічних, хімічних і біологічних чинників.

Наукові ідеї С. М. Виноградського, закладені наприкінці XIX — на початку XX ст., на сьогодні не втратили актуальності, а навпаки, стали основою для розвитку сучасної геомікробіології та біогеохімії в глобальному масштабі. Його концепція мікробного окислення неорганічних сполук як джерела енергії для автотрофного росту виявилася ключовою для пояснення генезису давніх залізистих формацій, зокрема стрічкових залізних формацій (BIF), що утворилися в архейську та протерозойську ери. Так, С. Вайхман, М. Бау, Дж. Е. Хоффман, К. Мункер (2015) [7] вказують у своїх роботах на важливу роль мікроорганізмів у гіпергенних процесах — вивітрюванні та вторинному збагаченні руд.

Сучасні дослідження активно використовують ізотопні маркери (Fe, C, S), мікроморфологічні аналізи та метагеноміку для виявлення слідів мікробної активності в осадових породах. Наприклад, К. Бензерара, С. Бернард, Дж. Майот (2019) [12] та Ю. Ветенабе зі співавторами (2023) [13] демонструють, що наноструктури мінералів і специфічні ізотопні фракціонування можуть слугувати надійними біосигнатурами, що дає змогу відрізняти біогенні процеси від абіогенних. Ці підходи ґрунтуються на принципах, запропонованих С. М. Виноградським: розумінні мікроорганізмів як активних учасників геохімічних циклів, а не лише пасивних спостерігачів.

У межах України ці ідеї отримали подальший розвиток у дослідженнях Криворізького басейну. Деякі науковці вказують на важливу роль мікробів у гіпергенних процесах, як-от вивітрювання та вторинне збагачення руд [7]. Зокрема, В. Покалюк та В. Сукач (2014) у своїх дослідженнях проаналізували літохімічні типи та стандартний мінеральний склад метаседиментів у Криворізькому басейні, що сприяє розумінню раннього прекамбрійського седиментогенезу [8]. Метагеномні аналізи [14] також виявляють наявність функціональних груп, здатних до окиснення та відновлення заліза, що свідчить про активність подібних процесів у сучасних умовах.

Міжнародні дослідження, зокрема порівняльні аналізи залізорудних басейнів в Індії, ПАР, Австралії та Бразилії (Н. Дж. Беукес, Дж. Гатзмер, Дж. Макахопадхіа, 2003) [15], засвідчують універсальність механізмів мікроорганізмів у трансформації заліза, що дає змогу застосовувати глобальні моделі до українських реалій. При цьому колонка Виноградського, яка спочатку була навчальним інструментом, нині розглядається як ефективна модель для дослідження формування осадових

ISSN 2786-4510 (Online)

руд (А. М. Ілін, І. Юста, Дж. Санхез-Еспана, 2020) [16], що підкреслює її наукову цінність.

Отже, спадщина С. М. Виноградського не просто інтегрована в сучасну науку, його передові ідеї про біологічну складову геологічних процесів стали основою для міждисциплінарних досліджень, що об'єднують мікробіологію, геохімію, мінералогію та екологію. У контексті України це відкриває перспективи для глибшого розуміння генезису залізних руд і доводить провідну роль вітчизняної науки в глобальному біогеохімічному дискурсі.

Незважаючи на фундаментальність ідей С. М. Виноградського, новітні методи, зокрема метагеноміка, виявляють певні обмеження його концепцій у сучасному контексті. Він працював у парадигмі культивування мікроорганізмів, вважаючи, що ті, кого вдалося виростити в лабораторії, є головними учасниками процесів. Сьогодні відомо, що більш ніж 90 % мікроорганізмів у природних середовищах не піддаються культивуванню, а їхня роль у біогеохімічних циклах виявляється лише за допомогою молекулярних методів [12; 14]. Це означає, що багато функціональних груп, зокрема мікроорганізмів, які окислюють залізо в складних симбіотичних асоціаціях або за мікрокисневих умов, могли бути ним не виявлені. Еволюція підходів до вивчення мікробного окислення заліза від класичних спостережень С. М. Виноградського до сучасних молекулярних технологій наочно продемонстрована в таблиці 1, створеній на основі аналізу даних [1; 5; 7; 13; 15; 17–21].

Таблиця 1

Порівняння підходів до вивчення мікробного окислення Fe^{2+}: історичний та сучасний контексти

Аспект дослідження	Історичний контекст (С. М. Виноградський, кінець XIX — початок XX ст.)	Сучасний контекст (XXI ст.)
Основна концепція	Мікроорганізми як окремі агенти, здатні отримувати енергію за рахунок окиснення неорганічних сполук (хемосинтез)	Мікроорганізми як частина складних мікробних консорціумів, що взаємодіють у біогеохімічних циклах на рівні екосистем
Об'єкт дослідження	Культивовані штами залізобактерій (наприклад, *Leptothrix*, *Gallionella*), виділені з природних середовищ	Цілісні мікробіоми, в тому числі некультивовані та маловідомі таксони, виявлені за допомогою молекулярних методів
Методологія	Мікробіологічний експеримент, використання селективних середовищ, мікроскопія, хімічний аналіз осадів	Метагеноміка, метатранскриптоміка, ізотопна геохімія (Fe, C, S), мікрозондова аналітика, високопродуктивне секвенування ДНК
Ключовий інструмент	Колонка Виноградського — модельна система для відтворення градієнтів кисню та активності мікроорганізмів	Біореактори, мікрофлюїдні системи, інкубаційні експерименти з ізотопним позначенням, цифрове моделювання біогеохімічних циклів
Доказова база біогенності	Спостереження за утворенням осадів гідроксидів заліза під дією мікроорганізмів	Виявлення молекулярних маркерів (наприклад, гену *cyc2*), специфічних ізотопних фракціонувань ($\delta^{56}Fe$), морфологічних біосигнатур (наноструктур, органічних каркасів)
Розуміння ролі мікроорганізмів	Мікроорганізми як каталізатори хімічних реакцій (окислення $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$)	Роль мікроорганізмів у формуванні редокс-потенціалу середовища, який впливає на геохімічну еволюцію літосфери
Обмеження підходу	Залежність від культивування (не виявлено 99 % мікроорганізмів), ідеалізована модель, обмежений хімічний аналіз	Складність інтерпретації Omics-даних, труднощі у встановленні прямого причинно-наслідкового зв'язку між геном і мінералоутворенням
Приклад застосування	Пояснення утворення болотних залізних руд	Реконструкція генезису стрічкових залізних формацій (BIF), біотехнології збагачення руд

Таблиця 2

Розробка першого заняття на тему «Колонка Виноградського»

№	Назва етапу	Шляхи реалізації
1	Проблемне питання	Які складові колонки Виноградського?
2	Пошук інформації. Складання плану дослідження	Колонка Виноградського складається з мулу (донних відкладень), джерелом якого може бути вода з будь-якої водойми, води з тієї самої водойми, джерела вуглецю (целюлози) — подрібненого газетного паперу, фільтрувального паперу або тирси, джерела сірки — сульфату кальцію ($CaSO_4$, гіпс) або яєчного жовтка, для підтримки лужної кислотності середовища використовується карбонат кальцію ($CaCO_3$, крейда) ***Покрокова інструкція закладання*** *А. Підготовка суміші* Змішайте мул із джерелами вуглецю та сірки. Орієнтовні пропорції: на 1 кг мулу додайте 5–10 г подрібненого паперу та 5 г гіпсу / крейди. Додайте трохи води з водойми, щоб суміш за консистенцією нагадувала густу сметану. Ретельно перемішайте, щоб видалити великі бульбашки повітря. *Б. Наповнення колонки* Нижній шар: обережно заповніть циліндр цією сумішшю приблизно на 1/3 або 1/2 висоти. Щільно утрамбуйте, щоб уникнути великих порожнин (анаеробна зона). Середній шар: додайте чистий мул (без добавок) ще на 1/4 висоти. Верхній шар: обережно налийте воду з водойми, залишивши зверху 2–3 см повітряного простору. Для герметизації необхідно накрити колонку харчовою плівкою, щоб запобігти випаровуванню води, але забезпечити мінімальний газообмін. Протягом місяця відбудеться перерозподіл шарів. Внизу — анаеробна зона: чорний мул через активність сульфатредукувальних бактерій (наприклад, *Desulfovibrio*), які утворюють H_2S. Зелена та пурпурова зони: вище з'являться кольорові плями. Це зелені та пурпурові сіркобактерії, які використовують H_2S для фотосинтезу. Основне рівняння процесу: $6CO_2 + 12H_2S \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 12S + 6H_2O$ (використовується енергія світла). Зона іржі: в результаті діяльності залізобактерій з'являються бурі кольори. Основне рівняння процесу: $4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 4CO_2$ + енергія. Аеробна зона (вода зверху): тут розмножуються ціанобактерії та водорості, які насичують верхній шар киснем
3	Визначення змінних у дослідженні	Можна закласти різні варіанти джерела вуглецю, джерела сірки або воду та мул з різних водойм (річки, озера тощо)
4	Формування гіпотези	Тирса краще сприяє розвитку сульфатредукувальних бактерій, ніж інші джерела целюлози (фільтрувальний папір). Яєчний білок є кращим джерелом сірки, ніж $CaSO_4$
5	Визначення матеріалів для проведення дослідження	Мірні циліндри на 500 мл, 1000 мл, скляні палички. Мул та вода з різних прісних або морських водойм. Газетний чи фільтрувальний папір або тирса. Яєчний білок, або гіпс, або $CaSO_4$ (хімічно чистий). Крейда або $CaCO_3$
6	Виконання експерименту	Закладання різних варіантів колонок Виноградського. Спостереження за колонками Виноградського, особливо за зміною кольору шарів
7	Аналіз інформації та побудова графіків	Графіки можуть відображати товщину шарів, які змінюються з часом
8	Висновки та їх оприлюднення	Доповідь

ISSN 2786-4510 (Online)

Таблиця 3

Розробка другого заняття
на тему «Мікроорганізми колонки Виноградського»

№	Назва етапу	Шляхи реалізації
1	Проблемне питання	Які мікроорганізми мешкають у колонці Виноградського?
2	Пошук інформації. Складання плану дослідження	1. Облігатні анаероби (нижній шар). У самому низу, де кисень повністю відсутній, мешкають бактерії, що розкладають органіку та відновлюють сульфати. Целюлозолітичні бактерії (наприклад, *Clostridium*): морфологія: грампозитивні палички, часто утворюють спори (термінальні або субтермінальні), що надає їм вигляду барабанних паличок; фізіологія: хемоорганотрофи, розщеплюють складні полісахариди (целюлозу паперу) до органічних кислот і спиртів шляхом бродіння. 2. Сульфатвідновлювальні бактерії (наприклад, *Desulfovibrio*): морфологія: вигнуті палички (вібріони) з полярними джгутиками; фізіологія: хемолітоавтотрофи або хемоорганотрофи; використовують сульфати як акцептори електронів, виділяючи сірководень (H_2S), який є паливом для наступних шарів. 3. Фотоавтотрофні аноксигенні бактерії (середній шар). Ці бактерії використовують світло як енергію, але не виділяють кисень. Вони зазвичай формують кольорові зони. 4. Зелені сірчані бактерії (наприклад, *Chlorobium*): морфологія: дрібні нерухомі палички або коки, часто з'єднані у ланцюжки; містять хлоросоми — спеціальні структури з пігментами; фізіологія: фотоавтотрофи, використовують найвищі концентрації H_2S як донор електронів, відкладаючи сірку поза клітиною. 5. Пурпурові сірчані бактерії (наприклад, *Chromatium*): морфологія: великі палички, часто рухливі за допомогою джгутиків, мають внутрішньоклітинні мембранні вирости (хроматофори); фізіологія: фотоавтотрофи, окиснюють H_2S до елементарної сірки, яку накопичують всередині клітини у вигляді блискучих гранул. 6. Пурпурові несірчані бактерії (вище сірчаних; наприклад, *Rhodospirillum*): морфологія: спіралеподібні клітини, надзвичайно рухливі; фізіологія: фотогетеротрофи, терпимі до низьких концентрацій кисню, але віддають перевагу використанню органічних сполук (продуктів бродіння знизу) як джерела вуглецю на світлі. 7. Хемолітоавтотрофи та аероби (верхній шар). Там, де дифундує кисень повітря, а знизу піднімається сірководень, виникає зона окиснення. Сіркоокиснювальні бактерії (наприклад, *Beggiatoa*): морфологія: довгі безбарвні нитчасті форми, здатні до ковзного руху; фізіологія: хемолітотрофи, окиснюють H_2S до H_2SO_4 за допомогою кисню, отримуючи енергію для фіксації CO_2. 8. Ціанобактерії та мікроводорості: морфологія: різноманітні — від одиночних коків до складних трихом (ниток) з гетероцистами; фізіологія: фотоавтотрофи (оксигенні), проводять класичний фотосинтез із виділенням O_2, що насичує верхній шар води
3	Визначення змінних у дослідженні	У цьому випадку змінними виступають мікроорганізми, як-от: *Clostridium septicum, Chrobium tepidum, Chromatium okenii*
4	Формування гіпотези	Кожний варіант колонки Виноградського має унікальний набір бактерій
5	Визначення матеріалів для проведення дослідження	Піпетки Пастера (довгі, скляні, стерильні); скельця, знежирені етиловим спиртом; стерильна вода; ексикатори; салазки; спиртівки; сірники; фуксин Циля або метиленовий синій; серветки; імерсійна олія; мікроскоп з імерсійним об'єктивом
6	Виконання експерименту	На стерильні знежирені предметні скельця нанести проби з різних глибин колонки Виноградського. Виготовити та зафарбувати мазки, розглянути їх під мікроскопом
7	Аналіз інформації та побудова графіків	Проаналізуйте морфологічну будову мікроорганізмів, встановіть їх систематичне положення
8	Висновки та їх оприлюднення	Доповідь

Крім того, сучасні дослідження доводять, що процеси окислення заліза часто є спільним результатом діяльності мікробних консорціумів, а не ізольованих штамів, що суперечить ідеалізованій моделі, закладеній у колонці Виноградського. Тож, хоча підхід науковця дав перші ключі до розуміння мікробної геології, нині необхідно доповнювати його системним аналізом мікробіомів, інтеграцією даних про гени, транскрипцію та метаболізм, щоб повноцінно розуміти складність біогеохімічних процесів у рудних формаціях України.

STEM — практико-орієнтований підхід в освіті, основою якого є використання методів, що розвивають креативність і критичне мислення. Основа STEM — навчання через дослідження. Ми пропонуємо STEM-підхід реалізувати науковим методом.

У таблицях 2 і 3 наведено основні етапи впровадження наукового методу та шляхи їх реалізації (заняття 1, тривалість — 2 астрономічні години; заняття 2, тривалість — 2 астрономічні години).

Висновки. Науковий внесок Сергія Миколайовича Виноградського у розвиток біогеохімії та мікробної екології має фундаментальне значення для розуміння природи залізорудних формацій, зокрема в межах Криворізького басейну. Хоча він не досліджував безпосередньо українські руди, його відкриття залізобактерій, здатних до хемолітотрофного окиснення Fe^{2+}, заклало теоретичну основу для розуміння біологічних механізмів утворення важкорозчинних гідроксидів заліза — ключових компонентів болотних і осадових руд [1–3]. Цей процес, відкритий ще наприкінці XIX — на початку XX ст., сьогодні визнається універсальним чинником у генезисі залізистих мінералів. Колонка Виноградського виявилася не просто навчальним експонатом, а концептуальним мостом між лабораторією та природним середовищем. У її обмеженому просторі відтворюються динамічні умови, характерні для водно-болотних систем і донних відкладень, де мікробні спільноти розвиваються за градієнтами хімічних потенціалів. Ця модель дає змогу простежити, як у мікромасштабі виникають зони, аналогічні тим, що формуються в осадових басейнах протягом тисячоліть, — від поверхневих шарів з активним окисленням заліза до глибинних анаеробних зон із сульфідними процесами. Саме ця здатність відтворювати природну динаміку робить колонку не лише ілюстрацією, а живою моделлю біогеохімічної еволюції. Ідеї С. М. Виноградського знайшли своє продовження в сучасних геомікробіологічних дослідженнях в Україні та за її межами. Роботи з використанням метагеноміки, ізотопної геохімії та аналізу біомаркерів (наприклад, гену *cyc2*) підтверджують участь мікроорганізмів у трансформації заліза в гіпергенних зонах [7; 8; 14; 18]. Це дає змогу інтерпретувати рудоутворення не як виключно геохімічний процес, а як результат складної взаємодії геологічних, хімічних і біологічних чинників. Отже, спадщина С. М. Виноградського є не просто історичною пам'яткою науки, а живим методологічним підходом, який продовжує розвиватися. У роботі наведено методичні розробки двох занять (уроків), присвячених дослідженню колонки Виноградського.

Окремо слід зазначити, що колонка Виноградського є спрощеною моделлю локальних біогеохімічних процесів і не відтворює повний комплекс геологічних умов формування промислових залізорудних родовищ.

Список використаних джерел

1. Winogradsky S. Ueber Eisenbacterien. *Botanische Zeitung*. 1888. № 17. Pp. 261–270. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Botanische_Zeitung_%28IA_botanischezeitun46-mohl%29.pdf (дата звернення: 26.02.2026).
2. Konhauser K. O. Diversity of bacterial iron mineralization. *Earth-Science Reviews*. 1998. Vol. 43 (3). Pp. 91–121. DOI: https://doi.org/10.1016/S0012-8252(97)00036-6.
3. Microbial anaerobic Fe(II) oxidation — Ecology, mechanisms and environmental implications / C. Bryce et al. *Environmental Microbiology*. 2018. Vol. 20 (10). DOI: https://doi.org/10.1111/1462-2920.14328.
4. Bianchi T. S. The evolution of biogeochemistry: revisited. *Biogeochemistry.* 2021. Vol. 154. 141–181. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-020-00708-0?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.642d55fbdCZeYl (дата звернення: 17.04.2026). DOI: https://doi.org/10.1007/s10533-020-00708-0.
5. Dworkin M., Gutnick D. Sergei Winogradsky: a founder of modern microbiology and the first microbial ecologist. *FEMS Microbiology Reviews*. 2012. Vol. 36 (2). Pp. 364–379. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00299.x.
6. Krulwich T. A. Sergei Winogradsky: A founder of modern microbiology and microbial ecology. *ASM News*. 1996. Vol. 62 (9). Pp. 479–484.

ISSN 2786-4510 (Online)

7. Viehman S., Bau M., Hoffman J. E., Munker C. Geochemistry of the Krivoy Rog Banded Iron Formation, Ukraine, and the impact of peak episodes of increased global magmatic activity on the trace element composition of Precambrian seawater. *Precambrian Research*. 2015. Vol. 270. Pp. 165–180. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.015.
8. Pokalyuk V. V., Sukach V. Early Precambrian sedimentogenesis of Krivoy Rog iron-ore basin: Lithochemical types and MINLITH-standard mineral composition of metasediments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2014. № 6. Pp. 5–14. URL: https://www.nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1008-2014/contents-no-6-2014/geology/2852-early-precambrian-sedimentogenesis-of-krivoy-rog-iron-ore-basin-lithochemical-types-and-minlith-standard-mineral-composition-of-metasediments (дата звернення: 11.08.2025).
9. Щорічний дослідницький звіт. *Вісник клубу ім. Сергія Виноградського*. 2023. № 2. Київ : ТОВ «Вістка», 2023. 184 с.
10. Posth N. R., Konhauser K. O., Kappler A. Microbiological processes in banded iron formation deposition. *Sedimentology*. 2013. Vol. 60 (7). Pp. 1733–1754. DOI: https://doi.org/10.1111/sed.12051.
11. Chen L., Zhang H. X., Li Y., Zheng Sh. L., Liu F. H. The role of microorganisms in the geochemical iron cycle. *Scientia Sinica Vitae*. 2016. Vol. 46 (9). Pp. 1069–1078. DOI: https://doi.org/10.1360/N052016-00064.
12. Benzerara K., Bernard S., Miot J. Mineralogical Identification of Traces of Life. *Biosignatures for Astrobiology. Advances in Astrobiology and Biogeophysics* / eds.: B. Cavalazzi, F. Westall. Springer, Cham, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-96175-0_6.
13. Watanabe Y., Tajika E., Ozaki K. Evolution of iron and oxygen biogeochemical cycles during the Precambrian. *Geobiology*. 2023. Vol. 21 (6). Pp. 689–707. DOI: https://doi.org/10.1111/gbi.12571.
14. Succession of microbial communities in waste soils of an iron mine in Eastern China / Q. Zhang et al. *Microorganisms*. 2021. Vol. 9 (12). 2463. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms9122463.
15. Beukes N. J., Gutzmer J., Mukhopadhyay J. The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits. *Applied Earth Science (Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section B).* 2003. Vol. 112 (1). Pp. 18–31. DOI: https://doi.org/10.1179/037174503225011243.
16. Ilin A. M., Yusta I., Sánchez-España J. Winogradsky-Type Columns as an Insight into Mineral Neoformation and Metal Mobility in Acidic Pit Lakes. *Goldschmidt 2020 Conference Abstracts*. Abstract 1133. Honolulu, USA, 2020. DOI: https://doi.org/10.46427/gold2020.1133.
17. Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: Implications for biosignature formation / C. S. Chan et al. *The ISME Journal*. 2011. Vol. 5 (4). Pp. 717–727. DOI: https://doi.org/10.1038/ismej.2010.173.
18. Microbial iron oxide respiration coupled to sulfide oxidation / S. C. Chen et al. *Nature*. 2025. Vol. 646. Pp. 925–933. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-025-09467-0.
19. Winogradsky S. Recherches sur les organismes de la nitrification. *Annales de l'Institut Pasteur*. 1890. Vol. 4. Pp. 213–231. URL: https://archive.org/details/annales-de-linstitut-pasteur_1890-05_4_5/page/260/mode/2up (дата звернення: 26.02.2026).
20. Winogradsky S. Microbiologie du sol: Problèmes et méthodes. Paris : Masson, 1949.
21. Kappler A., Straub K. L. Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2005. Vol. 59 (1). Pp. 85–108. DOI: https://doi.org/10.2138/rmg.2005.59.5.

References

1. Winogradsky, S. (1888). Ueber Eisenbacterien [On iron bacteria]. *Botanische Zeitung — Botanical Journal*, 17, 261–270. Retrieved from https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a4/Botanische_Zeitung_%28IA_botanischezeitun46-mohl%29.pdf [in German].
2. Konhauser, K. O. (1998). Diversity of bacterial iron mineralization. *Earth-Science Reviews*, 43 (3), 91–121. DOI: https://doi.org/10.1016/S0012-8252(97)00036-6.
3. Bryce, C., Blackwell, N., Schmidt, C., Otte, J., Huang, Y.-M., Kleindienst, S. et al. (2018). Microbial anaerobic Fe(II) oxidation — Ecology, mechanisms and environmental implications. *Environmental Microbiology*, 20 (10). DOI: https://doi.org/10.1111/1462-2920.14328.
4. Bianchi, T. S. (2021). The evolution of biogeochemistry: revisited. *Biogeochemistry*, 154, 141–181. Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-020-00708-0?spm=a2ty_o01.29997173.0.0.642d55fbdCZeYl. DOI: https://doi.org/10.1007/s10533-020-00708-0.
5. Dworkin, M., & Gutnick, D. (2012). Sergei Winogradsky: a founder of modern microbiology and the first microbial ecologist. *FEMS Microbiology Reviews*, 36 (2), 364–379. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2011.00299.x.
6. Krulwich, T. A. (1996). Sergei Winogradsky: A founder of modern microbiology and microbial ecology. *ASM News*, 62 (9), 479–484.

7. Viehman, S., Bau, M., Hoffman, J. E., & Munker, C. (2015). Geochemistry of the Krivoy Rog Banded Iron Formation, Ukraine, and the impact of peak episodes of increased global magmatic activity on the trace element composition of Precambrian seawater. *Precambrian Research*, 270, 165–180. DOI: https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.015.
8. Pokalyuk, V. V., & Sukach, V. (2014). Early Precambrian sedimentogenesis of Krivoy Rog iron-ore basin: Lithochemical types and MINLITH-standard mineral composition of metasediments. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 5–14. Retrieved from https://www.nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1008-2014/contents-no-6-2014/geology/2852-early-precambrian-sedimentogenesis-of-krivoy-rog-iron-ore-basin-lithochemical-types-and-minlith-standard-mineral-composition-of-metasediments.
9. Shchorichnyi doslidnytskyi zvit [Annual Research Report]. (2023). *Visnyk klubu im. Serhiia Vynohradskoho — The Herald of Serhiy Winogradsky Club*, 2. Kyiv : TOV "Vistka" [in Ukrainian].
10. Posth, N. R., Konhauser, K. O., & Kappler, A. (2013). Microbiological processes in banded iron formation deposition. *Sedimentology*, 60 (7), 1733–1754. DOI: https://doi.org/10.1111/sed.12051.
11. Chen, L., Zhang, H. X., Li, Y., Zheng, Sh. L., & Liu, F. H. (2016). The role of microorganisms in the geochemical iron cycle. *Scientia Sinica Vitae*, 46 (9), 1069–1078. DOI: https://doi.org/10.1360/N052016-00064.
12. Benzerara, K., Bernard, S., & Miot, J. (2019). Mineralogical Identification of Traces of Life. B. Cavalazzi, F. Westall (Eds.), *Biosignatures for Astrobiology. Advances in Astrobiology and Biogeophysics*. Springer, Cham. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-96175-0_6.
13. Watanabe, Y., Tajika, E., & Ozaki, K. (2023). Evolution of iron and oxygen biogeochemical cycles during the Precambrian. *Geobiology*, 21 (6), 689–707. DOI: https://doi.org/10.1111/gbi.12571.
14. Zhang, Q., Wei, P., Banda, J. F., Ma, L., Mao, W., Li, H. et al. (2021). Succession of microbial communities in waste soils of an iron mine in Eastern China. *Microorganisms*, 9 (12), 2463. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms9122463.
15. Beukes, N. J., Gutzmer, J., & Mukhopadhyay, J. (2003). The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits. *Applied Earth Science (Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section B)*, 112 (1), 18–31. DOI: https://doi.org/10.1179/037174503225011243.
16. Ilin, A. M., Yusta, I., & Sánchez-España, J. (2020). Winogradsky-Type Columns as an Insight into Mineral Neoformation and Metal Mobility in Acidic Pit Lakes. *Goldschmidt 2020 Conference Abstracts*, Abstract 1133. Honolulu, USA. DOI: https://doi.org/10.46427/gold2020.1133.
17. Chan, C. S., Fakra, S. C., Emerson, D., Fleming, E. J., & Edwards, K. J. (2011). Lithotrophic iron-oxidizing bacteria produce organic stalks to control mineral growth: Implications for biosignature formation. *The ISME Journal*, 5 (4), 717–727. DOI: https://doi.org/10.1038/ismej.2010.173.
18. Chen, S. C., Li, X. M., Battisti, N., Guan, G., Montoya, M. A., Osvatic, J. et al. (2025). Microbial iron oxide respiration coupled to sulfide oxidation. *Nature*, 646, 925–933. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-025-09467-0.
19. Winogradsky, S. (1890). Recherches sur les organismes de la nitrification [Research on nitrifying organisms]. *Annales de l'Institut Pasteur — Annals of the Pasteur Institute*, 4, 213–231. Retrieved from https://archive.org/details/annales-de-linstitut-pasteur_1890-05_4_5/page/260/mode/2up [in French].
20. Winogradsky, S. (1949). *Microbiologie du sol: Problèmes et méthodes [Soil microbiology: Problems and methods]*. Paris : Masson [in French].
21. Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59 (1), 85–108. DOI: https://doi.org/10.2138/rmg.2005.59.5.

Ye. Yu. Pashchenko,
Zh. I. Bilyk

STEM APPROACH IN STUDYING THE LEGACY OF SERHIY MYKOLAYOVYCH VYNOHRADSKY

Abstract. *The article discusses the contribution of Serhiy Mykolayovych Vynogradsky (1856–1953) to the formation of a biogeochemical approach to the study of iron ores, in particular deposits in Ukraine. It is shown that his research on iron bacteria and microbial oxidation processes of metals became an important basis for understanding the genesis of iron minerals and the biogeochemical role of microorganisms in ore formation. Special attention is paid to Vynogradsky's column as an experimental model of biogeochemical processes in natural sediments. The interconnection between the scientist's ideas and modern approaches to the study of ore formations is analyzed, allowing his legacy to be considered as a foundation for the development of biogeochemistry and microbial geology.*

During Vynogradsky's lifetime, the prevailing view was that proving the existence of bacteria required isolating them in pure culture and growing them on nutrient media. However, it has now become clear that nearly 90 % of microorganisms cannot be cultured on nutrient media. Nevertheless, they can be studied through advancements in metagenomics, ensuring that the study of the Vynogradsky column retains its pedagogical potential. This article presents a methodological development for two lessons designed according to the STEM approach. Each lesson consists of posing a problem question, searching for information, creating a research plan, forming a hypothesis, identifying materials for the study, conducting the experiment, analyzing information, constructing graphs, formulating conclusions, and sharing the results. Each stage contains the necessary information for the teacher. Particular attention is paid to the morphology of microorganisms that inhabit various layers of the Vynogradsky column. By completing these STEM projects, students have a unique opportunity to observe microorganisms such as Desulfovibrio, Leptothrix, Gallionella, Clostridium septicum, Chlorobium tepidum, Chromatium okenii, Rhodospirillum, and Beggiatoa. The article also provides the basic equations for the chemosynthesis processes occurring in the different layers of the Vynogradsky column.

Keywords: *Serhiy Vynogradsky, biogeochemistry, iron bacteria, microbial iron oxidation, Vynogradsky column, geomicrobiology, iron ores of Ukraine.*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Пащенко Євгеній Юрійович — канд. екон. наук, старший науковий співробітник відділу створення навчально-тематичних систем знань, НЦ «Мала академія наук України», м. Київ, Україна, pobeda2000@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8703-4796

Білик Жанна Іванівна — канд. біол. наук, старший науковий співробітник відділу створення навчально-тематичних систем знань, НЦ «Мала академія наук України», м. Київ, Україна, zhannabiluk@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2092-5241

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pashchenko Ye. Yu. — PhD in Economics, Senior Researcher of the Department for Creating Educational and Thematic Knowledge Systems, NC "Junior Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine, pobeda2000@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8703-4796

Bilyk Zh. I. — PhD in Biology, Senior Researcher of the Department for Creating Educational and Thematic Knowledge Systems, NC "Junior Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine, zhannabiluk@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2092-5241

Рукопис надійшов до редакції / Received 27.02.2026
Рукопис прийнято до друку / Accepted 06.04.2026
Опубліковано / Available online 30.04.2026

Licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License