

СУЧАСНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ У БІОМІНЕРАЛОГІЇ

Святослав Лойко, аспірант кафедри мінералогії,
петрографії і геохімії імені професора Ореста Матковського
Sviatoslav.Loiko@lnu.edu.ua
<https://orcid.org/0009-0003-2613-7910>

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. М. Грушевського, 4, Львів, Україна, 79005

Біомінералогія на сучасному етапі є однією з найбільш динамічних міждисциплінарних галузей науки, у якій інтегровані методичні підходи мінералогії, геохімії, молекулярної біології, медицини і матеріалознавства.

У статті узагальнено сучасні напрями досліджень у біомінералогії та проаналізовано основні тенденції її розвитку. Особливу увагу зосереджено на механізмах біомінералізації як процесу утворення твердих неорганічних фаз за безпосередньої участі біологічних чинників. Розглянуто суттєві відмінності між біологічно індукованою мінералізацією (BIM), характерною головню для мікробних систем, і біологічно контрольованим мінералоутворенням (BCM), властивим вищим організмам.

Проаналізовано роль органічних матриць, зокрема специфічних білків і полісахаридів, у процесах нуклеації, орієнтованого росту і просторової організації кристалів, що забезпечує формування біогенних мінералів з унікальною ієрархічною будовою та специфічними фізико-хімічними властивостями. Схарактеризовано основні природні модельні системи, серед яких біогенні карбонати кальцію (кальцит, арагоніт і вітерит у складі скелетів безхребетних і кокколітофор), фосфати кальцію (зокрема, гідроксо-апатит кісткової тканини), а також біогенний опал діатомей і магнетит магнітотактичних бактерій. Окрему увагу приділено мікробній біомінералізації як важливому чиннику геохімічної трансформації середовища, патологічній мінералізації в організмі людини та біоміметичним напрямом у створенні нових функціональних матеріалів.

Сучасна біомінералогія має важливе значення для реконструкції палеоекологічних умов, розвитку регенеративної медицини та дослідження біогеохімічних процесів. Окреслено перспективи переходу до мультимасштабного дослідження складу й структури речовини на мікро-, нано- й атомному рівнях із використанням різноманітних спектроскопічних методів і синхротронного випромінювання. Інтеграція цих підходів є фундаментом для розуміння закономірностей мінералоутворення в живій і неживій природі та розкриття ролі біоти у глобальних геохімічних циклах.

Ключові слова: біомінералогія, біомінералізація, мікробна біомінералізація, патологічна мінералізація, біоміметичні матеріали, гідроксо-апатит, кристалохімія біогенних фаз, наноструктура мінералів.

DOI <https://doi.org/10.30970/min.76.09>

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку біомінералогії характеризується формуванням нових дослідницьких напрямів, розширенням кола об'єктів вивчення та впровадженням високоточних аналітичних методів, що зумовлює потребу в системному узагальненні сучасних тенденцій цієї галузі. Біомінералогія вже давно вийшла за межі опису окремих біогенних мінералів і нині охоплює вивчення механізмів біомінералізації на молекулярному, клітинному, тканинному й геобіологічному рівнях. Особливого значення

набувають дослідження, присвячені ролі органічної матриці в мінералоутворенні, функціонуванню аморфних попередників, взаємодії мікроорганізмів з мінеральною фазою, патологічній мінералізації та біоміметичному відтворенню природних процесів у матеріалознавстві.

Актуальність проблеми посилюється тим, що сучасні аналітичні методи, зокрема електронна мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, спектроскопічні та синхротронні підходи, дають змогу досліджувати біогенні мінерали на значно вищому рівні просторової і структурної роздільної здатності, ніж раніше. Це сприяє переходу від морфологічно-описового етапу розвитку біомінералогії до мультимасштабного аналізу складу, кристалохімії, наноструктури й механізмів формування біомінеральних систем. Водночас накопичення великої кількості даних у мінералогії, геохімії, біології, медицині, палеонтології та матеріалознавстві потребує їх інтеграції в межах єдиного оглядового бачення.

Проблема полягає також у тому, що сучасні напрями досліджень у біомінералогії часто висвітлюють фрагментарно: окремо розглядають мікробну біомінералізацію, патологічні кальцифікації, біоміметичні технології, екологічні й еволюційні аспекти. За таких умов виникає потреба в узагальнювальному аналізі, який дав би змогу показати внутрішню логіку розвитку цієї науки, взаємозв'язок між фундаментальними і прикладними дослідженнями, а також значення біомінералогії для розуміння закономірностей мінералоутворення в живій і неживій природі.

Аналіз досліджень. Класичні фундаментальні публікації з біомінералогії сформували концептуальну основу сучасних досліджень, у межах якої біомінералізацію трактують як процес утворення біогенних мінеральних фаз під контролем живих систем, а власне біомінерали – як складні органо-мінеральні композити зі специфічними кристалохімічними, морфологічними й ізотопно-геохімічними характеристиками. У фундаментальних узагальненнях показано, що біомінералізація безпосередньо пов'язана з біогеохімічними циклами, осадоагромадженням, фосильним літописом і проблемою *vital effect* (життєвий, або біологічний ефект) – системним відхиленням ізотопного складу ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{44}\text{Ca}$) та вмісту слідових елементів у біогенних фазах від рівноважних абіогенних аналогів [16; 26]. Саме ці праці заклали підґрунтя для переходу від опису окремих біогенних мінералів до аналізу механізмів їхньої нуклеації, росту, фазових трансформацій і стабілізації в природних системах.

Упродовж останніх років дослідницький фокус помітно змістився в бік механістичного й мультимасштабного аналізу біогенних мінеральних фаз. Якщо в попередні десятиліття домінували морфологічний опис і фазова ідентифікація, то нині провідними стали дослідження неklasичних шляхів кристалізації, ролі аморфних попередників (ACC¹, ACP²), переднуклеаційних кластерів, органічних матриць і компартменталізації мінералоутворення. Особливо важливими в цьому контексті стали високороздільна крио-ТЕМ (трансмійсна електронна мікроскопія), томографія та синхротронні методи, зокрема, сканувальна трансмісійна рентгенівська мікроскопія (STXM); вони дали змогу простежити перехід від аморфних кальцій-фосфатних або кальцій-карбонатних попередників до впорядкованих кристалічних фаз [6; 9; 26].

Окремий масив сучасних публікацій присвячений мікробній біомінералізації. У цій групі досліджень особливу увагу приділяють розмежуванню понять *біологічно контрольована мінералізація* (*biologically controlled mineralization* – BCM), *біологічно індукована мінералізація* (*biologically induced mineralization* – BIM), *органомінералізація* (*biologically influenced mineralization*). У сучасних оглядах зазначено, що прокариоти здатні індукувати

¹ Аморфний карбонат кальцію (Amorphous Calcium Carbonate).

² Аморфний фосфат кальцію (Amorphous Calcium Phosphate).

утворення широкого спектра фаз – від оксидів і оксигідроксидів заліза (гетит, магнетит) до карбонатів і сульфідів [4; 8; 24]. Особливе місце посідають праці про магнітотактичні бактерії, у яких біогенний магнетит і грейгіт розглядають як модельні фази внутрішньоклітинної мінералізації [9].

Паралельно швидко розвивається блок досліджень, присвячений прикладним аспектам біомінералогії. У 2024–2025 рр. особливо активно узагальнювали біоміметичні підходи до синтезу функціональних органо-мінеральних матеріалів, зокрема скаффолд-систем для кісткової регенерації, матеріалів для ремінералізації твердих тканин, біоінспірованих композитів і мінералізованих носіїв для біомедичних застосувань. У цих працях біомінералогічні моделі використовують уже не тільки для пояснення природного фазоутворення, а й для керованого відтворення кристалохімічних і текстурних характеристик біогенних мінеральних фаз у штучних системах [9; 12].

Отже, біомінералогія нині розвивається в кількох взаємопов'язаних напрямках: дослідження фундаментальних механізмів нуклеації та росту біогенних мінеральних фаз; вивчення їхніх кристалохімічних, морфологічних і текстурних особливостей; аналіз мікробно-опосередкованих мінеральних трансформацій; розроблення біоміметичних матеріалів; інтерпретація ролі біомінералізації в геологічній історії та сучасних біогеохімічних циклах. Водночас зберігається потреба в інтегрованому мінералогічному узагальненні, яке поєднувало б дані про фазовий склад, механізми кристалізації та геохімічне значення біогенних мінеральних фаз [8; 9; 12; 24; 26].

Мета статті – виконати системний аналіз сучасних напрямів досліджень у біомінералогії, виявити ключові тенденції розвитку цієї галузі та обґрунтувати значення інтегрованого мінералогічного підходу до дослідження біогенних мінеральних фаз як чинника геологічних і біогеохімічних процесів у сучасних і фосильних системах.

Виклад основного матеріалу. Біомінералізація є базовим процесом формування біогенних мінеральних фаз і становить фундаментальну основу біомінералогії як між-дисциплінарної галузі. У мінералогічному розумінні йдеться не тільки про власне факт утворення мінералу за участю живого організму, а й про формування специфічних органо-мінеральних систем, у яких нуклеація, ріст, поліморфний вибір, морфологія кристалів, ступінь кристалічності й текстурна організація визначені біологічним контролем різної інтенсивності. Саме ця ознака відрізняє біогенні мінеральні фази від їхніх абіогенних аналогів і зумовлює появу кристалохімічних і геохімічних характеристик, які нерідко не відтворюються у типових неорганічних системах. Біомінерали, зазвичай, є не ізольованими кристалами, а складними органо-неорганічними композитами, у яких мінеральна фаза тісно пов'язана з органічною матрицею й набуває специфічних морфологічних, текстурних та ізотопних ознак [26].

Упродовж геологічної історії біота сформувала широкий спектр мінеральних фаз, серед яких домінують карбонати кальцію (кальцит, арагоніт, вітерит), фосфати кальцію (біогенний апатит), біогенний кремнезем (опал-А), оксиди, оксигідроксиди та сульфід заліза. Біомінералізація постає як процес керованого створення локально пересиченого мікросередовища, у межах якого відбуваються нуклеація й подальша стабілізація певної мінеральної фази. Таке мікросередовище може бути внутрішньоклітинним, міжклітинним або позаклітинним, однак у всіх випадках воно передбачає просторове обмеження зони мінералоутворення, селективне надходження йонів, регуляцію рН, Eh, $p\text{CO}_2$ та участь органічних шаблонів [16; 26].

Як базовий процес фазоутворення, біомінералізація охоплює кілька рівнів. На фізико-хімічному рівні це досягнення пересичення, зародження нової фази, ріст кристалів і стабілізація метастабільних попередників, зокрема. На кристалохімічному рівні суттєво

значення мають поліморфізм, ізоморфні заміщення, ступінь гідратації та розподіл слідових елементів. На текстурному рівні ключовими є орієнтований ріст кристалітів та формування ієрархічних композитів [16].

Для мінералогії біомінералізація має особливе значення як джерело інформації про умови середовища. Ізотопний склад і кристалохімічні особливості біогенних фаз використовують для реконструкції палеоекологічних умов, хоча інтерпретація таких даних ускладнена явищем *vital effect*. Отже, розуміння біомінералізації є необхідною умовою для правильної інтерпретації геологічного літопису та з'ясування ролі біогенних мінеральних фаз у біогеохімічній еволюції Землі [26].

Ключовою особливістю біомінералізації є її реалізація як процесу, детермінованого на молекулярному й клітинному рівнях. У сучасній науковій парадигмі, як зазначено вище, виділяють три типи біомінералізації: ВСМ, ВІМ та органомінералізацію. У разі ВСМ організм безпосередньо регулює нуклеацію, фазовий склад і кристалографічну орієнтацію, формуючи високоспеціалізовані скелетні структури. Натомість ВІМ є наслідком метаболічно зумовлених змін фізико-хімічних параметрів локального середовища (рН, рСО₂, Eh), коли клітина є ініціатором, а не точним регулятором фазоутворення [4; 26].

У системах ВСМ вирішальну роль відіграє органічна матриця, представлена білками, глікопротеїнами й полісахаридами, що формують тривимірний каркас мінералоутворення. Вона виконує не тільки опорну, а й шаблонувальну функцію, задаючи місця нуклеації та контролюючи орієнтований ріст кристалів. Взаємодія між структурною матрицею та розчинними регуляторними макромолекулами визначає поліморфний вибір, зокрема, співвідношення між кальцитом і арагонітом, а також ієрархічну організацію біогенної мінеральної фази [6; 26].

Важливим механізмом є компартменталізація – створення ізольованих мікрозон у везикулах або інших мембранно-обмежених компартментах, де підтримується специфічний іонний гомеостаз. Мембрани таких компартментів регулюють трансмембранне перенесення катіонів і аніонів, зокрема, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺/Fe³⁺, забезпечуючи локальне пересичення, необхідне для стабілізації метастабільних попередників.

У мікробних системах центрами гетерогенної нуклеації слугують клітинні поверхні та позаклітинні полімерні речовини (EPS)³. Їхні функціональні групи модифікують локальне середовище, впливаючи на розмір, морфологію та ступінь агрегування кристалів. Унікальною моделлю внутрішньоклітинного контролю є магнітотактичні бактерії, у яких мембранно-обмежені магнітосоми забезпечують синтез евгедральних кристалів магнетиту або грейгіту [24].

Сучасні дані свідчать, що молекулярний контроль часто реалізується через неklasичні шляхи кристалізації – від стабілізації переднуклеаційних кластерів до керування переходом аморфна фаза–кристал. Це дає змогу живим системам формувати мінеральні агрегати з кристалохімічними і текстурними характеристиками, що не завжди відтворюються в типових абіогенних системах [6; 16].

Сучасній біомінералогії притаманний перехід від класичної теорії нуклеації до концепції неklasичних шляхів кристалізації. У межах цих уявлень фазоутворення починається не з безпосереднього зародження впорядкованої кристалічної фази з іонного розчину, а через формування переднуклеаційних кластерів і рідкоподібних мінеральних прекурсорів, які виступають проміжними стадіями на шляху до кристалічно впорядкованої структури [6; 26]. Сучасні уявлення додатково пов'язують формування аморфних попередників із виникненням переднуклеаційних кластерів і щільних рідкоподібних прекурсорів, які трактують як проміжні стадії на шляху до стабільної кристалічної фази [6; 26].

³ EPS – Extracellular Polymeric Substances.

Стратегічну роль у цьому процесі відіграють аморфні попередники – АСС та АСР. Завдяки відсутності далекого кристалічного порядку та високій реакційній здатності ці метастабільні фази слугують лабільним резервуаром мінеральної речовини. У біологічних системах така нестабільність є функціональною перевагою, оскільки дає змогу організму транспортувати мінеральну речовину до зони мінералоутворення та контролювати формування складної морфології біогенної фази. Стабілізація АСС як попередника кальциту або арагоніту та АСР як прекурсора біогенного апатиту здійснюється органічними макромолекулами, а в карбонатних системах також іонами-стабілізаторами, зокрема Mg^{2+} , що дає змогу селективно регулювати момент і локалізацію фазового переходу [4; 8; 10].

До неklasичних механізмів належить також орієнтоване приєднання, за якого нанорозмірні кристалічні блоки вирівнюються в межах органічної матриці вздовж спільних кристалографічних осей. Цей механізм пояснює формування мезокристалів – структур, що морфологічно можуть нагадувати монокристали, однак фактично мають мозаїчну будову й містять інтегровані органічні включення [4].

Для мінералогії це має принципове значення, оскільки дає підстави по-новому інтерпретувати кристалохімічні дефекти, варіабельний ступінь кристалічності та особливості поліморфного вибору в біогенних системах. Отже, дослідження неklasичної кристалізації є одним із ключових напрямів сучасної біомінералогії, який поєднує фізичну хімію фазових переходів з біологічним контролем біомінералоутворення [4; 10].

Базовий аналітичний комплекс сучасної біомінералогії ґрунтується на поєднанні морфологічних, фазово-аналітичних, кристалохімічних та спектроскопічних підходів. Традиційно до нього належать сканувальна (SEM) та трансмісійна (TEM) електронна мікроскопія, рентгенівська дифракція (XRD), інфрачервона спектроскопія (FTIR) та Раман-спектроскопія. Їхнє поєднання дає змогу аналізувати фазовий склад, поліморфні модифікації, ступінь кристалічності та ієрархічну організацію біогенних фаз [17; 21].

SEM залишається ключовим інструментом для вивчення мікротекстури, тоді як TEM дає змогу досліджувати ультраструктуру й орґано-мінеральний інтерфейс на нанорівні. Водночас сучасні дослідження застерігають від спрощених інтерпретацій, особливо для кальцій-фосфатних систем. Пряме ототожнення біогенної фази з «гідроксо-апатитом» без урахування дефектності структури, ізоморфних заміщень, зокрема карбонат-іона, та наявності аморфних доменів часто є некоректним. Для деталізації складу дедалі ширше залучають термічний аналіз (TG/DSC⁴), який дає змогу кількісно оцінити вміст води й органічної речовини, інтегрованих у структуру біомінералу [17; 21]. Основні аналітичні можливості сучасних методів дослідження біогенних мінеральних фаз узагальнено в табл. 1.

Прорив у розумінні динаміки біомінералоутворення пов'язаний із впровадженням методів *in situ* та *in operando*. Кріогенна трансмісійна електронна мікроскопія (cryo-TEM) та рідиннофазова трансмісійна електронна мікроскопія (liquid-TEM) дають змогу візуалізувати переднуклеаційні кластери та аморфні прекурсоры в їхньому нативному, тобто гідратованому, стані. Це критично важливо для верифікації моделей неklasичної кристалізації, оскільки традиційна підготовка зразків часто спричиняє артефактну дегідратацію й фазові трансформації [7; 17].

Вагомим елементом сучасного інструментарію стали синхротронні методи. Сканувальна трансмісійна рентгенівська мікроскопія (STXM) забезпечує високороздільне хімічне картування кальцієвмісних компартментів у клітинах. Спектроскопічні підходи XANES (рентгенівська спектроскопія ближньої зони поглинання) та EXAFS (розширена рентгенівська абсорбційна спектроскопія) дають змогу аналізувати локальну координацію, електронний стан і характер включення домішкових елементів у біогенні мінеральні фази.

⁴ TG – термогравіметрія; DSC – диференціальна сканувальна калориметрія.

Таблиця 1

**Сучасні методи дослідження біогенних мінеральних фаз
та їх аналітичні можливості**

Метод/підхід	Аналітичний фокус	Можливості	Джерело
Сканувальна електронна мікроскопія (SEM)	Морфологія поверхні, мікротекстура, просторове розміщення мінеральної фази	Дає змогу аналізувати форму кристалів, мікроструктурну організацію біомінералів і характер мінералоутворення на мікрорівні	[1; 25]
Трансмісійна електронна мікроскопія (TEM/сгуо-TEM/liquid-TEM)	Ультраструктура, нанокристали, органо-мінеральний інтерфейс, аморфні попередники	Дає змогу простежувати ранні стадії фазоутворення, перехід від аморфних прекурсорів до впорядкованих фаз і механізми неklasичної кристалізації	[7; 17]
Рентгеноструктурний аналіз (XRD) / Мікрорентгенова дифракція (MicroED)	Фазовий склад, поліморфні модифікації, ступінь кристалічності, структурні характеристики субмікронних кристалів	Забезпечує надійну фазову ідентифікацію біогенних мінеральних фаз і уточнення кристалохімічних особливостей слабковпорядкованих систем	[21; 23]
ІЧ-спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR) / Раман-спектроскопія (Raman)	Функціональні групи, карбонатні та фосфатні домени, кристалічність, органо-мінеральні взаємодії	Дає змогу оцінювати ступінь кристалічності, карбонатні заміщення та співвідношення органічної й мінеральної складових у біомінералах	[2; 25]
Сканувальна трансмісійна рентгеновська мікроскопія (STXM) / Рентгеновська спектроскопія ближньої зони поглинання (XANES) / Розширена рентгеновська абсорбційна спектроскопія (EXAFS)	Хімічне картування, локальна координація елементів, електронний стан і домішкові заміщення	Розкриває кристалохімічні заміщення, локальний хімічний стан елементів і механізми формування vital effect у біогенних фазах	[3; 13]
Ядерний магнітний резонанс вуглецю-13 (APT)	Субнанометрова хімічна гетерогенність, тривимірний розподіл слідових елементів	Надає майже атомномасштабну інформацію про неоднорідність біомінералів і розподіл домішок у твердих тканинах	[11]
Корелятивний мультимасштабний аналіз	Інтеграція морфологічних, спектроскопічних і високороздільних даних	Дає змогу інтерпретувати біогенні мінеральні фази як динамічні органо-мінеральні системи, а не як ізольовані кристалічні об'єкти	[11; 13; 17]

Це важливо для інтерпретації кристалохімічних заміщень і механізмів формування *vital effect* [3; 13]. Одним із найперспективніших методів атомного масштабу є атомно-зондова томографія, яка забезпечує тривимірну реконструкцію субнанометрової хімічної гетерогенності та розподілу слідових елементів у структурі біомінералу [11]. Перспективним доповненням до цього інструментарію є мікрорентгенова дифракція (MicroED), яка дає змогу визначати структурні характеристики субмікронних і слабковпорядкованих кристалічних об'єктів, що особливо важливо для дослідження дрібнодисперсних біогенних фаз і поліморфних модифікацій [23].

Отже, методологічний арсенал сучасної біомінералогії еволюціонує в бік корелятивного аналізу, де дані різних масштабів інтерпретуються як взаємодоповнювальні. Саме такий мультимасштабний підхід дає підстави розглядати біогенні мінеральні фази не як статичні об'єкти, а як складні динамічні органо-мінеральні системи [11; 17].

Серед природних модельних систем біомінералогії провідне місце посідають карбонатні й фосфатні біогенні мінеральні фази вищих організмів. Саме вони найкраще демонструють, як біологічний контроль впливає на поліморфний вибір, кристалохімічні особливості, текстурну організацію та функціональні властивості біомінералів. У мінералогічному аспекті ці системи особливо цінні, оскільки поєднують чітко визначений фазовий склад з високим рівнем морфологічної та структурної впорядкованості, що робить їх придатними як для фундаментального аналізу механізмів фазоутворення, так і для палео-екологічних реконструкцій [5; 19].

Карбонатні системи представлені, насамперед, біогенними модифікаціями CaCO_3 – кальцитом, арагонітом і, рідше, вітеритом – у складі черепашок молюсків і коралів. Формування цих фаз визначене не тільки термодинамічними умовами, а й тонким контролем над локальними концентраціями йонів, рН, органічною матрицею та просторовим обмеженням зони кристалізації. Для біомінералогії особливо важливо, що ці об'єкти є основними носіями інформації про механізми інкорпорації слідових елементів і формування *vital effect*, що безпосередньо впливає на інтерпретацію геохімічних проксі у палеокліматичних дослідженнях [5; 19].

Фосфатні системи охоплюють кісткову тканину, дентин і емаль, де домінує біогенний апатит. Важливо зазначити, що мінеральний компонент кістки не слід спрощено ототожнювати зі стехіометричним гідроксо-апатитом: ідеться про кальцій-дефіцитний, карбонатовмісний апатит із вираженою дефектністю структури та, ймовірно, участю аморфно-нанокристалічних доменів. У кістковій тканині мінеральна фаза тісно пов'язана з колагеновою матрицею, утворюючи ієрархічну систему, тоді як у високомінералізованих тканинах, зокрема, в емалі, апатит має вищий ступінь кристалічності. Саме ці системи є ключовими моделями для дослідження ролі матриці, ферментативної регуляції фосфатного обміну та просторово-часового контролю нуклеації й росту кристалів [17; 21; 27].

Порівняльний аналіз цих систем дає змогу простежити спільні й відмінні риси біологічно контрольованого фазоутворення. У карбонатних системах головний акцент припадає на поліморфізм CaCO_3 та значення біомінералів як геохімічних архівів, тоді як у фосфатних – на дефектну структуру апатиту та зв'язок між його кристалохімічними характеристиками і механічними властивостями тканин. Саме тому ці системи залишаються базовими модельними об'єктами сучасної біомінералогії та створюють концептуальний місток до аналізу мікробної біомінералізації й патологічного мінералоутворення [5; 21; 27].

Мікробна біомінералізація є одним із найбільш динамічних напрямів сучасної біомінералогії, оскільки саме мікроорганізми здатні ініціювати формування, трансформацію та стабілізацію широкого спектра біогенних мінеральних фаз – карбонатів, оксидів і гідроксидів заліза, сульфідів і фосфатів – у природних середовищах. У мінералогічному аспекті її значення полягає у здатності прокариотів суттєво впливати на морфологію, ступінь кристалічності та хімічну неоднорідність мінеральних продуктів, а через це і на перебіг глобальних біогеохімічних циклів [4; 8; 15].

Сучасні уявлення про мікробну біомінералізацію ґрунтуються на розмежуванні трьох фундаментальних типів. У разі біологічно індукованої мінералізації мікроорганізми змінюють фізико-хімічні параметри середовища, зокрема рН, Eh та вміст неорганічного вуглецю, створюючи умови для пересичення і масового осадження фаз. Саме цим пояснюється роль бактеріального карбонатогенезу у формуванні строматолітів, осадкових товщ

і процесах фосилізації [4; 8]. Біологічно зумовлена мінералізація пов'язана з тим, що клітинні поверхні та позаклітинні полімерні речовини (EPS) відіграють роль активних матричних субстратів і центрів гетерогенної нуклеації. Це дає змогу мікробним клітинам задавати текстурні характеристики кристалів навіть за відсутності прямого генетичного контролю. Особливе екологічне значення мають залізовмісні системи, де біогенні ферригідрит $\text{Fe}^{3+}_{10}\text{O}_{14}(\text{OH})_2$ і гетит $\text{FeO}(\text{OH})$ стають високореактивними геохімічними бар'єрами, забезпечуючи іммобілізацію забруднювачів [4; 15].

Біологічно контрольована мінералізація найвиразніше представлена у магнітотактичних бактерій. У межах мембранно-обмежених магнітосом формуються евгедральні кристали магнетиту $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$ або грейгіту $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{S}_4$. Ця система демонструє здатність прокаріотів прецизійно регулювати фазовий склад, морфологію та просторову організацію мінералу на генетично детермінованому рівні [24].

Геохімічне значення цих процесів полягає не тільки у формуванні стійкого мінерального запису в геологічному літописі, а й у їхній участі в циклах вуглецю, заліза, сірки і фосфору. Мікробно-опосередковані фази є індикаторами умов палеосередовища, поєднуючи мінералогічний аналіз з геомікробіологічною інтерпретацією процесів фазоутворення [4; 8; 24].

Патологічне мінералоутворення в організмі людини є важливим об'єктом сучасної біомінералогії, оскільки демонструє, що біогенне фазоутворення може реалізуватися не тільки у фізіологічних, а й у патологічних умовах. У мінералогічному аспекті йдеться про формування ектопічних або атипично локалізованих мінеральних фаз у м'яких тканинах, порожнинних органах, судинній стінці, клапанах серця чи біоплівках. Такі утворення не слід розглядати як пасивне осадження солей, оскільки сучасні дослідження засвідчують, що їхнє формування пов'язане з запаленням, локальними змінами йонного середовища, появою матричних субстратів для нуклеації та активацією остеогеноподібних сигнальних шляхів [22].

Однією з найбільш показових моделей патологічної біомінералізації є уролітіаз. Сучасний підхід дедалі частіше трактує ниркові камені як патологічні біогенні мінерали, для аналізу яких недостатньо лише визначення загального хімічного складу. Принципове значення мають кристалічна структура, пористість, проникність, спайність, тріщинуватість і механічні властивості конкременту. Для уролітів характерне суттєве мінералогічне різноманіття: серед основних фаз трапляються оксалати кальцію, зокрема, ювеліт $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ й уделіт $\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, фосфати кальцію, а також урати й інші компоненти, співвідношення яких відображає умови фазоутворення в багатокомпонентному біологічному середовищі. Важливо, що навіть за незначної масової частки органічний матрикс може суттєво впливати на архітектуру конкременту, модулюючи нуклеацію, фазові переходи й текстурну будову патологічного мінерального агрегату [18].

Іншим важливим напрямом є судинна і клапанна кальцифікація, коли осаджуються кальцій-фосфатні мінеральні фази, близькі за складом до кісткоподібного мінералу. Сучасні дані свідчать, що в кальцифікованих судинних і клапанних тканинах переважають добре впорядковані фосфатні фази, тоді як на ранніх етапах може зростати частка більш незрілих і протонуваних кальцій-фосфатних компонентів. Це засвідчує, що для патологічної кальцифікації важливі не тільки локалізація й кількість мінералу, а й ступінь його зрілості, фазовий стан і кристалохімічна організація. Імовірно, суттєву роль у цьому процесі відіграють позаклітинні везикули, які функціонують як локальні мікрореактори початкової нуклеації кальцій-фосфатних фаз [22; 28].

Окреме місце серед патологічних біомінеральних систем посідає дентальний камінь як мінералізована біоплівка. Його мінеральна складова представлена переважно

кальцій-фосфатними фазами, серед яких домінують апатитові модифікації, а також інші фосфатні й карбонатні компоненти. Важливо, що мінералізація в цьому випадку відбувається не спонтанно, а внаслідок взаємодії мікробної біоплівки, ферментативної активності, зміни рН та локального пересичення кальцій-фосфатної системи. Отже, дентальний камінь є показовим прикладом того, як патологічне мінералоутворення поєднує мікробний, фізико-хімічний і матричний контроль фазоутворення [25].

Для патологічних біомінеральних систем загалом характерні мікрогетерогенність, зональна будова, варіабельний ступінь кристалічності та специфічний набір домішкових компонентів. Саме ці ознаки роблять їх цінними об'єктами біомінералогічного аналізу, оскільки дають змогу досліджувати механізми нуклеації, фазової еволюції та стабілізації біогенних мінеральних фаз у нефізіологічних умовах. Отже, патологічне мінералоутворення в організмі людини має подвійне значення для сучасної біомінералогії: з одного боку, воно є моделлю порушеного фазоутворення, а з іншого, – джерелом інформації про взаємозв'язок між запаленням, матричними субстратами, локальною геохімією середовища та кристалохімією мінеральної фази [18; 22; 25].

Сучасні біоміметичні підходи ґрунтуються на відтворенні не тільки хімічного складу природних біомінералів, а й фундаментальних принципів їхньої нуклеації, росту, фазових переходів та ієрархічної організації. Якщо ранні біоінспіровані матеріали переважно копіювали окремі морфологічні риси природних систем, то сучасна парадигма зміщується до керованого відтворення органо-мінеральних інтерфейсів, стабілізації аморфних прекурсорів та просторово-часового контролю мінералоутворення. Саме тому біомінералізацію дедалі частіше трактують як природну модель для конструювання функціональних матеріалів із наперед заданими кристалохімічними, текстурними й механічними властивостями [12; 14].

Одним із центральних напрямів є створення біомінераловмісних композитів для регенеративної медицини і тканинної інженерії. Сучасні дослідження засвідчують, що інтеграція мінеральної фази в полімерні або гібридні матриці дає змогу не тільки підвищувати механічну стійкість матеріалу, а й відтворювати мікрооточення природної тканини. Особливе значення мають наноструктуровані карбонатзаміщені фосфати кальцію, які забезпечують високу біосумісність, остеointegraцію та наближення властивостей штучного матеріалу до кісткової тканини. У стоматологічному матеріалознавстві біоміметичні підходи особливо виразно виявлені у технологіях ремінералізації емалі, коли білкові й супрамолекулярні матриці використовують для спрямованого росту апатитової фази й часткового відновлення ультраструктурної організації твердих тканин зуба [10; 20].

Важливим напрямом є також наслідування власне механізму біомінералізації. Йдеться про системи, у яких органічна матриця, ферментні регулятори або стабілізовані аморфні попередники забезпечують контрольоване осадження мінеральної фази *in situ*. Такий підхід відкриває можливості для створення гідрогелів, 3D-друкованих конструкцій, мінералізованих каркасів і нанокомпозитів, у яких мінералізація відбувається за м'яких умов температури й тиску. Саме це зближує біоміметичне матеріалознавство з принципами «зеленої хімії», оскільки дає змогу уникати жорстких фізико-хімічних режимів синтезу й водночас зберігати високу структурну впорядкованість кінцевого матеріалу [12; 29].

Для мінералогії принципово важливо, що біоміметичне матеріалознавство дедалі більше спирається на кристалохімічну логіку природних систем. Йдеться про керування поліморфним вибором, стабілізацію метастабільних фаз, контроль розміру й орієнтації кристалітів, а також про відтворення ієрархічної текстурної організації. Завдяки цьому біоінспіровані матеріали перестають бути простими аналогами природних біомінералів і перетворюються на функціональні системи, властивості яких задаються через фазовий склад, режим мінералоутворення та органо-мінеральний інтерфейс [12; 29].

Отже, біоміметичні підходи у матеріалознавстві та медицині є одним із найважливіших прикладних відгалужень сучасної біомінералогії. Їхня цінність полягає в тому, що фундаментальні знання про нуклеацію, фазові переходи, аморфні прекурсори та кристалохімічну організацію біогенних мінеральних фаз безпосередньо трансформуються у технології створення регенеративних матеріалів, стоматологічних систем, біоінженерних конструкцій та інших функціональних композитів [10; 12; 14].

Біоінспіровані композити та регенеративні матеріали є прямим результатом перенесення біомінералогічних принципів у прикладну площину. У матеріалознавстві фундаментальні знання про нуклеацію, фазові переходи та органо-мінеральні інтерфейси використовують для створення систем, у яких мінеральна й органічна складові поєднані в ієрархічно організований функціональний композит. Найбільший інтерес у цьому контексті становлять кальцій-фосфатні, кальцій-карбонатні та змішані гібридні системи, здатні відтворювати не тільки склад, а й структурну логіку природних біомінералів [12; 14].

Провідне місце серед регенеративних матеріалів посідають композити на основі фосфатів кальцію, насамперед карбонатзаміщених апатитів, аморфного фосфату кальцію та їхніх комбінацій з полімерними матрицями. Їхня перевага полягає в можливості тонкого керування розчинністю, фазовим складом, пористістю й міжфазною взаємодією. Такі системи активно розглядають для кісткової регенерації, остеоінтеграції імплантатів і тканинної інженерії, де пріоритетом є відтворення природного мінералізованого мікрооточення, а не просто заповнення дефекту інертною речовиною [12; 29].

Окремий напрям становлять матриці, у яких мінералізація відбувається безпосередньо *in situ* і регулюється ферментами, білками або супрамолекулярними структурами. Такі системи дають змогу відтворювати власне послідовність біомінералоутворення – від стабілізації аморфних прекурсорів до переходу в упорядкований апатитовий стан. Для регенеративної медицини це забезпечує просторово-часовий контроль мінералізації, що зближує штучний матеріал з природними механізмами формування твердих тканин [14; 29].

У стоматологічному матеріалознавстві біоінспіровані системи найвиразніше виявлені у дослідженні ремінералізації емалі. Сучасні роботи свідчать, що білкові матриці можуть спрямовувати ріст апатитових кристалів, частково відновлюючи структурну організацію людської емалі та її механічні властивості. Паралельно розвиваються керамінові й пептидні системи, здатні створювати умови для впорядкованого апатитового росту за фізіологічних умов. Це робить їх перспективними для створення нових покриттів і регенеративних стоматологічних матеріалів [10; 20].

Ефективність біоінспірованих композитів визначена контролем кристалохімічних параметрів – фазового складу, ступеня кристалічності, характеру заміщень і текстурної організації мінеральної фази. Саме тому сучасні регенеративні матеріали проєктують як керовані органо-мінеральні системи, у яких властивості програмуються через режим мінералоутворення. У цьому полягає одна з головних прикладних перспектив сучасної біомінералогії [12; 29].

Еволюційні й екологічні аспекти біомінералогії визначають її значення не тільки як науки про механізми фазоутворення, а й як важливого інструмента для інтерпретації геологічної історії та сучасних біогеохімічних процесів. Біогенне мінералоутворення є однією з ключових еволюційних інновацій, що забезпечила виникнення скелетних структур і суттєво вплинула на взаємодію організмів з довкіллям. У цьому контексті біогенні мінеральні фази стають активними учасниками глобальних циклів вуглецю, кальцію, кремнію, фосфору, заліза й сірки [5; 15].

Екологічне значення біомінералогії особливо виразно виявлене у процесах біоремедіації. Біологічно індуквана мінералізація здатна переводити розчинні форми токсичних

елементів у порівняно стійкі мінеральні фази, що знижує їхню міграційну здатність у природних водах. Цей механізм вважають перспективним методом іммобілізації важких металів і радіонуклідів через утворення вторинних карбонатних або фосфатних фаз. У мінералогічному аспекті це означає формування стабільних геохімічних бар'єрів, у яких поліаніони фіксуються безпосередньо у структурі біогенних мінералів. Сучасним прикладом такого підходу є мікробно- та ферментативно-індуковане осадження карбонатів, що їх розглядають як перспективні інструменти екологічної інженерії, стабілізації ґрунтів і контрольованої іммобілізації забруднювачів [8; 15].

Не менш важливим є значення біогенних мінеральних фаз як архівів палеосередовища. Кристалохімічний та ізотопний склад біогенних кальциту й арагоніту в скелетах коралів, форамініфер і молюсків використовують для реконструкції параметрів давніх басейнів. Особливу роль у палеоокеанографії відіграють ізотопні співвідношення $\delta^{18}\text{O}$ та $\delta^{13}\text{C}$ як індикатори температури й циклу вуглецю, а також мікроелементні проксі, зокрема Mg/Ca та Sr/Ca, що відображають хімізм морської води. Коректність таких реконструкцій безпосередньо залежить від розуміння механізмів vital effect – біологічно зумовлених відхилень у входженні ізотопів і домішок до структури мінералу. Отже, біомінералогічний аналіз є необхідною умовою для верифікації палеокліматичних моделей [5; 26].

Еволюційні й екологічні аспекти біомінералогії замикають логіку дисципліни від молекулярного контролю нуклеації до планетарних циклів речовини. Біогенні мінеральні фази є одночасно і активними учасниками сучасних геохімічних процесів, і надійними носіями інформації про минулі стани біосфери, поєднуючи мінералогічний, геохімічний та палеоекологічний підходи [5; 15; 26].

У табл. 2 узагальнено основні напрями сучасних досліджень у біомінералогії.

Таблиця 2

Основні напрями сучасних досліджень у біомінералогії

Напрямок досліджень	Головний науковий фокус	Типові об'єкти / біогенні мінеральні фази	Джерело
Фундаментальні механізми і неklasична кристалізація	Нуклеація, ріст кристалів, роль органічної матриці, аморфні попередники, переднуклеаційні кластери, органо-мінеральні інтерфейси	ACC, ACP, колаген-апатитові системи, ієрархічно організовані біогенні композити	[4; 7; 17; 21]
Карбонатні й фосфатні системи вищих організмів	Кристалохімія, текстурна організація й функціональні властивості біогенних карбонатів і фосфатів	Кальцит, арагоніт, вітерит, біогенний апатит, кісткова тканина, емаль, дентин	[5; 17; 21]
Мікробна біомінералізація	ВІМ, ВСМ, роль клітинних поверхонь та EPS, внутрішньоклітинна мінералізація, мікробно-опосередковані геохімічні трансформації	Магнетит, грейгіт, карбонати, фосфати, оксиди й гідроксиди заліза	[8; 15; 24]
Патологічне мінералоутворення	Ектопічна кальцифікація, запально-асоційоване фазоутворення, мінералогічна характеристика патологічних конкрементів	Судинні кальцифікати, уроліти, кальцифікація м'яких тканин, дентальний камінь	[18; 22; 25; 28]

Продовження таблиці 2

Біоміметичні та матеріалознавчі напрями	Використання принципів природної біомінералізації для створення функціональних матеріалів, скафолд-систем і регенеративних технологій	Біоінспіровані апатитові композити, мінералізовані матриці, матеріали для ремінералізації та тканинної інженерії	[9; 10; 12; 14]
Аналітичні та мультимасштабні підходи	Поєднання морфологічних, спектроскопічних і високороздільних методів для вивчення біогенних фаз на мікро-, нано- й атомному рівнях	SEM, TEM, cryo-TEM, XRD, FTIR, Raman, STXM, APT, MicroED	[11; 13; 23]
Екологічні, еволюційні та біогеохімічні аспекти	Роль біомінералів у глобальних циклах речовини, реконструкції палеосередовища, біоремедіації та кліматичних застосуваннях	Біогенні карбонати, залізовмісні мінерали, мікробно-індуковані карбонатні й фосфатні фази	[5; 15; 19]

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Виконаний аналіз засвідчив, що сучасна біомінералогія сформувалася як міждисциплінарна галузь, у межах якої поєднані мінералогічний, геохімічний, біологічний, медичний і матеріалознавчий підходи до вивчення біогенних мінеральних фаз. Біогенне мінералоутворення слід розглядати не як пасивне осадження солей, а як складний контрольований процес, у якому визначальну роль відіграють органічні матриці, молекулярний і клітинний контроль, аморфні та метастабільні попередники, поліморфний вибір і багаторівнева текстурна організація мінеральної фази.

До ключових напрямів сучасної біомінералогії належать дослідження фундаментальних механізмів фазоутворення, ролі неklasичної кристалізації, удосконалення мультимасштабних методів аналізу, вивчення карбонатних і фосфатних систем вищих організмів, мікробної біомінералізації, патологічного мінералоутворення та прикладних біоміметичних матеріалів.

Показано, що біогенні мінеральні фази є не тільки продуктами життєдіяльності організмів, а й активними учасниками глобальних біогеохімічних циклів, важливими архівами палеосередовища та перспективною основою для створення функціональних матеріалів. Патологічні кальцифікати й конкременти доцільно трактувати як моделі порушеного фазоутворення, тоді як біоінспіровані композити відображають перехід від копіювання форми до відтворення логіки природного мінералоутворення.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком корелятивних високороздільних методів, зокрема *in situ* та *in operando* підходів, поглибленням кристалохімічного аналізу біогенних фаз, уточненням ролі аморфних попередників і органо-мінеральних інтерфейсів у механізмах фазоутворення, а також із розширенням екологічно керованих біомінералізаційних технологій у біоремедіації, матеріалознавстві та медицині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Arshynnikov R. S., Kulygina V. N., Drohomiretska M. S., Poberezhna H. M., Polyanyk N. Y., Sukhomlynova T. Y. Morphological study of hard dental tissue condition with various types of dental deposits. *Reports of Morphology*. 2024. Vol. 30. No. 4. P. 5–11. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(4\)-01](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(4)-01)

2. Bartholdy B. P., Velsko I. M., Gur-Arieh S., Fagnäs Z., Warinner C., Henry A. G. Assessing the validity of a calcifying oral biofilm model as a suitable proxy for dental calculus. *bioRxiv*. 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.05.23.541904>
3. Bazin D., Carpentier X., Brocheriou I., Dorfmueller P., Aubert S., Chappard C., Thiaudière D., Reguer S., Waychunas G., Jungers P., Daudon M. Revisiting the localisation of Zn²⁺ cations sorbed on pathological apatite calcifications made through X-ray absorption spectroscopy. *Biochimie*. 2009. Vol. 91. No. 10. P. 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.05.009>
4. Benzerara K., Miot J., Morin G., Ona-Nguema G., Skouri-Panet F., Féraud C. Significance, mechanisms and environmental implications of microbial biomineralization. *Comptes Rendus Geoscience*. 2011. Vol. 343. No. 2–3. P. 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.002>
5. Branson O., de Nooijer L. J. Calcium carbonate biomineralisation: Insights from trace elements. *Elements*. 2025. Vol. 21. No. 2. P. 105–111. <https://doi.org/10.2138/gselements.21.2.105>
6. Cölfen H. Biomineralization: A crystal-clear view. *Nature Materials*. 2010. Vol. 9. No. 12. P. 960–961. <https://doi.org/10.1038/nmat2911>
7. DiCecco L.-A., Gao R., Gray J. L., Kelly D. F., Sone E. D., Grandfield K. Liquid transmission electron microscopy for probing collagen biomineralization. *Nano Letters*. 2023. Vol. 23. No. 21. P. 9760–9768. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02344>
8. Eltarahony M., Jestrzemeski D., Hassan M. A. A comprehensive review of recent advancements in microbial-induced mineralization: Biosynthesis and mechanism, with potential implementation in various environmental, engineering, and medical sectors. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 978. Art. 179426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179426>
9. Guo J., Gao F., Zhang F., Zhao X., Zhao R. Biomineralization-driven advances in materials science and biomedical engineering. *JACS Au*. 2025. Vol. 5. No. 9. P. 4134–4154. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00669>
10. Hasan A., Chuvilin A., Van Teijlingen A., Rouco H., Parmenter C., Venturi F., Fay M., Greco G., Pugno N. M., Ruben J., Edwards-Gayle C. J. C., Myers B., Dreveny I., Cowieson N., Winter A., Gamea S., Walboomers X. F., Hussain T., Rodríguez-Cabello J. C., Rawson F., Tuttle T., Elsharkawy S., Banerjee A., Habelitz S., Mata A. Biomimetic supramolecular protein matrix restores structure and properties of human dental enamel. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16. No. 1. Art. 9434. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64982-y>
11. Holmes N. P., Chen Y.-S., Niu R., McGuire H., Cairney J. M., Chen E. Y.-S. Probing the near-atomic scale structure of hard biological materials with atom probe tomography: A review. *Solid State and Materials Science*. 2025. Vol. 39. Art. 101241. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2025.101241>
12. Hu H., Lin Y., Yang B., Wen X., Ma P., Loh X. J., Luo Z., Li Z., Wu Y.-L. Biomineralization-inspired functional biomaterials: From principles to practice. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 504. Art. 158624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158624>
13. Karim B., Görgen S., Athar K. M., Chauvat F., March K., Menguy N., Lopez-Adams E., Cordier L., Labarre J., Belhadj O., Duprat E., Poinot M., El Albani A., Gérard E., Jebbar M., Benzerara K. Quantitative mapping of calcium cell reservoirs in cyanobacteria at the submicrometer scale. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. 2023. Vol. 267. Art. 147369. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2023.147369>
14. Kim S. H., Ki M.-R., Han Y., Pack S. P. Biomineral-based composite materials in regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. No. 11. Art. 6147. <https://doi.org/10.3390/ijms25116147>

15. Li S., Li C., Gao X., Zhu M., Li H., Wang X. Biomineralization mediated by iron-oxidizing microorganisms: Implication for the immobilization and transformation of heavy metals in AMD. *Minerals*. 2025. Vol. 15. No. 8. Art. 868. <https://doi.org/10.3390/min15080868>
16. Lowenstam H. A., Weiner S. On biomineralization. New York: Oxford University Press, 1989. 324 p.
17. Micheletti C., Shah F. A. Bone hierarchical organization through the lens of materials science: Present opportunities and future challenges. *Bone Reports*. 2024. Vol. 22. Art. 101783. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2024.101783>
18. Popova E., Tkachev S., Shapoval A., Karpenko A., Lee Y., Chislov P., Ershov B., Golub D., Galechyan G., Bogodov D., Akovantseva A., Gafarova E., Musaelyan R., Schekleina M., Clark S., Ali S., Dymov A., Vinarov A., Glybochko P., Timashev P. Kidney stones as minerals: How methods from geology could inform urolithiasis treatment. *Journal of Clinical Medicine*. 2025. Vol. 14. No. 3. Art. 997. <https://doi.org/10.3390/jcm14030997>
19. Sanyal S. K., Scott C., Nagaraj V., Speight R., Ahmed F. H. Harnessing the biomolecular mechanisms of marine biomineralisation for carbon sequestration. *Biotechnology Advances*. 2025. Vol. 83. Art. 108644. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108644>
20. Sedek E. M., Holiel A. A. Next-generation strategies for enamel repair and regeneration: Advances in biomaterials and translational challenges. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. 2025. Vol. 22. No. 6. P. 771–789. <https://doi.org/10.1007/s13770-025-00725-w>
21. Shah F. A. Revisiting the physical and chemical nature of the mineral component of bone. *Acta Biomaterialia*. 2025. Vol. 196. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.01.055>
22. Song J.-H., Liu M.-Y., Ma Y.-X., Wan Q.-Q., Li J., Diao X.-O., Niu L.-N. Inflammation-associated ectopic mineralization. *Fundamental Research*. 2023. Vol. 3. No. 6. P. 1025–1038. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.04.020>
23. Trzybiński D., Ziemniak M., Olech B., Sutula S., Góral T., Bemowska-Kalabun O., Brzost K., Wierzbicka M., Woźniak K. MicroED: Unveiling the structural chemistry of plant biomineralisation. *Molecules*. 2024. Vol. 29. No. 20. Art. 4916. <https://doi.org/10.3390/molecules29204916>
24. Wan J., Ji R., Liu J., Ma K., Pan Y., Lin W. Biomineralization in magnetotactic bacteria: From diversity to molecular discovery-based applications. *Cell Reports*. 2024. Vol. 43. No. 12. Art. 114995. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114995>
25. Wei Y., Dang G.-P., Ren Z.-Y., Wan M.-C., Wang C.-Y., Li H.-B., Zhang T., Tay F. R., Niu L.-N. Recent advances in the pathogenesis and prevention strategies of dental calculus. *npj Biofilms and Microbiomes*. 2024. Vol. 10. No. 1. Art. 56. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00529-1>
26. Weiner S., Dove P. M. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2003. Vol. 54. No. 1. P. 1–29. <https://doi.org/10.2113/0540001>
27. Yang W., Wang B., Ren Y., Li W., Li X. Multiscale characterization of bone mineralization reveals an amorphous–nanocrystalline apatite phase intimately associated with collagen. *Materials & Design*. 2026. Vol. 261. Art. 115362. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115362>
28. Yao J., Farrar C. T., Aikawa E., Sosnovik D. E., Moon B. F., Kulkarni A., Ackerman J. L. Ex vivo phosphorus-31 solid-state magnetic resonance spectroscopy identifies compositional differences between bone mineral and calcified vascular tissues. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2025. Vol. 12. Art. 1689116. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1689116>
29. Zhao Q., He M., Shu J., Huang Y., Chen J., Guo W. Enzyme-regulated biomineralization: Biological functions and advanced biomaterials for tissue regeneration. *Bioactive Materials*. 2026. Vol. 59. P. 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.12.041>

REFERENCES

1. Arshynnikov, R. S., Kulygina, V. N., Drohomyyretska, M. S., Poberezhna, H. M., Polyanyk, N. Y., & Sukhomlynova, T. Y. (2024). Morphological study of hard dental tissue condition with various types of dental deposits. *Reports of Morphology*, 30 (4), 5–11. [https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30\(4\)-01](https://doi.org/10.31393/morphology-journal-2024-30(4)-01)
2. Bartholdy, B. P., Velsko, I. M., Gur-Arieh, S., Fagnäs, Z., Warinner, C., & Henry, A. G. (2023). Assessing the validity of a calcifying oral biofilm model as a suitable proxy for dental calculus. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.05.23.541904>
3. Bazin, D., Carpentier, X., Brocheriou, I., Dorfmueller, P., Aubert, S., Chappard, C., Thiaudière, D., Reguer, S., Waychunas, G., Jungers, P., & Daudon, M. (2009). Revisiting the localisation of Zn²⁺ cations sorbed on pathological apatite calcifications made through X-ray absorption spectroscopy. *Biochimie*, 91 (10), 1294–1300. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.05.009>
4. Benzerara, K., Miot, J., Morin, G., Ona-Nguema, G., Skouri-Panet, F., & Féraud, C. (2011). Significance, mechanisms and environmental implications of microbial biomineralization. *Comptes Rendus Geoscience*, 343 (2–3), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.002>
5. Branson, O., & de Nooijer, L. J. (2025). Calcium carbonate biomineralisation: Insights from trace elements. *Elements*, 21 (2), 105–111. <https://doi.org/10.2138/gselements.21.2.105>
6. Cölfen, H. (2010). Biomineralization: A crystal-clear view. *Nature Materials*, 9 (12), 960–961. <https://doi.org/10.1038/nmat2911>
7. DiCecco, L.-A., Gao, R., Gray, J. L., Kelly, D. F., Sone, E. D., & Grandfield, K. (2023). Liquid transmission electron microscopy for probing collagen biomineralization. *Nano Letters*, 23 (21), 9760–9768. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c02344>
8. Eltarahony, M., Jestrzemeski, D., & Hassan, M. A. (2025). A comprehensive review of recent advancements in microbial-induced mineralization: Biosynthesis and mechanism, with potential implementation in various environmental, engineering, and medical sectors. *Science of the Total Environment*, 978, 179426. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179426>
9. Guo, J., Gao, F., Zhang, F., Zhao, X., & Zhao, R. (2025). Biomineralization-driven advances in materials science and biomedical engineering. *JACS Au*, 5 (9), 4134–4154. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00669>
10. Hasan, A., Chuvilin, A., van Teijlingen, A., Rouco, H., Parmenter, C., Venturi, F., Fay, M., Greco, G., Pugno, N. M., Ruben, J., Edwards-Gayle, C. J. C., Myers, B., Dreveny, I., Cowieson, N., Winter, A., Gamea, S., Walboomers, X. F., Hussain, T., Rodríguez-Cabello, J. C., Rawson, F., Tuttle, T., Elsharkawy, S., Banerjee, A., Habelitz, S., & Mata, A. (2025). Biomimetic supramolecular protein matrix restores structure and properties of human dental enamel. *Nature Communications*, 16 (1), 9434. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64982-y>
11. Holmes, N. P., Chen, Y.-S., Niu, R., McGuire, H., Cairney, J. M., & Chen, E. Y.-S. (2025). Probing the near-atomic scale structure of hard biological materials with atom probe tomography: A review. *Solid State and Materials Science*, 39, 101241. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2025.101241>
12. Hu, H., Lin, Y., Yang, B., Wen, X., Ma, P., Loh, X. J., Luo, Z., Li, Z., & Wu, Y.-L. (2024). Biomineralization-inspired functional biomaterials: From principles to practice. *Chemical Engineering Journal*, 504, 158624. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.158624>
13. Karim, B., Görgen, S., Athar, K. M., Chauvat, F., March, K., Menguy, N., Lopez-Adams, E., Cordier, L., Labarre, J., Belhadj, O., Duprat, E., Poinso, M., El Albani, A., Gérard, E., Jebbar, M., & Benzerara, K. (2023). Quantitative mapping of calcium cell reservoirs in cyanobacteria at the submicrometer scale. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 267, 147369. <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2023.147369>
14. Kim, S. H., Ki, M.-R., Han, Y., & Pack, S. P. (2024). Biomineral-based composite materials in regenerative medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 25 (11), 6147. <https://doi.org/10.3390/ijms25116147>

15. Li, S., Li, C., Gao, X., Zhu, M., Li, H., & Wang, X. (2025). Biomineralization mediated by iron-oxidizing microorganisms: Implication for the immobilization and transformation of heavy metals in AMD. *Minerals*, *15* (8), 868. <https://doi.org/10.3390/min15080868>
16. Lowenstam, H. A., & Weiner, S. (1989). *On biomineralization*. Oxford University Press.
17. Micheletti, C., & Shah, F. A. (2024). Bone hierarchical organization through the lens of materials science: Present opportunities and future challenges. *Bone Reports*, *22*, 101783. <https://doi.org/10.1016/j.bonr.2024.101783>
18. Popova, E., Tkachev, S., Shapoval, A., Karpenko, A., Lee, Y., Chislov, P., Ershov, B., Golub, D., Galechyan, G., Bogoevov, D., Akovantseva, A., Gafarova, E., Musaelyan, R., Schekleina, M., Clark, S., Ali, S., Dymov, A., Vinarov, A., Glybochko, P., & Timashev, P. (2025). Kidney stones as minerals: How methods from geology could inform urolithiasis treatment. *Journal of Clinical Medicine*, *14* (3), 997. <https://doi.org/10.3390/jcm14030997>
19. Sanyal, S. K., Scott, C., Nagaraj, V., Speight, R., & Ahmed, F. H. (2025). Harnessing the biomolecular mechanisms of marine biomineralisation for carbon sequestration. *Biotechnology Advances*, *83*, 108644. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108644>
20. Sedek, E. M., & Holiel, A. A. (2025). Next-generation strategies for enamel repair and regeneration: Advances in biomaterials and translational challenges. *Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, *22* (6), 771–789. <https://doi.org/10.1007/s13770-025-00725-w>
21. Shah, F. A. (2025). Revisiting the physical and chemical nature of the mineral component of bone. *Acta Biomaterialia*, *196*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2025.01.055>
22. Song, J.-H., Liu, M.-Y., Ma, Y.-X., Wan, Q.-Q., Li, J., Diao, X.-O., & Niu, L.-N. (2023). Inflammation-associated ectopic mineralization. *Fundamental Research*, *3* (6), 1025–1038. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.04.020>
23. Trzybiński, D., Ziemniak, M., Olech, B., Sutuła, S., Góral, T., Bemowska-Kalabun, O., Brzost, K., Wierzbicka, M., & Woźniak, K. (2024). MicroED: Unveiling the structural chemistry of plant biomineralisation. *Molecules*, *29* (20), 4916. <https://doi.org/10.3390/molecules29204916>
24. Wan, J., Ji, R., Liu, J., Ma, K., Pan, Y., & Lin, W. (2024). Biomineralization in magnetotactic bacteria: From diversity to molecular discovery-based applications. *Cell Reports*, *43* (12), 114995. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114995>
25. Wei, Y., Dang, G.-P., Ren, Z.-Y., Wan, M.-C., Wang, C.-Y., Li, H.-B., Zhang, T., Tay, F. R., & Niu, L.-N. (2024). Recent advances in the pathogenesis and prevention strategies of dental calculus. *npj Biofilms and Microbiomes*, *10* (1), 56. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00529-1>
26. Weiner, S., & Dove, P. M. (2003). An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, *54* (1), 1–29. <https://doi.org/10.2113/0540001>
27. Yang, W., Wang, B., Ren, Y., Li, W., & Li, X. (2026). Multiscale characterization of bone mineralization reveals an amorphous–nanocrystalline apatite phase intimately associated with collagen. *Materials & Design*, *261*, 115362. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.115362>
28. Yao, J., Farrar, C. T., Aikawa, E., Sosnovik, D. E., Moon, B. F., Kulkarni, A., & Ackerman, J. L. (2025). Ex vivo phosphorus-31 solid-state magnetic resonance spectroscopy identifies compositional differences between bone mineral and calcified vascular tissues. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, *12*, 1689116. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1689116>
29. Zhao, Q., He, M., Shu, J., Huang, Y., Chen, J., & Guo, W. (2026). Enzyme-regulated biomineralization: Biological functions and advanced biomaterials for tissue regeneration. *Bioactive Materials*, *59*, 135–160. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2025.12.041>

MODERN RESEARCH DIRECTIONS IN BIOMINERALOGY

Sviatoslav Loiko

Sviatoslav.Loiko@lnu.edu.ua

*Ivan Franko National University of Lviv,
4, Hrushevskoho St., Lviv, Ukraine, 79005*

Biomaterialogy is currently one of the most dynamic interdisciplinary fields, integrating the methodological approaches of mineralogy, geochemistry, molecular biology, medicine, and materials science. Its relevance is driven by the rapid development of high-precision analytical methods and by the need for a deeper understanding of the fundamental processes governing the interaction between living systems and mineral matter throughout Earth's geological history.

This article summarizes current research directions in biomaterialogy and analyses the main trends in the development of this field. Particular attention is given to biomaterialization mechanisms as processes of inorganic solid-phase formation under the direct influence of biological factors. The essential differences between biologically induced mineralization (BIM), characteristic mainly of microbial systems, and biologically controlled mineralization (BCM), typical of higher organisms, are examined.

The role of organic matrices, including specific proteins and polysaccharides, in nucleation, oriented crystal growth, and the spatial organization of crystals is analysed, as these factors ensure the formation of biogenic minerals with unique hierarchical architectures and specific physicochemical properties. The paper considers the principal natural model systems, including biogenic calcium carbonates (calcite, aragonite, and vaterite in the skeletons of invertebrates and coccolithophores), calcium phosphates (particularly hydroxyapatite in bone tissue), as well as biogenic opal in diatoms and magnetite in magnetotactic bacteria. Special attention is paid to microbial biomaterialization as an important factor in the geochemical transformation of the environment, to pathological mineralization in the human body, and to biomimetic approaches to the design of new functional materials.

Modern biomaterialogy is of great importance for the reconstruction of palaeoecological conditions, the development of regenerative medicine, and the study of biogeochemical processes. The prospects for a transition toward multiscale investigations of matter at the micro-, nano-, and atomic levels using SEM, TEM, XRD, infrared spectroscopy, and synchrotron radiation are outlined. It is concluded that the integration of these approaches provides the foundation for understanding the regularities of mineral formation in living and non-living nature and for revealing the role of biota in global geochemical cycles.

Key words: biomaterialogy, biomaterialization, biogenic minerals, microbial biomaterialization, pathological mineralization, biomimetic materials, hydroxyapatite, crystallochemistry of biogenic phases, nanostructure of minerals.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 24.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.04.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026