

**Г. І. Рудько**, *д-р геол.-мінерал. наук, д-р геогр. наук, д-р техн. наук, професор*  
(Державна комісія України по запасах корисних копалин), м. Київ, Україна,  
office@dkz.gov.ua

## БЕЗКИСНЕВИЙ ПЕРІОД В ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ ТА ЖИТТЯ В НЬОМУ

*Розглянуто розвиток планети Земля в контексті її становлення, зародження первісної атмосфери та гідросфери. Головні етапи еволюції атмосфери відбулися в архей. Описано можливі механізми зародження життя, їхній вплив на формування та зміни довкілля. Подано коротку характеристику найдавніших відкладів, складених археобактеріями та ціанобактеріями. В архей розвитку аноксигенного, а потім оксигенного фотосинтезу внаслідок високої біологічної активності прокариотів поступово перетворив анаеробну відновну атмосферу в аеробну кисневу, давши поштовх для розвитку нових досконаліших мікроорганізмів – еукариотів.*

**Ключові слова:** *первісна атмосфера, археобактерії, панспермія, мікрофосилії докембрію, гідротерми, фотосинтез.*

Дослідження раннього етапу розвитку нашої планети є одним з найцікавіших і важливих завдань, які дають змогу зрозуміти механізм формування тих чи інших життєвих форм та екосистем, їхню роль і вплив на зміну умов довкілля.

Головною метою вивчення докембрійських порід (вік понад 2,5 млрд років тому) було і є встановлення умов, які панували на поверхні Землі протягом перших двох мільярдів років її історії. Нещодавні значні досягнення в галузі геохімії ізотопів і геохімічного мікроаналізу дозволили по-новому поглянути на перші декілька сотень мільйонів років історії Землі і відсунули часові межі виникнення первинного життя на раніший термін.

Найбільш ранній підрозділ докембрію – Гадей – почався з утворенням Землі з пилу й газу, що оберталися довкола Сонця біля 4,6 млрд років тому, й охоплював період до 4,0–3,8 млрд років тому, тобто перші 600–800 млн років історії нашої планети. Земля відразу після свого утворення

була порівняно холодним космічним тілом – температура в її надрах ніде не перевищувала температури плавлення речовини. Вона мала досить однорідний склад, не було ані ядра, ані земної кори. Рельєф нагадував побиту метеоритами поверхню Місяця, проте був згладжений сильними й майже безперервними припливними землетрусами та складений тільки монотонною темно-сірою первинною речовиною, укритою зверху товстим шаром реголіту. Виверження вулканів та метеоритні дощі з космосу відбувалися постійно.

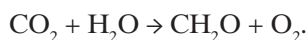
Повітря було гарячим, густим, насиченим парами, сповненим пилом й попелом, у складі якого переважали вуглекислий газ та водяна пара, зі слідами азоту й сполук сірки. Будь-які породи, які утворювалися від охолодження лави, швидко вкривалися її новими потоками або розривалися на шматки під час метеоритного бомбардування.

Атмосфера виникла в початковій періоді формування земної кори. Відомо дві гіпотези її утворення. Згідно з першою,

початок цього процесу поклало виділення газів під час зіткнення планетозималей. Атмосферу розглядають як похідну первинного матеріалу, що залишився від спрощених флюїдів, які колись оточували розплавлену Землю. За другою гіпотезою, атмосфера – це вторинне утворення, що виникло під час вивільнення легких хімічних елементів і сполук з лави, яка вивергалася на земну поверхню. Завдяки цій лаві була створена первинна земна кора. Більшість учених дотримується другої гіпотези походження атмосфери, вважаючи, що інакше будь-яка первинна атмосфера на ранній стадії розвитку Землі була б порівняно швидко нею втрачена.

Склад цієї атмосфери дуже відрізнявся від сучасної й складався переважно з газів, що накопичуються в атмосфері від дегазації верхньої мантії. Окис вуглецю (CO), двоокис вуглецю (CO<sub>2</sub>), водяна пара (H<sub>2</sub>O), метан (CH<sub>4</sub>), невелика кіль-

кість азоту (N) і водень (H) переважали в газовому складі, також виділялися H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub>S, H<sub>2</sub>S, HCl, HF та невелика кількість інертних газів. Атмосфера мала відновний характер і була майже позбавлена вільного кисню (рис. 1), незначна його частина виникала у верхніх шарах атмосфери внаслідок дисоціації молекул вуглекислого газу й води:



Про брак кисню в стародавній атмосфері й океані свідчить наявність у великій кількості не тільки у вивержених, але й у осадових гірських породах елементів і сполук, що не зазнали окиснення. Так, наприклад, в катархейських карбонатних породах є багато незмінених зерен піриту й уранініту й немає окисненої сірки. Усі ці породи характеризуються чималою величиною співвідношення закисного заліза до окисного.

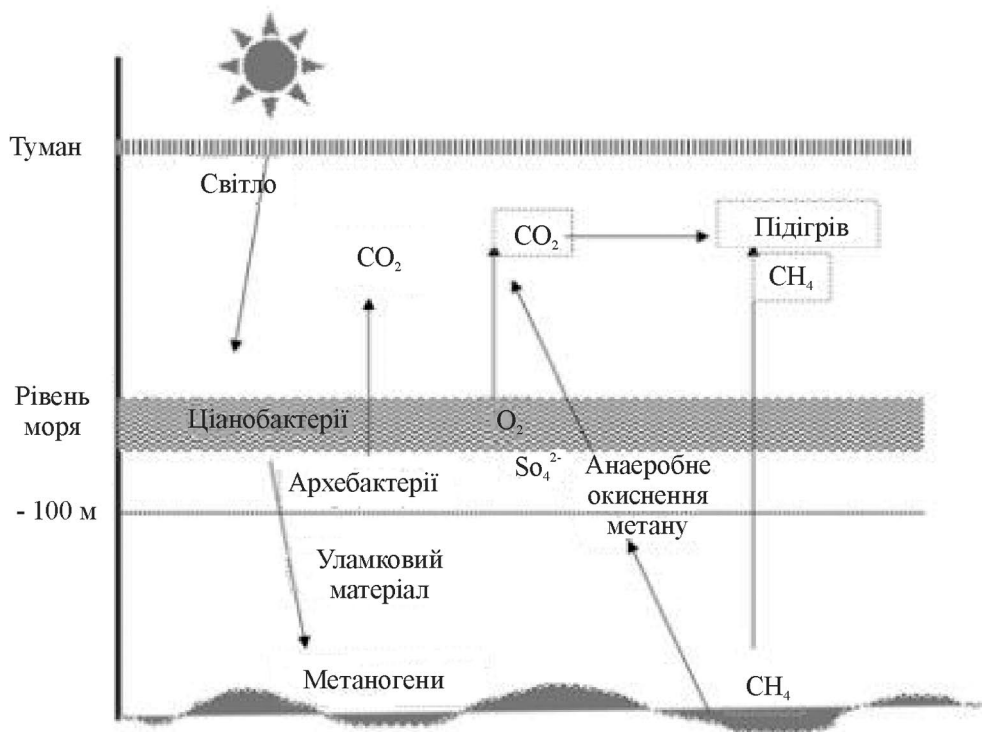


Рис. 1. Атмосфера архейського еону [7]

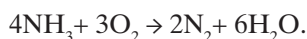
З огляду на те, що вільного кисню в атмосфері тривалий час бракувало, озонного екрана теж не було. Атмосфера легко пропускала ультрафіолетове випромінювання Сонця. У таких умовах не могло бути й мови про можливе існування будь-яких живих організмів на суші. Під впливом ультрафіолетового випромінювання у водах морів і океанів почали утворюватися складні органічні сполуки аж до амінокислот. Передбачається, що на початку докембрію, атмосферний цикл двоокису вуглецю був подібний до сучасного, але маса CO<sub>2</sub> була в 100 або більше разів вищою. Імовірно, підвищений уміст діоксиду вуглецю, метану, водяної пари сприяв затримці теплового випромінювання. Це забезпечило досить високу температуру поверхні з порівняно низькою світністю Сонця в архей і протерозой, яка була на 28% нижчою, ніж у цей час [4]. За останні 4 млрд років світність Сонця поступово збільшувалась, а маса діоксиду вуглецю знижувалась через скорочення швидкості дегазації верхньої мантії Землі. Ці два суперечливі процеси забезпечили збереження стійкого клімату Землі протягом багатьох мільйонів років.

У таблиці наведено дані про склад давньої атмосфери Землі, Венери та Марса, що демонструє майже ідентичні умови на цих планетах у перші 2 млрд років їхнього існування.

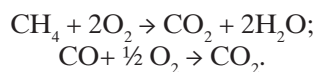
Як видно, початкові атмосфери на всіх указаних планетах були ледве не тотожні. Проте, оскільки Марс набагато менший,

аніж Венера й Земля, його надра ніколи не розігрівалися так сильно, як у цих планет, і тому їхня дегазація була менш значною. Велика частина газів, імовірно, ще захована всередині Марса. До того ж, оскільки його маса менша, сила тяжіння на ньому невелика, і тому він більшу частину своєї атмосфери розгубив у космічному просторі.

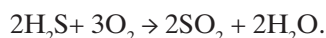
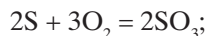
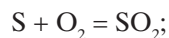
Вільний кисень спочатку витрачався на окиснення аміаку, і при цьому виділявся вільний азот:



Метан і окис вуглецю окисали до вуглекислоти, головна частина якої йшла в океан:



Сірка й сірководень окисали до сірчистого й сірчаного ангідриту:



В океані випадали карбонатні й сульфатно-карбонатні осади:

$\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3$  (вапняк), морська вода ставала хлоридно-карбонатно-сульфатною.

Походження вод гідросфери так само нерозривно пов'язано з історією летких речовин. Виділення останніх взаємопов'язане з магматичними процесами, тобто

**Таблиця. Склад древньої атмосфери планет Сонячної системи**

Показник	Планета		
	Земля	Венера	Марс
Азот, %	1,9	3,4	1,7
Кисень	сліди	сліди	сліди
Аргон, %	0,19	0,04	0,85
Діоксид вуглецю, %	98	96,5	98
Рівень первинного океану, м	3000	9	30
Тиск атмосферного повітря, бар	~ 70	88±3	~ 2

кожний вилив базальтової або андезитової лави виносив на поверхню Землі певну порцію води. Кількість такої ювенільної води під час вивержень сучасних вулканів коливається зазвичай у межах 3–5 %, а в низці випадків – до 8 % стосовно до маси вивержених порід.

Поверхня новонародженої Землі перевищувала 100 °С й вода деякий час у пароподібному стані формувала атмосферу. Зі зниженням температури, що ймовірно відбувалося в полярних областях, почалася конденсація води й утворення первинних водойм. Умови поверхні планети стали набувати ознак широтної зональності у зв'язку з особливостями розподілу сонячної радіації.

Поява гідросфери та атмосфери стала однією з вирішальних подій в історії Землі. Їхній розвиток ускладнив і диференціював процеси, що протікають у земній корі. Активно відбувалося перетворення гірських порід на земній поверхні. У безкисневій атмосфері вивітрювання проходило вельми своєрідно в умовах підвищених температур і високої кислотності природних вод і атмосфери.

Отже, появі життя та формуванню біосфери передували такі умови довкілля [3]: інтенсивний вулканізм, висока радіація, постійне перетворення первинної кори, низькорельєфна поверхня, щільна вторинна атмосфера з потужним умістом парникових газів, майже цілковитий брак вільного кисню та відповідно захисного озонового шару, мілководна гідросфера з високими концентраціями вулканічних газів та іонів важких металів у воді.

Уявлення про механізми зародження та становлення перших живих організмів пройшли довгий шлях, починаючи від гіпотези креаціонізму (створення божественною силою) до гіпотези панспермії (походження життя на Землі внаслідок перенесення з інших планет якихось зародків).

Оскільки нам ближча саме остання, розгляньмо її докладніше. На сьогодні гіпотеза панспермії є однією з найбільш обговорюваних теорій походження життя на Землі. Німецький учений Герман Ріхтер,

запропонувавши гіпотезу 1865 р., базував її на уявленнях про те, що розсіяні в космосі зародки життя (наприклад, спори мікроорганізмів) переносяться з одного небесного тіла на інше з метеоритами або під дією тиску світла, тобто первинна жива матерія має космічне походження. Прихильники цієї гіпотези підтримують думку про вічне існування життя й висувують ідею про його неземне походження. Згідно з гіпотезою спори бактерій та інших організмів могли бути занесені на Землю з метеоритами. Лабораторні дослідження підтверджують високу стійкість живих організмів до несприятливих впливів, зокрема низьких температур. Наприклад, спори й насіння рослин не гинули навіть під час тривалого витримання в рідкому кисні або азоті.

Близький до гіпотези панспермії й погляд астрономів Ч. Вікрасасінгха (Шрі-Ланка) і Ф. Хойла (Велика Британія). Вони вважають, що в космічному просторі, переважно в газових і пилових хмарах, у великій кількості присутні мікроорганізми, де вони, на думку вчених, і утворюються. Відтак ці мікроорганізми захоплювалися кометами, які потім, проходячи поблизу планет, розсіювали їх поверхнею. Потрапляючи в ідеальні умови, бактерії відновлювали свою активність і починався процес еволюції. Нещодавно група вчених з Кардіфського університету ідентифікувала в уламках метеорита, що впав наприкінці 2012 р. на територію Шрі-Ланки, фосилізовані рештки діатомових водоростей.

Палеонтолог Санкар Чаттерджи з Техаського технологічного університету (США) наголошує на тому, що зародки життя на Землі впали з неба й проросли вже тут, незважаючи на ті пекельні умови, які існували в Гадейському еоні [11].

Завдяки безупинному бомбардуванню земної поверхні кометами й метеоритами 4 млрд років тому, в епоху початкового формування планети, великі кратери, що виникали після зіткнень, не тільки містили воду й головні хімічні будматеріали для життя, але й були прекрасними тиглями,

в яких ці речовини концентрувалися й готувалися до створення перших найпростіших організмів.

Вивчивши три локації, в яких знайдено найстаріші скам'янілості, відомі науці, він дійшов висновку, що саме метеорити й комети занесли на Землю всі потрібні інгредієнти, а також створили відповідні умови для виникнення життя. Учений виділяє чотири стадії ускладнення еволюції клітин з органічних молекул через природні процеси: космічну, геологічну, хімічну й біологічну.

На космічному етапі (4,1–3,8 млрд років тому) Земля й уся Сонячна система разом з нею ще остаточно не сформувалися, проте щодня були під атакою астероїдів і комет. Тектоніка плит, вітер і вода давно стерли сліди того бурхливого часу, але давні кратери, що збереглися на поверхні Марса, Венери, Меркурія й Місяця, дають змогу припустити, наскільки важким було це бомбардування.

Ідеальними тиглями, на думку вченого, стали кратери діаметром близько 550 км. Метеорити, які їх утворили, були настільки великими, що мали б пробивати земну кору, створюючи тим самим вулкани й геотермальні жерла. Занесені ними речовини концентрувалися й полімеризувалися в цих умовах. На геологічній стадії кратери заповнилися водою, геотермальна активність нагріла її, виникла конвекція – вода невпинно рухалася, змішувалася, перетворюючися в добротний первісний “бульйон”.

Потім почалася хімічна стадія. Тепло збовтувало воду всередині кратерів, змішувало хімічні речовини й викликало трансформацію простих з'єднань у більші й складні. Цей процес тривав мільйони років, і врешті-решт з'явився генетичний код, а перші клітини почали ділитися. Фінальна стадія – біологічна – клітини, що виникли, навчилися зберігати, обробляти й передавати генетичну інформацію нащадкам.

Панспермія не відповідає на питання, як життя почалося, а лише пояснює способи його підтримки й поширення.

Дослідницька група, що складається з учених Оснабрюкського університету (Німеччина) і Національного інституту здоров'я в Бетесді (США), запропонувала дещо іншу версію походження перших клітинних організмів [6]. Вона полягає в тому, що перші живі організми на планеті, швидше за все, з'явилися не у Світовому океані, а в прісноводних водоймах вулканічного походження.

Життя – це послідовність окисно-відновних реакцій, тому місце й середовище його походження повинні бути там, де ці реакції постійно відбуваються. Лужні гідротермальні джерела забезпечують хорошу модель для розуміння ранньої хімічної еволюції, оскільки вони самі дещо подібні до живих систем.

Учені порівняли за складом іонів океан і прісноводні геотермальні водойми й зіставили їх з імовірним складом середовища проживання перших організмів на Землі, тобто з потребами протоклітин у хімічних елементах. Оскільки протоклітини не мали мембранних насосів, які відкачують непотрібні іони й накачують потрібні, то вони могли існувати тільки у відповідному хімічному середовищі. Порівняння показало, що первинний океан за балансом елементів не дуже підходив для підтримки життя. Набагато сприятливіші умови склалися в замкнутих прісноводних водоймах вулканічно-активних зон.

Можливо, деякі типи гідротермальних джерел, схожих на ті, що існують сьогодні, могли мати потрібний і достатній окисно-відновний потенціал (у вигляді  $\text{H}_2$ - $\text{CO}_2$  окисно-відновних пар) і каталітичні можливості у вигляді іонів перехідних металів. Це дало б початок органічному синтезові в певному місці в просторі й стабільно протягом геологічного часу – можливість породжувати хімічні складові життя. Після цього відбувся перехід від хімічних складових до живих клітин.

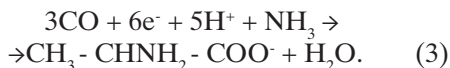
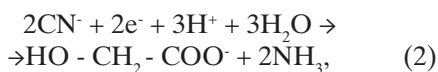
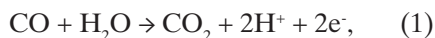
Прикладом такої водойми є геотермальні озера Єллоустоунського національного парку, на дно яких прибуває гаряча вода, збагачена хімічними елементами. За

розрахунками авторів [6], склад води геотермальних джерел найбільш близький до хімічного складу живої клітини. У них відповідна концентрація найважливіших біоелементів: натрію, калію, марганцю, цинку й фосфатів. На думку вчених, саме там склалися сприятливі умови для формування білків та інших біологічних молекул.

Такі озера, імовірно, утворилися з геотермального пару, збагаченого хімічними елементами під час проходження землею корою. Джерелом цього пару є дуже гарячий і багатий на різні речовини розсіл, що утворюється під час проходження через скельну породу геотермальної рідини, нагрітої магмою. Кипіння цього розсолу приводить до поділу на водну й парову фази, які можуть вибиватися на поверхню в різних місцях. У водну фазу переходять іони хлору, а ось у паровій залишаються аміак, сірководень і двоокис вуглецю. Крім цього, у парів насамперед зостаються погано розчинні у воді органічні молекули. І саме ця водна фаза могла стати “інкубатором життя”, стартовою точкою для подальшої еволюції. Тобто за цією гіпотезою, життя виникло на суші й уже потім завоювало океан.

Ще одні дослідження на користь цієї теорії провели хіміки з Мюнхенського технічного університету [5]. Учені показали, що в гідротермальних джерелах за температури понад 80 °С може відбуватися абіогенний синтез органічних речовин, у результаті якого з неорганічних сполук, таких як чадний газ (CO) і ціаністий водень (HCN), утворюються різноманітні органічні молекули, зокрема амінокислоти й найпростіші ліпіди. Каталізатором цих реакцій є присутні в гідротермальних водах тверді частинки, що містять залізо й нікель. Реакції особливо добре відбуваються за температури 80–120 °С. Умови, в яких проводилися експерименти, були максимально наближеними до реальності. На думку дослідників, такі умови (ураховуючи всі компоненти реакційної суміші) цілком могли існувати в гідротермальних джерелах на ранніх етапах розвитку Землі.

Головні хімічні реакції, що ведуть до абіогенної фіксації вуглецю й синтезу органіки, можна подати такими формулами:



Ці три реакції взаємопов'язані: у першій з них утворюються вільні протони й електрони, потрібні для двох інших, а в другій реакції (синтез гідроксикислот) утворюється аміак, нагальний для третьої реакції (синтез амінокислот). З підвищенням температури зростає загальний вихід кінцевих продуктів, а також частка амінокислот стосовно до гідроксикислоти.

Це відкриття – важливий аргумент на користь гіпотези, згідно з якою життя на Землі зародилося в гарячих вулканічних джерелах. Проте вони не суперечать теорії панспермії, оскільки ці гідротерми могли бути саме тим сприятливим субстратом, який дав змогу спорам відновитися та почати свою еволюцію.

Перші докази життя на нашій планеті простежуються приблизно через 100 млн років після її виникнення. Породи, що є одновіковими з першими живими організмами, ще не розкриті у відслоненнях і дістатися до них, можливо, вдасться в майбутньому через буріння глибоких свердловин. Геологічний розріз найдавніших осадових порід Землі свідчить, що вони утворилися з участю бактерій.

Бактеріальне життя колонізувало вулканічні гірські породи незабаром після їхнього підводного виверження майже 3,56 млрд років тому. Колонії бактерій активно розчиняли субстрат з вулканічного скла, витягуючи поживні речовини й утворюючи тунелі з трубчастих структур. Їхній діаметр становить 1–9 мкм (у середньому 4 мкм), а довжина сягає 200 мкм (у середньому 50 мкм). Ці структури простягаються далеко від початкових тріщин, через які колись морська вода потрапляла в породу. Деякі з них демонструють поділ

на сферичні сегменти діаметром 1–9 мкм. Властиві структурам характеристики (діапазон розмірів, морфологія й організація), засвідчують їхнє біогенне походження.

Рентгеновське дослідження свідчить про наявність вуглецю на стінках трубчастих структур. Наявність вуглецю, азоту, а також нуклеїнових кислот, пов'язаних з цими корозійними текстурами, і значення ізотопів вуглецю в бактеріально зміненому базальтовому склі підтверджують біогенне походження цих структур. Вони узгоджуються з утвореннями, знайденими в сучасній океанічній корі, і не мають абіогенних аналогів.

Різноманітні типи мікроорганізмів, урахувавши фототрофів і хемотрофів, мешкали серед узбережних вулканічних відкладів, що омивалися гідротермальними джерелами. Гідротермальні рідини були джерелами живлення для хемотрофних бактеріальних спільнот і, таким чи-

ном, сильно впливали на їхній розвиток і поширення. Насичені кварцом гідротермальні рідини також зробили свій внесок у швидку фосилізацію мікроорганізмів і скам'яніння осадів, фіксуючи різноманітність бактеріального життя.

Розгляньмо деякі такі типи порід детальніше.

**Кременисті сланці Апекс** (вік 3,465 млрд років, Північно-Західна Австралія). Знамениті відклади серії Варравуна знайшов професор В. Шопф. Базальти Апекс мають велику потужність і перешаровуються з тонкими сланцями (потужність сланцевого шару близько 10 м). Високі організми в доброму стані трапляються в уламковому матеріалі – округлих гранулах породи розміром близько міліметра, укріплених у сланці; таким чином, вони можуть бути ще давнішими (рис. 2). Ці гранули мають сліди тривалого транспортування. Збереженість знахідок погана, з тисяч фрагментів клітинних ниток, знайдених у

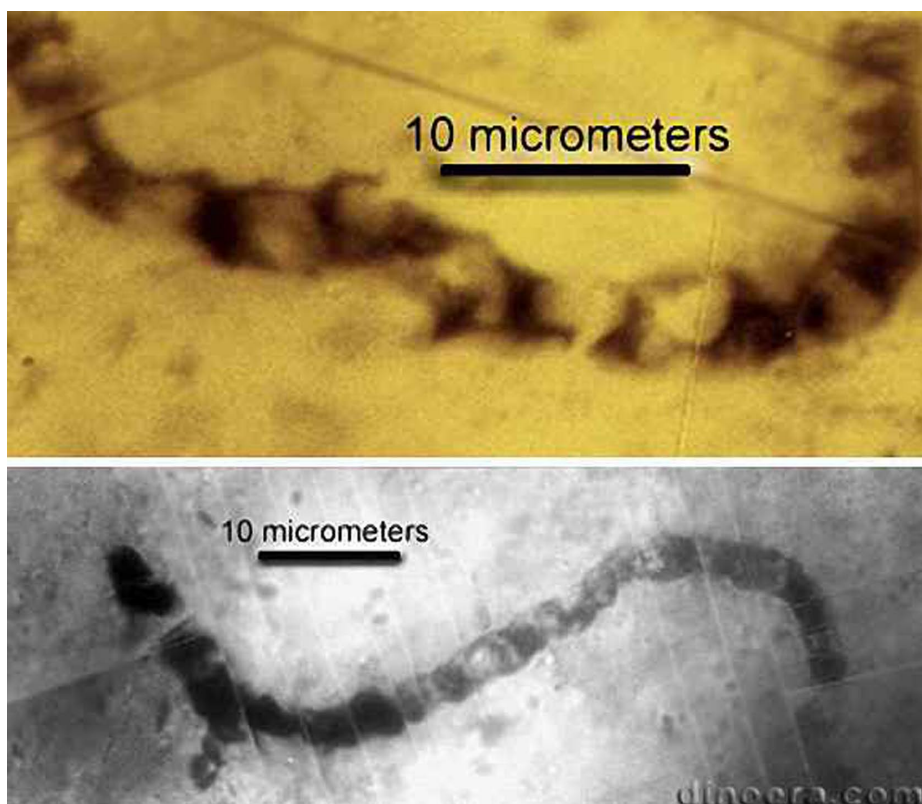


Рис. 2. Мікроскам'янілості, знайдені в кременистих сланцях Апекс [8]

відкладах, непогано збереглися тільки менш 1 %, але цього замало для детального вивчення й формального опису.

Місцевість Апекс являла собою морські узбережні райони, в які викидалися вулканічні лави. Розкидані вулканічні острови були облямовані відкладами гравію, пісковіку, замуленими ділянками. На місці знахідки мікрофосилій у минулому схоже були гідротермальні жили, які не сприяють хорошому станові знахідок. Однак, мікроорганізми, морфологічно схожі з нитками Апекс, цілком поширені в сучасних гідротермальних середовищах. Кременистий сланець Апекс розміщений у межах однієї такої шаруватості між попередніми й наступними потужними лавовими потоками та пов'язаний з гідротермальними системами, температура яких становить близько 250 °С.

Бактеріальні нитки з Апекс являють собою вуглецеві тривимірні клітинні залишки, заповнені дрібнозернистим кварцом. Самі організми є нитчастими, що складаються з особливих прокариотних клітин з органічними стінками, з'єднаних у нитку, й інтерпретуються як одноклітинні термофільні бактерії. Ці крихітні вуглецеві волокна є найдавнішими відомими мікрофосиліями. Діаметр волокон – 1–20 мкм, довжина – 30–40 мкм. Вони являють собою клітини, об'єднані в ланцюжок, що утворює бактеріальний кластер, і дуже нагадують сучасні ціанобактерії. Крім цього, знайдено сотні окремих одноклітинних сфероїдних структур, що нагадують колоїдні мікрофосилії. Характерно, що часу існування мікрофосилій сланців Апекс передують збільшення кількості кисню в атмосфері, оскільки саме ціанобактерії відповідальні за його появу. Ця біота була й гетеротрофною, й автотрофною.

**Група Онвервахт** (3,472–3,332 млрд років, Південна Африка). Дві формації з групи Онвервахт містять головні сліди життя: формація Хоогеног та формація Кромберг. Група Онвервахт розглядається як фрагмент архейської океанічної кори, що розвивалася в асоціації з суб-

дукцією й активними острівними дугами. Формація Хоогеног містить потужну послідовність толеїтних базальтів, базальтових коматітів, кислих вивержених порід і тонких сланцевих юнітів. Формація Кромберг складається з базальтів, коматітів і мафічних вулканічних порід з нечисленними чорними й шаруватими сланцями. Сліди життя трапляються й у базальтових і сланцевих породах.

Платформні відклади цих формацій осідали в мілководній і субаеральних зонах та в більш глибоководних зонах у супроводі базальтового вулканізму. Структурні свідчення бактеріальної активності в кременистих сланцях групи Онвервахт дуже поширені. Шари з тонкими вуглистами прошарками, що нагадують викопні бактеріальні мати, переважають у кременистих осадах здебільшого базальтових формацій (фото 1). У рідкісних випадках із шарами відкладів пов'язані волокнисті мікроскам'янілості діаметром 0,2–2,5 мкм. Порожнисті циліндричні нитки мають діаметр 1,2–1,4 мкм і довжину 10–150 мкм. Морфологія скам'янілостей передбачає спорідненість із сучасними ціанобактеріями, що мешкають на вапнякових матах, та бактеріями.

В осадових породах групи Онвервахт знайдено силіційовані сфери й паличкоподібні тіла розміром у кілька мікронів. Форма, розмір і розміщення в колоніях засвідчує наявність у них скам'янілих бактерій. Діаметр сфер становить близько 1 мкм. Їм властиві морфологічні характеристики кокоїдних бактерій і складна структура. Знайдено їх у тривимірних кластерних колоніях. Деякі структури нагадують спори.

Крім того, на поверхні відкладення осаду є позаклітинна біоплівка (позаклітинна полімерна речовина – глікокалікс), що являє собою відходи життєдіяльності й розпаду організмів, типова для бактеріальних колоній. Співвідношення ізотопів вуглецю свідчить про його біогенне походження. Передбачається наявність кисневих фотосинтезувальних організмів і сіркобактерій.



**Сланці Бак Риф** (3,445–3,416 млрд років, група Онвервахт, Південна Африка). Бак Риф іноді зараховують як складову частину у формацію Кромберг групи Онвервахт і розміщені біля її основи. Містять геобіологічне свідчення присутності бактеріальних матів (фото 2, рис. 3), обмежених фотичною зоною безкисневих океанів архею. Зростаючи, біоплівки й кварцові відклади домінували протягом росту матів, в яких містяться великі обсяги детритових вуглецевих зерен. Дрібний шельф давав змогу світлові досягати дна, заселеного бактеріальними колоніями, які розривалися періодичними штормами через невелику глибину.

Сланці Бак Риф не містять слідів гідротермальних джерел. Немає відкладів з гідротермальних рідин, і весь риф узгоджується з нормальним океанічним середовищем. Це, у свою чергу, свідчить про те, що весь вуглець був утворений живими організмами, а не занесений ззовні. Тут існували характерні для берегової лінії лагуни й водойми, які випаровувалися; мілководні області зі слідами впливу хвиль і глибші ділянки, де води були спокійними й осадки утворювали пласкі й регулярні шари.

У сланцях Бак Риф відносні поклади біомаси та осадового кварцу циклічно змінювалися, створюючи шарувату будову мату (чергування темних і світлих шарів потужністю 10–15 см). Світлі шари складаються з майже чистого мікрокристалічного кварцу. Темні містять відклади живих організмів – волокнистий вуглецевий матеріал і округлі детритні вуглисті частки.

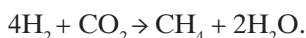
Органічні волокнисті структури подібні до знайдених у кременистих сланцях Апекс. Ширина волокон – до 1,5 мкм, довжина – близько 100 мкм. Волокна є залишками бактеріального мату, що утворилися в дрібних морських водах. Ці волокнисті шаруватості мають однорідну товщину й у темних, і у світлих шарах, близько 30 мкм. У деяких смугах вони становлять 30–90 % обсягу породи, що може свідчити про панування в геологічній платформі древніх сланців Бак Риф бактеріальної біомаси. Однак це були не ціанобактерії, а анаеробні фотосинтезатори. Ідентифікація добре збережених мікрофосилій у цих сланцях часто є досить проблематичною.



**Фото 1.** Строматоліти з групи Онвервахт, що являють собою бактеріальний мат [10]

Синтез кисню був першою хімічною реакцією, якою скористалися протобілки, щоб вижити. Але цей механізм продукування кисню здійснювався не в результаті випромінювання Сонця, а через використання теплової енергії вулканів.

Перші примітивні бактерії отримували енергію завдяки хемосинтезу (синтез органічних речовин з вуглекислого газу завдяки енергії окислення аміаку, сірководню й інших речовин). Одними з таких представників вважаються археї-метаногени [1]. Вони отримували енергію, відновлюючи вуглекислий газ до метану з допомогою молекулярного водню:



Потрібну кількість водню вони отримували в земній корі (унаслідок реакції перегрітих гірських порід з парами води), а вуглекислий газ постійно надходив з надр в атмосферу (наприклад, під час вивержень вулканів).

З'явилися вони близько 3,8–4,1 млрд років тому й були надзвичайно терmostійкими організмами. Однак активність метаногенів на прадавній Землі, можливо, була обмежена – лімітовим чинником міг служити, наприклад, дефіцит молекулярного водню.

Протягом першого мільярда років існування прокаріотної біосфери (приблизно від 4,1 до 3,2 млрд років тому) одні за одними з'являлися нові форми мікробів і нові способи отримання енергії.

Механізм фотосинтезу бактерії виробили, коли температура на поверхні Землі знизилася й живому, щоб вижити, довелося шукати інше джерело енергії.

У числі перших з'явився безкисневий (аноксигенний) фотосинтез. Його освоїли бактерії – предки нинішніх зелених, пурпурових і ціанобактерій.

Аноксигенні фотосинтезувальні бактерії навчилися використовувати енергію сонячного світла з допомогою особливих

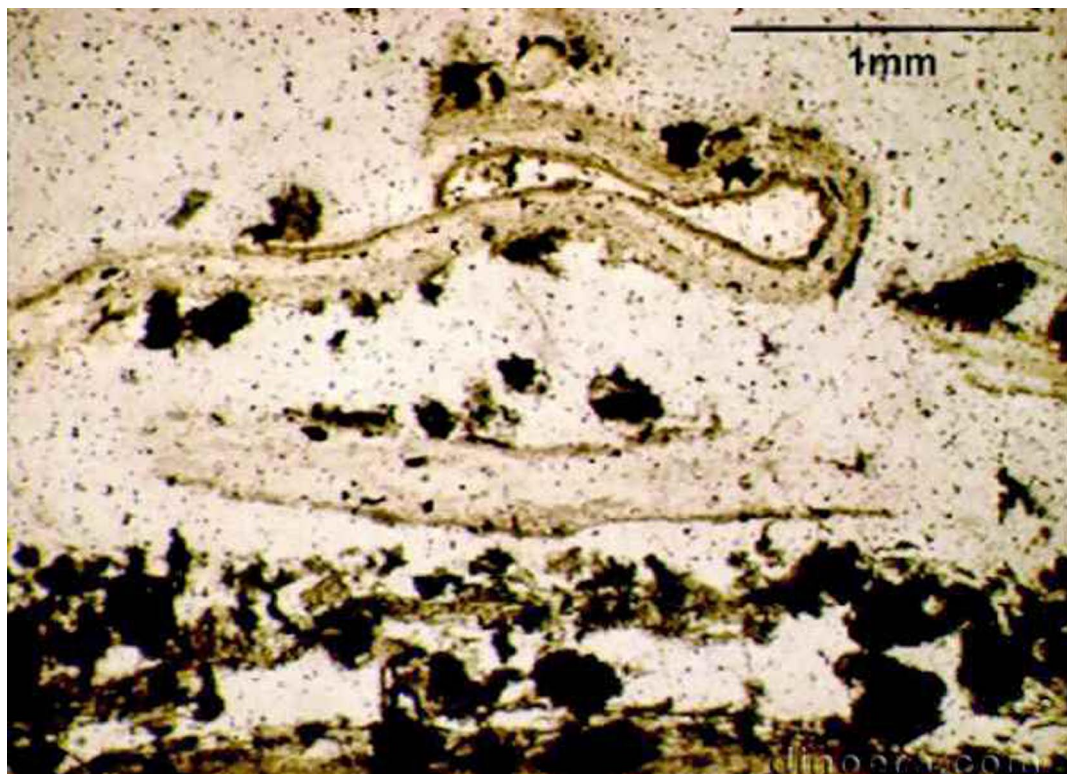


Рис. 3. Зразок бактеріального мату [9]

світлочутливих молекул – бактеріохлорофілів і пов'язаних з ними білкових комплексів.

Виникнення аноксигенного фотосинтезу було великим кроком уперед. Живі істоти отримали доступ до невичерпного джерела енергії – сонячного світла. Проте їх залежність від дефіцитних хімічних речовин, що надходять із земних надр, при цьому все-таки збереглася. Річ у тім, що для фотосинтезу одного світла замало – потрібна ще яка-небудь речовина, від якої можна відірвати електрон (це називається “фотоокиснення”). У найпростішому випадку в ролі донора електрона під час фотосинтезу виступає сірководень. Унаслідок діяльності аноксигенних фотосинтетиків сірководень перетворюється в сірку (S) або сульфат ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

У результаті на планеті активно накопичувалися метан і сульфати. Це сприяло появі мікроорганізмів, здатних окисляти метан з допомогою сульфатів. Це були не

просто мікроби, а симбіотичні мікробні спільноти, що склалися з архей і бактерій. Археї окисляли метан, а бактерії відновлювали сульфати, причому обидва процеси були якимось чином пов'язані між собою в нерозривне ціле.

Результатом окиснення метану був вуглекислий газ, потрібний усім автотрофам, а результатом відновлення сульфатів – сірководень, який із задоволенням використовували фотосинтетичні організми. Цикли замикалися, біосфера набувала стійкості й здатності до саморегуляції.

Приблизно в той самий період (понад 3,2 млрд років тому) з'явилися перші гетеротрофи, які отримували енергію завдяки безкисневій ферментації (бродиння) готової органіки, виробленої автотрофами. Як відходи їхньої життєдіяльності виділяють молекулярний водень, який поглинався археями-метаногенами та сульфатредукторними бактеріями (вони використовували молекулярний водень як відновник).



Фото 2. Сланці Бак Риф [9]

Найважливішим поворотним пунктом у розвитку життя стала поява оксигенного, або кисневого, фотосинтезу, завдяки якому в атмосфері почав накопичуватися кисень і стало можливим існування вищих організмів. Ця подія сталася, мабуть, 2,5–2,7 млрд років тому.

Першими організмами, які здійснювали фотосинтез із виділенням  $O_2$  були синьо-зелені водорості (ціанобактерії), які використовували як каталізатор Fe; для них характерний підвищений уміст цього елемента, порівняно з Cu, Zn і Mn. З появою синьо-зелених водоростей, розквіт діяльності яких припадає на протерозой, починає здійснюватися одна з важливих газових функцій живої речовини – киснево-вуглекислотна.

У кисневому фотосинтезі донором електрона є звичайна вода, а побічним продуктом – кисень. Кисневий фотосинтез зробив бактерії незалежними від сполук сірки або заліза, і це відкрило перед ними виняткові, надзвичайні можливості.

Після появи ціанобактерій безроздільне панування прокариот на нашій планеті тривало 1,5–2 млрд років. Мікроорганізми поступово ставали все численнішими й різноманітнішими (про це можна судити з їхніх викопних залишків). Однак саме поява ціанобактерій запустила ланцюжок подій, унаслідок яких естафета еволюційного прогресу була в кінцевому підсумку передана більш високоорганізованим живим істотам – еукаріотам. Ключову роль у цьому зіграв кисень, що накопичився в атмосфері завдяки ціанобактеріям, а також процеси кооперації та симбіозу, що відбувалися в мікробних співтовариствах ще на початку земного життя. Зрештою рівень інтеграції у співтоваристві прокариотів досяг такого рівня, що кілька різних видів мікроорганізмів злилися в єдиний організм – еукаріотичну клітину.

Ціанобактерії не тільки створили біосферу “сучасного типу”. Вони й сьогодні продовжують її підтримувати, виробляючи кисень і синтезуючи органіку з вуглекислого газу.

Крім вище зазначеного, живі організми й продукти їхньої життєдіяльності фактично із зародження біосфери брали активну участь у всіх процесах гіпергенезу й літогенезу, нерідко змінюючи хід і характер накопичення осадових і породотворення. З їхньою участю осідали й діагенетично перетворювалися майже всі осадові породи, за винятком грубоуламкових. З-поміж осадових порід, походження яких пов'язане з життєдіяльністю мікробів – фосфорити, високовуглецеві породи (шунгіти й чорні сланці, глини, кори вивітряння).

Біотичний колообіг речовин у біосфері, що складалася винятково з прокариотів, був дуже недосконалим. Біомаса, створена автотрофними бактеріями, розкладалася переважно під впливом абіотичних фізичних і хімічних процесів у зовнішньому середовищі, при цьому багато важили й гетеротрофні бактерії, проте їхні можливості були обмежені через особливості організації клітин прокариотів. Вони виділяли ферменти у зовнішнє середовище, відбувалося свого роду “зовнішнє перетравлювання”, а низькомолекулярні продукти всмоктувалися крізь цитоплазматичну мембрану. Усе це зумовило низьку швидкість розкладання біомаси, створеної автотрофними прокариотами. Тому на ранніх етапах еволюції біосфери величезні маси органічного вуглецю виводилися з біологічного колообігу, зберігалися в осаді, піддавалися хімічній трансформації, перетворювалися на горючі сланці, нафту й газ.

Фотоавтотрофи, що почали активно продукувати молекулярний (вільний) кисень, активно сприяли окисненню закисного (двовалентного) заліза, яке осідало у вигляді залізистих руд (джеспілітів), що складаються переважно з таких мінералів, як гематит ( $Fe_2O_3$ ) та магнетит ( $FeO(Fe_2O_3)$ ). Саме в цей час виникли всі найбільші родовища заліза, зокрема й Криворізький залізорудний басейн.

Мікроорганізми, зокрема й найдавніші, трапляються не тільки у вулканогенно-осадових породах. Вони часто стимулю-

ють і осадження різних мінералів. На сьогодні зроблено опис більш як 100 мінералів, утворення яких може бути пов'язане з діяльністю бактерій, отримано численні експериментальні й природні підтвердження цього [2]. Доведено біологічне походження залізних, золотих, марганцевих і багатьох інших родовищ руд. Ці родовища були колись утворені мікробами, що поступово сприяли осіданню на своїх клітинних стінках іонів різних металів. У процесі своєї життєдіяльності мікроби активно перетворювали сполуки заліза, сірки, фосфору, утворюючи пірит, фосфорити та інші мінерали [10].

Результати вивчення викопних бактерій засвідчують, що мінералоутворення під впливом бактерій або з їхньою безпосередньою участю було майже безперервним з часів становлення біосфери. Також виявлено, що вплив живої речовини на хід геологічних процесів неухильно зростає з розвитком біосфери.

**Висновок.** Отже, спосіб розвитку планети Земля та механізм зародження життя на ній є оптимальною й збалансованою системою, яка за інших параметрів (браку сили тяжіння, супутника, інша відстань до Сонця, відмітні початкові концентрації елементів у земній корі, метеоритне бомбардування тощо) могла розвиватись іншим чином.

Наприклад, Венера, яка на початку вивчення космічного простору вважалася чи не головним та ідеальним кандидатом на звання колиски позаземного життя, сьогодні фактично однозначно визнана непридатною для життя через високі температури та атмосферний тиск на її поверхні, які майже в 100 разів перевищують земні показники, наявність сильного парникового ефекту тощо. Проте останнім часом з'явилися гіпотези, що припускають існування на Венері мікробів, життєдіяльність яких заснована на зовсім іншому хімічному механізмі метаболізму, ніж у мікробів на Землі. Разом з тим, існування якоїсь складної чи, тим паче, розумної форми життя на Венері – неможливе.

Приблизно такий самий висновок щодо Марса, головні характеристики якого подібні до земних, проте через майже повну відсутність атмосфери, низький атмосферний тиск (майже в 200 разів нижчий від земного) червона планета, за висновками вчених, назавжди позбавлена води в рідкому стані. У таких умовах розвиток багатоклітинних організмів неможливий, проте вчені не відкидають можливості існування на Марсі бактерій, зокрема й занесених метеоритами.

Нині розгляд гіпотетичної можливості виникнення життя на інших планетах з погляду більшості вчених цілком виправданий і теорія життя на інших планетах має право на існування.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Марков А. В.* Рождение сложности. Эволюционная биология сегодня. Неожиданные открытия и новые вопросы. – М.: Астрель: Corpus, 2010. – 552 с.
2. *Розанов А. Ю.* Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы//Палеонтологический журнал. – 2003. – № 6. – С. 41–49.
3. *Федонкин М. А.* Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем//Проблемы зарождения и эволюции биосферы (под ред. Э. М. Галимова). – М.: Книжный дом “Либроком”, 2008. – С. 417–437.
4. *Borzenkova I. I., Turchinovich I. Ye.* History of Atmospheric Composition//Environmental structure and function: climate system, edited by G. Gruza. – Vol. II. – Paris, UNESCO; Oxford, UK, EOLSS, 2002. – P. 184–204.
5. *Huberand C., Wächtershäuser G.*  $\alpha$ -Hydroxyand  $\alpha$ -Amino Acids Under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions//Science. – 2006. – V. 314. – P. 630–632.
6. *Mulkiidjanian A. Y., Bychkov A. Y., Dibrova D. V., Galperin M. Y., Koonin E. V.* 2012. Origin of first cell satterrestrial, anoxic geothermal fields. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, (published ahead of print February 13, 2012, doi: 10.1073/pnas.1117774109).
7. *Nisbet E., Fowler C. M. R.* The evolution of the atmosphere in the Archaean and early Proterozoic//Chinese Sci. – Bull. – 2011. – 56. – P. 4–13, doi: 10.1007/s11434-010-4199-8.
8. *Schopf W. J.* Microfossils of the Early Archaean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life//Science, NewSeries. – Vol. 260. – № 5108 (Apr. 30, 1993). – P. 640–646.

9. Tice M. M., Lowe D. R. Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean//Nature. – № 431(7008). – 2004. – P. 549–552.

10. Viljoen M. J., Reimold W. U. An Introduction to South Africa's Geological and Mining Heritage//Mintek & Geological Soc. of South Africa. – 1999. – 193 p.

11. <http://phys.org/news/2013-10-paleontologist-life-theory.html>

#### REFERENCES

1. Markov A. V. Birth of difficulty. Evolutionary biology today. Unexpected discoveries and new questions. – Moskva: Astrel: Corpus, 2010. – 552 p. (In Russian).

2. Rozanov A. Ju. Fossil bacteria sedimentogenesis and the early stages of evolution of the biosphere//Paleontologicheskij zhurnal. – 2003. – № 6. – P. 41–49. (In Russian).

3. Fedonkin M. A. The role of hydrogen and metals in the formation and evolution of metabolic systems. In the book: Problems of origin and evolution of the biosphere (edited by E. M. Galimova). – Moskva: Knizhnyj dom "Librokom"; 2008. – P. 417–437. (In Russian).

4. Borzenkova I. I., Turchinovich I. Ye. History of Atmospheric Composition//Environmental structure and function: climate system, edited by G. Gruza. – Vol. II. – Paris, UNESCO; Oxford, UK, EOLSS, 2002. – P. 184–204.

5. Huberand C., Wächtershäuser G.  $\alpha$ -Hydroxyand  $\alpha$ -Amino Acids Under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions//Science. – 2006. – V. 314. – P. 630–632.

6. Mulkidjanian A. Y., Bychkov A. Y., Dibrova D. V., Galperin M. Y., Koonin E. V. 2012. Origin of first cell satterrestrial, anoxic geothermal fields. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, (published ahead of print February 13, 2012, doi: 10.1073/pnas.1117774109).

7. Nisbet E., Fowler C. M. R. The evolution of the atmosphere in the Archaean and early Proterozoic//Chinese Sci. – Bull. – 2011. – 56. – P. 4–13, doi: 10.1007/s11434-010-4199-8.

8. Schopf W. J. Microfossils of the Early Archaean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life//Science, NewSeries. – Vol. 260. – № 5108 (Apr. 30, 1993). – P. 640–646.

9. Tice M. M., Lowe D. R. Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean//Nature. – № 431(7008). – 2004. – P. 549–552.

10. Viljoen M. J., Reimold W. U. An Introduction to South Africa's Geological and Mining Heritage//Mintek & Geological Soc. of South Africa. – 1999. – 193 p.

11. <http://phys.org/news/2013-10-paleontologist-life-theory.html>

Рукопис отримано 11.07.2016.

**Г. И. Рудько**, Государственная комиссия Украины по запасам полезных ископаемых, office@dkz.gov.ua

#### **БЕСКИСЛОРОДНЫЙ ПЕРИОД В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ И ЖИЗНЬ В НЕМ**

*Рассмотрено развитие планеты Земля в контексте ее становления, зарождения первобытной атмосферы и гидросферы. Основные этапы эволюции атмосферы состоялись в архее. Описаны возможные механизмы зарождения жизни, их влияние на формирование и изменения окружающей среды. Подана краткая характеристика древних отложений, сложенных археобактериями и цианобактериями. В архее развитие аноксигенного, а затем оксигенного фотосинтеза вследствие высокой биологической активности прокариот постепенно превратило анаэробную восстановительную атмосферу в аэробную кислородную, дав толчок для развития новых, более совершенных микроорганизмов – эукариот.*

**Ключевые слова:** первоначальная атмосфера, археобактерии, панспермия, микрофоссилии докембрия, гидротермы, фотосинтез.

**G. I. Rudko**, State Commission of Ukraine on Mineral Resources, office@dkz.gov.ua

#### **OXYGEN FREE PERIOD IN THE HISTORY OF EARTH AND LIFE IN IT**

*The development of Earth in the context of its formation as also emergence of the original atmosphere and hydrosphere are presented in the article. Main stages of the atmosphere evolution have occurred in the Archaean. The mechanisms of life origin, their impact on environmental development and changes are described as well. A brief description of the most ancient sediments composed by the archaean bacteria and cyanobacteria is considered. In the Archaean due to high biological*

*activity of procaryotes the development of anoxic and then oxygenian photosynthesis has gradually transformed anaerobic restorative atmosphere into the aerobic oxygenous one, consequently giving a boost for the development of new improved micro-organisms – eukaryotes.*

**Keywords:** *the initial atmosphere, archaea bacteria, panspermia, Precambrian microfossils, hydrothermae, photosynthesis.*