

УДК 550.72

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.72712

БЕЗКИСНЕВИЙ ПЕРІОД В ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ ТА ЖИТТЯ В НЬОМУ

© Г. І. Рудько

Розглянуто розвиток планети Земля в контексті її становлення, зародження первісної атмосфери та гідросфери. Основні етапи еволюції атмосфери відбулися в архей. Описані можливі механізми зародження життя, їх вплив на формування та зміни навколишнього середовища. Дана коротка характеристика найдревніших відкладів, складених археобактеріями та ціанобактеріями

Ключові слова: первісна атмосфера, археобактерії, панспермія, гідросфера, протоклітини, біоелементи, мікрофосилії докембрію, гідротерми, фотосинтез

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 archaebacteria and cyanobacteria is considered

Keywords: original atmosphere, archaebacteria, panspermia, hydrosphere, protocells, bioelements, Precambrian microfossils, hydrothermae, photosynthesis

1. Вступ

Дослідження раннього етапу розвитку нашої планети є одним з найбільш цікавих і важливих завдань, які дозволяють зрозуміти механізм формування тих чи інших життєвих форм та екосистем, їх роль та вплив на зміну умов навколишнього середовища.

Довгострокові зміни в складі атмосфери і гідросфери тісно пов'язані зі змінами в самій земній корі та з тривалою еволюцією біосфери. Основні біохімічні механізми зароджувались в далекому минулому Землі – в архей і ранньому протерозої, відокремлених від нас мільярдами років. Протягом більшої частини історії нашої планети домінуючі умови середовища часто змінювались, істотно відрізняючись не тільки від сьогоденних. Важливим є вивчення та дослідження стародавньої біосфери, оскільки це б дозволило отримати відповіді на складні питання: коли, де і чому сформувалися ті чи інші типи фізіології життєвих форм і екосистем.

2. Аналіз літературних даних

Вивченню найдавніших періодів розвитку Землі та докембрійських порід приділялося значно менше уваги, ніж вони заслуговували, оскільки, як виявилось, час, який вони охоплюють становить 7/8 всієї геологічної історії Землі.

В 1967 р. на базі Лабораторії геології і геохронології докембрію АН СРСР в Ленінграді був створений Інститут геології і геохронології докембрію, який протягом тривалого часу залишався єдиним в світі спеціалізованим науковим закладом з вивчення докембрію. Видатні вчені цього інституту (О. О. Полканов [1], С. В. Обручев [2], М. О. Єлісєєв [3], В. А. Ніколаєв [4], М. Г. Судовіков [5]) проводили комплексне вивчення стратиграфії, тектоніки, магматизму і метаморфізму древніх кристалічних товщ, що стали основою вчення про цей період. У Лабораторії біостратиграфії були здійснені перші

знахідки мікроорганізмів (мікрофосилій) в найдавніших товщах докембрію і прослідкована еволюція ранніх прокариот з переходом їх в еукаріоти, як вищі форми органічного життя.

Велике значення для пізнання ранніх етапів становлення органічного життя на Землі мали роботи Б. В. Тимофєєва [6, 7]. Згадані дослідження значно розширили область застосування біостратиграфічного методу на сильно змінені метаморфічні породи та докембрійські відклади.

У 1963 р академіком Б. С. Соколовим [8], в рамках лабораторії палеозою Інституту геології і геофізики була створена група з вивчення пізнього протерозою, яка займалась вивченням практично всіх скам'янілостей цього періоду та досліджувала проблеми, пов'язані з геологічною історією біосфери, особливо її ранніх етапів

Першовідкривачем світу докембрійських безкелетних тварин вважають М. О. Федонкіна [9], дослідження якого докорінно змінили уявлення про історію біосфери і ранньої еволюції безхребетних.

Загалом за останні десятиліття розвиток уявлень про зародження та розвиток нашої планети дозволив нагромадити велику кількість окремих досліджень, що потребували певного узагальнення та переосмислення для розуміння можливих подальших сценаріїв розвитку біосфери як на планеті Земля, так і на інших планетах Сонячної системи.

3. Мета та задачі дослідження

Основною метою вивчення докембрійських порід (вік понад 2,5 млрд р. тому) було і є встановлення умов, які панували на поверхні Землі протягом перших двох мільярдів років її історії.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні задачі: проаналізовано дослідження докембрійського періоду, проведені протягом останніх десятиліть, узагальнено отримані результати.

4. Утворення та розвиток атмосфери та гідросфери Землі як передумова для розвитку живих організмів

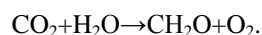
Найбільш ранній підрозділ докембрію – Гадей – почався з утворенням Землі з пилу і газу, що оберталися довкола Сонця біля 4,6 млрд років тому і охоплював період до 4,0–3,8 млрд років тому, тобто перші 600–800 млн років історії нашої планети. Земля відразу після свого утворення була порівняно холодним космічним тілом – температура в її надрах ніде не перевищувала температуру плавлення речовини. Вона мала досить однорідний склад, не існувало ні ядра, ні земної кори. Рельєф нагадував побиту метеоритами поверхню Місяця, проте був згладжений сильними і практично безперервними приливними землетрусами та складений тільки монотонною темно-сірою первинною речовиною, покритою зверху товстим шаром реголіту. Виверження вулканів та метеоритні дощі з космосу відбувалися постійно.

Повітря було гарячим, густим, насиченим парами, сповненим пилом і попелу, в його складі переважали вуглекислий газ та водяна пара, зі слідами азоту і сполук сірки. Будь-які породи, які утворювалися від охолодження лави були швидко поховані під новими потоками або розривалися на шматки під час метеоритного бомбардування.

Атмосфера виникла в початковій періоді формування земної кори. Існують дві гіпотези її утворення. Припускають, що початок цього процесу поклато виділення газів при зіткненні планетозималей. Атмосфера розглядається як похідна первинного матеріалу, що залишився від спрощених флюїдів, які

колись оточували розплавлену Землю. За другою гіпотезою, атмосфера розглядається як вторинне утворення, що виникло при вивільненні легких хімічних елементів і сполук з лави, що вивергалась на земну поверхню. Завдяки цій лаві була створена первинна земна кора. Більшість вчених дотримуються другої гіпотези походження атмосфери, вважаючи, що в іншому випадку будь-яка первинна атмосфера на ранній стадії розвитку Землі була б порівняно швидко нею втрачена.

Склад цієї атмосфери значно відрізнявся від сучасної і складався в основному з газів, що накопичуються в атмосфері від дегазації верхньої мантії. Окис вуглецю (CO), двоокис вуглецю (CO₂), водяна пара (H₂O), метан (CH₄), невелика кількість азоту (N), і водень (H) переважали в газовому складі, також виділялися H₃BO₃, NH₃S, H₂S, HCl, HF та невелика кількість інертних газів. Атмосфера мала відновний характер і була практично позбавлена вільного кисню (рис.1), незначна його частина виникала в верхніх шарах атмосфери в результаті дисоціації молекул вуглекислого газу і води:



Про відсутність кисню в стародавній атмосфері і океані свідчить наявність у великій кількості не тільки в вивержених, але і в осадових гірських породах елементів і сполук, що не зазнали окислення. Так, наприклад, в катархейських карбонатних породах є багато незмінених зерен піриту і уранініту і відсутня окислена сірка. Всі ці породи характеризуються великою величиною співвідношення закисного заліза до окисного.

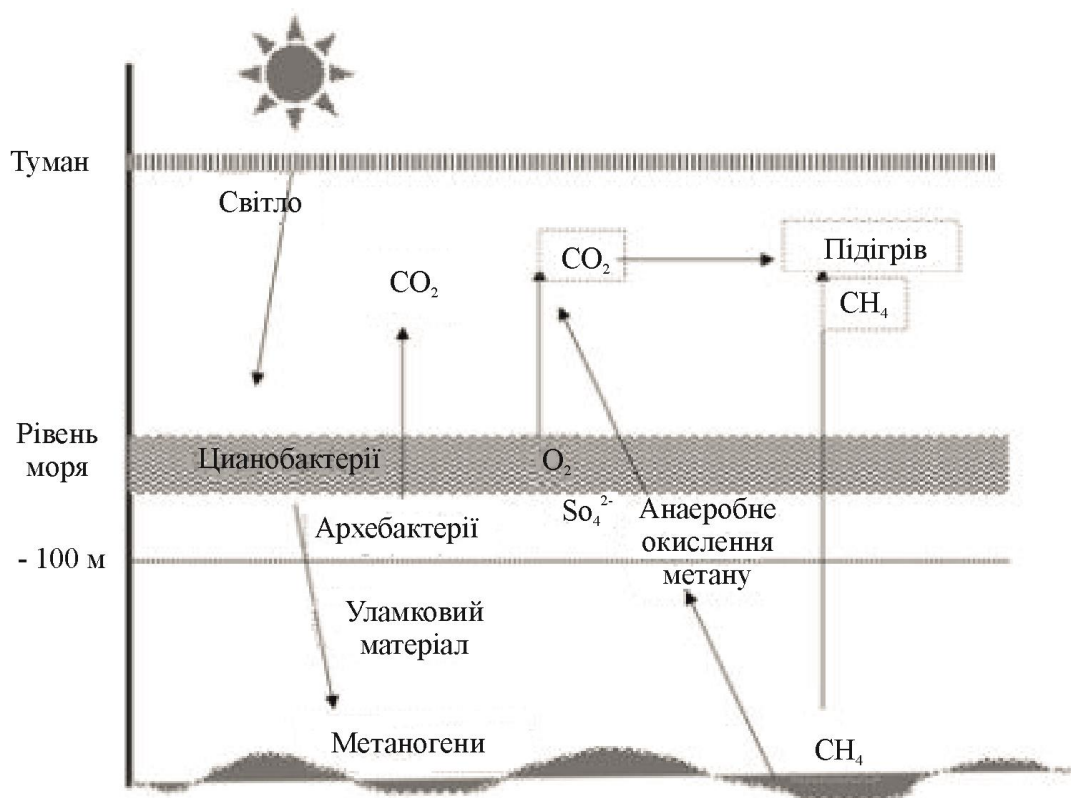


Рис. 1. Атмосфера архейського еону [10]

З огляду на те, що вільного кисню в атмосфері тривалий час не було, озоновий екран був відсутній. Атмосфера легко пропускала ультрафіолетове випромінювання Сонця. В таких умовах не могло бути й мови про можливе існування будь-яких живих організмів на суші. Під впливом ультрафіолетового випромінювання в водах морів і океанів почали утворюватися складні органічні сполуки аж до амінокислот. Передбачається, що на початку докембрію, атмосферний цикл двоокису вуглецю був аналогічний сучасному, але маса CO₂ була в 100 або більше разів вища. Імовірно, підвищений вміст діоксиду вуглецю, метану, водяної пари сприяв затримці теплового ви-

промінювання. Це забезпечило досить високу температуру поверхні з порівняно низькою світністю Сонця в архей і протерозої, яка була на 28 % нижче, ніж в даний час [11]. За останні 4 млрд років світність Сонця поступово збільшувалась, а маса діоксиду вуглецю знижувалась через скорочення швидкості дегазації верхньої мантії Землі. Ці два суперечливих процеси забезпечили збереження стійкого клімату Землі протягом багатьох мільйонів років.

В табл. 1 показані дані про склад древньої атмосфери Землі, Венери та Марсу, що демонструє практично ідентичні умови на цих планетах в перші 2 млрд років їх існування.

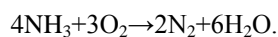
Таблиця 1

Склад древньої атмосфери планет Сонячної системи

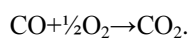
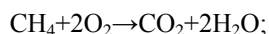
Показник	Планета		
	Земля	Венера	Марс
Азот, %	1,9	3,4	1,7
Кисень	Сліди	Сліди	Сліди
Аргон, %	0,19	0,04	0,85
Діоксид вуглецю, %	98	96,5	98
Рівень первинного океану, м	3000	9	30
Тиск атмосферного повітря, Бар	~70	88±3	~2

Як видно початкові атмосфери на всіх вказаних планетах були майже ідентичні. Проте оскільки Марс набагато менший, аніж Венера і Земля, його надра ніколи не розігрівалися так сильно, як у цих планет, і тому їх дегація була менш значною. Велика частина газів, ймовірно, ще захована усередині Марса. До того ж, оскільки його маса менше, сила тяжіння на ньому невелика, і тому він більшу частину своєї атмосфери розгубив в космічному просторі.

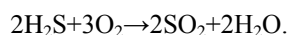
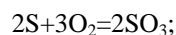
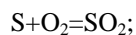
Вільний кисень спочатку витрачався на окислення аміаку, і при цьому виділявся вільний азот:



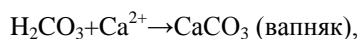
Метан і окис вуглецю окислялись до вуглекислоти, основна частина якої йшла в океан:



Сірка і сірководень окислялись до сірчастого і сірчаного ангідриду:



В океані осаджувалися карбонатні і сульфатно-карбонатні осади:



морська вода ставала хлоридно-карбонатно-сульфатною.

Походження вод гідросфери так само нерозривно пов'язане з історією летючих речовин. Виділення останніх взаємопов'язане з магматичними процесами, тобто кожний вилив базальтової або андезитової лави виносив на поверхню Землі певну порцію води. Кіль-

кість такої ювенільної води при виверженнях сучасних вулканів коливається зазвичай в межах 3–5 %, а в ряді випадків до 8 % по відношенню до маси вивержених порід.

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

Поява гідросфери та атмосфери стала однією з ключових подій в історії Землі. Їх розвиток ускладнив і диференціював процеси, що протікають в земній корі. Активно відбувалися процеси перетворення гірських порід на земній поверхні. У безкисневій атмосфері процес вивітрювання протікав вельми своєрідно в обстановці підвищених температур і високої кислотності природних вод і атмосфери.

Отже появи життя та формуванню біосфери передували такі умови навколишнього середовища [12]: інтенсивний вулканізм, висока радіація, постійне перетворення первинної кори, низькорельєфна поверхня, щільна вторинна атмосфера з потужним вмістом парникових газів, практично повна відсутність вільного кисню та відповідно захисного озонового шару, мілководна гідросфера з високими концентраціями вулканічних газів та іонів важких металів у воді.

5. Результати дослідження та їх обговорення

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 в результаті перенесення з інших планет якихось зародків).

Оскільки нам ближча саме остання, розглянемо її докладніше. На сьогодні гіпотеза панспермії є однією з найбільш обговорюваних теорій походження життя на Землі. Запропонована німецьким ученим Германом Ріхтером у 1865 р., вона базується 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. Її прихильники підтримують думку про вічне існування життя і висувують ідею про неземне її 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 до низьких температур. Наприклад, спори і насіння рослин не гинули навіть при тривалому витриманні в рідкому кисні або азоті.

До гіпотези панспермії примикає точка зору астрономів Ч. Вікрасасінгха (Шрі-Ланка) і Ф. Хойла (Великобританія). Вони вважають, що в космічному просторі, в основному в газових і пилових хмарах, у великій кількості присутні мікроорганізми, де вони, на думку вчених, і утворюються. Далі ці мікроорганізми захоплювались кометами, які потім, проходячи поблизу планет, розсіювали їх по поверхні. Попадаючи у ідеальні умови, бактерії відновлювали свою активність і починався процес еволюції. Нещодавно група учених з Університету Кардіффу 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 і проросли вже тут, незважаючи на ті пекельні умови, які існували в Гадейському еоні [13].

Завдяки безперестанному бомбардуванню земної поверхні кометами і метеоритами 4 млрд років тому, в епоху початкового формування планети, великі кратери, що виникали після зіткнень, не тільки містили воду і основні хімічні будматеріали для життя, але й служили прекрасними тиглями, в яких ці речовини концентрувалися і готувалися до створення перших найпростіших організмів.

Вивчивши три локації, в яких знайдені найстаріші скам'янілості, відомі науці, він прийшов до висновку, що саме метеорити і комети занесли на Землю всі необхідні інгредієнти, а також створили відповідні умови для виникнення життя. Він виділяє чотири стадії ускладнення еволюції клітин з органічних молекул шляхом природних процесів: космічну, геологічну, хімічну і біологічну.

На космічному етапі (4,1–3,8 млрд років тому) Земля і вся Сонячна система разом з нею ще остаточноне сформувались, проте щодня атакувались астероїдами і кометами. Тектоніка плит, вітер і вода давно стерли сліди того бурхливого часу, але древні кратери, що збереглися на поверхні Марса, Венери, Меркурія і Місяця, дозволяють припустити наскільки важким було це бомбардування.

Ідеальними тиглями, на думку вченого, стали кратери діаметром близько 550 км. Метеорити, які їх утворили, були настільки великі, що повинні були пробивати земну кору, створюючи тим самим вулкани і геотермальні жерла. Занесені ними речовини концентрувалися і полімеризувались в цих умовах. На геологічній стадії кратери заповнилися водою, геотермальна активність нагріла її, виникла конвекція – вода невпинно рухалася, перемішувалася, перетворюючись в добротний первісний бульйон.

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

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

Дослідницька група, що складається з вчених Університету Оснабрюк, Німеччина і Національного інституту здоров'я в Бетесді, США запропонувала дещо іншу версію походження перших клітинних організмів [14]. Вона полягає в тому, що перші живі організми на планеті, швидше за все, з'явилися не в Світовому океані, а в прісноводних водоймах вулканічного походження.

Життя – це послідовність окислювально-відновних реакцій, тому місце і 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 мають деяку подібність з живими системами.

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

Можливо, деякі типи гідротермальних джерел, схожих на ті, що існують сьогодні, моглиб володіти необхідним і достатнім окислювально-відновним потенціалом (у вигляді H_2 – CO_2 окисно-відновних пар) і каталітичними можливостями у вигляді іонів перехідних металів. Це дало б початок органічного синтезу в певному місці в просторі, і стабільно, протягом геологічного часу, можливість породжувати хімічні складові життя. Після цього відбувся перехід від хімічних складових до живих клітин.

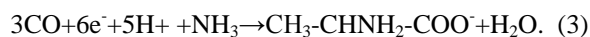
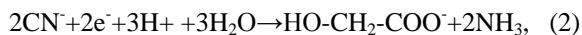
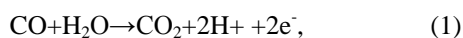
Прикладом такої водойми служать геотермальні озера Єллоустоунського національного парку, на дно яких надходить гаряча вода, збагачена хімічними елементами. За розрахунками авторів [14], склад во-

ди геотермальних джерел найбільш близький до хімічного складу живої клітини. У них відповідна концентрація найважливіших біоелементів: натрію, калію, марганцю, цинку і фосфатів. На думку вчених, саме там склалися сприятливі умови для формування білків та інших біологічних молекул.

Такі озера, ймовірно, утворилися з геотермального пару, збагаченого хімічними елементами при проходженні через земну кору. Джерелом цього пару служить дуже гарячий і багатий різними речовинами розсіл, що утворюється при проходженні через скельну породу геотермальної рідини, нагрітої магмою. При кипінні цього розсолу відбувається поділ на водну і парову фази, які можуть вибиватися на поверхню в різних місцях. У водну фазу переходять іони хлору, а ось в паровій залишаються аміак, сірководень і двоокис вуглецю. Крім цього, в парів першу чергу залишаються 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 і вже потім завоювало океан.

Ще одні дослідження на користь цієї теорії, були проведені хіміками з Мюнхенського технічного університету [15]. Вчені показали, що в гідротермальних джерелах при температурі понад 80°C може відбуватися абіогенний синтез органічних речовин, в результаті якого з неорганічних сполук, таких як чадний газ (CO) і ціаністий водень (HCN), утворюються різноманітні органічні молекули, в тому числі амінокислоти і найпростіші ліпіди. Каталізатором цих реакцій служать присутні в гідротермальних водах тверді частинки, що містять залізо і нікель. Реакції особливо добре йдуть при температурі 80–120 °C. Умови, в яких проводилися експерименти, були максимально наближені до реальності. На думку дослідників, такі умови (включаючи всі компоненти реакційної суміші) цілком могли існувати в гідротермальних джерелах на ранніх етапах розвитку Землі.

Основні хімічні реакції, що ведуть до абіогенної фіксації вуглецю і синтезу органіки, можна представити наступними формулами:



Ці три реакції взаємопов'язані: в першій з них утворюються вільні протони й електрони, необхідні для двох інших, а в другій реакції (синтез гідроксикислот) утворюється аміак, необхідний для третьої реакції (синтез амінокислот). З підвищенням температури зростає загальний вихід кінцевих продуктів, а також частка амінокислот по відношенню 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 б бути саме тим сприятливим субстратом, який дозволив спорам відновитись та почати свою еволюцію.

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

Бактеріальне життя колонізувало вулканічні гірські породи незабаром після їх підводного виверження майже 3,56 млрд років тому. Колонії бактерій активно розчиняли субстрат з вулканічного скла, щоб витягувати поживні речовини, утворюючи тунелі з трубчастих структур. Вони мають діаметр 1–9 мкм (в середньому 4 мкм) і довжину до 200 мкм (в середньому 50 мкм). Ці структури простягаються далеко від початкових тріщин, через які колись морська вода потрапляла в породу. Деякі з цих структур демонструють поділ на сферичні сегменти діаметром 1–9 мкм. Ці структури мають характеристики (діапазон розмірів, морфологія і організація), які вказують на їх біогенне походження.

Рентгенівське дослідження показує наявність вуглецю по стінках трубчастих структур. Наявність вуглецю, азоту, а також нуклеїнових кислот, пов'язаних з цими корозійними текстурами і значення ізоотопів вуглецю в бактеріально зміненому базальтовому склі підтверджують біогенне походження цих структур. Вони відповідають утворенням, знайденим в сучасній океанічній корі і не мають абіогенних аналогів.

Різноманітні типи мікроорганізмів, включаючи фототрофів і хемотрофів, мешкали серед прибережних вулканічних відкладів, що омивалися гідротермальними джерелами. Гідротермальні рідини виступали в якості джерела живлення для хемотрофних бактеріальних спільнот і таким чином сильно впливали на їх розвиток і поширення. Насичені кварцом гідротермальні рідини також внесли свій вклад в швидку фосилізацію мікроорганізмів і скам'яніння осадів, фіксуючи різноманітність бактеріального життя.

Розглянемо деякі такі типи порід детальніше.

Крем'янисті сланці Апекс (вік 3,465 млрд років, Північно-Західна Австралія). Знамениті відклади серії Варравуна знайдені професором В. Шопфом. Базальти Апекс мають велику потужність і перешаровуються з тонкими сланцями (потужність сланцевого шару близько 10 м). Виявлені організми у добротому стані зустрічаються в уламковому матеріалі – округлих гранулах породи розміром близько міліметра, включених в сланці; таким чином, вони можуть бути ще більш давніми (рис. 2). Ці гранули мають сліди тривалого транспортування. Збереженість знахідок погана, з тисяч фрагментів клітинних ниток, знайдених у відкладах, достатньо збереглися тільки менше 1 %, цього замало для детального вивчення і формального опису.

Місцевість Апекс представляла собою морські прибережні райони, в які викидалися вулканічні лави. Розкидані вулканічні острова були облямовані відкладами гравію, пісковіку, замуленими ділянками.

Місце знахідки мікрофосилій представляло собою в минулому гідротермальні жили, які не сприяють хорошому стану знахідок. Однак, мікроорганізми, морфологічно схожі з нитками Апекс, цілком розповсюджені в сучасних гідротермальних середовищах.

Кременистий сланець Апекс розташований в межах однієї такої шаруватості, що знаходиться між попередніми і наступними потужними лавовими потоками і приурочений до гідротермальних систем з температурою близько 250 °С.

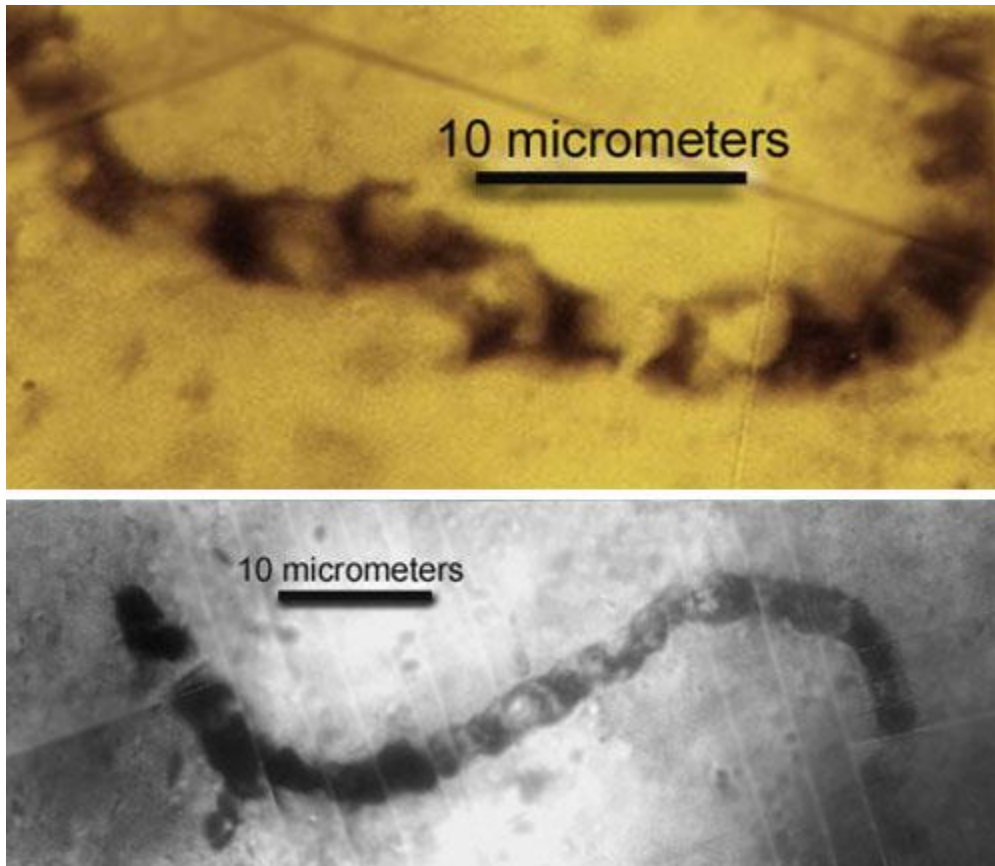


Рис. 2. Мікроскам'янілості, знайдені в кременистих сланцях Апекс [16]

Бактеріальні нитки з Апекс являють собою вуглецеві тривимірні клітинні залишки, заповнені дрібнозернистим кварцем. Самі організми є нитчастими, що складаються з особливих прокариотних клітин з органічними стінками, з'єднаних в нитку і 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. Вони дуже нагадують сучасні ціанобактерії. Крім цього знайдено сотні окремих одноклітинних сфероїдних структур, що нагадують колоїдні мікрофосилії. Характерно, що часу існування мікрофосилій сланців Апекс передувало збільшення кількості кисню в атмосфері, оскільки саме ціанобактерії відповідальні за його появу. Ця біота була і гетеротрофною, і автотрофною.

Група Онвервахт (3,472–3,332 млрд років, Південна Африка). Дві формації з групи Онвервахт містять основні сліди життя: формація Хоогеног та формація Кромберг. Група Онвервахт розглядається як фрагмент архейської океанічної кори, що розвивалася в асоціації з субдукцією і активними острівними дугами. Формація Хоогеног містить потужну послідовність толейтних базальтів, базальтових коматі-

тів, кислих вивержених порід і тонких сланцевих юнітів. Формація Кромберг складається з базальтів, коматітів і мафічних вулканічних порід, з нечисленними чорними і шаруватими сланцями. Сліди життя зустрічаються і в базальтових і в сланцевих породах.

Платформні відклади цих формацій осаджувалися в мілководній і субаеральних зонах та в більш глибоководних зонах в супроводі базальтового вулканізму. Структурні свідчення бактеріальної активності в кременистих сланцях групи Онвервахт широко поширені. Шари з тонкими вуглистими прошарками, що нагадують викопні бактеріальні мати, переважають в кременистих осадах переважно базальтових формацій (рис. 3). У рідкісних випадках із шарів відкладів пов'язані волокнисті мікроскам'янілості діаметром 0,2–2,5 мкм. Пустотілі циліндричні нитки мають діаметр 1,2–1,4 мкм і довжину 10–150 мкм. Морфологія скам'янілостей передбачає спорідненість з сучасними ціанобактеріями, що мешкають на вапнякових матах та бактеріями.

В осадових породах групи Онвервахт знайдені силіційовані сфери і паличкоподібні тіла розміром в кілька мікронів. Форма, розмір і розташування в колоніях вказує на наявність в них скам'янілих бактерій. Сфери мають діаметр близько 1 мкм і мають морфологічні характеристики кокоїдних бактерій.

Вони мають складну структуру і знайдені в тривимірних кластерних колоніях. Деякі структури нагадують спори.

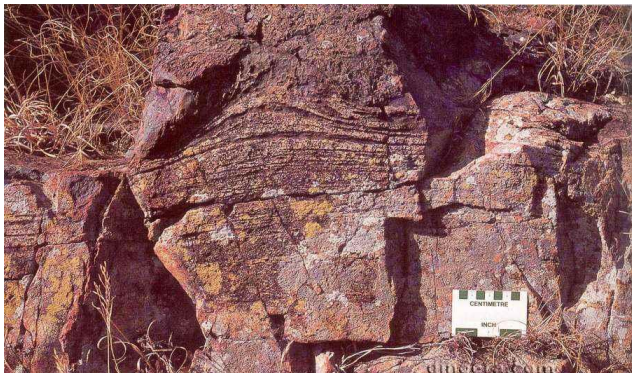


Рис. 3. Строматоліти з групи Онвервахт, що представляють собою бактеріальний мат [17]

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

Сланці Бак Риф (3,445–3,416 млрд. років, група Онвервахт, Південна Африка). Бак Риф іноді включають в якості складової частини в формацію Кромберг групи Онвервахт і розташовані біля її основи. Містять геобіологічне свідчення присутності бактеріальних матів (рис. 4), обмежених фотичною зоною безкисневих океанів архею. Зростаючі біоплівки і кварцеві відклади домінували протягом росту матів, в яких заключені великі обсяги детритових вуглецевих зерен. Дрібний шельф дозволяв світлу досягати дна, де донний осад був заселений бактеріальними колоніями, які розривались періодичними штормами через невелику глибину.

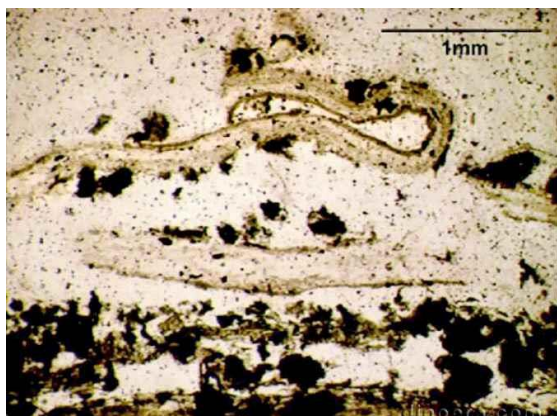


Рис. 4. Сланці Бак Риф: зразок бактеріального мату під мікроскопом [18]

Сланці Бак Риф не містять слідів гідротермальних джерел. Відсутні відклади з гідротермальних рідин, і весь риф відповідає нормальному океанічному середовищу. Це, в свою чергу, вказує на те, що

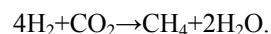
весь вуглець був утворений живими організмами, а не був занесений ззовні. Тут існували лагуни і водойми, які випаровувались, характерні для берегової лінії; мілководні області зі слідами впливу хвиль і більш глибокі ділянки, де води були спокійними і осади утворювали плоскі і регулярні шари.

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 практично чистого мікрористалічного кварцу. Темні містять відклади живих організмів – волокнистий вуглецевий матеріал і округлі детритні вуглисті частки.

Органічні волокнисті структури, схожі з тими, що знайдені в кремнистих 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 і в темних, і в світлих шарах, близько 30 мікрометрів. У деяких смугах вони становлять 30–90 % обсягу породи, що може вказувати на домінування в геологічній платформі древніх сланців Бак Риф бактеріальної біомаси. Однак це були не ціанобактерії, а анаеробні фотосинтезатори. Ідентифікація добре збережених мікрофосилій в цих сланцях часто є досить проблематичною.

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

Перші примітивні бактерії отримували енергію за рахунок хемосинтезу (синтез органічних речовин з вуглекислого газу за рахунок енергії окислення аміаку, сірководню і інших речовин). Одним з таких представників вважаються археї-метаногени [19]. Вони отримували енергію, відновлюючи вуглекислий газ до метану за допомогою молекулярного водню:



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

З'явилися вони близько 3,8–4,1 млрд років тому і були надзвичайно термостійкими організмами. Однак активність метаногенів на древній Землі, можливо, була обмежена – лімітуючим фактором міг служити, наприклад, дефіцит молекулярного водню.

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

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

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

Аноксигенні фотосинтезуючі бактерії навчилися використовувати енергію сонячного світла за допомогою особливих світлочутливих молекул – бактеріохлорофілів і пов'язаних з ними білкових комплексів.

Виникнення аноксигенного фотосинтезу було великим кроком вперед. 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. Справа в тому, що для фотосинтезу одного світла мало – потрібна ще яка-небудь речовина, від якої можна відірвати електрон (це називається "фотоокислення"). У найпростішому випадку в ролі донора електрона при фотосинтезі виступає сірководень. В результаті діяльності аноксигенних фотосинтетиків сірководень перетворюється в сірку (S) або сульфат (SO_4^{2-}).

В результаті на планеті активно накопичувались метаном та сульфатами. Це сприяло появі мікроорганізмів, здатних окисляти метан за допомогою сульфатів. Це були не просто мікроби, а симбіотичні мікробні спільноти, що складалися 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 окислення метану був вуглекислий газ, необхідний всім автотрофам, а результатом відновлення сульфатів – сірководень, який із задоволенням використовували фотосинтетики. Цикли замикалися, біосфера набувала стійкості і здатність до саморегуляції.

Приблизно в той же період (понад 3,2 млрд. років тому) з'явилися перші гетеротрофи, які отримували енергію за рахунок безкисневої ферментації (бродиння) готової органіки, виробленої автотрофами. В якості відходів їх життєдіяльності виділяють молекулярний водень, який поглинався археями-метаногенами, та сульфатредукторними бактеріями (вони використовували молекулярний водень в якості відновника).

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 з виділенням O_2 були синьо-зелені водорості (ціанобактерії), які використовували у якості каталізатора Fe; для них характерний підвищений вміст цього елемента в порівнянні 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.

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

Після появи ціанобактерій безроздільне панування прокариот на нашій планеті тривало 1,5–2 млрд. років. Мікроорганізми поступово ставали все більш численними і різноманітними (про це можна судити по їх викопних залишках). Однак саме поява ціанобактерій запустила ланцюжок подій, в результаті яких естафета еволюційного прогресу була в кінцевому рахунку передана більш високоорганізованим живим істотам – еукаріотам. Ключову роль в 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 в співтоваристві прокариотів досяг такого рівня, що кілька різних видів мікроорганізмів злилися в єдиний організм – еукаріотичну клітину.

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

Крім вище зазначеного живі організми і продукти їх життєдіяльності фактично із зародження біосфери брали активну участь у всіх процесах гіпергенезу і літогенезу, нерідко змінюючи хід і характер накопичення осадових і породоутворення. За їх участі проходило осадження і діагенетичне перетворення практично всіх осадових порід, за винятком грубоуламкових. Серед осадових порід, походження яких пов'язане з життєдіяльністю мікробів – фосфорити, високовуглецеві породи (шунгіти і чорні сланці, глини, кори вивітрювання).

Біотичний колообіг речовин у біосфері, що складалась виключно із прокариотів, був дуже недосконалий. Біомаса, створена автотрофними бактеріями, розкладалась переважно під впливом абіотичних фізичних і хімічних процесів у зовнішньому середовищі, при цьому важливу роль відігравали і гетеротрофні бактерії, проте їх можливості були обмежені через особливості організації клітин прокариотів. Вони виділяли ферменти в зовнішнє середовище, відбувалось свого роду "зовнішнє перетравлювання", а низькомолекулярні продукти всмоктувались крізь цитоплазматичну мембрану. Все 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 і газ.

Фотоавтотрофи, що активно почали продукувати молекулярний (вільний) кисень, активно сприяли окисленню закисного (двовалентного) заліза і осадженню його у вигляді залізистих руд (джеспілітів), що складаються в основному з таких мінералів як гематит (Fe_2O_3) та магнетит ($\text{FeO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$). Саме в цей час виникли всі найбільші родовища заліза, зокрема і Криворізький залізрудний басейн.

Мікроорганізми, в тому числі і найдревніші, зустрічаються не тільки в вулканогенно-осадових породах. Вони часто стимулюють і осадження різних мінералів. На сьогодні дано опис більш як 100 міне-

ралів, утворення яких може бути пов'язане з діяльністю бактерій, отримані численні експериментальні і природні підтвердження цього [20]. Доведено біологічне походження залізних, золотих, марганцевих і багатьох інших родовищ руд. Ці родовища були колились утворені мікробами, що поступово осаджували на своїх клітинних стінках іони різних металів. В ході своєї життєдіяльності мікроби активно перетворювали сполуки заліза, сірки, фосфору, утворюючи пірит, фосфорити та інші мінерали [19].

Результати вивчення викопних бактерій показують, що мінералоутворення під впливом бактерій або за їх безпосередньої участі було практично безперервним і існувало з часів становлення біосфери. Також виявлено, що вплив живої речовини на хід геологічних процесів неухильно зростає в ході розвитку біосфери.

6. Висновки

Отже, шлях розвитку планети Земля та механізм зародження життя на ній є оптимальною і збалансованою системою, яка за інших параметрів (відсутність сили тяжіння, супутника, інша відстань до Сонця, відмінні вихідні концентрації елементів у земній корі, метеоритне бомбардування тощо) могла розвиватись іншим шляхом.

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 температуру та атмосферний тиск на її поверхні, які майже у 100 разів перевищують земні показники, наявність сильного парникового ефекту тощо. Проте останнім часом з'явилися гіпотези, що допускають 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 більше розумної форми життя на Венері неможливе.

Приблизно такий самий висновок щодо Марса, основні 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, у тому числі 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. Полканов, А. А. Некоторые очередные задачи изучения геологии докембрия. [Текст] / А. А. Полканов // Вестн. АН СССР. – 1959. – № 5 – С. 43–47.
2. Абсолютный возраст докембрийских пород СССР [Текст]: сб. ст. / под ред. С. В. Обручев. – Москва; Ленинград: Наука, 1965. – 207 с.

3. Геология и геохронология докембрия [Текст]: сб. ст. / под ред. Н. А. Елисеев. – Москва; Ленинград: Наука, 1964. – 384 с.

4. Николаев, В. А. Об органических остатках в докембрии [Текст] / В. А. Николаев. – В кн.: Методическое рук-во по геологическому картированию метаморфических комплексов. – М: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1957. – С. 128–138.

5. Судовиков, Н. Г. Особенности тектонического строения архейских образований Алданского горнопромышленного района [Текст] / Н. Г. Судовиков, Г. М. Другова, М. Д. Крылова, Д. А. Михайлов // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1962. – № 11. – С. 95–100.

6. Тимофеев, Б. В. Микрофитофоссилии раннего докембрия [Текст] / Б. В. Тимофеев. – Л.: Наука, 1982. – 128 с.

7. Тимофеев, Б. В. Микрофитофоссилии докембрия, кембрия и ордовика [Текст] / Б. В. Тимофеев, Т. Н. Герман, Н. С. Михайлов. – АН СССР, Ин-т геологии и геохронологии докембрия. – Ленинград: Наука, 1976. – 106 с.

8. Соколов, Б. С. Докембрийская биосфера в свете палеонтологических данных [Текст] / Б. С. Соколов // Вестник АН СССР. – 1972. – № 8. – С. 48–54.

9. Федонкин, М. А. Холодная заря животной жизни [Текст] / М. А. Федонкин // Природа. – 2000. – № 9. – С. 3–11.

10. Nisbet, E. The evolution of the atmosphere in the Archaean and early Proterozoic [Text] / E. Nisbet, C. M. R. Fowler // Chinese Science Bulletin. – 2011. – Vol. 56, Issue 1. – P. 4–13. doi: 10.1007/s11434-010-4199-8

11. Borzenkova, I. I. History of Atmospheric Composition [Text] / I. I. Borzenkova, I. Ye. Turchinovich; G. Gruza (Ed.). – Environmental structure and function: climate system. Vol. II. – Paris, UNESCO; Oxford, UK, EOLSS, 2002. – P. 184–204.

12. Федонкин, М. А. Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем. [Текст] / М. А. Федонкин. – Проблемы зарождения и эволюции биосферы. – М.: Либроком, 2008. – С. 417–437.

13. Paleontologist presents origin of life theory [Electronic resource]. – Available at: <http://phys.org/news/2013-10-paleontologist-life-theory.html>

14. Mulkidjanian, A. Y. Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields [Text] / A. Y. Mul-kidjanian, A. Y. Bychkov, D. V. Dibrova, M. Y. Galperin, E. V. Koonin // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 109, Issue 14. – P. E821–E830. doi: 10.1073/pnas.1117774109

15. Huberand, C. α -Hydroxyand α -Amino Acids Under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions [Text] / C. Huberand, G. Wächtershäuser // Science. – 2006. – Vol. 314, Issue 5799. – P. 630–632. doi: 10.1126/science.1130895

16. Schopf, W.J. Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life [Text] / W.J. Schopf // Science. – 1993. – Vol. 260, Issue 5108. – P. 640–646. doi: 10.1126/science.260.5108.640

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

18. Tice, M. M. Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean [Text] / M. M. Tice, D. R. Lowe // Nature. – 2004. – Vol. 431, Issue 7008. – P. 549–552. doi: 10.1038/nature02888

19. Марков, А. В. Рождение сложности [Текст] / А. В. Марков. – Эволюционная биология сегодня. Неожиданные открытия и новые вопросы. – М.: Астрель: Corpus, 2010. – 552 с.

20. Розанов, А. Ю. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы [Текст] /

А. Ю. Розанов // Палеонтологический журнал. – 2003. – № 6. – С.41–49.

References

1. Polkanov, A. A. (1959). Nekotoryye ocherednyye zadachi izucheniya geologii dokembriya [Some of the immediate tasks of the study of Precambrian Geology]. Vestn. AN SSSR, 5, 43–47.
2. Obruchev, S. V. (Ed.) (1965). Absolyutnyy vozrast dokembriyskikh porod SSSR: sbornik statey [The absolute age of the Precambrian rocks of the USSR: a collection of articles]. Moscow: Leningrad: Nauka, 207.
3. Geologiya i geokhronologiya dokembriya: Sbornik statey (1964). [Precambrian Geology and Geochronology: a collection of articles]. Moscow: Leningrad: Nauka, 384.
4. Nikolayev, V. A. (1957). Ob organicheskikh ostatkakh v dokembrii. [On the organic remains in the Precambrian]. Metodicheskoye ruk-vo po geologicheskomu kartirovaniyu metamorficheskikh kompleksov. Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tehnicheskoye izdatelstvo literatury po geologii i okhrane nedr, 128–138.
5. Sudovikov, N. G., Drugova, G. M., Krylova, M. D., Mikhaylov, D. A. (1962). Osobennosti tektonicheskogo stroyeniya arkheyskikh obrazovaniy Aldanskogo gornopromyshlennogo rayona [Features of the tectonic structure of the Archaean formations of the Aldan mining region]. Izvestiya AN SSSR. Seriya geologicheskaya, 11, 95–100.
6. Timofeyev, B. V. (1982). Mikrofitofossilii rannego dokembriya [Microfossils of Early Precambrian]. Leningrad, Nauka, 128.
7. Timofeyev, B. V. (1976). Mikrofitofossilii dokembriya, kembriya i ordovika [Microphytofossils of Precambrian, Cambrian and Ordovician]. In-t geologii i geokhronologii dokembriya, Leningrad: Nauka, 106.
8. Sokolov, B. S. (1972). Dokembriyskaya biosfera v svete paleontologicheskikh dannyykh [Precambrian biosphere in the light of paleontological data]. Vestnik AN SSSR, 8, 48–54.
9. Fedonkin, M. A. (2000). Kholodnaya zarya zhivotnoy zhizni. [Cold dawn of animal life]. Priroda, 9, 3–11.
10. Nisbet, E., Fowler, C. M. R. (2011). The evolution of the atmosphere in the Archaean and early Proterozoic. Chinese Science Bulletin, 56 (1), 4–13. doi: 10.1007/s11434-010-4199-8
11. Borzenkova, I. I., Turchinovich, I. Ye. (2002). History of Atmospheric Composition. Environmental structure and function: climate system, 2, 184–204.
12. Fedonkin, M. A. (2008). Rol vodoroda i metallov v stanovlenii i evolyutsii metabolicheskikh sistem. Problemy zarozhdeniya i evolyutsii biosfery [The role of hydrogen and metals in formation and evolution of metabolic systems. Problems of origin and evolution of the biosphere]. Moscow: Knizhnyiy dom Librokom, 417–437.
13. Paleontologist presents origin of life theory. Available at: <http://phys.org/news/2013-10-paleontologist-life-theory.html>
14. Mulkidjanian, A. Y., Bychkov, A. Y., Dibrova, D. V., Galperin, M. Y., Koonin, E. V. (2012). Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (14), E821–E830. doi: 10.1073/pnas.1117774109
15. Huber, C., Wachtershauser, G. (2006). α -Hydroxyand α -Amino Acids Under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions. Science, 314 (5799), 630–632. doi: 10.1126/science.1130895
16. Schopf, J. W. (1993). Microfossils of the Early Archaean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life. Science, 260 (5108), 640–646. doi: 10.1126/science.260.5108.640
17. Viljoen, M. J., Reimold, W. U. (1999). An Introduction to South Africa's Geological and Mining Heritage. Mintek&Geological Soc. of South Africa, 193.
18. Tice, M. M., Lowe, D. R. (2004). Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean. Nature, 431 (7008), 549–552. doi: 10.1038/nature02888
19. Markov, A. V. (2010). Rozhdeniye slozhnosti. Evolyutsionnaya biologiya segodnya. Neozhidannyye otkrytiya i novyye voprosy [Creation of difficulty. Evolutionary Biology of today. Unexpected discoveries and new questions]. Moscow: Astrel: Corpus, 552.
20. Rozanov, A. Yu. (2003). Iskopayemyye bakterii, sedimentogenez i ranniye stadii evolyutsii biosfery [Fossil bacteria, sedimentogenesis and early stages of biospheric evolution]. Paleontologicheskii zhurnal [Paleontological Journal], 6, 41–49.

Дата надходження рукопису 12.05.2016

Рудько Георгій Ілліч, доктор геолого-мінералогічних наук, доктор географічних наук, доктор технічних наук, професор, Державна комісія України по запасах корисних копалин, вул. Кутузова, 18/7, м. Київ, Україна, 01133
E-mail: office@dkz.gov.ua