

## ЦИКЛІЧНІСТЬ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІСТОРІЇ ЗЕМЛІ. ПЕРШОПРИЧИНИ

**М.П. Щербак, Л.М. Степанюк, О.М. Пономаренко**

*Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України  
пр. акад. Палладіна, 34, м. Київ-142, 03680, Україна  
E-mail: stepanyuk@igmof.gov.ua*

Розглянуто першопричини мегациклічності в історії Землі. Запропоновано модель мегациклічності. За цією моделлю причинами мегациклічності є внутрішня енергія Землі та процеси перерозподілу енергії та речовини між ядром і мантією, всередині самої мантії і між мантією та літосферою. Цей перерозподіл у Землі відбувається завдяки двом тісно пов'язаним між собою процесам – конвекції та плюмам. Конвекція в мантії призводить до горизонтального переміщення літосферних плит із усіма наслідками: зародженням та існуванням зон спредінгу, трансформних розломів та зон субдукції з відповідним набором геологічних породних асоціацій. Спусковим гачком для перебудови конвекції (конвективних комірок), є суперплюми – потоки перегрітої речовини, що відриваються від поверхні ядра Землі, прояви яких обумовлюють утворення та розпад суперконтинентів. Запропоновано поняття геологічного циклу (мегациклу), початком якого є момент переродження рифтів у зони спредінгу та формування порід офіолітової асоціації. Саме на цьому етапі розпаду суперконтиненту формуються перші осадові та осадово-вулканогенні породи, що можуть бути розпізнані та закартовані. Завершенням геологічного циклу є утворення великих роїв дайок. Виконано огляд космічних факторів та можливої їх ролі в мегациклічності.

*Ключові слова:* циклічність, конвекція, геологічний цикл, плюм, мантія, ядро.

**Вступ.** Періодизація геологічної історії Землі була виконана М.П. Семененком на основі ізотопного датування порід докембрійських комплексів головним чином Східноєвропейської та Сибірської платформ, а також вивченню геологічних матеріалів щодо докембрію Канади, Африки, Індії та ін. М.П. Семененко запропонував хроностратиграфічне розчленування докембрію України та схеми кореляції з іншими докембрійськими регіонами й обґрунтував положення про шість мегациклів в історії земної кори. В ієрархії геохронологічних дат Землі, за М.П. Семененком, існує шість крупних мегациклів, які відповідають етапам послідовного формування континентальної кори, а саме: перший докембрій (I) з верхньою віковою межею – 2700 млн рр., другий докембрій

(II) – 2000, третій докембрій (III) – 1700, четвертий докембрій (IV) – 1100–1200, п'ятий докембрій (V) – 560 млн рр., шостий – фанерозойський (VI) [5–8]. Якщо ми поглянемо на сучасну Міжнародну стратиграфічну схему, то зазначені рубежі, з незначними відхиленнями, відображеними в ній, і є ключовими. М.П. Семененко виділив також десять епох рудоутворення в докембрії [5].

Періодизація геологічного розвитку Землі, виконана М.П. Семененком, базувалася на концепції геосинклінального розвитку. Першопричини циклічності геологічних подій залишалися поза його увагою, а саме цю проблему ми й обговоримо в даній роботі.

**Мета роботи** – з'ясувати першопричини мегациклічності геологічних процесів в історії Землі.

**Стан проблеми.** Багато уваги проблемам циклічності, особливо в останні роки, приділяв В.І. Хаїн [9–12]. В ієрархії закономірностей роз-

витку Землі перше місце він відводив направленості, друге – циклічності, третє – нелінійності [11].

Циклічність історичного розвитку геологічних процесів досить виразно простежується у формуванні континентальної кори в фанерозої. У докембрії, особливо в ранньому, через значні метаморфічні перетворення породних комплексів циклічність менш виражена, але все ж досить впевнено простежується, наприклад у формуванні породних комплексів зеленокам'яних областей. На загал, найбільш яскравим проявом циклічності є формування континентальної кори, що розпочинається процесами седиментації (накопичення осадово-вулканогенних товщ), інтрузивним магматизмом, метаморфізмом, ультраметаморфізмом з формуванням плагіогранітоїдів, та завершується формуванням значних мас двополювошпатових гранітів.

На сьогодні існує декілька уявлень щодо причин циклічності, тобто повторюваності певної послідовності геологічних процесів під час еволюції Землі. Найбільш популярними є уявлення щодо “Земних” причин, обумовлених ендегенними факторами – внутрішня енергія Землі; досить поширеними є погляди, де в основу циклічності покладені космічні фактори [1, 3, 10–12] та ін.

Загалом гіпотез на пояснення циклічності багато; дослідники виділяють різнорангові цикли, тривалістю від декількох десятків років до мільйонів і сотень мільйонів років. У цій роботі ми аналізуємо можливі причини мегациклічності.

**Обговорення.** На думку В.І. Хаїна “Основними рушійними силами динаміки твердої Землі є внутрішнє тепло і гравітація. Теплові гравітаційні сили обумовлюють спливання розігрітої речовини із самих низів мантиї до земної поверхні та занурення охолодженої на поверхні Землі речовини, що надійшла раніше із глибинних надр, назад в мантию аж до самих її низів – шару  $D_2$ ...” [12].

Для з'ясування проблеми першопричин циклічності ключовим питанням є енергія. На сьогодні переважна більшість дослідників погоджується, що внутрішня енергія Землі складається з залишкової енергії, яку отримала наша планета в результаті акреції, енергії, яка виділилась і продовжує виділятися в результаті радіоактивного розпаду, та енергії, пов'язаної з диференціацією речовини Землі та формуванням її оболонок: внутрішнього та зовнішнього ядра, нижньої та верхньої мантиї, земної кори. Деякі вчені вважають важливою

складовою енергію, що вивільняється в результаті гравітаційної взаємодії у системі Місяць – Земля та Земля – Сонце (припливи та відпливи як у водній оболонці Землі, так і в літосфері) [11]. Помітно впливає на енергетичний стан Землі, в усякому разі на її зовнішні оболонки, Сонце. Вплив зазначених складових внутрішньої енергії Землі в різні часи існування її був різним. Поступово зменшується з часом залишкова енергія та частка радіогенного тепла. Найвірогідніше, значною мірою вичерпалася енергія, що пов'язана з диференціацією речовини Землі. Максимум виділення енергії диференціації мав місце протягом перших декількох сотень мільйонів років існування Землі і пов'язаний з формуванням ядра [11]. Виходячи з зазначеного можна констатувати, що тепловиділення в історії Землі не мало циклічного характеру. Поступовий і послідовний характер зміни стану внутрішньої енергії Землі міг призводити до накопичення в деяких її зонах надлишкової (з точки зору критичного стану системи, що могло викликати плавлення) енергії. До моменту плавлення зростання температури в таких зонах забезпечується відносно низькою теплопровідністю речовини Землі.

Найбільш вірогідними причинами мегациклічності є процеси перерозподілу енергії та речовини між ядром і мантиєю, всередині самої мантиї і між мантиєю та літосферою. Цей перерозподіл у сучасній Землі найбільш ефективно може відбуватися завдяки двом тісно пов'язаним процесам – конвекції та плюмам<sup>1</sup>. Конвекція в мантиї призводить до горизонтального переміщення літосферних плит з усіма наслідками: зародженням на існуванням зон спредінгу, трансформних розломів і зон субдукції, які обумовлюють розвиток островних дуг, активних континентальних окраїн, колізійних обстановок гімалайського типу з відповідним набором породних асоціацій. Так, зонам спредінгу властиве поєднання специфічних океанічних базальтів (*MORB*) з мантийними перидотитами. Вважається, що палеоаналогами цієї породної асоціації є офіоліти, представлені закономірним чергуванням (знизу вгору) ультраосновних і основних інтрузивних (дуніти, перидотити, піроксеніти, різноманітні габро і тоналіти) та ефузивних (переважно базальти та їх туфи) порід і глибоководних кременистих осадових відкладів.

В островодужних умовах формуються потужні вулканогенно-осадові товщі, складені породами

<sup>1</sup> Через низьку теплопровідність гірських порід кондуктивний теплоперенос відіграє значно меншу роль.

енсиматичної (дві океанічні плити) чи енсїалічної (океанічна та континентальна плити) асоціації, в залежності від типу плит, що зіштовхуються.

На колізійній стадії в результаті насування слєбів океанічної та континентальної кори стра-тифіковані комплекси зазнають складчастості та метаморфічних перетворень, відбувається гранітоїдний магматизм. Відклади власне колізійної стадії представлені моласами, а магматичні геологічні формації – базальт-андезит-ріолітовою, андезитовою, дацит-ріолітовою, ріолітовою та групою гранітних формацій К-Na- і К-гранітів, які формують батоліти. Геоморфологічним проявом стадії є гірська споруда.

Спусковим гачком для перебудови конвекції (конвективних комірок), очевидно, є суперплюми – потоки перегрітої речовини, що відриваються з поверхні ядра Землі. У рамках таких уявлень досить логічно пояснюється утворення та розпад суперконтинентів. Багатокоміркова конвекція призводить до тривалого існування декількох континентів, зосереджених над низхідними конвективними потоками. Поява суперплюму спричиняє перебудову конвективних комірок у мантії, та, за максимального розвитку, до утворення однієї планетарної конвективної комірки. Саме в ділянці низхідного потоку буде нагромаджуватися речовина континентальної кори і сформується суперконтинент. Затухання активності суперплюму призведе до появи багатокоміркової конвекції, формування дивергентних границь та розпаду суперконтиненту на декілька континентів, при цьому їх кількість буде приблизно рівною кількості конвективних комірок. Таку послідовність глобальних геологічних подій, що починається з зародження суперплюму та утворення суперконтиненту з подальшим його розпадом на декілька



Рис. 1. Геологічний цикл (мегацикл)

континентів, ми, погоджуючись з [11], називаємо мегациклом, або геологічним циклом (рис. 1).

Розпад суперконтинентів супроводжується рифтогенезом на початковій стадії, пізніше окремі рифти перероджуються в зони спредінгу [11].

Початком геологічного циклу, очевидно, треба вважати момент переродження рифтів у зони спредінгу та формування порід офіолітової асоціації. Саме на цьому етапі розпаду суперконтиненту формуються перші осадові та осадововулканогенні породи, що можуть бути розпізнані та закартовані. Завершенням геологічного циклу є утворення великих роїв дайок, що іноді супроводжуються формуванням полів платобазальтів – трапів (LIP).

Ця концепція дозволяє пояснити епізодичне формування магматитів з геохімічними характеристиками недеплетованої мантії. Якщо розглянути конвективну комірку (рис. 2), то можна припустити, що деплетация мантії відбувається в зонах мантійних потоків (висхідного, низхідного та горизонтальних), де речовина хоча б частково розплавлена. У центральних ділянках конвективних комірок речовина мантії не рухається, ці ділянки мантії не деплетують і зберігають свій первісний склад. На латеральну неоднорідність мантії вказують результати сейсмотомографії [11]. У ході перебудови багатокоміркової конвекції в тип конвекції з меншою кількістю комірок, мінімум однією, залишиться один висхідний і один низхідний потік, решта будуть “законсервованими”. У момент перебудови конвекції з меншою кількістю комірок до конвекції з більшою їх кількістю, очевидно, не всі новоутворені конвективні комірки успадкують старі раніше “законсервовані” конвективні потоки – ділянки деплетованої мантії. Наново утворені висхідні конвективні потоки в окремих випадках можуть сформуватися на місці ділянок недиференційованої мантії (центральні ділянки “старих” конвективних комірок (рис. 2, б)). Саме на місці виходу останніх будуть формуватися магматичні породи, геохімічні характеристики яких відповідатимуть незбідненій мантії. Останні можуть бути виплавлені не з деплетованої мантії, у тому числі верхньої, за умови, що плюмовий потік перетне ділянку недеплетованої мантії.

Варто визнати, що протягом значного часу життя Землі, а саме з моменту появи розплавленої речовини, основним фактором в динаміці її геосфер є спосіб обміну речовиною і енергією між ними. Зважаючи, що з часом глибинний тепловий

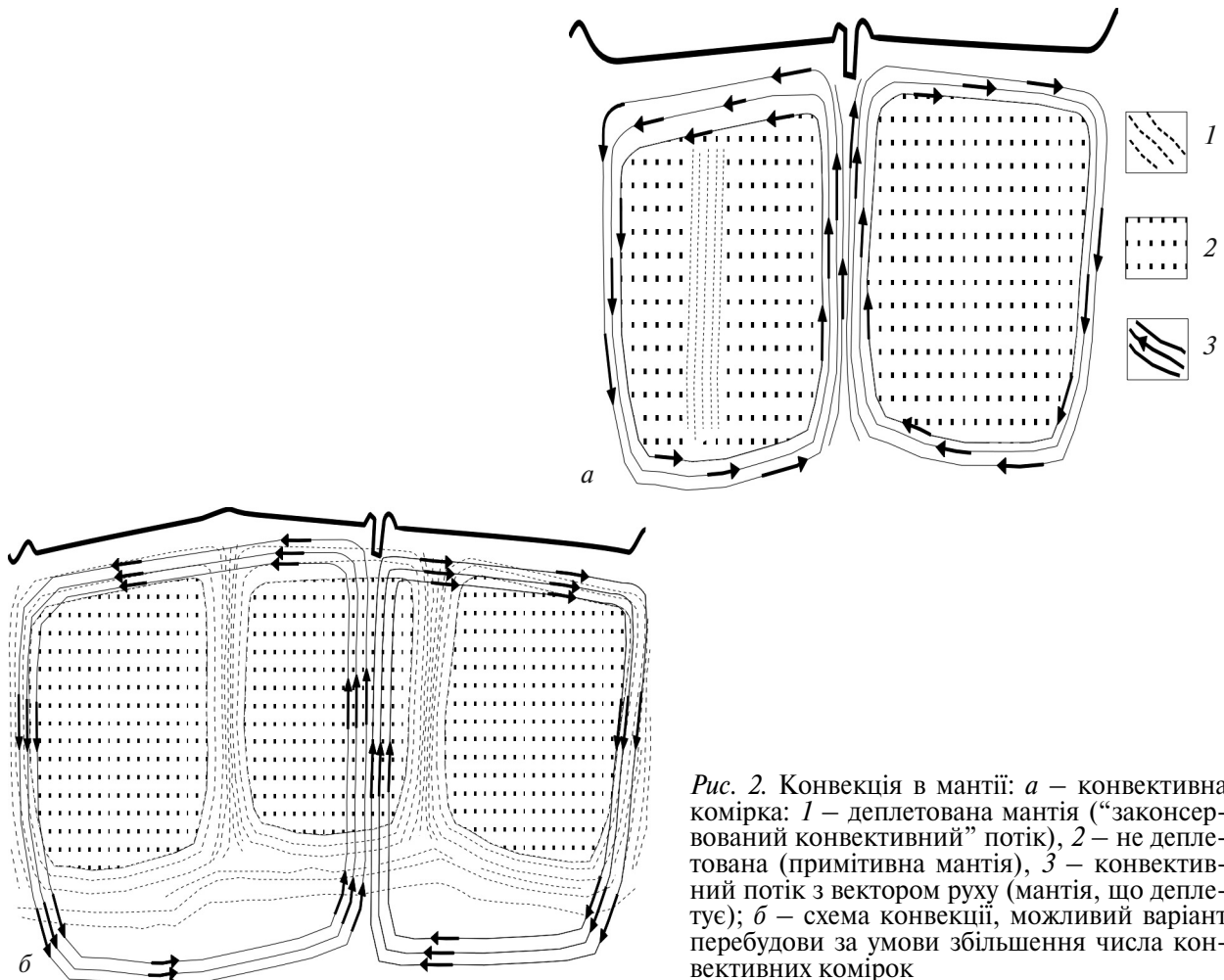


Рис. 2. Конвекція в мантії: *a* – конвективна комірка: 1 – деплетована мантія (“законсервовані конвективний” потік), 2 – не деплетована (примітивна мантія), 3 – конвективний потік з вектором руху (мантія, що деплетує); *б* – схема конвекції, можливий варіант перебудови за умови збільшення числа конвективних комірок

потік поступово зменшувався, енергетичний обмін між геосферами Землі також зазнавав певних змін. За даними [11], глибинний тепловий потік, порівняно з археем, зменшився в 3–4 рази.

Очевидно, що на ранніх етапах розвитку нашої планети (найвірогідніше в палеоархеї), коли накопичилася достатня кількість теплової енергії, ключову роль відігравали плюми та хаотична конвекція [14]. Із втратою теплової енергії та збільшенням маси і потужності літосферних плит зростала роль горизонтальних рухів (похідні конвекції) в тектоніці Землі. Наявні на сьогодні дані щодо геологічної будови Українського щита дають підстави вважати, що тектоніка літосферних плит запрацювала не пізніше 2,9 млрд років тому. Про достатньо потужну континентальну кору того часу свідчать породи з гранулітовим парагенезисом [2, 13]. Саме з цього моменту почали вкорінюватися інтрузиви двопольовошпатових гранітоїдів Середнього Придніпров'я, однією із умов формування їх родоначальних розплавів є потужна континентальна кора.

На наш погляд, космічні фактори, а саме взаємодія фізичних полів Землі з полями космічних тіл, яка обумовлена переміщеннями нашої планети разом із Сонцем у межах Галактики, мають менший вплив на мегациклічність геологічних процесів. Насамперед це стосується гравітації. Відповідно до закону Всесвітнього тяжіння ( $F = G \times (m_1 \times m_2) / R^2$ ), сила взаємодії між двома тілами прямо пропорційна добутку їх мас та зворотно пропорційна квадрату відстані між ними. Саме завдяки тому, що взаємодія між тілами послаблюється квадратично відстані між ними, гравітація навряд чи може суттєво впливати на геологічні процеси. Показовим є наведені в [11] дані про зміну прискорення сили тяжіння в результаті взаємодії Землі з Місяцем ( $0,1$  мГал) та Марсом (за максимального зближення –  $0,31 \times 10^{-7}$  мГал), що відрізняються всього на сім порядків.

У той же час ряд дослідників [4, 11, 12 та ін.] вбачають приблизне співпадіння циклу Бертрана з Галактичним роком (200–250 млн рр.), а періодичні зближення Сонячної системи з великими

газопиловими скупченнями, інтервал між якими оцінюється в 300–500 млн рр., – з циклами Вілсона. Нам уявляється, що якби Земля в складі Сонячної системи періодично потрапляла під дію потужного гравітаційного поля, яке було б спроможне викликати значні зміни внутрішньої динаміки нашої планети, не менш катастрофічних змін (перебудов) повинна була б зазнати і сама Сонячна система – зміну орбіт планет відносно Сонця, супутників навколо їх планет, наприклад Місяця, але таких змін до цього часу ніхто не виявляв.

Інша річ – магнітні (електромагнітні) поля.

Магнітне поле Землі є диполем, який увесь час взаємодіє не лише з магнітними полями інших планет, Сонця, а й з потоками заряджених часток. Достеменно ми не знаємо, що визначає функціонування магнітного поля Землі. Вважається, що магнітне поле планет спричиняє розплавлене металеве ядро. Магнітне поле Землі постійно взаємодіє з зарядженими потоками космічної речовини, наприклад Сонця, чи потоків від квазарів та наднових зірок, що призводить до його змін.

Очевидно, досить відчутними можуть бути наслідки потрапляння Землі під дію електромагнітного поля пульсарів. У результаті взаємодії перемінного електромагнітного поля з розплавленим металевим ядром Землі, ядро неодмінно буде розігріватися. Такий розігрів ядра може спричинити появу суперплюмів або принаймні змінювати (прискорювати) періодичність їх проявів. Але найбільший вплив електромагнітні поля та потоки заряджених космічних часток справляють на поверхню Землі (атмосферу, гідросферу та біосфе-

ру). Перш за все може бути зруйнованим озоновий шар, не виключена можливість втрати захисних функцій магнітного поля, що призведе до катастрофічних кліматичних змін.

Ми розуміємо, що Земля є відкритою системою, і постійно взаємодіє з іншими космічними тілами. Але яка роль цієї взаємодії у глобальних геологічних процесах, що відбуваються у Землі, який вона має вплив на прояви мегациклічності? Проблема полягає в ієрархії причинно-наслідкових зв'язків. На наш погляд, не достатньо виявити кореляцію між певними подіями, наприклад періодичність проходження Сонячної системи повз великі газопилові скупчення, інтервал між якими оцінюється в 300–500 млн років, з циклами Вілсона [11, 12], щоб обґрунтувати причинно-наслідковий зв'язок між ними. В основу слід покласти енергетичні аспекти геологічних процесів.

**Висновки.** 1. Основними факторами циклічності геологічних процесів є конвекція в мантії та перерозподіл енергії і речовини між ядром та мантією, який реалізується у вигляді суперплюмів.

2. Періодичність появи суперплюмів обумовлює періодичну перебудову конвективних комірок у мантії, що спричиняє циклічність геологічних процесів.

3. Одному геологічному циклу (прояву певної послідовності геологічних процесів) відповідає період між проявами двох суперплюмів.

4. Космічні фактори не мають систематичного прояву (впливу) і, вірогідно, можуть лише змінювати (прискорювати) циклічність геологічних процесів, впливаючи на енергетичний баланс між оболонками Землі.

#### Література

1. Баренбаум А.А., Хаин В.Е., Ясаманов Н.А. Крупномасштабные тектонические циклы: интерпретация с позиций галактической концепции // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. – 2004. – № 3. – С. 3–16.
2. Бобров А.Б., Кирилук В.П., Гошовский С.В., Степанюк Л.М., Гурский Д.С. и др. Гранулитовые структурно-формационные комплексы Украинского щита – европейский эталон. – Львов : ЗУКЦ, 2010. – 160 с.
3. Епифанов В.А. Геологические циклы и геохронологическая шкала в системе галактических пульсаций Земли // Новые идеи в науках о Земле: Материалы VIII Международной конфер. – М., 2007. – Т. 1. – С. 120–123.
4. Нечаев В.П. О галактическом влиянии на Землю в последние семьсот миллионов лет // Вестн. ДВО. – 2004. – № 2. – С. 102–113.
5. Семенов Н.П. Геохронология докембрия в абсолютном летоисчислении // Изв. АН СССР. Сер. Геол. – 1959. – № 5. – С. 3–15.
6. Семенов М.П. Достижения абсолютной геохронологии та головні рубежі геологічної історії // Геол. журн. – 1959. – 19, вип. 5 – С. 11–16.
7. Семенов Н.П. Геохронология Восточно-Европейской платформы и ее обрамления // Проблемы геологии и космологии. – М. : Наука, 1968. – С. 70–75.
8. Семенов Н.П. Межконтинентальная корреляция докембрия // Геохронология докембрия. – М. : Наука, 1970. – С. 5–22.
9. Хаин В.Е. Крупномасштабная цикличность в тектонической истории Земли и ее возможные причины // Геотектоника. – 2000. – № 6. – С.3–14.

10. Хаин В.Е., Гончаров М.А. Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношения и эволюция в истории Земли // Геотектоника. — 2006. — № 5. — С. 3–24.
11. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа / МГУ им. М.В. Ломоносова. — М. : Науч. мир, 2009. — 519 с.
12. Хаин В.Е. Об основных принципах построения подлинно глобальной модели динамики Земли // Геология и геофизика. — 2010. — 51, № 6. — С. 753–760.
13. Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей. — К. : Наук. думка, 2005. — 243 с.
14. Kroner A., Layer H.W. Crust formation and plate motion in the Early Archean // Science. — 1992. — 256, № 5062. — P. 1405–1411.

**Щербак Н.П., Степанюк Л.М., Пономаренко А.Н.**

**Цикличность геологических процессов в истории Земли. Первопричины.**

Рассмотрены первопричины мегацикличности в истории Земли. Предложена модель мегацикличности. В рамках этой модели причинами цикличности является внутренняя энергия Земли и процессы перераспределения энергии и вещества между ядром и мантией, внутри самой мантии и между мантией и литосферой. Это перераспределение в Земле происходит благодаря двум тесно связанными между собой процессам — конвекцией и плюмами. Конвекция в мантии приводит к горизонтальному перемещению литосферных плит со всеми последствиями: зарождением и существованием зон спрединга, трансформных разломов и зон субдукции, с соответствующим набором геологических породных ассоциаций. Спускным крючком для перестройки конвекции (конвективных ячеек), служат суперплюмы — потоки перегретого вещества, отрывающегося с поверхности ядра Земли, проявления которых обуславливают образование и распад суперконтинентов. Предложено понятие геологического цикла (мегацикла), начало которого это момент перерождения рифтов в зоны спрединга и формирования пород офиолитовой ассоциации. Именно на этом этапе распада суперконтинента формируются первые осадочные и вулканогенно-осадочные породы, которые могут быть распознаны и закартированы. Завершает геологический цикл образование крупных роев даек. Проведен обзор космических факторов и возможной их роли в мегацикличности. *Ключевые слова:* цикличность, конвекция, геологический цикл, плюм, мантия, ядро.

**Shcherbak M.P., Stepaniuk L.M., Ponomarenko O.M.**

**Cyclicity of geological processes in the Earth's history. Primary causes.**

Primary causes of megacyclicity in the Earth's history is considered. Megacyclicity model is offered. According to this model the causes of cyclicity is the inner energy of the Earth and processes of redistribution of energy and substance between core and mantle in the mantle and between mantle and lithosphere. This redistribution occurred in the Earth as two closely interrelated processes — convection and plumes. Mantle convection results into horizontal movements of lithospheric plates with such consequences as: origin and existence of spreading zones, transform faults breaks and subduction zones, with associated set of geological rock associations. As a trigger for reorganisation of convection конвекции (convection cells), are superplumes — flows of overheated substance which are coming from surface of the Earth's core and which manifestations cause formation and supercontinental breakup. The concept of geological cycle (megacycle) which starts from rift transformation into spreading zone and formations of ophiolite rock associations is offered. Especially at this stage of supercontinent breakup first sedimentary and volcanogenic-sedimentary rocks which can be distinguished and mapped are formed. The final stage of geological cycle is formation of large dike swarms. The review of space factors and their possible role to in megacyclicity is made. *Key words:* cyclicity, convection, geological cycle, plume, mantle, core.

*Надійшла 29.03.2016.*