

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.2.198793>  
УДК 552.12 : 550.462 : 549.623.5 : 549.621.8

Р.Я. БЕЛЕВЦЕВ, В.І. БЛАЖКО, О.О. ВИСОТЕНКО, С.В. КУЗЕНКО,  
Б.Ф. МЕЛЬНИЧЕНКО, І.І. МИХАЛЬЧЕНКО, Л.О. ПЕТРОВА, С.І. ТЕРЕЩЕНКО

Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,  
E-mail: belevtsev@ukr.net

## ТЕРМОДИНАМІЧНА РИФЕЙ-ФАНЕРОЗОЙСЬКА ЕВОЛЮЦІЯ ВЕРХНІХ ГЕОСФЕР: АТМОСФЕРИ, ЗЕМНОЇ КОРИ, ГІДРОСФЕРИ ТА БІОСФЕРИ

Представлена нова концепція термодинамічної рифей-фанерозойської еволюції верхніх геосфер (атмосфери, земної кори, гідросфери та біосфери), яка від рифею до фанерозою визначається послідовним охолодженням поверхні Землі. Для гідросфери (з 2,0 млрд років) це проявляється в появі суцільного кислого океану з рідкою водою, в якому з часом зменшувалася ступінь кислотності. Первинна атмосфера у ранньому протерозої близько 2 млрд років тому складалася переважно з водяної пари та хлору з тиском водяної пари при 375 °С близько 230 бар і тиском хлорного газу близько 5 бар, з утворенням кислої гідросфери (рН 0,15) та з тиском близько 1 бар вільного кисню в атмосфері. Сучасний склад атмосфери Землі склався, зокрема, завдяки реакціям окислення в геосферах, що призвело до зменшення кисню з венду в атмосфері до 0,2 бар, а також до переважання в ній азоту, який в атмосфері має значну стійкість. У фанерозої збільшувалася площа суші та висота материків, які денудувалися поверхневими водотоками та морями з відкладанням осадів, а також зростав об'єм накопичення вулканітів, що було пов'язано з початком активної тектоніки плит. Архейські смугасті залізисті кварцити деякими геологами відносяться до осадових порід. Однак цьому суперечать оцінки температури у поверхневих шарах Землі в археї (близько 600—700 °С), коли проходили активні процеси регіонального метаморфізму та гранітоутворення за участю водяної пари. Сприятливі умови для життя у воді виникли у верхньому рифеї (з ≈1000 млн років тому), коли в океанічній воді знизилася кислотність. Однак на поверхні суші перше життя з'явилося тільки у девоні за температури атмосфери нижче 60 °С.

**Ключові слова:** термодинамічна еволюція геосфер; рифей; венд; фанерозой.

### Вступ

Генезис та термодинамічна еволюція верхніх геосфер — атмосфери, гідросфери, земної кори, біосфери, є важливими проблемами, перш

за все, для трактування виникнення та еволюції біосфери. Є багато різних гіпотез про давнє, майже архейське життя, що суперечать багатом геохімічним даним, з яких важливим є

Цитування: Белевцев Р.Я., Блажко В.І., Висотенко О.А., Кузенко С.В., Мельниченко Б.Ф., Михальченко І.І., Петрова Л.О., Терещенко С.І. Термодинамічна рифей-фанерозойська еволюція верхніх геосфер: атмосфери, земної кори, гідросфери та біосфери. *Геологічний журнал*. 2020. № 2 (371). С. 18—26. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.2.198793>

Citation: Belevtsev R.Ya., Blazhko V.I., Vysotenko O.O., Kuzenko S.V., Melnichenko B.F., Mihalchenko I.I., Petrova L.O., Tereshchenko S.I., 2020. Thermodynamic Riphean-Phanerozoic evolution of the upper geospheres: atmosphere, earth's crust, hydrosphere and biosphere. *Geological Journal (Ukraine)*, No 2 (371), pp. 18—26. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.2.198793>

наявність кисню, а також висока температура, оскільки умови життя обмежені вузьким інтервалом позитивних температур (4–60 °С). Наприклад, життя в атмосфері на поверхні Землі виникло лише з девону (≈400 млн років тому), але активне життя почалося лише з карбону — з 300 млн років тому при максимальній температурі атмосфери близько 50 °С (Аллаби, 2008).

У морях та океанах температура води швидко зменшується з глибиною, зараз це 5–10 °С на кожні 100 м, і тому життя в океані могло виникнути раніше, ніж на суші. Умови для життя в океані також залежать від кислотності океанічної води і при значній кислотності, за рН порядку 1–2, життя в океані неможливе. Задля реконструкції умов виникнення та розвитку біосфери треба проаналізувати еволюцію основних верхніх геосфер, тобто зміну їх складу та РТ умов.

### Еволюція температурного та газового режиму формування геосфер

Можна орієнтовно оцінити зміну температури поверхні Землі, як остигаючого нагрітого тіла (Эберт, 1963; Белевцев Р.Я. та ін., 2019а):

$$T = T_0 \cdot e^{-kt}, \text{ або } \ln T_0 - \ln T = kt, \quad (1)$$

де  $T_0$  — початкова температура (800–850 °С або 1073–1123 К);  $T$  — кінцева температура (25 °С або 298 К);  $t$  — тривалість охолодження від 3,8 млрд років тому до сучасності;  $k$  — константа швидкості (0,35). За цією формулою можна оцінити вік головних процесів цієї еволюції (Белевцев Р.Я. та ін., 2019а). У цій еволюції можна виділити наступні важливі етапи формування земної кори та інших геосфер:

1) Архейський етап (3,8–2,6 млрд років) формування магматогенної плагіогранітової земної кори, в 10 % об'єму якої при її кристалізації інтродували ультраосновні, основні та залізисто-кременисті магми з формуванням дайкоподібних інтрузивних тіл відповідного складу. Цей етап завершився регіональним метаморфізмом (Танатар, 1916; Белевцев Я.Н., 1959; Деменицкая, 1967; Белевцев Р.Я., 1982; Добрецов, 1990; Belevtsev R., 1996; Азаров, 2005; Белевцев Р.Я. та ін., 2019а).

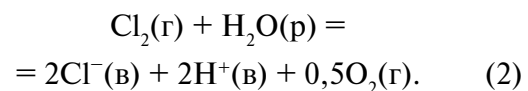
2) Ранньопротерозойський етап (2,6–1,6 млрд років), який на Українському щиті відзначався

утворенням Коростенського, Корсунь-Новомиргородського та інших багатих калієм гранітних масивів, які представлені магматичними рапаківі гранітами та супроводжуються масивами лабрадоритів та габро-анортозитів. Для цих гранітів характерні порфіробласти калішпату, які формуються за участі рідкої води при постмагматичному калієвому метасоматозі (Курлов та ін., 1997; Белевцев Р.Я. та ін., 2011; Белевцев Р.Я., 2012; Белевцев Р.Я. та ін., 2016).

3) При охолодженні постмагматичного водного газу (пару) нижче критичної для води температури 375 °С з нього формується рідка вода у протерозої близько 2,0 млрд років тому (Белевцев Р.Я. та ін., 2011; Белевцев Р.Я., 2011; Белевцев Р.Я., 2012).

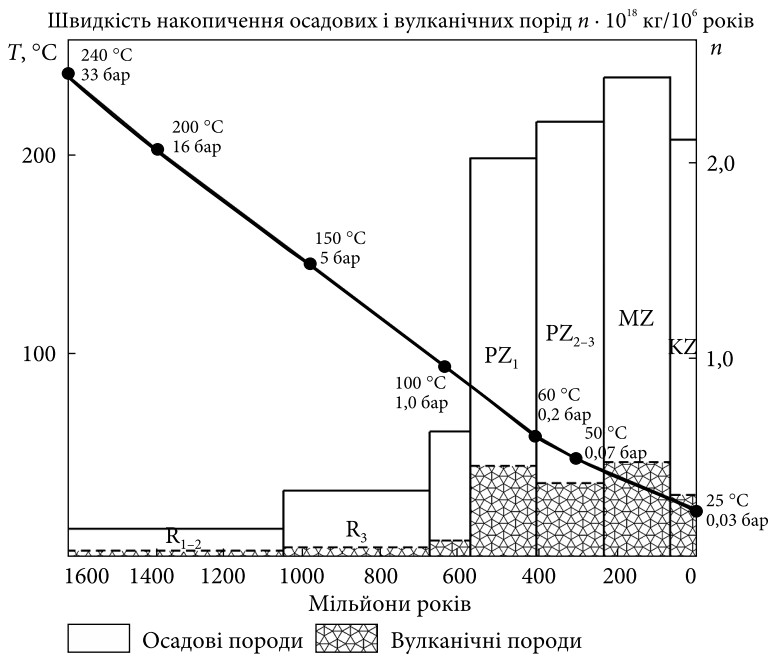
4) Верхнепротерозойські етапи: рифей (1,6–0,68 млрд років), венд (0,68–0,57 млрд років) та фанерозой (від 0,57 млрд років до сучасності) (Мархинин, 1985; Ронов та ін., 1990; Курлов та ін., 1997; Белевцев Р.Я. та ін., 2007; Белевцев Р.Я. та ін., 2010; Белевцев Р.Я., 2011; Белевцев Р.Я., 2012; Белевцев Р.Я., 2013; Белевцев Р.Я. та ін., 2016).

При температурі нижче критичної, при появі рідкої води та за участі хлору відбувається реакція (2), яка йде направо (Белевцев Р.Я., 2011; Белевцев Р.Я., 2012; Белевцев Р.Я., 2013):



При цьому  $\text{HCl}(\text{в})$  розчиняється у воді, розпадаючись на іони  $\text{Cl}^-(\text{в})$  та  $\text{H}^+(\text{в})$ , тобто утворюється водний розчин  $\text{HCl}$ :  $\Delta G_{298}(2) = -25,5 \text{ кДж/моль}$ , а  $\Delta G_{648}(2) = -1,8 \text{ кДж/моль}$ ;  $\lg K_p(2) = 0,14$ . За цією реакцією в рифейі утворився кислий океан з рН 0,15 та вільний атмосферний кисень (Белевцев Р.Я. та ін., 2019б). Проходженню реакції (2) сприяли: зменшення  $T$ , зростання загального тиску  $P_{\text{заг}}$  та зменшення відновлення та кислотності водних розчинів, зменшення  $\text{Pn}_2$ . При цьому  $\text{Po}_2$  у ранньопротерозойській атмосфері досягає 1 бар. Таким чином, в ранньому протерозої з'явився кислий океан та багата абіогенним киснем атмосфера, яка визначила  $Eh$  океанічної води — близько +0,8 В (див. таблицю) (Белевцев Р.Я., 2011).

Аналіз цих реакцій є складним завданням, оскільки режим температури залежить від багатьох факторів: 1) від остигання Землі, як пла-



Еволюція накопичення осадових та вулканічних порід, а також температури та тиску водної пари ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ , бар) в атмосфері в рифеї (RF), венді (V) та фанерозої: від палеозою (PZ) до кайнозою (KZ)

The evolution of the accumulation of sediments and volcanic rocks, as well as the temperature and pressure of water vapor ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ , bar) in the atmosphere in Riphean (RF), Vendian (V), and Phanerozoic: from the Paleozoic (PZ) to the Cenozoic (KZ)

**Фізико-хімічні та термодинамічні характеристики геосфер (гідросфери, атмосфери, земної кори) та швидкість відкладання осадових та вулканічних порід в рифеї, венді та фанерозої**

**Physico-chemical and thermodynamic characteristics of geospheres (hydrosphere, atmosphere, earth's crust) and deposition rate of sediments and volcanics in Riphean, Vendian and Phanerozoic**

№	Вік етапів еволюції, млн років	1600	1350	970	620	410	310	0
1	Температура, °C	240	200	150	100	60	50	25
2	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ , бар	33	16	5	1	0,2	0,07	0,03
3	pH	0,15	1	2—4	6—7	8	8	8
4	$Eh$ , В	0,7	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1
5	Потужність товщі осадових, м	10	100	200	300	500	600	900
6	Середня глибина океану, м	1800	2400	2500	2600	2700	3800	4000
7	Швидкість накопичення осадових, $10^{18}$ кг/10 <sup>6</sup> років	0,12	0,27	0,40	0,60	2,2	2,3	3,0
8	Швидкість накопичення вулканітів, $10^{18}$ кг/10 <sup>6</sup> років	0,02	0,03	0,04	0,05	0,40	0,40	0,40
9	Швидкість накопичення карбонатів, $10^{18}$ кг/10 <sup>6</sup> років	0,02	0,02	0,03	0,09	0,50	0,33	0,40
10	Кисень — газ — $\text{O}_2$ в атм., бар	0,5	0,3	0,3	0,27	0,25	0,2	0,2

нети, а також від випромінювання Сонця у різних широтах і порах року; 2) від термодинаміки хімічних реакцій при різних РТ умовах, які визначають зміну складу та стану речовин атмосфери, гідросфери, земної кори; 3) від процесів вулканізму, осадконакопичення, тектоніки плит, геокології.

Ці процеси досить складні та їх умови часто не мають однозначної інтерпретації. Наприклад, в полюсних широтах в Антарктиді, на

Шпіцбергені та Гренландії є кам'яновугільні відклади карбону, знаходження яких там логічно розглядати як наслідок переміщення плит з тропічної зони до полюсу відповідно до гіпотези тектоніки плит, оскільки вони включають залишки тропічних організмів. Але деякі геофізики не визнають тектоніку плит, і тоді треба визнавати наявність тропічних температур в карбоні і в зонах полюсів Землі, що мало імовірно.

Багато геологів припускали, що фізико-хімічні умови на поверхні Землі ще в археї були близькими до сучасних і вже було життя. Наприклад, В.І. Вернадський, Я.М. Белевцев та багато інших геологів, відносили архейські залізисто-кременисті формації до осадових, хоч залишків організмів в них не знайдено, але в археї на поверхні Землі ще не було рідкої води, і вона до 2,0 млрд років була представлена газом при температурі вище 375 °С (Белевцев Р.Я. та ін., 2019а).

У деяких роботах були обґрунтовані уявлення про термодинамічну еволюцію Землі та інших планет Сонячної системи з 4,5 млрд років тому, коли сформувалася первинна високотемпературна планета Земля сонячного складу, яка мала початкову масу в 60 разів більшу, ніж теперішня Земля. Потім при виділенні з неї значної кількості водню вона генерувалась в планету сучасної маси та складу приблизно до 3,8 млрд років тому (Всехсвятский, 1972).

Більш популярними були гіпотези про розплавлену Землю, поверхня якої закристалізувалась 3,8 млрд років тому з формуванням первинної постмагматичної плагіогранітової земної кори (Добрецов, 1990). Залізисті кварцити розглядались лише деякими геологами як магматичні інтрузії з мантиї Землі в ранньому докембрії (Танатар, 1916; Belevtsev R., 1996). Були представлені різні гіпотези про зниження температури у верхніх геосферах в протерозої, про появу рідкої води, про кислий та окиснений первинний океан, про тектоніку плит, про термодинаміку та рудоутворення (Эберт, 1963; Мархинин, 1985; Ронов та ін., 1990; Белевцев Р.Я. и др., 2010; Белевцев Р.Я. и др., 2016; Белевцев Р.Я. та ін., 2018). Для рифею, венду та фанерозою нами зроблена загальна оцінка еволюції фізико-хімічних умов геохімічних процесів в таблиці та на рисунку.

## Основні ідеї формування та етапи еволюції Землі

Розглянемо головні геохімічні ідеї формування Землі й докембрійських верхніх геосфер: земної кори, атмосфери та гідросфери. Найбільш обґрунтованою є космогенна гіпотеза В.А. Амбарцумяна, С.К. Всехсвятского та інших (Белевцев Я.Н., 1959; Азаров, 2005) про формування Сонячної системи 4,5 млрд років тому, коли первинно всі тіла

Сонячної системи склалися з зіркової матерії, переважно з водню. Еволюція кожного космічного тіла, перш за все, визначається його первинною масою зіркової матерії, а також відстанню від Сонця (Белевцев Я.Н. и др., 1959; Азаров, 2005). Земля в цьому відношенні займає найбільш вигідне положення для виникнення та існування життя. Вона є кам'яною планетою зі значною масою газових компонентів і особливо води, а також розміщується між Венерою, де середня температура поверхні близько 430 °С, і Марсом, де температура поверхні, навпаки, значно нижче 0 °С — близько до мінус 70 °С.

У віковий період 4,5—3,8 млрд років тому Земля була розплавлена, про що свідчить відсутність кристалічних порід цього віку (за даними ізотопної геохронології). Піднята на поверхню Землі в результаті магматичної диференціації в археї плагіогранітова (ендербітова) магма почала кристалізуватися 3,8 млрд років тому в ранньому археї з формуванням плагіогранітової земної кори потужністю 10—15 км (Белевцев Р.Я., 1982; Белевцев Р.Я. и др., 2007; Белевцев Р.Я. и др., 2010; Белевцев Р.Я. и др., 2011; Белевцев Р.Я., 2011; Белевцев Р.Я., 2012). Ця первинна магма містила до 8—10 % води, а також близько 1 % інших газів — хлору, сірки, та CO<sub>2</sub>, подібно до вулканічних газів (Белевцев Р.Я. та ін., 2011; Белевцев Р.Я., 2011; Белевцев Р.Я. и др., 2016; Belevtsev R., 1996). Головні мінерали плагіогранітів: середній плагіоклаз (№ 20—40 з 0,5—1 % K<sub>2</sub>O), кварц та гіперстен при 60—70 % SiO<sub>2</sub>. РТ умови формування: Т близько 800 °С, P<sub>зар</sub> = 2—4 кбар, P<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 1—2 кбар, а вміст води при кристалізації плагіогранітової магми становить близько 6—8 %.

Після кристалізації ендербітової (плагіогранітоїдної) земної кори 3,8 млрд років тому Земля пройшла складну еволюцію з різними етапами.

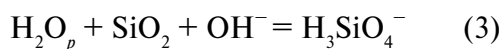
Перш за все, ці плагіограніти після кристалізації займали об'єм менший на 5—10 %, ніж магма, і по розломно-тріщинних зонах були інтродувані глибинними магмами з верхньої мантиї: залізисто-кременистого, основного і ультраосновного складу з формуванням досить багатьох дайкоподібних тіл. Потім весь цей породний комплекс був перетворений архейським регіональним гранулітовим метаморфізмом близько 2,6—2,8 млрд років тому

(Танатар, 1916, Belevtsev R., 1996; Курлов та ін., 1997; Азаров, 2005; Белевцев Р.Я. та ін., 20196).

Криворізькі залізисті кварцити виникли в результаті кристалізації кремнеземистого та магнетитового розплавів. Це переважно 30 % магнетиту та 70 % кварцу. Температура кристалізації їх близько 1700 °С, при якій ці два розплави рівноважні. При  $T = 1800$  °С рівноважний склад їх: 54 %  $\text{SiO}_2$  та 46 %  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Переважно у Кривбасі співвідношення магнетит : кварц = 23 : 77, а в залізистих джеспілітах — середнє відношення магнетит : кварц = 40 : 60. Тіла залізистих кварцитів у Криворізькому залізорудному басейні залягають у вигляді монокліналі, яка ускладнена накладеною складчастістю.

Залізисті кварцити є архейськими разом з плагіогнейсами (ендербітами) з віком близько 3 млрд років (Белевцев Р.Я., 2013; Белевцев Р.Я. та ін., 20196).

До 2,0 млрд років вода на поверхні Землі була газом у складі атмосфери, а в земній корі був проявлений лише регіональний метаморфізм без зміни хімічного складу порід. Після 2,3 млрд років вже у рідкій воді утворились метасоматичні білі кварцити — з виносом кислотою водою металів з порід. Велику роль відіграло перш за все виділення хлору (до 6 %  $\text{HCl}$ ), який сформував кислу морську воду з утворенням по силікатниз породах кварцитів, наприклад, овруцьких кварцитів в рифейі з віком близько 1,5 млрд років (Белевцев Р.Я., 2013; Белевцев Р.Я. та ін., 20196). А з фанерозою рідка морська вода мала вже лужну реакцію і виносила кремнезем із кварцу залізистих кварцитів за реакцією:



з  $\Delta G_{298} = -0,71$  кДж / моль (Белевцев Р.Я. та ін., 20196).

При виносі кремнезему з залізистих кварцитів за цією реакцією в них генерувались багаті залізні мартикові руди у фанерозої, за окислювальних умов, з утворенням гематиту по магнетиту (Белевцев Я.Н. и др., 1959). Таким чином, фільтрація морської води в товщу залізистих кварцитів супроводжувалася також утворенням лужних амфіболів, наприклад, рибекиту, що можна пояснити привносом натрію, вміст якого пов'язаний з розчинною в морській воді сіллю  $\text{NaCl}$ .

## Про еволюцію життя в рифейі, венді та фанерозої

Таким чином, сучасний склад атмосфери Землі сформувався завдяки, зокрема, реакціям окислення у гідросфері, атмосфері, вулканізму, а потім при зміні рН,  $Eh$  та температури (нижче 60 °С) у гідросфері та атмосфері з'явилося життя. Це призвело до зменшення в них вуглекислого газу, особливо завдяки рослинам, а також до стабілізації об'ємної частки кисню в атмосфері до 21 % і до переважання в ній азоту, який в атмосфері має значну стійкість, яка, можливо, пов'язана з його малою хімічною активністю у порівнянні з іншими газами атмосфери.

Уявлення про еволюцію життя на Землі достатньо складне, тому що воно пов'язане з його виникненням при температурах від 4 до 60 °С, які є найбільш придатними умовами для обміну речовин для живих організмів з навколишнім середовищем.

Зараз відомо, що більшість живих організмів на Землі виникли при температурах нижче 60 °С в атмосфері чи в рідкій воді. Наприклад, на суші життя виникло в девоні і вже розвинулось в карбоні. Це стосується тварин та рослин. Однак більш раннє життя на Землі виникло ще в докембрії у вигляді морських організмів, оскільки у морі з глибиною температура води швидко зменшується приблизно на 5—10 °С на кожні 100 м від поверхні. Тому життя в океані виникло значно раніше, ніж на суші. Умови життя в морській воді також залежать від її кислотності, а при значній кислотності океанічної води — при рН порядку 1—2, життя у цих умовах неможливе. Тому життя у ранньому рифейі за значної температури, кислотності та окисленості океанічної води малоімовірно (див. таблицю). Найімовірніше, сприятливі умови для життя в океані виникли у венді, а розвинулись вже у фанерозої (див. таблицю).

## Висновки

1. Термодинамічна еволюція верхніх геосфер (атмосфери, земної кори, гідросфери та біосфери) від рифею до фанерозою залежить, перш за все, від послідовного охолодження поверхні Землі. Планета Земля від раннього архею до нашого часу постійно охолоджується, і температура на її поверхні поступово зменши-

лась від 800 °С 3,8 млрд років тому до 25 °С в сучасності.

2. Смоугастість архейських залізистих кварцитів можна пояснити не осадовою їх природою, а розпадом двох незмішуваних розплавів (силікатного та залізистого складу) в системі  $Fe_3O_4-SiO_2$  чи  $FeO-SiO_2$  при високотемпературних умовах близько 1500 °С.

3. Гідросфера починає утворюватись з 2,0 млрд років, коли з рифею при температурі нижче 375 °С з'являється рідка вода, яка протягом своєї еволюції поступово зменшувала кислотність та окисленість.

4. Первинна атмосфера до рифею переважно складалася з водного пару та хлорного газу, а потім при появі рідкої води за реакцією між ними утворився також вільний кисень в атмосфері з тиском близько 1 бар.

5. У кислому океані в рифеї до венду при слабкому осадконакопиченні з порід до океану виносяться практично всі компоненти, окрім кремнезему, з утворенням овруцьких кварцитів, а також ураноносних альбітитів,

які формувалися при проникненні води кислого океану по зонах розломів 1,8 млрд років тому в глибинні зони земної кори і з якими пов'язане формування значних уранових родовищ (Жовторіченське, Мічуринське та інші).

6. З венду (з 620 млн років тому) швидко збільшуються площа суші та висота материків. Вони розмиваються морями з відкладанням потужних покладів осадових порід, в тому числі карбонатів. Також відбувається поступове зростання накопичення вулканітів, що пов'язано з початком активної тектоніки плит та дрейфом континентів.

7. Сучасна атмосфера Землі з фанерозою склалася завдяки реакціям окислення у гідросфері та атмосфері та вулканізму. Зміни газового складу та зменшення рН і Eh в гідросфері та зниження температури в атмосфері до 60 °С призвели до виникнення життя з девону. Це, у свою чергу, призвело до встановлення тиску кисню та азоту в атмосфері на рівнях, відповідно, 0,2 бар та 0,8 бар.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Шеремет Е.М., Глевасский Е.Б., Есипчук К.Е. Геолого-геоэлектрическая модель Орехово-Павлоградской шовной зоны Украинского щита. Киев: Наук. думка, 2005. 192 с.
- Аллаби Майкл. Планета Земля. Энциклопедия «Ридерз Дайджест» (пер. Юрий Амченков). Изд. Дом Ридерз Дайджест, 2008. 256 с.
- Белевцев Р.Я. Режим зонального прогрессивного метаморфизма в докембрии Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1982. 150 с.
- Белевцев Р.Я., Бойченко С.Г., Спивак С.Д., Николаенко В.И., Волощук В.М., Дудко В.С., Блажко В.И., Ковалюх Н.Н., Кузенко С.В., Курлов Н.С., Самчук А.И., Козак С.А., Высотенко О.А. Термодинамика газового обмена в окружающей среде. Киев: Наук. думка, 2007. 247 с.
- Белевцев Р.Я., Шестопалов В.М., Спивак С.Д., Николаенко В.И., Блажко В.И., Дудко В.С., Крюченко Н.О., Кузенко С.В., Лазаренко Е.Е., Самчук А.И., Ганевич А.Е., Коченко В.Ю. Геохимия литогенеза овручских кварцито-песчаников рифея. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2010. № 10. С. 22—41.
- Белевцев Р.Я., Белевцев А.Р., Спивак С.Д., Дудко В.С., Мельниченко Б.Ф., Бондаренко С.Н., Николаенко В.И., Лазаренко Е.Е., Блажко В.И. Генезис и прогнозирование золотого и уранового оруденения в докембрии Украинского щита. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2011. № 2 (11). С. 20—45.
- Белевцев Р.Я. Происхождение и эволюция внешних геосфер: газовой атмосферы, кислого океана, свободного атмосферного кислорода и возникновение жизни. *Доп. НАН України*. 2011. № 12. С. 83—90.
- Белевцев Р.Я. Генезис и термодинамическая эволюция внешних геосфер. *Геофизический журнал*. 2012. Т. 34, № 2. С. 49—59.
- Белевцев Р.Я. В.И. Вернадский о геохимии окружающей среды. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України*. 2013. Вип. 22. С. 113—123.
- Белевцев Р.Я., Блажко В.И., Терещенко С.И. О термодинамической эволюции земной коры и тектонике плит. *Геофизический журнал*. 2016. № 6. С. 118—136.
- Белевцев Р.Я., Блажко В.И., Дерман В.А., Жолуденко О.А., Кузенко С.В., Терещенко С.И. Термодинаміка викидів токсичних речовин автомобілями в повітря міст та очищення його рослинами. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища НАН України*. 2018. Вип. 28. С. 66—73.
- Белевцев Р.Я., Блажко В.И., Терещенко С.И. Термодинамическая эволюция верхних геосфер: атмосферы, земной коры, гидросферы и биосферы. *Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні: Збірник тез*

- наукової конференції, присвяченої 50-річчю Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка (Київ, 14—16 травня 2019 р.). У 2-х томах. Київ, 2019а. Т. 1. С. 51—52.
- Белевцев Р.Я., Блашко В.І., Терещенко С.І. Термодинамічне обґрунтування магматичного генезису архейських залізистих кварцитів Українського щита та їх послідовна локальна переробка в багаті залізні руди при вилуговуванні з них кремнезему морською водою у фанерозої. *Збірник наукових статей XV Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»* (Харків, 9—13 вересня 2019 р.). Харків, 2019б. С. 23—27.
- Белевцев Я.Н., Бура Г.Г., Дубинкина Р.П., Епатко Ю.М., Ищенко Д.И., Мельник Ю.П., Стыгин А.И. Генезис железных руд Криворожского бассейна. Киев: Изд-во АН УССР, 1959. 310 с.
- Всехсвятский С.К. Космогония Солнечной системы. *Проблемы современной космогонии*. Москва: Наука, 1972. С. 318—413.
- Деменицкая Р.М. Кора и мантия Земли. Москва: Недра, 1967. 280 с.
- Добрецов Н.Л. Введение в глобальную петрологию. Новосибирск: Наука, 1990. 200 с.
- Курлов Н.С., Белевцев Р.Я., Решетняк В.В., Мечников Ю.П. Криворожская сверхглубокая скважина: значение для петрогенезиса и геоэкологии. *Минералогический журнал*. 1997. Т. 29, № 5. С. 85—100.
- Мархинин Е.К. Вулканизм. Москва: Недра, 1985. 288 с.
- Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдасов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. Москва: Наука, 1990. 182 с.
- Танатар И.И. Некоторые соображения о генезисе криворожских руд и вмещающих кварцитов. *Южный инженер*. 1916. № 7—8. С. 157—161.
- Эберт Г. Краткий справочник по физике. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 552 с.
- Belevtsev R. Ya. About liquation-intrusive genesis of archean ferruginous quartzites. *Доп. НАН України*. 1996. № 4. С. 97-102.

Надійшла до редакції 21.02.2020

Надійшла у ревізованій формі 17.04.2020

Прийнята 18.04.2020

## REFERENCES

- Allaby Michael, 2008. Planet Earth. Encyclopedia "Readers Digest" (translation by Yuri Amchenkov). Publishing house: Readers Digest (in Russian).
- Azarov N. Ya., Antsiferov A. V., Sheremet E. M., Glevassky E. B., Esipchuk K. E., 2005. Geological-geolectric Model of the Orekhovo-Pavlograd Seam Zone of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., 1982. Regime of the Zonal Progressive Metamorphism in the Precambrian of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., 1996. About liquation-intrusive genesis of archean ferruginous quartzites. *Dopovidi NAN Ukraine*, № 12, p. 97-102.
- Belevtsev R. Ya., 2011. Genesis and evolution of outer geospheres: gas-water atmosphere, sour ocean, free atmospheric oxygen and the origination of life. *Dopovidi NAN Ukraine*, № 12, p. 83-90 (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., 2012. Genesis and thermodynamic evolution of outer geospheres. *Geophysical journal*, № 2, p. 49-59 (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., 2013. V.I. Vernadsky about geochemistry of environment. *Collection of scientific papers of the Institute of environmental geochemistry*, № 22, p. 113-123 (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., Boychenko S. G., Spivak S. D., Nikolaenko V. I., Voloshchuk V. M., Dudko V. S., Blazhko V. I., Kovalyuh N. N., Kuzenko S. V., Kurlov N. S., Samchuk A. I., Kozak S. A., Vysotenko O. A., 2007. Thermodynamics of gas sharing in the environment. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., Belevtsev A. R., Spivak S. D., Dudko V. S., Melnichenko B. F., Bondarenko S. N., Nikolaenko V. I., Lazarenko E. E., Blazhko V. I., 2011. Genesis and prognosis of gold and uranium ore formation in the Precambrian of the Ukrainian shield. *Poshukova ta ekologichna geochimiya*, № 2 (11), p. 20-45 (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., Blazhko V. I., Derman V. A., Zholudenko O. A., Kuzenko S. V., Tereschenko S. I., 2018. Thermodynamics of toxic automotive emission in city air and air purification by plants. *Collection of scientific papers of the Institute of environmental geochemistry*, № 28, p. 66-73 (in Ukrainian).
- Belevtsev R. Ya., Blazhko V. I., Tereschenko S. I., 2016. About thermodynamics evolution of Earth crust and tectonic plates. *Geophysical journal*, № 6, p. 118-136 (in Russian).
- Belevtsev R. Ya., Blazhko V. I., Tereschenko S. I., 2019a. Thermodynamic evolution of the upper geospheres: atmosphere, earth crust, hydrosphere and biosphere. *Achievements and Development of the Geological Sciences in Ukraine*:

- Abstracts of Scientific Conference dedicated to the 50th Anniversary of M.P. Semenenko, Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation (Kyiv, May 14–16, 2019). In 2 volumes. Kyiv, vol. 1, p. 51-52 (in Russian).*
- Belevtsev R.Ya., Blazhko V., Terescenko S., 2019b. Thermodynamic substantiation of magmatic genesis of Archean ferruginous quartzites of the Ukrainian Shield and their subsequent local processing into rich iron ores during leaching of silica with seawater in Phanerozoic. *Zbirnyk naukovykh statey XV mizhnarodnoi konf. "Ekologichna bezpeka: problemy i shliachy vyrishennia"*. Kharkiv, p. 23-27 (in Ukrainian).
- Belevtsev Y.N., Bura G.G., Dubinkina R.P., Epatko Yu.M., Ishenko D.I., Melnik Yu.P., Strygin A.I., 1959. The genesis of iron ores of the Krivoy Rog basin. Kiev: AN Ukrainian SSR (in Russian).
- Belevtsev R.Ya., Shestopalov V.M., Spivak S.D., Nikolaenko V.I., Blazhko V.I., Dudko V.S., Kryuchenko N.O., Kuzenko S.V., Lazarenko E.E., Samchuk A.I., Ganevich A.E., Kochenko V. Yu., 2010. Geochemistry of lithogenesis of Ovruch quartzite-sandstone in Riphean. *Poshukova ta ekologichna geokhimiya*, № 10, p. 22-41 (in Russian).
- Demenitskaya R.M., 1967. The crust and mantle of the Earth. Moscow: Nedra (in Russian).
- Dobretsov N.L., 1990. Introduction to Global Petrology. Novosibirsk: Nauka (in Russian).
- Ebert G., 1963. A Brief Guide to Physics. Moscow: State Publishing House of Physics and Mathematics (in Russian).
- Kurlov N.S., Belevtsev R.Ya., Reshetnyak V.V., Mechnikov Yu.P., 1997. Krivorozhskaya ultradeep well: implications for petrogenesis and geoecology. *Mineralogicheskii zhurnal*. vol. 29, № 5, p. 85-100 (in Russian).
- Markhinin E.K., 1985. Volcanism. Moscow: Nedra (in Russian).
- Ronov A.B., Yaroshevsky A.A., Migdasov A.A., 1990. Chemical structure of Earth's crust and geochemical balance of the main elements. Moscow: Nauka (in Russian).
- Tanatar I.I., 1916. Some considerations about the genesis of Krivoy Rog ores and host quartzites. *Yuzhnyi inzhener*, № 7-8, p. 157-161 (in Russian).
- Vsehsvyatskiy S.K., 1972. Cosmogony of the Solar system. In: *Problem of modern cosmogony*. Moscow: Nauka, p. 318-413 (in Russian).

Received 21.02.2020

Received in revised form 17.04.2020

Accepted 18.04.2020

R.Ya. Belevtsev, V.I. Blazhko, O.O. Vysotenko, S.V. Kuzenko,  
B.F. Melnichenko, I.I. Mihalchenko, L.O. Petrova, S.I. Tereshchenko  
State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine,  
Email: belevtsev@ukr.net

#### THERMODYNAMIC RIPHEAN-PHANEROZOIC EVOLUTION OF THE UPPER GEOSPHERES: ATMOSPHERE, EARTH'S CRUST, HYDROSPHERE AND BIOSPHERE

A new concept of thermodynamic Riphean-Phanerozoic evolution of upper geospheres: atmosphere, earth's crust, hydrosphere and biosphere is presented. This evolution from Riphean to Phanerozoic is determined by the consistent cooling of the earth's surface. For the hydrosphere (starting from 2.0 billion years), this is manifested in the appearance and increase in the Riphean and Phanerozoic of the mass of liquid water (mainly in the seas and oceans), which gradually decreases its acidity and increases its oxidizing properties. The primary atmosphere in the Early Proterozoic about 2 billion years ago mainly consisted of gaseous water and chlorine, with water gas pressure at about 230 bar and the chlorine pressure at about 5 bar at a temperature of 375 °C. At this, an acidic hydrosphere (pH = 0.15) was formed, with a pressure of about 1 bar of free oxygen in the atmosphere. In the acidic ocean in Riphean to Vendian, with little sedimentation, almost all components were removed from the rocks of the ocean floor, except for silica, with the formation, for example, of Ovruch quartzites. Since Vendian (from 620 million years ago, and especially in the Phanerozoic), the land area and the height of the continents rapidly increased, which are eroded by the seas with the deposition of thick sediments, including carbonates. At the same time, more and more volcanics are accumulating, which is associated with active plate tectonics. The modern composition of the Earth's atmosphere was formed due to chemical reactions of oxidation in the hydrosphere and atmosphere and volcanism, followed by a change in pH, Eh, and temperature (below 60 °C) in the hydrosphere and atmosphere and the appearance of life. This led to a decrease in carbon dioxide in the hydrosphere and atmosphere, especially due to plants, as well as to stabilization of the oxygen content in the atmosphere at 0.2 bar and to the predominance in it of nitrogen, which has substantial stability in the atmosphere. Views of some geologists that Archean banded ferruginous quartzites have originated as sedimentary rocks are contradicted by significant temperatures in the surface layers of the Earth in the Archean (about 600-700 °C), when active processes of regional metamorphism and gas formation took place.

**Keywords:** *thermodynamic evolution of geospheres; Riphean; Vendian; Phanerozoic.*



*Р.Я. Белевцев, В.И. Блажко, О.А. Высотенко, С.В. Кузенко,  
Б.Ф. Мельниченко, И.И. Михальченко, Л.А. Петрова, С.И. Терещенко*

Государственное учреждение «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», Киев, Украина,  
E-mail: belevtsev@ukr.net

#### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ РИФЕЙ-ФАНЕРОЗОЙСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЕРХНИХ ГЕОСФЕР: АТМОСФЕРЫ, ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И БИОСФЕРЫ

Представлена новая концепция термодинамической рифей-фанерозойской эволюции верхних геосфер (атмосферы, земной коры, гидросферы и биосферы), которая от рифея до фанерозоя определяется последовательным охлаждением поверхности Земли. Для гидросферы (с 2,0 млрд лет) это проявляется в появлении сплошного кислого океана с жидкой водой, в котором со временем уменьшалась степень кислотности. Первичная атмосфера в раннем протерозое около 2 млрд лет назад состояла преимущественно из водного пара и хлора с давлением водного пара при 375 °С около 230 бар и давлением хлорного газа около 5 бар, с образованием кислой гидросферы (рН 0,15) и с давлением около 1 бар свободного кислорода в атмосфере. Современный состав атмосферы Земли сложился, в частности, благодаря реакции окисления в геосферах, что привело к уменьшению кислорода с венда в атмосфере до 0,2 бар, а также к преобладанию в ней азота, который в атмосфере имеет значительную устойчивость. В фанерозое увеличивалась площадь суши и высота материков, которые денудировались поверхностными водотоками и морями с отложением осадков, а также рос объем накопления вулканитов, что было связано с началом активной тектоники плит. Архейские полосатые железистые кварциты некоторыми геологами относятся к осадочным породам. Однако этому противоречат оценки температуры в поверхностных слоях Земли в архее (порядка 600—700 °С), когда проходили активные процессы регионального метаморфизма и гранитообразования с участием водного пара. Благоприятные условия для жизни в воде возникли в верхнем рифее (около ≈1000 млн лет назад), когда в океанической воде снизилась кислотность. Однако на поверхности суши первая жизнь появилась только в девоне при температуре атмосферы ниже 60 °С.

**Ключевые слова:** *термодинамическая эволюция геосфер; рифей; венд; фанерозой.*