

С.Г. Бойченко, В.М. Волощук

**ОСОБЛИВОСТІ ВІКОВОЇ ДИНАМІКИ ВМІСТУ
ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ В ЗЕМНІЙ АТМОСФЕРІ**

Встановлено основні особливості різномасштабних коливань вмісту вуглекислого газу в атмосфері фанерозою (останні 570 млн. років), в пізнього плейстоцену (останні 420 тис. років) та в останньому тисячолітті. Обговорено можливі фізичні механізми, які відповідальні за природні коливання вмісту CO_2 в атмосфері для розглянутих проміжків часу (у тому числі внутрішні ритми формування тектонічної структури літосфери Землі, зміни елементів земної орбіти, довгоперіодні ритми сонячної активності).

Постановка задачі. Відносний вміст вуглекислого газу CO_2 в земній атмосфері в сучасну епоху досить низький протягом фанерозою. У доіндустріальну епоху (середина XIX ст.) він складав $\sim 280 \text{ млн}^{-1}$ (тобто 280 молекул на 10^6 молекул сухого повітря). У сучасну епоху відносний вміст CO_2 в земній атмосфері піднявся до $\sim 365 \text{ млн}^{-1}$ (тобто на $\sim 30\%$ порівняно з доіндустріальним рівнем).

Зауважимо, що відносний вміст CO_2 в атмосферах двох планет земної групи, одна з яких трохи ближче розташована до Сонця (*Венера*, середня відстань від Сонця – $0,72 \text{ а.о.}$, де 1 а.о. – середня відстань Землі від Сонця – $\sim 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$), а друга (*Марс*) – дещо віддалена ($1,52 \text{ а.о.}$) – надзвичайно високий (складає $\sim 95\text{-}96\%$). За однією з гіпотез вважають, що саме такий високий рівень CO_2 і був притаманний первинній атмосфері Землі. Але два надзвичайно важливих фізико-хімічних механізми виведення вуглекислого газу з атмосфери повинні різко понижувати вміст CO_2 в земній атмосфері:

- розчинення CO_2 у воді з наступним формуванням нерозчинних карбонатів (цей механізм працював протягом усього періоду існування води в рідкому стані);
- реакція фотосинтезу (цей механізм працював протягом останнього геологічного періоду багатоклітинного життя - фанерозою).

Ні на Венері, ні на Марсі такі процеси просто неможливі в сучасну епоху. Вони, можливо, не відбувалися там і в далекі часи, починаючи від зародження сучасної сонячної системи (4,5-4,6 млрд. років тому).

Вважають, що сучасна атмосфера Землі вторинна, причому за її сучасний хімічний склад відповідальна, головним чином, діяльність живих організмів [3, 30]. Практично обґрунтованою є гіпотеза, що саме живі організми в результаті своєї життєдіяльності протягом епохи фанерозою (останні 570 млн. років) перетворили земну атмосферу в азотно-кисневу і різко знизили рівень вмісту CO_2 .

Слід зауважити, що останні космічні дослідження холодної метанової атмосфери і поверхні Титана (супутник Сатурна) виявили надзвичайно цікавий ефект: можливість формування в сучасну епоху протоорганічних молекулярних сполук шляхом природних фотохімічних процесів. А тому Титан вважають природною планетарною лабораторією формування передбіотичного „життя”. Це відкриття породило нову гіпотезу щодо можливого існування і на нашій планеті первинної холодної метанової атмосфери, в якій таким же чином протягом першого мільярда років зародилося „живе” з „неживого” (ще одна, можливо, найбільш імовірна гіпотеза абіогенного походження життя на Землі).

Незважаючи на практично незначний вміст CO_2 в сучасній земній атмосфері (~0,03%), його роль у різних геофізичних процесах надзвичайно важлива, бо, як відомо, вуглекислий газ є [1, 3, 4, 19]:

- основним інгредієнтом при формуванні тіл усіх живих організмів у результаті відомої реакції фотосинтезу;
- одним із основних парникових газів в атмосфері, варіації яких формують той чи інший термічний режим на поверхні планети.

Мета даного дослідження – 1) провести аналіз різномасштабних особливостей динаміки вікового ходу вмісту вуглекислого газу в атмосфері в фанерозої (останні 570 млн. років), в пізньому плейстоцені (останні 420 тис. років) та в останньому тисячолітті; 2) дослідити можливі фізичні механізми, які відповідають за природні коливання вмісту CO_2 в атмосфері для розглянутих проміжків часу.

Актуальність дослідження пов'язана з відомою гіпотезою, про те що сучасні зміни глобального клімату спричинені антропогенним підсиленням атмосферного парникового ефекту через підвищення, в першу чергу, вмісту в атмосфері вуглекислого газу в результаті антропогенних викидів (сучасна динаміка вмісту вуглекислого газу в

атмосфері формується, очевидно, на фоні його різномасштабних коливань, спричинених різними природними процесами).

Динаміка вмісту CO_2 в атмосфері у фанерозої. Динаміка відносного вмісту CO_2 в земній атмосфері для фанерозою (останні 570 млн. років) встановлювалася за різними опосередкованими даними. Графік вікового ходу вмісту CO_2 в земній атмосфері для фанерозою (у % від загальної кількості молекул сухого повітря), побудований в [4] за даними, опублікованими в [3, 30], наведено на рис. 1. На цьому рисунку відмічено також характерні геологічні епохи фанерозою (у тому числі момент якоїсь космічної катастрофи, яка призвела до різкої трансформації життя на Землі – вимирання динозаврової фауни).

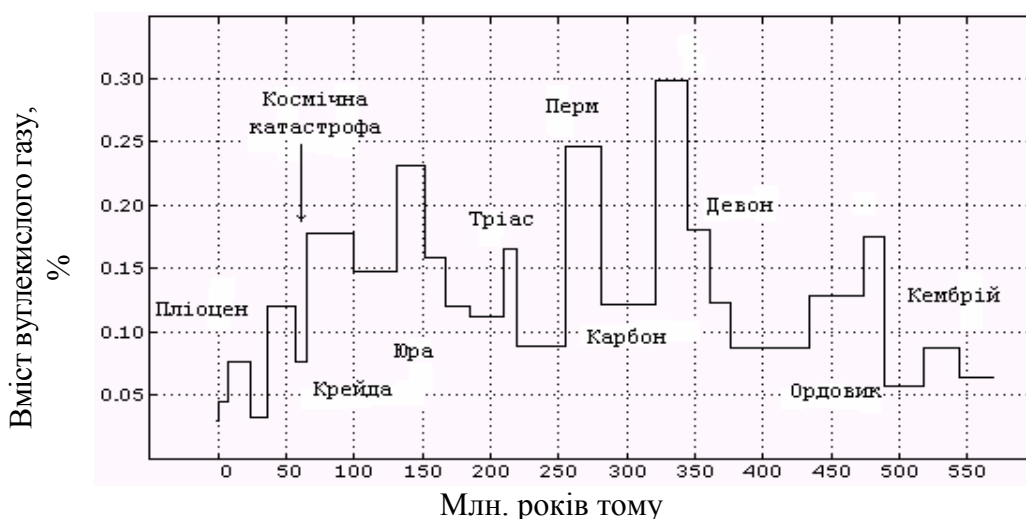


Рис.1. Віковий хід відносного вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері протягом фанерозою

З рис. 1 видно, що протягом фанерозою відбувалися істотні квазіперіодичні коливання відносного вмісту CO_2 в земній атмосфері. Чітко виражені, наприклад, наступні екстремуми:

- три максимуми, коли вміст CO_2 в атмосфері перевищував 0,2%: ранній карбон (346-322 млн. років тому), рання перм (282-257 млн. років тому), пізня юра (153-133 млн. років тому);
- чотири мінімуми, коли відносний вміст CO_2 в атмосфері був нижчий за рівень в 0,1%: пізній кембрій (520-490 млн. років тому), пізній силур-ранній девон (415-378 млн. років тому), пізня перм – ранній тріас (257-221 млн. років тому), палеоцен (67 млн. років тому – сьогодні).

Діапазон коливань концентрації CO_2 у фанерозої складав від 0,03% (сучасна епоха) до 0,3% (ранній карбон). Середній вміст вуглекислого

газу в атмосфері в останні 570 млн. років дорівнював 0,13%, що майже в 4 рази більше, ніж у сучасну епоху. До речі, навіть у тому випадку, коли в майбутньому вміст CO_2 збільшиться в 2 рази порівняно з його доіндустріальним значенням, він буде майже вдвічі нижчий, ніж середній рівень вуглекислого газу для фанерозою. Більш того, він буде навіть значно нижчий від усіх мінімальних рівнів для фанерозою. Слід відзначити, що і всі сучасні прогнози щодо можливого антропогенного збільшення CO_2 в земній атмосфері в наступні 150-300 років не приводять до рівнів, навіть мінімальних, які мали місце протягом фанерозою.

Який фізичний механізм таких істотних коливань вмісту CO_2 в атмосфері протягом фанерозою – до цього часу надійно не встановлено. Вважають, що найбільш вірогідними причинами цих коливань могли бути наступні фактори [1, 3, 5, 9, 10, 12, 13] або їх взаємодія:

- внутрішні ритми біосфери (згідно з теорією спіральної еволюції замкнутих систем);
- вікова динаміка термодинамічних, фізико-хімічних та просторових (трансгресії, регресії тощо) характеристик Світового океану;
- ритми тектонічної діяльності, при яких проходило або інтенсивне накопичення, або бурхливе руйнування (з дегазацією) карбонатних осадів і органічних вуглецевих сполук у верхній оболонці Землі.

У перші 50 млн. років фанерозою Південно-Американська, Африкано-Аравійська, Індостанська, Австралійська і Антарктична платформи почали об'єднуватись і утворили єдиний південний суперконтинент Гондвану з відносно високою висотою над рівнем моря. Однак Європейська і Північно-Американська платформи все ще залишалися перекритими трансгресіями моря. І лише протягом 0,46-0,41 млрд. років тому Євразія і Північна Америка з Гренландією піднялись і об'єдналися в єдиний північний суперконтинент Лавразію. У ті далекі часи суперконтиненти Гондвану і Лавразію відділяв один від одного древній океан Палео-Тетис.

Протягом 0,33-0,23 млрд. років до Лавразії приєдналися позагондванські азіатські платформи (можливо, без Китайсько-Корейської), а згодом і Північно-Західна Африка. У результаті тектонічних процесів нарешті відбулось об'єднання Гондвани і Лавразії в єдиний суперконтинент Пангею.

Пангея проіснувала ~90 млн. років і почала розпадатися біля 170 млн. років тому (у кінці першої третини мезозою). Спочатку утворилися

Саргасове море, яке відділило Південну Америку від Африки, і новий океан Тетис, який відділив Євразію від Північної Америки, спричинивши розпад Лавразії. У другій половині мезозою (150-67 млн. років тому) Гондвана розпалася на Північно-Американський, Африканський, Індостанський і Австрало-Антарктичний континенти. Останні 67 млн. років (кайнозой) представляють собою одну з тектоніко-магматичних епох, які характеризувалися різко підвищеною тектонічною активністю і посиленням магматизмом.

Слід відзначити, що початок сучасної епохи інтенсивної тектонічної активності і посиленого магматизму характеризується вираженим дрейфом материків (теорія Вегенера), що призводить до розбігання або зіткнення тектонічних плит. Він практично збігається з моментом часу, коли відбулась космічна катастрофа (можливо, зіткнення Землі з масивним космічним тілом – падіння великого метеорита), яка і привела, можливо, до практичного повного вимирання динозаврової фауни і формування нового типу фауни на нашій планеті, до якого належимо і ми, люди. Схоже на те, що тектонічна структура нашої планети, і в тому числі земна кліматична система, до цього часу ще не оговталися від наслідків цієї космічної катастрофи.

Зауважимо, що зіставлення варіацій температурного режиму земної поверхні за часів фанерозою і вікового ходу вмісту CO_2 в атмосфері не вказує на пряму кореляцію. Наприклад, геологічні матеріали більш-менш надійно підтверджують існування пермо-карбонової льодовикової епохи, особливо в південних полярних регіонах. Але як видно з рис.1, вміст вуглекислого газу в атмосфері впродовж цього періоду був досить високий, навіть у середньому значно вищий, ніж для попереднього (тривалість 250 млн. років) та наступного (тривалість 220 млн. років) періодів, протягом яких планета практично повністю звільнилася від льодовикового покриву. Найбільш імовірною причиною формування льодового покриву Землі в останній мільярд років (пізньо-докембрійська – 600-800 млн. років тому, пермо-карбонова – 230-350 млн. років і пізньокайнозойська ери – останні 10 млн. років) вважають зосередження значних за площею ділянок суші у приполярних регіонах планети. Наприклад, в епоху пермо-карбонового зледеніння весь суходіл представляв собою єдиний суперконтинент (Пангею), центр якого знаходився на екваторі, але його південні окраїни досягали високих широт Південної півкулі.

Існування пізньо-кайнозойського зледеніння також можна пояснити дислокацією великих ділянок суходолу у високих широтах. Як видно з рис. 1, в останні 10 млн. років рівень CO_2 в атмосфері різко знизився (найнижчий рівень за весь фанерозой).

Проведений аналіз наводить на думку, що протягом фанерозою біосфера повинна була пристосуватися до більш високого вмісту CO_2 в атмосфері, ніж сучасний. А тому можна вважати, що в останні, принаймні, декілька десятків мільйонів років вона відчуває “голод” відносно вмісту CO_2 в атмосфері.

Вплив варіацій вмісту атмосферного вуглекислого газу на екосистеми може проявитись або безпосередньо (через прямий вплив змін концентрації CO_2 на інтенсивність реакції фотосинтезу), або опосередковано (через трансформацію кліматичних умов) [11].

За характером механізму первинної фіксації CO_2 при фотосинтезі рослини поділяють на три групи – C_3 , C_4 і CAM . Ці групи розрізняють в основному за складом ферментів, які беруть участь у фотосинтетичній фіксації CO_2 . У зв’язку з цим різні групи рослин по-різному реагують на варіації концентрації CO_2 . Очевидно, що протягом фанерозою могла відбуватися квазіперіодична трансформація різних видів флори, а значить і її реакції на варіації вуглекислого газу в атмосфері, що і могло бути, до речі, причиною внутрішніх біосферних ритмів.

Динаміка вмісту вуглекислого газу в атмосфері пізнього плейстоцену. Пізнім плейстоценом називають останній геологічний період (~0,5 млн. років). Чисельні геологічні матеріали дозволяють зробити висновок, що він складався із серії потужних льодовиково-міжльодовикових коливань із періодом ~100 тис. років [5, 22, 23]. Аналіз динаміки CO_2 в земній атмосфері за останні 420 тис. років (чотирьох так званих кліматичних циклів) проведено на основі емпіричних матеріалів, опублікованих [6, 28]. Ці матеріали отримано шляхом прямого хімічного аналізу „бульбашок” повітря, законсервованих у віковічних льодових масах, керни яких добуті із свердловини в Центральній Антарктиді (ст. „Восток”), пробуреної на глибину 3310 м. Зауважимо, що безпосередньо у вигляді бульбашок у міжкристалічному просторі льодових мас атмосферні гази існують лише в їх верхніх шарах, вік яких не перевищує 50 тис. років. У нижніх же шарах льоду, вік яких перевищує 100 тис. років, у зв’язку з різким підвищенням тиску утворюються газові гідрати (клатрати), які зосереджуються в пустотах кристалічних структур льоду.

Віковий хід відносного вмісту CO_2 в атмосфері, сконструйований за матеріалами, отриманими в цих публікаціях, наведено на рис. 2.

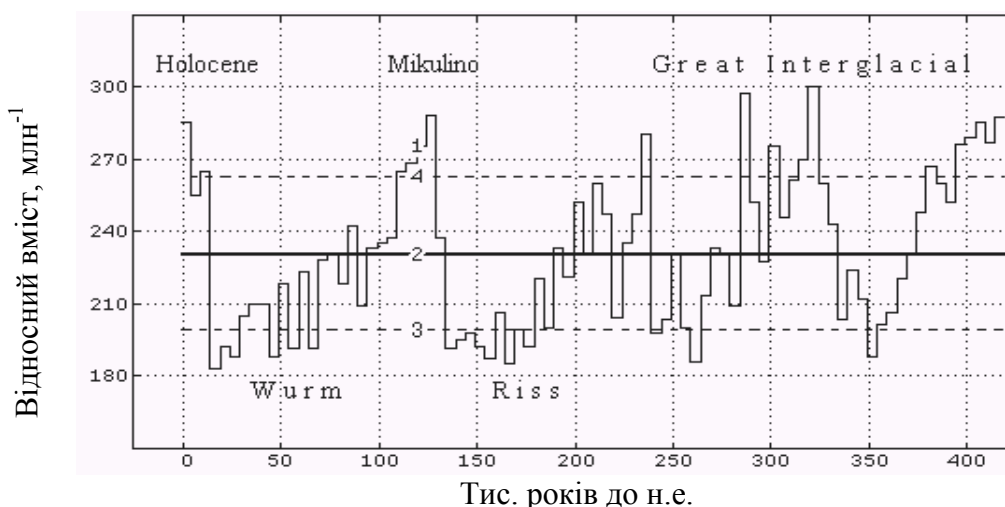


Рис. 2. Віковий хід відносного вмісту вуглекислого газу в атмосфері за чотири останніх кліматичних цикли: 1 — емпіричні дані (за матеріалами аналізу бульбашок повітря, законсервованих у льодових масах Антарктиди); 2 — середнє значення відносного вмісту вуглекислого газу за період 0-420 тис. років до н.е.; 3, 4 — середньоквадратичне відхилення за той же період

Середній рівень відносного вмісту вуглекислого газу в атмосфері за останні 420 тис. років складав $\sim 230 \text{ млн}^{-1}$. Це значно менше, ніж його середній рівень за останнє тисячоліття, який дорівнює 280 млн^{-1} . Як видно з рис.2, навіть максимальні значення вмісту CO_2 пізнього плейстоцену не перевищували 300 млн^{-1} , що нижче від його сучасної концентрації (365 млн^{-1} — у 2000 р.).

Протягом останніх 420 тис. років відбувались істотні квазіперіодичні коливання відносного вмісту CO_2 в земній атмосфері. Чітко виражені, наприклад, наступні екстремуми:

- п'ять максимумів, коли вміст вуглекислого газу в атмосфері перевищував 270 млн^{-1} : голоцен (останні 10-11 тис. років), Микулинське міжльодовиків'я (123-125 тис. років тому) і три цикли так званого періоду „Great Interglacial”;
- чотири мінімуми, коли відносний вміст вуглекислого газу в атмосфері був нижчий, ніж 200 млн^{-1} : зледеніння Вюрм (25-115 тис. років тому), зледеніння Рис (187-230 тис. років тому) та подальші дві гляціальні термінації (~ 260 і ~ 350 тис. років тому).

Доцільно також ще звернути увагу на наступні три важливі особливості вікового ходу вуглекислого газу в пізньому плейстоцені:

- період тих коливань його концентрації, амплітуда яких максимальна, практично становить ~100 тис. років;
- перехід до цих максимальних значень був стрімким, і максимальний рівень зберігався протягом короткого періоду часу. А перехід до мінімальних значень концентрації вуглекислого газу був більш тривалим, приблизно на порядок;
- на фоні крупномасштабних коливань концентрації вуглекислого газу спостерігались і деякі «регулярні» флуктуації з меншим проміжком часу і нижчою амплітудою (40, 20 тис. років тощо).

При визначенні фізичного механізму, який відповідальний за формування розглянутих коливань вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері, повинні обов'язково враховуватися наведені вище особливості його динаміки.

Слід відмітити, що віковий хід вмісту вуглекислого газу дуже тісно корелює з варіаціями глобальної приземної температури для розглянутого періоду часу.

Наведені на рис. 3 нормовані значення відносного вмісту вуглекислого газу та глобальної приземної температури обчислені за формулою:

$$\xi(t) = \frac{x(t) - \langle x \rangle}{s}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad (1)$$

де τ – розглянутий проміжок часу, $\langle x \rangle$ і s – середнє значення та середньоквадратичне відхилення параметра $x(t)$ для проміжку τ .

Статистичні характеристики часових рядів глобальної приземної температури і відносного вмісту CO_2 для пізнього плейстоцену ($\tau = 4,2 \cdot 10^5$ років) наведено в табл.1 (значення глобальних приземних температур відраховані від їх доіндустріального рівня – $+14,5^\circ C$).

Таблиця 1

Основні статистичні характеристики часових рядів глобальної приземної температури і відносного вмісту вуглекислого газу для пізнього плейстоцену

Параметр	Середнє	Середньоквадратичне відхилення
Глобальна приземна температура, $^\circ C$	-4,8	3,1
Відносний вміст вуглекислого газу, $млн^{-1}$	230	32

Як видно з рис. 3, варіації глобальної приземної температури і відносного вмісту атмосферного вуглекислого газу пізнього плейстоцену зв'язані практично лінійною залежністю. Відомо, що при більш високих значеннях концентрації вуглекислого газу перевищують 300 млн^{-1} , ця залежність має

логарифмічний характер. На жаль, немає можливості вияснити, чи проявляється такого ж типу залежність і для пізнього плейстоцену, через надзвичайно низькі відносні рівні варіацій вуглекислого газу.

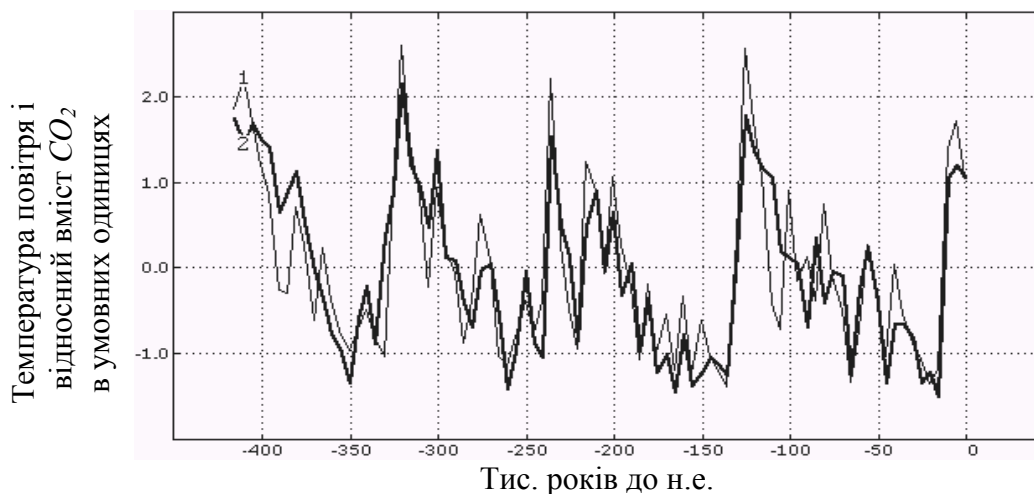


Рис. 3. Зіставлення вікового ходу температури приземного повітря (1) і відносного вмісту CO_2 в атмосфері (2) для останніх 420 тис. років

Так який же фізичний механізм приводить до значних коливань термічного режиму планети і тісно пов'язаних з ними коливань вмісту вуглекислого газу?

Серед можливих причин коливань термічного режиму і відносного вмісту CO_2 пізнього плейстоцену в даний час найбільш вірогідними вважають *квазіперіодичні осциляції основних елементів земної орбіти* [5, 7, 8].

І справді, період крупномасштабних коливань приземного термічного режиму і відносного вмісту вуглекислого газу, як було відмічено вище, становить ~ 100 тис. років, що повністю збігається з періодом вікових варіацій ексцентриситету земної орбіти.

Відомо, що варіації ексцентриситету земної орбіти пов'язані з квазіперіодичними змінами просторового розподілу планет Сонячної системи (у досить вузькому шарі плоскостей їх орбіт). Ці квазіперіодичні зміни просторового розподілу планет повинні приводити, звичайно, до конкретних варіацій інтенсивності їх гравітаційної взаємодії і, нарешті, до варіацій „еліптичності” земної орбіти.

Крупномасштабні коливання глобального термічного режиму та відносного вмісту вуглекислого газу і варіації ексцентриситету можуть перебувати з надзвичайно великою вірогідністю, у причинно-наслідковому зв'язку. Відповідно до загальних фізичних міркувань саме

коливання ексцентриситету земної орбіти можуть бути *причиною*, а коливання глобального термічного режиму і відносного вмісту вуглекислого газу – можливо, *наслідком* цих коливань (саме *можливо*, бо ми поки що не можемо повністю виключити і інші невідомі нам причини, які також могли б формувати такого ж типу зміни глобального термічного режиму і відносного вмісту вуглекислого газу).

Світова кліматична наука притримується поки що точки зору, що саме варіації ексцентриситету земної орбіти є основним фактором, що формує крупномасштабні коливання глобального термічного режиму нашої планети, і в тому числі відносного вмісту CO_2 в атмосфері.

Головними аргументами цього припущення є:

- практично повий збіг періодів крупномасштабних коливань клімату Землі і варіацій ексцентриситету земної орбіти (~100 тис. років) протягом останніх чотирьох кліматичних циклів;
- немає інших фізичних причин, які б приводили до такого ж типу коливань земного клімату (логічна „бритва” Оккама).

Однак зіставлення вікового ходу ексцентриситету і глобального клімату Землі, у тому числі вмісту CO_2 , усе ж дещо насторожує.

Розраховані нами для останніх ~500 тис. років за співвідношеннями Брауера і ван Веркома [12] значення екстремумів ексцентриситету і моменти часу їх досягнення опубліковано в [4]. Зіставлення екстремумів ексцентриситету з даними, що наведені на рис. 2 і 3, показує, що:

- глобальне потепління і максимуми вмісту вуглекислого газу за останні 420 тис. років у деяких випадках наступали дещо раніше, ніж ексцентриситет досягав максимального значення. Якщо б ми мали справу просто з інерцією земної кліматичної системи, то було як раз навпаки;
- рівні максимальних значень ексцентриситету практично не адекватні максимумам глобальної приземної температури. Наприклад, рівень глобального потепління в епоху голоцену практично збігається по величині з рівнями потеплінь попередніх теплих епох тоді, як максимум ексцентриситету для голоцену навіть значно нижчий, ніж його мінімуми між цими епохами.

Безперечно, цими протиріччями можна було б знехтувати, враховуючи наступне:

- хронометрія вікового ходу ексцентриситету є практично абсолютною, а хронометрія вікового ходу глобальної приземної

температури та вмісту CO_2 – досить умовна (можливі похибки для часів, віддалених на 100 тис. років і далі, можуть досягати ± 25 тис. років);

- прояви нетривіальних ефектів, спричинених суперпозицією варіацій трьох різних параметрів земної орбіти: ексцентриситету, кута нахилу осі обертання Землі до екліптики, точок рівнодень (прецесії). Періоди коливань цих параметрів практично кратні для епохи пізнього плейстоцену, тому можливе взаємне посилення або послаблення кліматичного сигналу (так званий ефект „інтерференції”).

Протягом останніх двох століть широко обговорюється „інсоляційна” гіпотеза, про те, що, можливо, фізичним механізмом, відповідальним за реакцію земної кліматичної системи на „орбітальний сигнал”, є варіації інсоляції, спричинені коливаннями елементів земної орбіти (Адемар – 1842 р., Кроль – 1864 р., Міланкович та ін. – перші десятиліття 20-го ст.) [5].

Кількість тепла, яку отримує Земля від Сонця за повний оберт по орбіті, можна розрахувати за допомогою наступного виразу:

$$Q = \pi R_G^2 S \frac{P_o}{\sqrt{1-e^2}}, \quad S = (1360 \pm 20) \frac{Вт}{м^2}, \quad (2)$$

де R_G – середній радіус Землі; P_o – час повного оберту Землі навколо Сонця; S – сонячна стала (щільність потоку сонячної енергії на середній відстані Землі від Сонця).

Як видно із (2), повна кількість тепла, яке надходить до Землі від Сонця дійсно залежить від ексцентриситету земної орбіти. Оскільки $e \ll 1$, то цей вираз можна досить точно представити у вигляді:

$$Q \sim 1 + 0,5 e^2$$

Таким чином, чим вище ексцентриситет орбіти Землі, тим більше вона отримує тепла за повний оберт навколо Сонця. Але зміни ексцентриситету за останні 420 тис. років були надзвичайно малими (від 0,002 до 0,048). Такі його зміни могли приводити лише до варіацій Q , що не перевищували кількох сотих часток процента. Вкрай сумнівно, щоб настільки незначні варіації повної інсоляції могли бути відповідальні за надзвичайно потужну трансформацію кліматичних умов на нашій планеті. Можливо, справа все ж таки в чомусь іншому!

Слід зазначити, що реакція глобальних кліматичних умов на квазіперіодичні зміни кута нахилу осі обертання до екліптики і прецесію (тобто на спричинені ними варіації інсоляції) також чітко проявляється.

На рис. 4 зіставленні спектральні функції глобальної приземної температури та інсоляції на 65^0 пн.ш. для останніх 420 тис. років. З аналізу рисунку можна зробити наступні висновки:

- у віковому ході температури надзвичайно різко проявився період 100 тис. років, тоді як для інсоляції він повністю відсутній (проведений вище аналіз дійсно показав, що коливання ексцентриситету надзвичайно мало впливають на варіації інсоляції);
- чітко проявляються у віковому ході і температури, і інсоляції періоди ~ 20 і 40 тис. років, які практично збігаються з прецесією і змінами кута нахилу осі обертання Землі до екліптики;
- узгоджуються між собою для обох параметрів і періоди коливань ~ 45 і ~ 65 тис. років (поки що не зрозуміло, яким чином формуються ці коливання);
- досить чітко проявляється у віковому ході температури період ~ 30 тис. років. У віковому ході інсоляції його не має. Фізична природа коливань температури цього періоду – невідома.

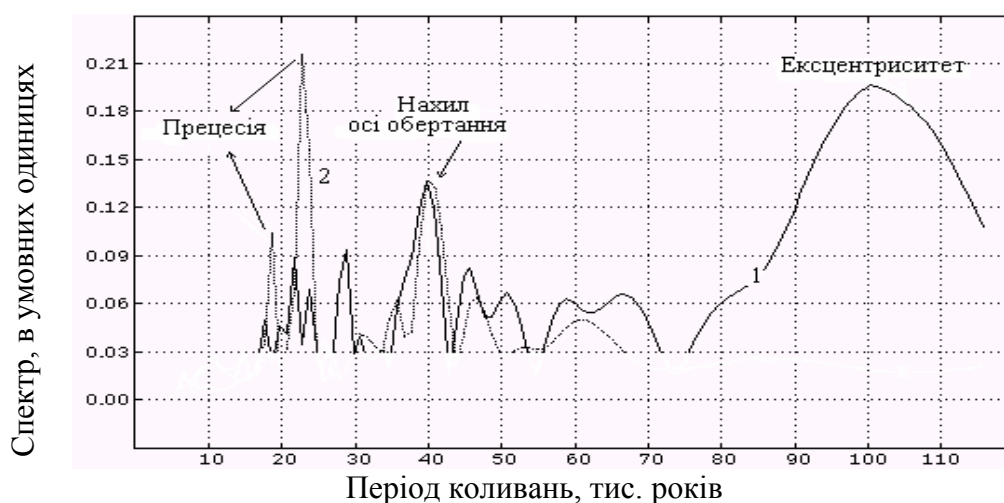


Рис. 4. Спектр глобальної приземної температури (1) та інсоляції на 65^0 пн.ш. (2)

Віковий хід глобальної приземної температури і інсоляції на широті 65^0 пн.ш. для останнього кліматичного циклу (125 тис. років), зі зміщенням графіка інсоляції на 5 тис. років назад (для врахування термічної інерції земної кліматичної системи), наведено на рис.5.

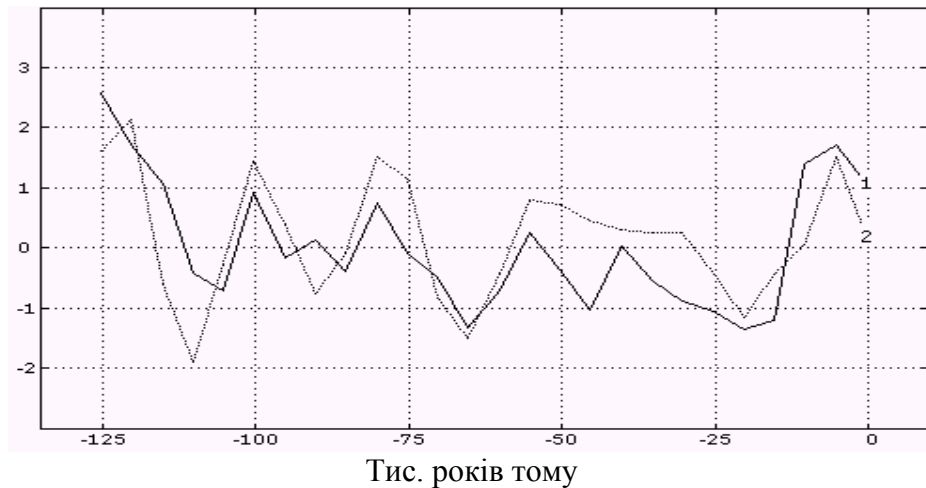


Рис. 5. Коливання глобальної приземної температури (1) та зміщеної інсоляції 5 тис. років назад на 65° пн.ш. (2), в умовних одиницях

Цей рисунок наочно демонструє практично повну узгодженість вікових ходів обох параметрів. Але зміни кута нахилу осі обертання до екліптики і прецесія приводять лише до просторово-часового перерозподілу сонячного тепла по земній поверхні. Коливання інсоляції в Північній і Південній півкулях знаходиться при цьому в протифазі, що видно, наприклад, з табл. 2 (за даними, що опубліковані в [12]).

Таблиця 2

Відхилення інсоляції ($0,1 \text{ Вт/м}^2$) на широті 50° обох півкуль від відповідних сучасних значень (1950 р., н.е.) для сонячної сталої 1360 Вт/м^2

Час, тис. років від н.е.	Широта	Весняне рівнодення	Літнє сонцестояння	Осіньне рівнодення	Зимове сонцестояння
-20	Пн.	35	-12	-34	21
	Пд.	35	25	-34	-50
-10	Пн.	-57	422	58	-111
	Пд.	-57	-1	58	-268
+5	Пн.	59	128	-59	11
	Пд.	59	74	-59	-247
Інсоляція в 1950 р. н.е., Вт/м^2	Пн.	280	481	276	86
	Пд.	280	80	276	514

Проте коливання кліматичних умов на Землі з періодами, які можна зіставити з періодами варіацій параметрів земної орбіти, в обох півкулях практично синхронні, що доведено шляхом багатолітніх і багаточисельних досліджень усього земного шару. До речі, на рис. 5 і порівнюється глобальна приземна температура з інсоляцією тільки на 65°

пн. ш. У той час, як у північній півкулі на заданій широті температура і інсоляція коливалися синхронно, то в південній – інсоляція змінювалась у протифазі.

Наведені дані наводять на думку, що реакція земних кліматичних умов на „орбітальний сигнал” управляється якимось „внутрішнім” земним фактором, який повинен бути дуже чутливим до асиметрії обох півкуль Землі. Як відомо, така асиметрія обох півкуль пов’язана, головним чином, з часткою і просторовим розподілом Світового океану. Можливо, ефект впливу варіацій інсоляції на приземний температурний режим у південній півкулі нівелюється Світовим океаном, а в північній півкулі він загострюється через значні площі поверхні материків. В останні десятиліття різні групи вчених пробують вирішити цю задачу шляхом аналізу матеріалів відповідних розрахунків, проведених на основі великих кліматичних математичних моделей [14, 15, 25, 27, 29]. Отримані попередні результати обнадіюють, але необхідно провести подальші ретельні дослідження.

Динаміка вмісту вуглекислого газу для останнього тисячоліття.

На основі аналізу бульбашок повітря, законсервованих у віковічних льодах Антарктиди та Гренландії, відновлено варіації вмісту CO_2 для останніх ~1000 років [18]. Як видно з рис. 6, відносний вміст вуглекислого газу в атмосфері для цього періоду коливався досить мало – у межах 275-285 млн⁻¹ (середнє значення для цього періоду становить 280 млн⁻¹, флуктуації складають $\pm 1,5\%$).

Так температурний режим планети протягом останнього тисячоліття істотно змінювався [18, 20, 21, 24, 26], причому характерні величини аномалій приземної температури Європи досягали $\pm 0,75^\circ C$. У IX–XIII ст. клімат Європи був відносно теплим, тому цей період отримав назву *малий кліматичний оптимум*. Для періоду XVI–XVIII ст. було характерне певне похолодання – *малий льодовиковий період*. Хоча це похолодання супроводжувалося невеликими флуктуаціями температурного режиму, наприклад, у 1550-1650 рр. спостерігалось слабе потепління.

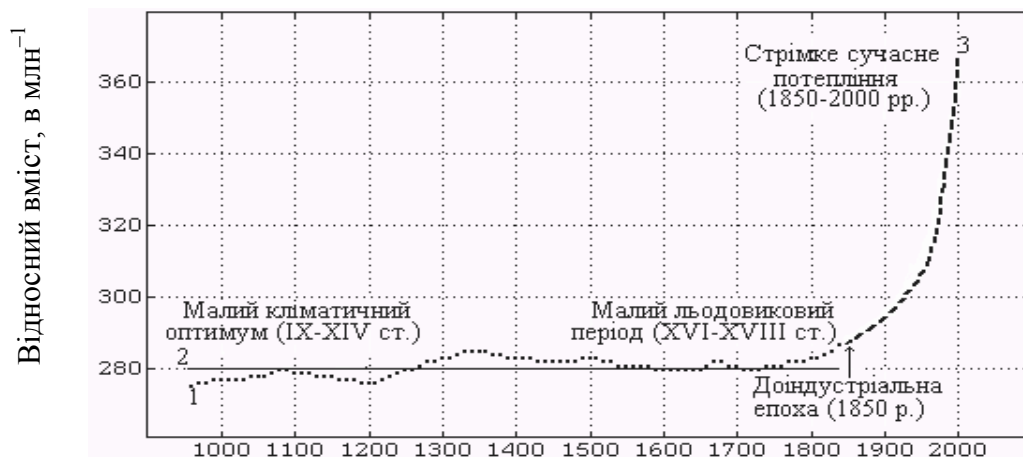


Рис. 5. Віковий хід відносного вмісту вуглекислого газу, у млн^{-1} : 1 – емпіричні дані (за матеріалами аналізу бульбашок повітря, законсервованих у льодових масах Гренландії та Антарктиди); 2 – середні значення відносного вмісту вуглекислого газу за період 950-1850 рр.; 3 – емпіричні дані для індустріального періоду 1850-2000 рр.

Отже, коливання вмісту вуглекислого газу в атмосфері не могло бути причиною таких коливань температури приземного повітря останнього тисячоліття. Тоді постає питання: що ж спричинило коливання термічного режиму планети?

Встановлено, що коливання температури приземного повітря в останньому тисячолітті дуже тісно корелюють із довгоперіодними ритмами сонячної активності (наприклад, цикл Глайсберга з періодом ~ 100 років [2, 4, 12, 16, 17]), які, можливо, і є їх причиною. Для доведення гіпотези про вплив довгоперіодних ритмів сонячної активності на кліматичні умови планети представляють певний збіг температурних максимумів і мінімумів (малий кліматичний оптимум, малий льодовиковий період) з екстремумами сонячної активності (середньовічний максимум, максимум Оорта, мінімуми Шперера і Маундера).

Одним із найбільш надійних індикаторів сонячної активності, який також можна використовувати для аналізу її ритмів, є радіовуглець C^{14} (період напіврозпаду $\sim 5,7 \cdot 10^3$ років), який утворюється у верхніх шарах атмосфери внаслідок ядерних реакцій теплових нейтронів – результату взаємодії космічного випромінювання з ядрами основних хімічних складових земної атмосфери (азоту, кисню, аргону тощо) – з ядрами азоту.

Після окиснення атомів радіовуглецю до $^{14}\text{CO}_2$ відбувається його перемішування з атмосферним вуглекислим газом $^{12}\text{CO}_2$. У результаті

такого перемішування $^{14}\text{CO}_2$ досягає земної поверхні при майже стабільному співвідношенні $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ і бере участь у фотосинтезуючій діяльності зелених водоростей та рослин. Співвідношення $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ складає приблизно 10^{-12} . Вміст ^{14}C в атмосферному вуглекислому газі прийнято виражати через відносну різницю в проміле між значенням $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ і його стандартним значенням (нормою), для визначення якої умовно обрано рівень 1890 р.

На жаль, через інтенсивне спалювання органічного викопного палива (збідненого на радіовуглець) співвідношення $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ почало різко зменшуватись (ефект розбавлення Зюса). А після проведення ядерних випробувань співвідношення $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ почало, навпаки, істотно збільшуватися, внаслідок штучного утворення радіовуглецю в атмосфері. Таким чином, в останні 100 років була істотно порушена природна динаміка радіовуглецю в атмосфері в результаті антропогенної діяльності.

Було висунуто три гіпотези щодо можливих природних механізмів формування варіацій концентрації радіовуглецю в земній атмосфері, а саме [12]:

- власні варіації магнітного поля Землі;
- пов'язані з коливаннями кліматичних умов зміни інтенсивності обміну вуглекислого газу в системі океан-атмосфера;
- довгоперіодні ритми сонячної активності.

Накопичені матеріали приводять до висновку, що флуктуації вмісту радіовуглецю дійсно можуть бути пов'язані із впливом збурень магнітного поля Сонячної системи на проходження космічного випромінювання, тобто активності Сонця (ефект де Вріє). А це означає, що сонячна активність повинна викликати зміни кліматичних умов нашої планети. Однак поки що абсолютно не зрозумілий фізичний механізм істотного впливу сонячної активності на температурний режим нашої планети. Ми не можемо виключити і того, що в цьому випадку маємо справу не з прямим впливом сонячної активності на земну кліматичну систему (причинно-наслідковий зв'язок), а що певний, поки що невідомий, зовнішній (космічний) Х-фактор спричинює синхронні коливання як активності Сонця, так і температурного режиму нашої планети (індикаторний зв'язок) [16, 17].

Досить надійні емпіричні часові ряди для аномалій концентрації радіовуглецю в земній атмосфері були побудовано різними групами дослідників на основі прямих та опосередкованих методів [12], а отримані

ними оцінки практично збігаються. Для останнього тисячоліття за допомогою цих даних розраховано нами лінійний кореляційний зв'язок між температурою приземного повітря Європи і концентрацією радіовуглецю в земній атмосфері, що має вигляд:

$$\Delta T = -0,20 - 0,043 (\Delta c + 4,8), \quad (3)$$

де ΔT – аномалії приземної температури, $^{\circ}K$ (відраховані від рівня 1880-1890 р.); Δc – аномалії концентрації радіовуглецю, ‰ (відраховані від рівня 1890 р.). Коефіцієнт лінійної кореляції дорівнює -74 %.

На рис. 7 наведено емпіричні дані та результат розрахунку за формулою (3). Як видно з цього рисунку, температура приземного повітря дійсно різко знижувалася тоді, коли концентрація радіовуглецю в земній атмосфері зростала, і навпаки.

Індикатором ритмів сонячної активності на нашій планеті є також і інтенсивність полярних саяв [2, 12]. За історичними і літописними даними було відновлено емпіричні ряди повторюваності цих явищ над територіями Європи, Руської рівнини, у країнах Сходу тощо. Ці матеріали підтверджують зв'язок між коливаннями клімату, концентрацією радіовуглецю та сонячною активністю.

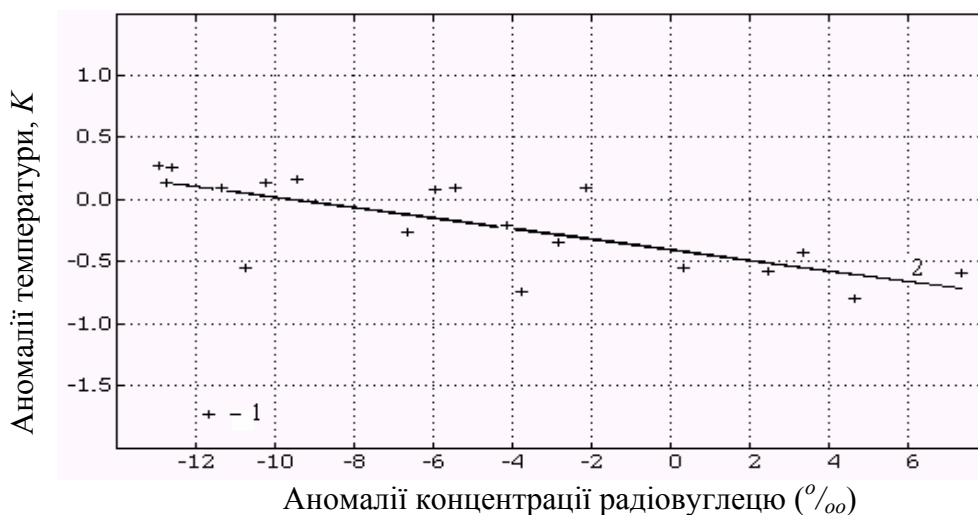


Рис. 7. Кореляційний зв'язок між температурою приземного повітря Європи та аномаліями концентрації радіовуглецю (C^{14}): 1 – емпіричні дані; 2 – розрахунки за формулою (3)

Висновки. На основі аналізу опублікованих матеріалів та за власними оцінками вікової динаміки основних кліматоформуючих факторів, отримано наступні результати:

1. Визначено основні закономірності динаміки вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері для останніх 570 млн. років. Обґрунтовано основний фізичний механізм формування крупномасштабних коливань вмісту вуглекислого газу в атмосфері протягом фанерозою – особливості динаміки тектонічної структури літосфери Землі. Пряму кореляцію крупномасштабних коливань відносного вмісту вуглекислого газу в атмосфері з температурним режимом земної поверхні не підтверджено.

2. Сформульовано основні закономірності квазіперіодичних коливань вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері протягом пізнього плейстоцену. Підтверджено існування тісної лінійної кореляції відносного вмісту вуглекислого газу в земній атмосфері з варіаціями температурного режиму земної поверхні для цього періоду часу. Показано недостатність „інсоляційної” гіпотези щодо реакції кліматичних умов Землі на зміни елементів її орбіти.

3. Проведено аналіз впливу довгоперіодних ритмів активності Сонця на кліматичні умови Землі. Кореляцію між вмістом вуглекислого газу і варіаціями глобальної приземної температури повітря для останнього тисячоліття не встановлено. Запропоновано гіпотезу щодо існування невідомого Х-фактора, який впливав би синхронно на активність Сонця та кліматичні умови Землі.

* *

Установлено основные особенности разномасштабных колебаний содержания углекислого газа в атмосфере для фанерозоя (последние 570 млн. лет), позднего плейстоцена (последние 420 тыс. лет) и последнего тысячелетия. Обговариваются возможные физические механизмы, которые ответственны за природные колебания содержания CO₂ в атмосфере для рассмотренных промежутков времени (в том числе внутренние ритмы формирующие тектонические структуры литосферы Земли, изменения элементов земной орбиты, долгопериодные ритмы солнечной активности).

* *

1. Борисенков Е.П., Кондратьев К.Я. Круговорот углерода и климат. -Л.: Гидрометеиздат, 1988. -320 с.
2. Бойченко С.Г. О влиянии индекса климатической аномальности на рейтинг интенсивности катастрофических климатозоологических событий на

- территории Украины. Матеріали міжнародної конференції “Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища - 2002”. Одеса, 2003. -Ч.1. -С.49-54.
3. Будыко М.И., Ронов А.Б., Янишин А.Л. История атмосферы. - Л.: Гидрометеоздат, 1985. -208 с.
 4. Волощук В.М., Бойченко С.Г., Степаненко С.Н та ін. Глобальне потепління і клімат України: регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти. -К.: ВПЦ “Київський університет”, 2002. -117 с.
 5. Имбри Дж., Имбри К. Тайны ледниковых эпох (перев. с англ. под ред. Авсюка Г.А) -М.: Прогресс, 1988. -264 с.
 6. Котляков В.М., Лориус К. Четыре климатических цикла по данным ледяного керна из глубокой скважины на станции Восток в Антарктиде. Известия АН, сер. геогр., 2000. -№1. -С. 7-19.
 7. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. (Пер. с нем. под. ред. С.Л. Бастамова). М.-Л., ГОНТИ, 1939. -208 с.
 8. Монин А. С. Вращение Земли и климат. -Л.: Гидрометеоздат, 1972. -112 с.
 9. Монин А. С., Шнишков Ю. А. История климата. -Л.: Гидрометеоздат, 1979. -407 с.
 10. Мороз С.А. Історія біосфери Землі. -К.: „Заповіт”, 1996. Т.2. -422 с.
 11. Парниковый эффект. изменение климата и экосистемы (под ред. Б. Болина и др.). -Л.: Гидрометеоздат, 1989. -557 с.
 12. Поток энергии Солнца и его изменения (под ред. О.Уайта).-М.: “Мир”, 1980. - 558 с.
 13. Ясаманов Н.А. Древние климаты Земли. -Л.: Гидрометеоздат, 1985. -294 с.
 14. Bell L.G. Ice Age mystery: a proposed theory for the cause of long term climate change. Theor.Appl.Climatol., 2003. -V.74. -P.235-244.
 15. Bell L.G. A 30,000 yr precession-related cycle affecting climate. Theor.Appl.Climatol., 2003. -V.74. -P.245-253.
 16. Boychenko S.G. Semi-empirical statistical models of connection of repeatability of the catastrophic phenomena in Europe with global temperature anomalies in last millennium (on the basis of historical records and annals). Proceedings of Third International Conference on Water Resources and Environment Research, Germany, 2002. -V.1. -P. 224-229.
 17. Boychenko S.G. Frequency of catastrophic phenomena in Ukraine under the influence of global warming. Water Resources System-Hydrological Risk, Management and Development. Proceedings of symposium IUGG 2003 at Sapporo. IANS Publ., no.281. -P.121-132.

18. *Crowley T. J.* Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science*, 2000. - V.289. -P.270-277.
19. Climate change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. UNEP/WMO, 2001. -520 p.
20. *Huang S., Pollack H.N. and Shen P.-Y.* Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *Nature*, 2000. -V.403. -P. 756-758.
21. *Hughes, M.K., Diaz H.F.* Was there a 'Medieval Warm Period' and if so, when and where?. *Climatic Change*, 1994. -V. 26. -P. 109-142.
22. *Imbrie J. et. al.* On the structure and origin of major of glaciation cycles. 1. Linear responses to Milankovich forcing. *Paleoceanography*, 1992. -V. 7. -P. 701-738.
23. *Imbrie J. et. al.* On the structure and origin of major of glaciation cycles. 2. The 100.000-year cycle. *Paleoceanography*, 1993. -V. 8. -P. 669-735.
24. *Jones, P.D., Briffa K.R., Barnett T.P. and Tett S.F.B.* High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *The Holocene*, 1998. -V 8. -P. 455-471.
25. *Khodri M. et. al.* Simulating the amplification of orbital forcing by ocean feedbacks in the last glaciation. *Nature*, 2001. -V.410. -P. 570-574.
26. *Mann, M.E., Bradley R.S. and Hughes M.K.* Northern hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999. -V. 26. -P. 759-762.
27. *Mitchell J.* Modelling of paleoclimates: examples from the recent past. *Phil. Trans R. Soc. Lond.*, 1993. -V.341. -P. 267-275.
28. *Petit J.R., Jouzel J. et al.* Climate and atmospheric history of the past 420.000 year from the „Vostok” ice core Antarctica. *Nature*, 1999. -V.399. -P.429-436.
29. *Phillipps P.* The response to orbital perturbations in a atmospheric model coupled to a slab ocean. *Journal Climatology*, 1994. -N7. -P. 767-782.
30. *Rutten M.G.* The origin of life by natural causes. Elsevier Publ.Comp. Lond., 1971. - 411 p.

*Інститут геофізики ім. С.І.Суботіна
НАН України, Київ*

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*