

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ

УДК [550.3+551.24]:004(477.87) DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.16.4>

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ОПИСУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ СЦЕНАРІЇВ ЗЕМЛІ

В. Фурман¹, Ю. Віхоть^{1,2}

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Грушевського 4, 79005 Львів, Україна
fourman@i.ua

²Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. Карпінського, 6, 79013 Львів, Україна
yuvik@ukr.net

Передбачення клімату і наслідків його змін – ключове завдання науки про клімат, у вирішенні якого високі технології і, перш за все, фізико-математичне моделювання не мають альтернативи. Глобальний клімат – це складна система, де поступове накопичення кількісних змін може призвести до несподіваного якісного стрибка з непередбачуваними наслідками процесів у кліматичній та екологічній системі. Подальший розвиток кліматичних моделей та методів прогнозування погоди пов'язаний із збільшенням просторової роздільної здатності та поліпшенням фізичних параметрів процесів масштабу підмережі. Рівень просторової роздільної здатності і значною мірою обмежений складністю фізичних параметрів виконання найпотужніших обчислювальних систем (суперкомп'ютерів). Проблеми відтворення та прогнозування кліматичних змін, на відміну від класичних проблем фізики, мають свою особливість: вони не дозволяють здійснювати безпосередній фізичний експеримент. Для детального вивчення реальної кліматичної системи існує лише обмежений набір параметрів траєкторії системи впродовж кількох десятиліть, під час яких проводились досить повні польові вимірювання. Глобальні зміни клімату дуже складні, тому сучасна наука не може дати однозначної відповіді щодо того, що чекає нас найближчим часом.

Ключові слова: моделювання, кліматична система, фізичні параметри, прогнозування.

Вступ

Серед глобальних екологічних проблем, на перше місце світове співтовариство ставить зміну клімату [1-3]. Обробка результатів чисельних експериментів по створенню моделі сучасного клімату в рамках міжнародних програм показала: основні характеристики, отримані за допомогою різних моделей і потім усереднені по всьому наборі моделей, виявляються ближче до спостерігача реально, чим характеристики, отримані за допомогою окремих, навіть кращих моделей. Прогрес у розвитку обчислювальної техніки дає можливість будувати усе більш точні моделі конкретних фізичних процесів і тим самим не тільки удосконалювати моделі клімату і технології прогнозу погоди, але і формулювати нові задачі і нові вимоги до обчислювальних

систем. Більше того, через специфічні характеристики кліматичної системи (наприклад, атмосфера та океан – це тонкі плівки), лабораторні експерименти також є досить проблематичними. Зміна клімату в історії людства – одна із найважливіших і поряд з тим найбільш природна характеристика природного середовища. За 200 млн. років клімат Землі безупинно змінювався, але ніколи це не відбувалося настільки швидко, як в сучасний час. За останнє сторіччя клімат на Землі потеплішав на $0,5^{\circ}\text{C}$ – факт безпрецедентний у геологічній історії нашої планети.

Проблеми вивчення кліматичної системи Землі.

Глобальний клімат – складна система, де поступове нагромадження кількісних змін може привести до несподіваного якісного стрибка з непередбачуваними наслідками процесів у всій клімато-екологічній системі. До даного часу найкраще вивчені й описані аеро- і гідродинамічні процеси, які породжені сонячним опроміненням Землі [3].

Фактично мова йде про роботу гігантської теплової машини, яка надає руху величезним масам повітря і води за рахунок нерівномірного нагрівання поверхні Землі. З одного боку, науки про Землю уже виробили досить повне представлення про основні фактори, що диктують зміни земного клімату.

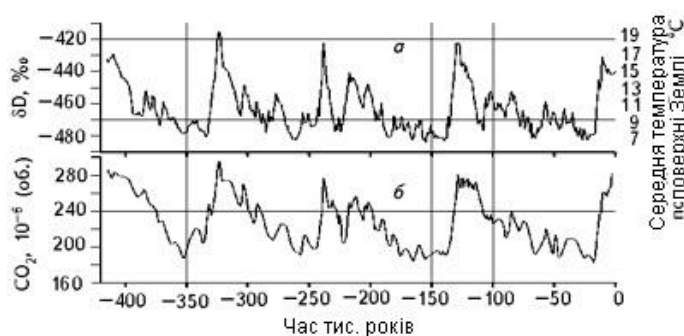


Рис. 1. Кореляція коливань ізотопної температури повітря [3] (а) зі змінами концентрації вуглекислого газу (б) за останні 420 тис. років на антарктичній станції “Схід”.

Ці представлення ґрунтуються як на спостережуваних даних, так і на теоретичних моделях. З іншого боку, характеристики окремих зв’язків у природі кількісні і навіть саме існування деяких зв’язків ще недостатньо визначено, щоб упевнено передбачити кліматичні зміни.

Причиною невизначеності служить як недостача спостережливих даних, так і високий ступінь саморегулювання в природній системі Землі [4]. Ця система демонструє нам гігантські потоки тепла, океанської води, повітря, атмосферної вологи, солі і т.п., але в той же час “ховає” якісь деталі механізмів самоорганізації, малі в порівнянні з тими, що спостерігаються потоками, але істотні для визначення напрямів протікання та інтенсивності кліматичних процесів (трендів) [1, 5]. Капризи погоди останнього часу оживили розмови про прийдешнє значне потепління земного клімату, людини, що викликається економічною діяльністю, головним чином внаслідок викидів в атмосферу так званих парникових газів (вуглекислого газу, метану та ін.). Ідея про розігрівання земної атмосфери парниковими газами була висловлена уперше у кінці XIX ст. відомим шведським ученим С.Аррениусом [1] і відколи очевидна приймається на віру, практично без перевірки [2, 3].

Ця позиція була повністю підтримана на Міжнародних екологічних конгресах в Ріо-де-Жанейро (Бразилія, 1992), в Кіото (Японія, 1997), Міжурядовій комісії з проблеми кліматичних змін (Париж, 2007). Згідно з прогнозами її прибічників, потепління клімату може досягти до 2100 р. 2,5-5 °С, а викликане цим потеплінням підвищення рівня океану на 0,6-1 м, що створить певні проблеми для густонаселених районів континентальних узбереж, а також для газових і нафтовидобувних виробництв в низинних зонах більшої частини узбереж Північного Льодовитого океану. Прогнозуються і інші згубні для природи наслідки: розширення пустель, зникнення мерзлоти, ерозія ґрунтів і так далі.

Побоювання аналогічних катастрофічних явищ і тиск екологічних організацій, а часто і просто спекуляції на цю тему, примушують уряди розвинених країн виділяти величезні кошти на боротьбу з наслідками потепління клімату, нібито пов'язаного з антропогенними викидами в атмосферу “парникових газів”. А наскільки виправдано це. З теорії парникового ефекту (див, наприклад [9-11]), зокрема, витікає, що невеликі концентрації парникових газів практично ніяк не впливають на температуру повітря в тропосфері.

Пов'язано це з тим, що після поглинання парниковими газами інфрачервоного (теплого) випромінювання саме випромінювання пропадає, а його енергія переходить в енергію коливальних рухів молекул повітря. В результаті опромінений об'єм повітря розігрівається, розширюється і швидко піднімається у верхні шари тропосфери, де і охолоджується, а йому на зміну опускається вже охоложене повітря, і температура повітря в тропосфері знову знижується до рівня адіабатичного розподілу, тобто практично не міняється. Аналогічна ситуація повинна спостерігатися і з розігріванням повітря при конденсації в ній вологи. При значних же концентраціях парникових газів розвивається – відбувається похолодання, а не потепління клімату. Так, при уявній заміні азотно-кисневої атмосфери, що володіє до того ж і більшою теплоємністю. Пояснюється ж цей уявний парадокс тим, що винесення тепла з тропосфери в основному відбувається завдяки конвекції, яка забезпечує значно ефективніше перенесення тепла, ніж радіація. Звідси стає зрозумілим, що зі збільшенням концентрації вуглекислого газу і поглинання ним теплового випромінювання ще більше зростає конвективний масообмін повітря, що виносить це тепло за межі тропосфери.

Приведений теоретичний висновок наочно ілюструється і експериментальними даними по бурінню льодовикового покриву Антарктиди (Рис. 1). При їх уважному вивченні виявляється, що крива температурних коливань (так звана ізотопна температура) [7, 8] випереджає зміни концентрацій вуглекислого газу, що відповідають їм, в середньому приблизно на 500-600 років, тобто якраз на час повного перемішування верхнього (активного) шару води у Світовому океані. Нагадаємо, що в океані розчинено вуглекислого газу приблизно в 60-90 разів більше, ніж його міститься в атмосфері, а згідно із законом Генрі, парціальний тиск вуглекислого газу в атмосфері підвищується при нагріванні океанічних вод і, навпаки, знижується при її охолодженні (це добре відомий усім “ефект шампанського”, але тільки в спокійнішому варіанті).

Глобальні кліматичні зміни дуже складні, тому сучасна наука не може дати однозначної відповіді, що ж нас очікує в найближчому майбутньому. Існує безліч сценаріїв розвитку ситуації, але приведем кілька найважливіших з них. Окрім розглянутих причин плавного похолодання кліматів Землі в протерозої і фанерозої за рахунок зменшення атмосферного тиску її приземні температури істотно залежать і від величини кута прецесії Землі. Виникнення прецесії тіла, що обертається, пов'язане з

відхиленнями розподілу його мас від повної осьової симетрії. На Землі такі відхилення симетрії передусім обумовлені розташуванням континентів і океанів на її поверхні, льодовиковими покривами континентів у високих широтах (Рис.2). У міру наближення площини земного екватора до екліптики кут прецесії зменшується від 24° до $2,5^\circ$, що супроводжується істотним похолоданням клімату: температура зменшується від 15°C , асимптотично наближаючись до свого граничного мінімального значення $6,5^\circ\text{C}$. Як тільки середня приземна температура досягає деякого критичного значення (для північних регіонів Землі близька, мабуть, до 9°C), виникають оледеніння. Виникнення ж льодовикових покривів в приполярних районах неминуче призводить до порушення рівноважного обертання Землі і до нового, досить швидкого, зростання кута прецесії.

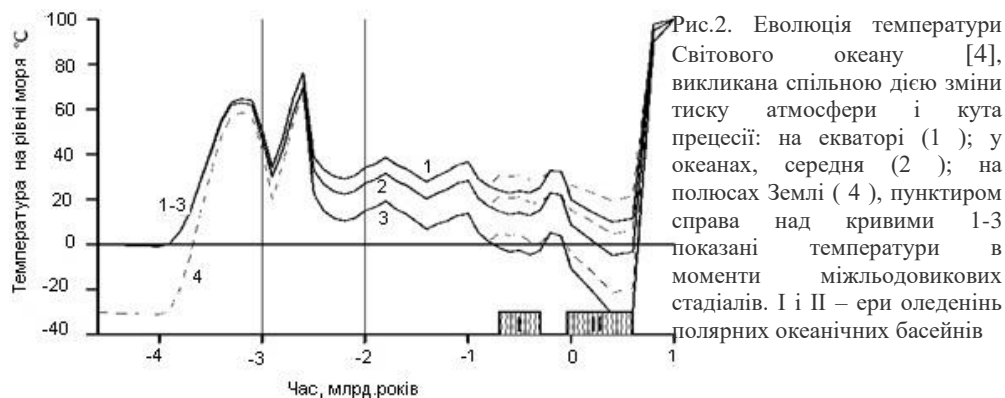


Рис.2. Еволюція температури Світового океану [4], викликана спільною дією зміни тиску атмосфери і кута прецесії: на екваторі (1); у океанах, середня (2); на полюсах Землі (4), пунктиром справа над кривими 1-3 показані температури в моменти міжльодовикових стадіалів. I і II – ери оледеніння полярних океанічних басейнів

Судячи з даних про поширення льодовиків в пізньому плейстоцені [13], головні маси льоду Північної півкулі накопичувалися над Канадським щитом. Тому на тіло Землі повинні були діяти два моменти сил, спрямовані один проти одного одно викликалося північним оледенінням, а інше – оледенінням Західної Антарктиди.

Отримана оцінка, безумовно, дуже наближена, але дозволяє оцінити характерний час потепління клімату і деградації оледенінь. Воно виявилось близько декількох тисяч років, що, мабуть, і відповідає дійсності. Так, за оцінками [10], “розпад велетенського плейстоценового оледеніння в Північній півкулі стався геологічно дуже швидко – всього за декілька тисяч років”.

Окрім впливу Місяця і Сонця на прецесію Землі впливає і асиметрія розташування континентів на земній поверхні, оскільки їх центр мас знаходиться дещо вищий за центр мас витісненої континентами речовини мантії. Проте необхідно ще враховувати неоднорідність будови мантії Землі, особливо розташування відносно легенів висхідних мантійних потоків і важчих літосферних плит, що опускаються, а також нерівності рельєфу земного ядра.

Сумарний вплив усіх цих чинників стає дуже невизначеним. За непрямыми оцінками, ґрунтованими на зіставленні теоретичних визначень температурних коливань клімату в плейстоцені (1,64 млн–10 тис. років назад) з ізотопними температурами льодовикового покриву Антарктиди (Рис. 3). Коливання температур викликані прецесією Землі – крива 3 (максимуми поєднані з екстремумами експериментальних даних) і прецесією орбіти Землі навколо Сонця (цикли Міланковича – близько 22 і 40

тис. років) – криві 2 і 3. Останній сплеск ізотопної температури (близько 20-10 тис. років назад) відповідав 8°C , а попередній (130-140 тис. років) - 10°C . Положення континентів на поверхні Землі може порушувати сферичну симетрію планети і сильно впливати на її температурні режими.

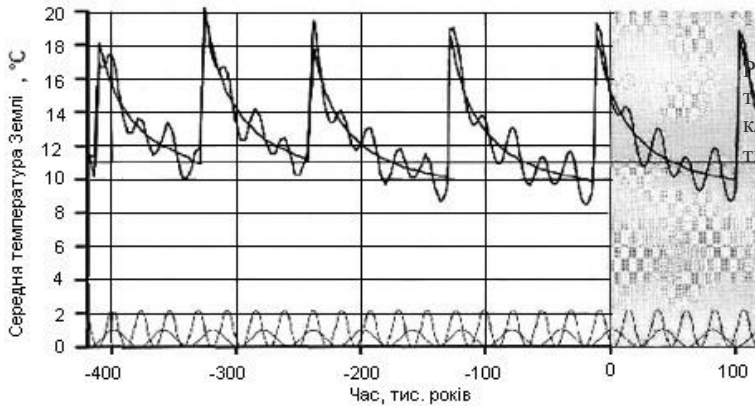


Рис. 4. Теоретичний температурний прогноз клімату на наступні 120 тис. років [4].

Проте такий вплив важко піддається розрахунку, оскільки нам невідомі аномалії густини мантії і рельєф земного ядра. Сьогодні цей вклад відносно невеликий. Проте при формуванні суперконтинентів з компакним розташуванням окремих материків, що зазвичай розташовувалися на низьких широтах, ці моменти різко зростають. Оскільки безпосередній вклад дрейфу континентів в прецесію Землі визначити важко, можна скористатись непрямим методом - визначенням кутів прецесії по палеотемпературах океанів, що існували в минулі геологічні епохи. Судячи з даних [3, 4], близько 100 млн років назад, під час утворення останнього суперконтиненту, вегенерівської Пангеї, температури на екваторі могли досягати 32°C при плюсових температурах на полюсах Землі. Таким умовам відповідав кут прецесії 34° [5]. Крім того, визначенню кутів прецесії в минулі геологічні епохи допомагають дані по реконструкціях попередніх суперконтинентів і характері їх розколів в минулі геологічні епохи Землі.

Якщо стаціонарний кут прецесії при утворенні Пангеї досягав приблизно 34° , то для інших суперконтинентів, судячи з їх реконструкцій і меншої маси, виходять дещо менші значення кутів прецесії [4]. У інтервалах часу між моментами утворення суперконтинентів ці кути прецесії близькими до стаціонарних $6-8^{\circ}$. Використовуючи отриману модель змін кута прецесії Землі, можна визначати і коливання середньої температури океанів і континентів на екваторі і полюсах Землі. Видно, що кожній епосі утворення суперконтинентів відповідає підвищення приземних температур. Так, під час формування першого в історії Землі суперконтиненту Моногеї (близько 2,6 млрд років назад), коли ще існувала архейська щільна вуглекислотна атмосфера, середня температура на рівні океану перевищувала 70°C . Оскільки в археї середні рівні континентів були виключно високими і досягали 6 км [6], те і температури на їх поверхні були істотно нижчими і не перевищували $20...30^{\circ}\text{C}$.

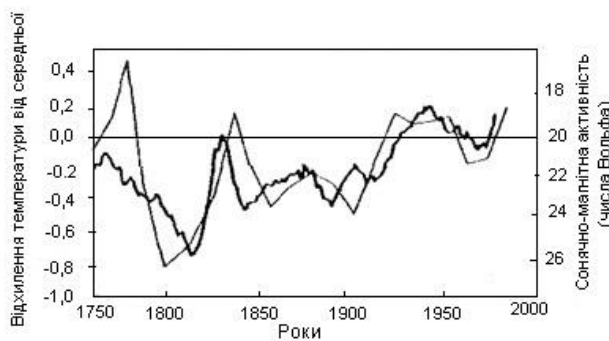


Рис.3. Кореляція температурних коливань [3] в Північній півкулі з магнітною активністю Сонця (числами Вольфа). Ліва шкала і товста лінія - відхилення середнього значення поверхневої температури, Північної півкулі при поточному 11-річному згладжуванні. Права шкала і тонка лінія - усереднена сонячно-магнітна активність (числа Вольфа). Різким сплеском магнітних циклів відповідає активніше, і, отже, яскравіше сонце [10]

При формуванні Мегатеї Штилле (близько 1,8 млрд років) ці температури наближалися відповідно до 30 і 20°C, при утворенні Мезотеї (Родинії, близько 1 млрд років) вони вже знизилися до 30 і 25°C, а в час Пангеї Вегенера (близько 200 млн років) зменшилися до 24 і 20°C. У проміжках між епохами формування суперконтинентів середні температури на рівні моря і на континентах знижувалися на 7-10 °С.

Разом із середніми температурами поверхні континентів і материків наведені геологічні дані щодо поширення в історії Землі ер зледеніння [4]. Як видно, після архею температура земної поверхні тільки знижувалася, незважаючи навіть на зростання світності Сонця. Спочатку, після накопичення води в Світовому океані і виникнення в ранньому протерозої океанічної кори сучасного типу, таке зниження температури відбувалося завдяки зв'язуванню вуглекислого газу в карбонатах, а потім (в протерозої і фанерозої) і завдяки життєдіяльності азотофіксуючих бактерій.

Похолодання земного клімату навіть більш різке, ніж раніше, продовжиться і в майбутньому (Рис. 4). Подальший розвиток таких процесів досить важко прогнозувати через невизначеність реакції температури приземного шару на зміни густини хмар, їхньої висоти, вологості, температури, фазового стану і розподілу часток по розмірам у різних шарах атмосфери, як середовище де реалізується кліматичне моделювання.

Принципи розвитку фізико-математичного моделювання кліматичної системи та можливі сценарії кліматичних катаклізмів Землі.

Сучасні кліматичні моделі базуються на добре відомих фізичних законах і переконливо продемонстрували свої можливості в розрахунках основних спостережуваних характеристик сучасного клімату, а також його змін в минулі епохи. Моделі дозволяють отримувати заслуговують на довіру (особливо для масштабів від глобальних до субконтинентальним) кількісні оцінки майбутніх змін клімату. Достовірність таких оцінок неоднакова для різних характеристик. Наприклад, вона вище для температури в порівнянні з опадами. Разом з тим існує ряд невирішених проблем.

На сьогодні кліматичні моделі інтенсивно розвиваються завдяки удосконалюванню обчислювальної техніки. Цей "паралелізм" у розвитку необхідний для розуміння

механізмів, відповідальних за відтворення різних кліматичних характеристик. Проблеми відтворення і прогнозу змін клімату, на відміну від класичних проблем фізики, мають свою особливість: вони не допускають прямого фізичного експерименту. Більш того, у силу специфічних характеристик кліматичної системи (наприклад, атмосфера й океан – це тонкі плівки), лабораторні експерименти представляються також досить проблематичними. Для детального вивчення реальної кліматичної системи є лише обмежений набір параметрів траєкторії системи довжиною в кілька десятків років, протягом яких проводилися досить повні натурні виміри.

Частина цих проблем обумовлена, мабуть, недостатнім для належного опису деяких кліматично значущих процесів просторовим дозволом сучасних моделей. Інші – недостатнім рівнем розуміння фізичних процесів (Рис. 5).

У багатьох випадках провести межу між цими групами проблем важко. До числа відомих проблем сучасних клімату чеських моделей можна віднести наступні (без вказівки пріоритетності) [6, 14-16]:

- більшості моделей притаманний кліматичний дрейф, особливо в глибокому океані;
- моделі демонструють значний розкид інтенсивності зворотних зв'язків у кліматичній системі;
- більшість сучасних моделей не відтворюють з необхідним ступенем достовірності деякі великомасштабні моди кліматичної мінливості, зокрема коливання Маддена - Джуліана, періодичні блокування атмосферної циркуляції і інтенсивні опади;
- систематичні помилки у відтворенні загальної циркуляції Південного океану посилюють невизначеність нерівноважного відгуку кліматичної системи на антропогенний збільшення вмісту парникових газів в атмосфері;
- відсутня система загально визначених показників якості моделей (при порівнянні модельних розрахунків з даними спостережень), які можна було б використовувати для зменшення розкиду оцінок майбутніх змін клімату.

Глобальне потепління буде відбуватися поступово. Земля дуже велика і складна система, що складається з великої кількості зв'язаних між собою структурних компонентів. На планеті є рухлива атмосфера, рух повітряних мас якої розподіляє теплову енергію по широтах планети, на Землі є величезний акумулятор тепла і газів – Світовий океан (океан накопичує в 1000 разів більше тепла, чим атмосфера) Зміни в такій складній системі не можуть відбуватися швидко. Пройдуть сторіччя і тисячоріччя, перш ніж можна буде судити про скільки-небудь відчутну зміну клімату.

Глобальне потепління буде відбуватися відносно швидко – «найпопулярніший» у на сьогоднішній сценарій. За різними оцінками за останні сто років середня температура на нашій планеті збільшилася на 0,5-1°C, концентрація – CO₂ зросла на 20-24 %, а метану на 100%. У майбутньому ці процеси одержать подальше продовження і до кінця XXI століття середня температура поверхні Землі може збільшитися від 1,1 до 6,4°C, у порівнянні з 1990 роком (за прогнозами IPCC від 1,4 до 5,8°C). Подальше танення Арктичних і Антарктичних льодів може прискорити процеси глобального потепління через зміну альбедо планети. За твердженням деяких учених, тільки крижані шапки планети за рахунок відображення сонячного випромінювання прохолоджують нашу Землю на 2°C, а покриваючу поверхню океану лід істотно сповільнює процеси теплообміну між відносно теплими океанічними водами і більш холодним поверхневим шаром атмосфери.

Крім того, над крижаними шапками практично немає головного парникового газу – водяної пари, тому що він виморожений. Якщо рівень Світового океану надалі буде підніматися з такою же швидкістю, то до кінця XXI століття сумарний підйом його рівня складе 30 - 50 см, що викликає часткове затоплення багатьох прибережних територій, особливо багатонаселеного узбережжя Азії. Крім підвищення рівня Світового океану глобальне потепління впливає на силу вітрів і розподіл опадів на планеті. У результаті на планеті виросте частота і масштаби різних природних катаклізмів (шторми, урагани, посухи, повені). Нині від посухи страждає 2% усієї суші, за прогнозами деяких учених до 2050 року посухою буде охоплене до 10% усіх земель материків. Крім того, зміниться розподіл кількості опадів по сезонах.

Глобальне потепління в деяких частинах Землі зміниться короткочасним похолоданням. Відомо, що одним з факторів виникнення океанічних плинів є градієнт (різниця) температур між арктичними і тропічними водами. Танення полярних льодів сприяє підвищенню температури Арктичних вод, а виходить, викликає зменшення температурної різниці між тропічними й арктичними водами, що у майбутньому приведе до уповільнення плинів. Одним з найвідоміших теплих плинів є Гольфстрім, завдяки якому в багатьох країнах Північної Європи середньорічна температура на 10 градусів вище, ніж в інших аналогічних кліматичних зонах Землі. Зрозуміло, що зупинка цього океанічного конвеєра тепла дуже сильно вплине на клімат Землі. Уже зараз плин Гольфстрім, стало слабкіше на 30% у порівнянні з 1957 роком. Математичне моделювання показало, щоб цілком зупинити Гольфстрім досить буде підвищення температури на 2-2,5 градуса. В даний час температура Північної Атлантики вже прогрілася на 0,2 градуси в порівнянні з 70-ми роками. Інші математичні моделі «обіцяють» більш сильне похолодання Європі. Згідно цим математичним розрахункам повна зупинка Гольфстріму відбудеться через 20 років, у результаті чого клімат Північної Європи, Ірландії, Ісландії і Великобританії може стати холодніше сьогодення на 4-6 градусів, підсиляться дощі й частішими стануть шторми. Похолодання торкнеться також і Нідерланди, Бельгію, Скандинавію і північ європейської частини Росії. Після 2030-х років потепління в Європі відновиться по сценарію №2. Глобальне потепління переміниться глобальним похолоданням. Зупинка Гольфстріму й інше океанічних викликає глобальне потепління на Землі і настання чергового льодовикового періоду.

Парникова катастрофа – один із найбільш «неприємних» сценаріїв розвитку процесів глобального потепління. Ріст середньорічної температури на Землі, унаслідок збільшення в атмосфері Землі змісту антропогенного CO₂, викликає перехід в атмосферу розчиненого в океані CO₂, а також спровокує розкладання осадових карбонатних порід з додатковим виділенням вуглекислого газу, що, у свою чергу, підніме температуру на Землі ще вище, що спричинить за собою подальше розкладання карбонатів, що лежать у більш глибоких шарах земної кори (в океані утримується вуглекислого газу в 60 разів більше, ніж в атмосфері, а в земній корі майже в 50 000 разів більше). Льодовики будуть інтенсивно танути, зменшуючи альbedo Землі. Таке швидке підвищення температури буде сприяти інтенсивному надходженню метану з вічної мерзлоти, що тоне, а підвищення температури до 1,4-5,8°C к кінцеві сторіччя буде сприяти розкладанню метангидратів (льодистих сполук води і метану), зосереджених переважно в холодних місцях Землі. Врахувавши, що метан, є в 21 раз сильнішим парниковим газом, ніж CO₂, ріст температури на Землі буде катастрофічним. Щоб краще представити, що буде з Землею найкраще звернути увагу на нашого сусіда по сонячній системі – планету

Венера. При таких же параметрах атмосфери, як на Землі, температура на Венері повинна бути вище земної усього на 60°C (Венера ближче Землі до Сонця) тобто бути близько 75°C , а у реальності ж температура на Венері майже 500°C . Більшість карбонатних і сполук, що є метано-вмістні, на Венері давним давно були зруйновані з виділенням вуглекислого газу і метану. В даний час атмосфера Венери складається на 98% із CO_2 , що приводить до збільшення температури планети майже на 400°C .

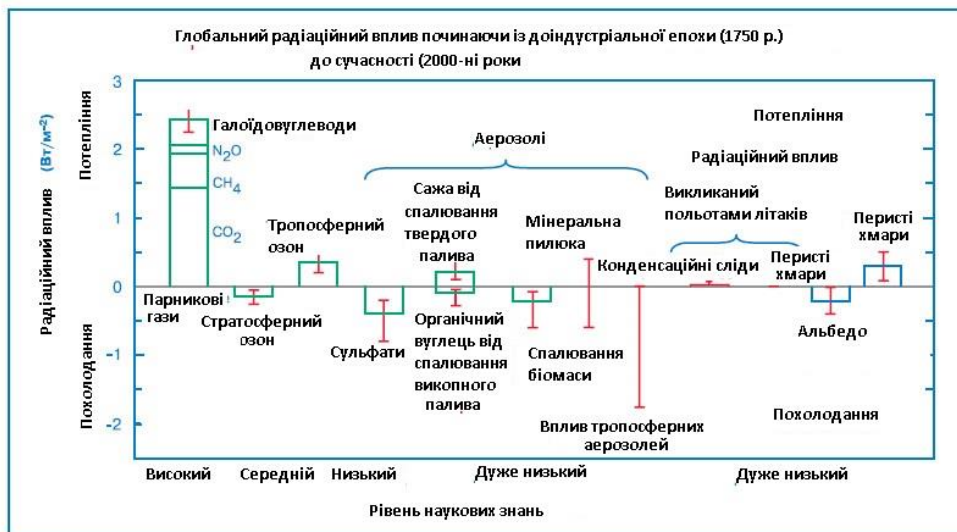


Рис. 5. Глобальні складові радіаційного впливу на кліматичну систему Землі [15,16].

Якщо глобальне потепління піде по такому ж сценарію, як на Венері, то температура приземних шарів атмосфери на Землі може досягти 150°C . Підвищення температури Землі навіть на 50°C поставить хрест на людській цивілізації, а збільшення температури на 150°C викликає загибель майже всіх живих організмів планети. По оптимістичному сценарію, якщо кількість CO_2 , що надходить в атмосферу, залишиться на колишньому рівні, то температура 50°C , на Землі установиться через 300 років, а 150°C через 6000 років. На жаль, прогрес не зупинити, з кожним роком обсяги викидів CO_2 тільки ростуть. По реалістичному сценарію, відповідно до якого викид CO_2 буде рости з такою ж швидкістю, подвоюючись кожні 50 років, температура 50°C на Землі вже установиться через 100 років, а 150°C через 300 років

Урагани в США, посуха в Австралії, аномальне жарке літо в Європі, катастрофічні зливи і повені на мрячному Альбіоні – список можна ще продовжити. От тільки деякі приклади наслідків кліматичних змін. Екстремальні природні явища б'ють усі рекорди практично у всіх регіонах світу. А природні катаклізми спричиняють економічні наслідки. З кожним роком збиток від стихійних лих зростає. Якого ж наслідку може викликати глобальне потепління?

Зміна частоти й інтенсивності випадання опадів. У цілому клімат на планеті стане більш вологим. Але кількість опадів не пошириться по Землі рівномірно. У

регіонах, що і так на сьогоднішній день одержують достатню кількість опадів, їхнє випадання стане інтенсивніше. А в регіонах з недостатнім зволоженням почастишають посушливі періоди.

Підвищення рівня моря. Протягом ХХ століття середній рівень моря підвищився на 0,1-0,2м. За прогнозами вчених за ХХІ століття підвищення рівня моря складе до 1 м. У цьому випадку найбільш уразливими виявляться прибережні території і невеликі острови. Такі держави як Нідерланди, Великобританія, а також малі острівні держави Океанії і Карибського басейну першими підпадуть під небезпеку затоплення. Крім цього будуть частішими високі припливи, підсиляться ерозія берегової лінії..

Загроза для екосистем і біорізноманіття. Види і екосистеми вже почали реагувати на зміну клімату. Мігруючі види птахів стали раніш прилітати навесні і пізніше летіти восени. Існують прогнози зникнення до 30-40% видів рослин і тварин, оскільки їхнє середовище проживання буде змінюватися швидше, ніж вони можуть пристосуватися до цих змін. При підвищенні температури на 1 °С прогнозується зміна видового складу лісу. Ліси є природним нагромаджувачем вуглецю (80% усього вуглецю в земній рослинності і близько 40% вуглецю в ґрунті). Перехід від одного типу лісів до іншого буде супроводжуватися виділенням великої кількості вуглецю.

Танення льодовиків. Сучасне зледеніння Землі можна вважати одним із найбільш чутливих індикаторів глобальних змін, що відбуваються. Супутникові дані показують, що, починаючи з 1960-х рр., відбулося зменшення площі снігового покриву приблизно на 10%. З 1950-х рр. у Північній півкулі площа морського льоду скоротилася майже на 10-15%, а товщина зменшилася на 40%. Товща Гімалайських льодів тоне зі швидкістю 10-15 м у рік. При нинішній швидкості цих процесів дві третини льодовиків Китаю зникнуть до 2060 р., а до 2100 усі льодовики стануть остаточно. Прискорене танення льодовиків створює ряд безпосередніх погроз людському розвитку. Для густонаселених гірських і передгірних територій особливу небезпеку представляють лавини, затоплення або, навпаки, зниження повноводості рік, а як наслідок – скорочення запасів прісної води.

Підвищення температури може привести до зміни географічного поширення різних видів, що є переносниками захворювань. З підвищенням температури ареали теплолюбних тварин і комах (наприклад, енцефалітних кліщів і малярійних комарів) будуть поширюватися північніше, у той час як люди, що населяють ці території, не будуть мати імунітету до нових захворювань.

Кліматичні моделі, призначені для вирішення пріоритетних завдань, перерахованих вище, повинні включати більш досконалі інтерактивні компоненти, що описують хімічні процеси, в тому числі процеси освіти, перенесення і руйнування озону, біогеохімічні цикли, процеси в стратосфері і ін. Інтерактивні компоненти сучасних моделей, що представляють процеси взаємодії аерозолів з хмарами, вуглецевий цикл в атмосфері і океані, еволюцію рослинності чутливої до клімату та ін., потребують подальшого розвитку [7]. До числа важливих питань розвитку атмосферних компонентів кліматичних моделей відноситься належний опис прикордонного шару і інверсій в нижній тропосфері. Малоймовірно, що прогрес тут може бути досягнутий лише за допомогою збільшення вертикального розподілу атмосферних компонентів кліматичних моделей.

Надії на істотне підвищення якості відтворення моделями спостережуваного клімату зв'язуються і з поліпшенням їх просторового дозволу, як горизонтального, так і

вертикального. Зокрема, є підстави очікувати, що покращення роздільної здатності дозволить зменшити систематичні помилки сучасних моделей на території Європи. До таких помилок відносяться, наприклад, заниження температури приземного повітря на північному сході європейського континенту, завищення згуртованості морського льоду в Баренцевому морі, зміщення арктичної повітряної маси в східний сектор Арктики (що приводить, зокрема, до спотворення вітрового впливу на морський лід) і ряд інших. Тим часом, для моделювання ряду кліматично значущих процесів, а також для отримання оцінок кліматичних змін з необхідною для деяких досліджень деталізацією потрібні моделі з просторовим дозволом, яке в найближчому майбутньому навряд чи буде досягнуто МЗЦАО. Ця ситуація створює певні перспективи для регіональних кліматичних моделей, що мають в середньому на порядок вищий дозвіл в порівнянні з глобальними моделями і забезпечують тим самим більшу реалістичність відтворення мінливості кліматичної системи. Розвиток таких моделей, а також інших моделей, що дозволяють деталізувати розрахунки клімату і представляють інтерес у регіонах (наприклад, моделей зі з більш густими сітками), безсумнівно входить у пріоритети моделювання клімату. Як зазначалося вище, багато хто з сьогоднішніх пріоритетів розвитку прогнозування клімату за допомогою кліматичних моделей пов'язані з поліпшенням їх просторового дозволу, в більшості випадків радикальним. З іншого боку, частина невизначеності оцінок майбутніх змін кліматичної системи обумовлена її власної мінливістю і не може бути усунена удосконаленням моделей. вирішуючи проблему передбачуваності клімату, необхідно досліджувати неминучу невизначеність, пов'язану з власної мінливістю, в імовірнісному просторі. З цією метою необхідно проводити ансамблеві розрахунки з варіюванням як початкових станів, так і невизначених модельних параметрів в реалістичному діапазоні, або використовуючи різні моделі [8-11]. Як передбачається, домінуючу роль у змінах концентрації CO₂ в атмосфері у XXI столітті будуть відігравати взаємодії між атмосферою, біосферою суші і поверхневим шаром океану, які відбуваються відносно швидко [14-16]. Обміни CO₂ між атмосферою і глибоким океаном, навпаки, набагато повільніші — вони відбуваються на часових масштабах від сторіч до тисячоліть. Якщо розглядати, наприклад, дуже ідеалізований сценарій, в якому викиди CO₂ мають своєрідну часову траєкторію, за якою концентрація вуглекислого газу досягає рівня 750 ppт у 2100 р. з тенденцією до подальшої стабілізації, але перед цим викиди раптово зменшуються до нуля. При цьому метою дослідження є не реалістичні проєкції клімату, але аналіз тривалих у часі змін у кліматичній системі при умові припинення викидів CO₂. У [14] описано вплив антропогенного форсингу на майбутній стан кліматичної системи. У свою чергу, зміни клімату впливають на біогеохімічні цикли, які змінюють значення радіаційного форсингу, що в свою чергу знову впливає на клімат через потенційні ефекти зворотних зв'язків. Серед всіх складних механізмів, що діють в кліматичній системі, необхідно зосередити на ефектах, пов'язаних з CO₂ оскільки він є домінуючим антропогенним газом. Там же наводяться дані про те, що половина антропогенного CO₂, який викидається при спалюванні викопного пального і за рахунок змін у землекористуванні, залишається в атмосфері. Інша половина порівну переходить у сховища в океанічній та суходільній біосфері. Проте цей розподіл між атмосферним, океанічним та суходільним резервуарами може змінитися в майбутньому. По-перше, зміни концентрації CO₂ в атмосфері безпосередньо змінюють потоки CO₂ між

атмосферою і океаном, а також між атмосферою і поверхнею суші. Баланс між H_2CO_3 , HCO^- та іонами карбонату CO_3^{2-} пояснює, як океан може зберігати великі кількості CO_2 .

Зокрема, CO_2 , що надходить з атмосфери в океан, вступає в хімічну реакцію з водою з формуванням вуглекислоти (H_2CO_3), яка розпадається до утворення іонів карбонату (CO_3^{2-}) та бікарбонату (HCO^-), які є домінуючою формою існування неорганічного вуглецю в океані, через те що іони CO_3^{2-} вступають в реакцію з вуглекислотою, знову формуючи іони бікарбонату, $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_3^{2-} \rightleftharpoons 2\text{HCO}^-$. Їхній прогноз засвідчує, що впродовж XX і XXI століть збільшення потоку CO_2 від атмосфери до океану буде зумовлювати зменшення доступності іонів карбонатів. Це призводить до меншої ефективності реакції, яка формує бікарбонати з CO_2 . Тоді все більша частина розчиненого неорганічного вуглецю буде залишатися у формі H_2CO_3 , що спричинить зростання парціального тиску CO_2 в океані, і тому скоротиться поглинання CO_2 в океані. В результаті океан продовжуватиме поглинати деяку частку антропогенного CO_2 , але відносний вклад процесу поглинання буде зменшуватися.

Недостатнє розуміння фізики прикордонного шару в високих широтах вимагає подальших досліджень. Значною мірою сказане відноситься і до параметризації радіоакційного перенесення, які повинні враховувати особливості атмосфери і підстильної поверхні, включаючи їх вертикальну і горизонтальну неоднорідність. Хмари високих широт, зокрема багатошарова арктична хмарність з притаманними їй фазовими переходами води в хмарах і низькою температурою, вносять свій вклад в невизначеність чутливості клімату до зовнішніх впливів.

Ця невизначеність посилюється відмінностями радіаційних властивостей і концентрацій різних типів хмарних кристалів, які по-різному взаємодіють з довгохвильовим випромінюванням (Рис. 5). Похибки розрахунків сучасного стану морського льоду за допомогою МЗЦАО нового покоління, а також значні невизначеності оцінок його майбутніх змін залишають великий простір для подальших зусиль у галузі моделювання як власне морського льоду, так і клімату високих широт в цілому. З огляду на потенційно важливу роль, яку можуть відігравати динамічні процеси в змінах балансу маси льодовикових щитів Гренландії та Антарктиди і тим самим в змінах рівня океану, необхідно розвивати відповідні кріосферні компоненти кліматичних моделей.

Список використаних джерел

- [1] Дымников В. П., Лыков В. Н., Володин Е. М. Проблемы моделирования климата и его изменений. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2006. Т. 42(5). – С. 618-636.
- [2] Гейнц Е. Изменения климата в истории времени // Экология и жизнь. 2001. – С. 52.
- [3] Сорохтин О.Г. Парниковый эффект: миф и реальность. – Вестник РАЕН. 2001. Т. 1. № 1.
- [4] Сорохтин О.Г. Эволюция и прогноз изменений глобального климата Земли. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006.
- [5] U. Cubasch et al., (2006). Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate // Adv. in Space Res. 37, pp.1629.
- [6] U. Berger, (2008). Modeling of middle atmosphere dynamics with LIMA // J. of Atm. and Solar-Terrestrial Phys. 70 1170–1200

- [7] *Randall David A., et al., (2007). Climate models and their evaluation. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC (FAR). Cambridge University Press, pp. 589-662.*
- [8] *Denman K. L. (2007). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 7.*
- [9] *Solomon S. (2007). The physical science basis: Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate change 2007, 996.*
- [10] *Giorgi F., (2005). Climate change prediction, Climatic Change, vol. 73, pp. 239–265. DOI:[10.1007/s10584-005-6857-4](https://doi.org/10.1007/s10584-005-6857-4)*
- [11] *Kattsov V., Kalle'n E. Future climate change: Modeling and scenarios for the Arctic, in: Arctic Climate Impact Assessment (ACIA), Cambridge University Press, 2005. P. 99–150.*
- [12] *Tebaldi C., Knutti R. The use of the multimodel ensemble in probabilistic climate projections, Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2007. Vol. 365. – P. 2053–2075, <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>.*
- [13] *Сорохтин О.Г. Теория развития Земли: происхождение, эволюция и трагическое. 2010. – 752 с. – Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/301379>*
- [14] *Степаненко С. М. Динаміка та моделювання клімату : підручник для студентів вищих навчальних закладів — Одеса : Екологія, 2013. – 204 с.*
- [15] *Hugues Goosse. Climate System Dynamics and Modelling [online], <http://bookprem.com/gd-ebooks/1107083893>*
- [16] *Scotese C. R. Some thoughts on global climate change: The Transition for Icehouse to Hothouse Conditions PALEOMAP Project. 2015. May 25, V. 19a, 54 p.*

ANALYSIS OF PROBLEMS OF DESCRIPTION AND MODELING THE CLIMATIC SCENARIOS OF THE EARTH

V. Fourman¹, Y. Vikhot^{1,2}

¹*Ivan Franko National University of Lviv,
4 Hrushevsky Str., UA-79005 Lviv, Ukraine
fourman@i.ua*

²*Lviv Polytechnic National University,
6 Karpinskoho Str., UA-79013, Lviv, Ukraine
yuvik@ukr.net*

The global climate is a complex system where the gradual accumulation of quantitative changes can lead to an unexpected qualitative leap with unpredictable consequences of processes throughout the climate and ecological system. To date, the best studied and described aero- and hydrodynamic processes generated by solar radiation of the Earth. In fact, we are talking about the work of a giant heat engine, which gives motion to huge masses of air and water due to uneven heating of the Earth's surface. On the one hand, the Earth sciences have already developed

a fairly complete picture of the main factors that dictate changes in the Earth's climate. These representations are based on both observable data and theoretical models. On the other hand, the characteristics of individual connections in nature are quantitative, and even the very existence of some connections is not yet sufficiently defined to reliably predict climate change. The reason for the uncertainty is both the lack of observational data and the high degree of self-regulation in the natural system of the Earth. Further development of climate models and methods of weather forecasting is associated with increased spatial resolution and improved physical parameterizations of subgrid scale processes. Level of spatial resolution and largely limited by the complexity of the physical parameterizations performance the most powerful computing systems (supercomputers). Problems of reproduction and prediction of climate change, in contrast to the classical problems of physics, have their own feature: they do not allow direct physical experiment. Moreover, due to the specific characteristics of the climate system (for example, the atmosphere and the ocean are thin films), laboratory experiments are also quite problematic. For a detailed study of the real climate system, there is only a limited set of parameters of the trajectory of the system in the length of several decades, during which fairly complete field measurements were performed. Global climate change is very complex, so modern science can not give an unambiguous answer as to what awaits us in the near future. There are many scenarios for the situation, but here are some of the most important ones. Processing the results of numerical experiments to create a model of modern climate in international programs showed that the main characteristics obtained using different models and then averaged over the whole set of models are closer to the observer actually than the characteristics obtained using individual, even better models.

Key words: modeling, climatic system, physical parameters, forecasting.

Стаття: надійшла до редакції 21.03.2021,
доопрацьована 28.03.2021,
прийнята до друку 29.03.2021