Для заказа доставки данной работы воспользуйтесь поиском на сайте по ссылке: <http://www.mydisser.com/search.html>

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ХОХЛОВ ВАЛЕРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 551.513:551.583

ДИНАМІКА НЕЛІНІЙНИХ ВЗАЄМОДІЙ

В ГЛОБАЛЬНІЙ КЛІМАТИЧНІЙ СИСТЕМІ

11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора географічних наук

Одеса – 2005

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському державному екологічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант

Доктор фізико-математичних наук, професор

Глушков Олександр Васильович,

Одеський державний екологічний університет, завідувач кафедрою вищої та прикладної
математики

**Офіційні опоненти:**

‑ Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Пірнач Ганна Михайлівна, Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, головний науковий співробітник

‑ Доктор географічних наук, професор Полонський Олександр Борисович, Морський гідрофізичний інститут, головний науковий співробітник

‑ Доктор географічних наук, професор Міщенко Зінаїда Антонівна, Одеський державний екологічний університет, професор кафедри агрометеорології та агрометеорологічних прогнозів

Провідна установа

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, географічний факультет, кафедра метеорології та кліматології м. Київ.

Захист відбудеться „ 19 ” травня 2005 р. о 1000 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.090.01 в Одеському державному екологічному університеті за адресою: 65016, Україна, м. Одеса, вул. Львівська, 15, ОДЕКУ.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеського державного екологічного університету за адресою: 65016, Україна, м. Одеса, вул. Львівська, 15, ОДЕКУ

Автореферат розісланий „ 18 ” квітня 2005 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Чугай А.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми** обумовлена необхідністю модернізації методів прогнозування та діагностики процесів, які спливають у земній кліматичній системі, а також якісної оцінки процесів взаємодії, які обумовлюють зміни клімату, що спостерігаються в глобальному та регіональному масштабах.

Наукові дослідження глобального та регіональних кліматів проводилися протягом всього минулого сторіччя, але тільки наприкінці 1980-х років, після того, як людство зіткнулося з проблемою глобального потепління, ці дослідження перейшли з теоретичної галузі у практичну, основним застосуванням якої стала оцінка спостереженої та прогноз майбутньої зміни клімату. Хоч на цей час моделювання клімату за допомогою суперЕОМ здійснюється у багато яких світових наукових центрах, відповіді на запитання, що відбудеться у найближчі десятиріччя в кліматичній системі та якими будуть наслідки цього, з належною точністю не дано. Підтвердженням може бути текст Узагальненої доповіді міжурядової групи експертів по змінам клімату (2001 р.), в якому достатньо зустрічаються вирази „можливо”, „імовірно” тощо. Саме тому в наукових колах не існує терміна „прогноз клімату”, замість якого використовується поняття „сценарій розвитку клімату”.

В теперішній час моделювання кліматичної системи здійснюється за двома основними напрямками.

Перший напрямок ґрунтується на інтегруванні системи диференціальних рівнянь, які враховують усі можливі взаємодії усередині кліматичної системи. Але наявність похибок (за рахунок наближених розрахунків) в параметризації цих взаємодій та неврахування (може бути й несуттєвих) окремих зворотних зв’язків призводить до того, що сценарії, які розраховані за допомогою різноманітних моделей, показують значні розбіжності в прогнозованих змінах клімату.

Другий напрямок розглядає коливання клімату як динамічну систему, яка (в сучасній теорії хаосу) розвивається на комплексно-структурних гранич­них множинах, що надані в її фазовому просторі. Перевагою такого підходу є те, що з усієї великої кількості факторів, які впливають на динаміку кліматичної системи, можна вибрати декілька головних і, вивчивши їх поведінку, побудувати модель.

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що будь-які відомості, які дозволяють поліпшити розуміння процесів, що обумовлюють динаміку кліматичної системи, є цінними незалежно від того, чи являють вони практичний або теоретичний аспекти проблеми.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами**. Одержані автором результати увійшли складовою частиною у такі науково-дослід­ницькі роботи Одеського державного екологічного університету:

– «Использование спутниковой информации и средств дистанционного зондирования с целью гидрометеорологического и экологического обеспечения народного хозяйства», № ДР 0196U013470, Інв. № 0200U001487, 1999 р.;

– «Теоретичне дослідження геофізичного граничного шару для обґрунтування екологічного моніторингу природних середовищ», № ДР 0100U000913, Інв. № 0202U006757, 2001 р.;

– «Вибір оптимальної моделі та її адаптація до фізико-географічних і метеорологічних умов України на базі моделюючих систем ALADIN і MM5», № ДР 0102U001596, Інв. № 0202U006758, 2001 р.;

– «Дослідження аномальних атмосферних процесів в Україні», № ДР 0199U001139, Інв. № 0204U000241, 2003 р.

**Мета і задачі дослідження**. Метою дослідження є розробка науково-методичних основ діагнозу та прогнозу процесів, що відбуваються в кліма­тичній системі Землі. Основні задачі наукового дослідження:

– сформулювати та обґрунтувати принципи нелінійного моделювання процесів в кліматичній системі;

– встановити просторово-часові закономірності розподілу енергетичних ха­рактеристик атмосфери, глобальних структур телеконекції та факторів, яких вони обумовлюють;

– удосконалити схему циклу енергії в атмосфері з урахуванням прихованої теплоти конденсації;

– розробити методику застосування вейвлет-розкладення для використання в діагнозі взаємодій усередині кліматичної системи;

– удосконалити модель глобального циклу двоокису вуглецю в системі „океан-атмосфера” з урахуванням впливу океанічної біоти;

– встановити закономірності нелінійної взаємодії між глобальними структурами телеконекції за умов клімату, що змінюється;

– розробити енергобалансову модель клімату, що враховує цикл льодовикових періодів.

*Об’єкт дослідження* – глобальна кліматична система.

*Предмет дослідження* – характеристика взаємодій усередині глобальної кліматичної системи, які обумовлюють її динаміку.

*Методи дослідження*. Спрямовані на реалізацію комплексного підходу до розв’язання поставленої проблеми. Перша група методів передбачає аналіз та узагальнення вихідної інформації та містить методи розрахунку потрібних гідрометеорологічних величин на основі даних об’єктивного аналізу, статистичного аналізу полів гідрометеорологічних величин, спільного аналізу одержаних результатів. До другої групи увійшли балансові методи (атмосферної енергії та кутового моменту), які передбачають розрахунки бюджетів різноманітних видів енергії за різними схемами. Третю групу утворюють методи математичного моделювання процесів в глобальній кліматичні системі, серед яких головне місце займає нелінійне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в теоретичному обґрунтуванні важливої проблеми діагностики стану клімату з використанням комплексного підходу, що враховує низку взаємодій в кліматичній системі, практичному розв’язанні проблеми врахування теплоти конденсації в циклі атмосферної енергії та впливу океанічної біоти в глобальному циклі двоокису вуглецю. Автором вперше:

– удосконалено схему циклу атмосферної енергії на базі трансформованої Ейлеревої середньої, яка враховує приховану теплоту конденсації;

– запропонована методика параметризації членів джерел/стоків в рівняннях балансу атмосферної енергії;

– розраховані та фізично пояснені складові бюджету різних видів енергії за основними схемами та їх модифікаціями на основі сучасних, найточніших даних об’єктивного аналізу;

– показаний вплив великомасштабних атмосферних процесів, таких як комірка Ґедлі та Північноатлантичне коливання на вміст енергії в атмосфері;

– теоретично обґрунтований та реалізований підхід до визначення часової динаміки енергетичних характеристик атмосфери, який базується на вейвлет-розкладенні;

– на основі даних об’єктивного аналізу виконана оцінка складових балансу кутового моменту в атмосфері з урахуванням Коріолісова перетворення;

– уточнений вплив океанічної біоти на варіації глобального циклу вуглецю в системі "океан-атмосфера";

– показані характеристики низькочастотних коливань глобальних структур телеконекції, які одержані на основі вейвлет-розкладення;

– виявлені закономірності між низькочастотними коливаннями Антарктичного коливання і вмістом озону в помірних та тропічних широтах Південної півкулі;

– теоретично обґрунтований та реалізований підхід до з’ясування нелінійного взаємозв’язку між глобальними структурами телеконекції: Арктичним, Південним та Антарктичним коливаннями;

– теоретично обґрунтована та реалізована енергобалансова модель глобального клімату, яка ґрунтується на положеннях теорії катастроф;

– за допомогою вейвлет-розкладення показаний зв’язок між коливаннями температури та орбітальних параметрів, які відповідають льодовиковим циклам.

**Теоретичне і практичне значення одержаних результатів**.

Теоретичне значення удосконаленої схеми циклу енергії полягає в обґрунтуванні можливості застосування узагальненого рівняння Еліасена-Пальма, яке враховує приховану теплоту конденсації, до розрахунків складових бюджету енергії в атмосфері. Практичне значення удосконаленої схеми полягає в можливості більш точної та фізично обґрунтованої оцінки складових бюджету енергії.

Теоретичне значення результатів розрахунків балансу атмосферної енергії за різними схемами полягає в фізичній інтерпретації достоїнств та недоліків кожної зі схем, починаючи формулюванням Лоренца (1955 р) та закінчуючи схемою Івасакі (2001 р). Зокрема виявлено, що найбільш фізично адекватно відтворює глобальний цикл енергії в атмосфері схема на основі трансформованої Ейлеревої середньої з урахуванням прихованої теплоти конденсації і схема в ізобаро-ізентропічній системі координат. Практичне значення цих результатів полягає в обґрунтуванні вибору методики для розрахунків енергетичного бюджету.

Виявлені взаємозв’язки між величиною запасів атмосферної енергії та великомасштабними атмосферними процесами відкривають нові можливості по використанню енергетики атмосфери як діагностичного засобу змін клімату.

Практичне значення удосконаленої моделі глобального циклу двоокису вуглецю полягає в простоті методики, яка дозволяє визначити час адаптації кліматичної системи на антропогенний вплив.

Теоретичне значення розроблених методик застосування вейвлет-розкладення, спільної інформації та причинності Грангера визначається можливістю виявлення нелінійних взаємодій та зворотних зв’язків між велико­масштабними атмосферними структурами. Практичне значення цих методик полягає в їх можливому застосуванні для аналізу динаміки різноманітних гідродинамічних характеристик.

Теоретичне значення розробленої енергобалансової моделі полягає в обґрунтуванні можливості застосування ентропійного підходу при моделюванні над довгострокових коливань клімату.

Розроблені методики та моделі можуть бути використані при оцінці стану кліматичної системи та прогнозі її розвитку як в глобальному, так й в регіональному масштабі.

**Особистий внесок здобувача**. На основі узагальнення та аналізу результатів дослідження автором виконане теоретичне обґрунтування та реалізація методик і моделей, які пояснюють деякі характерні риси коливань, що спостерігаються в глобальній кліматичній системі.

Автором самостійно розроблені програми, методологія та методики розрахунків, результати яких покладені в основу дисертації. Автор брав безпосередню участь в виконанні наукових досліджень та виконував окремі розділи НДР, що вказані у відповідних науково-технічних звітах.

Автор виказує вдячність за багаторічну плідну співпрацю та консультації з боку завідувача кафедри вищої та прикладної математики О.В. Глушкова. У роботах, що виконані у співавторстві з ним, питання, які стосуються теоретичного обґрунтування та реалізації моделей, а також одержані результати та їх аналіз, виконані автором самостійно.

В спільній роботі з А.Ф. Ківгановим автором виконане узагальнення формулювань стосовно енергетичного циклу та використання ізобаричної системи координат. В спільних роботах з В.Д. Русовим, В.М. Ващенком, О.Т. Михалусь автором розроблені теоретичні положення з вибору вхідних параметрів моделей. В спільній роботі з Н.С. Лободою автором розроблено теоретичне обґрунтування використання метеорологічних параметрів в моделях гідрологічного стоку.

**Апробація результатів дисертації**. Основні положення та результати досліджень доповідалися або були представлені як тези на таких міжнародних конференціях та симпозіумах:

– “Applied non-linear dynamics: From semiconductors to information technology” (Thessaloniki, Greece, 2001);

– “Climate Conference” (Utrecht, The Netherlands, 2001);

– “Comparing design in nature with science and engineering” (Udine, Italy, 2002);

– 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology (San Diego, USA, 2002);

– XXVII General Assembly of European Geophysical Society (Nice, France, 2002);

– 12th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology (Norfolk, USA, 2002);

– International Conference on Quantitative Precipitation Forecasting (Reading, UK, 2002);

– міжнародній конференції «Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища» (Одеса, Україна, 2002);

– 2nd GLOBEC Open Science Meeting (Qingdao, China, 2002);

– Symposium on Observing and Understanding the Variability of Water in Weather and Climate (Long Beach, USA, 2003);

– 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography (Long Beach, USA, 2003);

– First International Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region (Kyoto, Japan, 2003);

– всесвітній конференції по Зміні Клімату (Москва, Росія, 2003);

– International Symposium on Climate Change (Beijing, China, 2003);

– 7th Conference on Polar Meteorology and Oceanography (Hyannis, USA, 2003);

– International Conference “Fractals in hydrosciences” (Ascona, Switzerland, 2003);

– The World Geodetic and Geophysical Community IUGG Meeting (Sapporo, Japan, 2003);

– International Conference on Earth System Modelling (Hamburg, Germany, 2003);

– 1st General Assembly of European Geophysical Union (Nice, France, 2004);

– The Third International Conference on Nonlinear Science (Singapore, 2004).

**Публікації**. Результати дисертаційної роботи висвітлено у 53 опублікованих автором наукових працях, з них 30 у виданнях, що входять до відповідного переліку ВАК України, в тому числі 1 монографія, 24 наукових статті в українських журналах та збірниках, 5 наукових статей в іноземних журналах, а також 20 тез конференцій.

**Структура дисертації**. Дисертаційна робота складається з вступу, шістьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатку. Вона містить 243 сторінки машинописного тексту, 65 рисунків та 6 таблиць. Перелік використаних літературних джерел містить 260 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обговорюються актуальність та сучасний стан досліджень кліматичних процесів, формулюються цілі та задачі дисертації, показаний зв’язок роботи з науковими дослідженнями, що проводяться в Одеському державному екологічному університеті, викладені методи дослідження та наукова новизна одержаних результатів, положень та висновків, їх обґрунтованість та достовірність, описані наукове та практичне значення роботи, її апробація, об’єм публікацій та структура роботи.

В **першому розділі** дисертації, базуючись на огляді літератури, розглядаються фактори, які обумовлюють зміни в глобальній кліматичній системі на різних часових масштабах.

В параграфі 1.1 в загальних рисах описується радіаційний баланс в атмосфері Землі. Як відомо, теплоємкість атмосфери є малою і приблизно до­рівнює теплоємкості океану завтовшки 3,1 м. При цьому більша частина атмосфери характеризується істотним від’ємним радіаційним балансом. Втрата тепла визначається, в першу чергу, довгохвильовим випромінюванням атмосфери. Цей дефіцит променевої енергії повинний компенсуватися переносом енергії від земної поверхні, де радіаційний баланс є додатним. Відчутне та приховане тепло від земної поверхні переноситься теплопровідністю та випаровуванням, а у вільній атмосфері – упорядкованими циркуляційними системами різного масштабу, від купчасто-дощових хмар до циркуляції Ґедлі.

В параграфі 1.2 розглядаються основні формулювання перетворення енергії в атмосфері та обґрунтовується можливість використання атмосферної енергетики як діагностичного засобу для виявлення коливань клімату. Також описуються поняття доступної потенціальної енергії, трансформованої Ейлеревої середньої та можливість застосування останньої при опису циклу енергії в атмосфері.

Параграф 1.3 присвячений опису антропогенного впливу на глобальну кліматичну систему. Через те, що одним з основних процесів, які впливають на перерозподіл енергії всередині системи "атмосфера – суша – океан" є можливе зростання глобальної температури за рахунок підвищення концентрацій парникових газів (серед яких основними є вуглекислий газ, метан, тропосферний озон та ґалокарбони), то цей процес враховується майже в усіх гідродинамічних моделях загальної циркуляції атмосфери та океану при прог­нозі на найближчі декілька століть.

В параграфі 1.4 розглядаються основні глобальні структури телеконекції та їх вплив на зміни в кліматичній системі Землі. Одним з підходів, який використовується при моделюванні змін клімату, є ідентифікація відгуку кліматичної системи на зміни температури в тропічній частині Тихого океану, тобто моделюється відгук глобальної атмосфери на події Ель Ніньо-Півден­ного коливання (ЕНПК). Саме ж ЕНПК є динамічною системою океана та атмосфери, що змінюються та взаємодіють. Властивість відтворювати взаємодію атмосфери та океану мають також й інші основні структури телеконекції, такі як Північноатлантичне коливання (ПАК), коливання Тихий океан-Північ­на Америка (ТПА), а також так звані кільцеві моди – Арктичне коливання (АК) та Антарктичне коливання (ААК). Іншою особливістю структур телеконекції є те, що вони взаємодіють між собою. Ця взаємодія виявляється як нелінійна та виглядає як частково синхронізований хаос. Для такої комплексної системи мабуть єдиної можливістю реального моделювання є припущення, що тільки декілька різних механізмів становляться превалюючими в процесі, так що динаміка системи спрощується з відповідним зменшенням діючих ступенів свободи.

В параграфі 1.5 розглядаються фактори, які обумовлюють зміни клімату на часовому масштабі в сотні тисяч років і пов’язані зі змінами параметрів земної орбіти. Якщо розглядати Землю як величезну відкриту систему, в якій відбуваються процеси самоорганізації та еволюції, то природно було б в нелінійних моделях глобального клімату цілеспрямовано враховувати різноманіт­ні зовнішні регулярні та/або хаотичні збурення, що породжують розв’язки, які відповідають коливанням температури в минулому, що спостерігаються експериментально. Зі всього різноманіття теорій, які запропоновані для пояснення обледенінь в плейстоцені, тільки теорія Міланковича про ритми льодовикових періодів, що викликаються регулярними змінами параметрів орбіти Землі в гравітаційному полі Сонячної системи, природним чином ураховує еволюцію зовнішнього збурення і, що є особливо важливим, припускає експериментальну перевірку її висновків стосовно змін клімату у минулому.

В **другому розділі** дисертації розглядаються рівняння, що описують цикл енергії в атмосфері, а також впроваджується удосконалення трансформованої Ейлеревої середньої, яке враховує приховане тепло конденсації.

В параграфі 2.1 виводиться рівняння балансу енергії, а в параграфі 2.2 – цикл енергії на основі Ейлеревої середньої (так званий цикл Лоренцо або традиційний цикл енергії). Він ґрунтується на розділенні потокових членів у вигляді

,

при цьому  вважається потоком, що пов’язаний з середнім рухом, а  – компонентом, який виникає у присутності вихорів (тут τ – вертикальна швидкість в ізобаричній системі координат, *Т* – температура, риска зверху означає осереднення по широтному колу, а штрих – відхилення від такого середнього). Хоч такий підхід й є математично правильним, але використовувати його для безпосередньої фізичної інтерпретації було б помилковим. Пов’язане це з тим, що Ейлерева середня  містить внесок, який фізично не відокремлений від вихрового руху, і, отже, частина „середнього” потоку  фізично пов’язана з вихорами.

Щоб уникнути зазначеної помилки, можна використати Лагранжеве формулювання. Наприклад, в теорії узагальненої Лагранжевої середньої співвідношення між Ейлеревою та Лагранжевою () середніми таке:

,

де  – корекція Стокса, яка дорівнює нулю за відсутності вихорів.

За умови „без прискорення”  = 0 і, отже,  = –. Таким чином, може існувати ненульова Ейлерева середня меридіональна циркуляція, яка виникає за відсутності вихорів, навіть коли вихори не викликають довгочасні зміни в середньому стані.

Пламом було запропоновано використовувати поняття залишкової меридіональної циркуляції, яке ґрунтується на трансформованих Ейлеревих середніх (ТЕС)

,

,

де ,

 *р* – тиск;

 *v* – меридіональна складова вектора швидкості вітру;

 *а* – радіус Землі;

 *R* – універсальна газова стала;

 ц – широта;

 подвійна риска зверху означає осереднення по всій ізобаричній поверхні.

Члени, які містять вихрові потоки за умови „без прискорення” відповідають корекції Стокса і, відповідно, залишкова циркуляція близько пов’язана з Лагранжевою циркуляцією.

На основі складових залишкової меридіональної циркуляції введемо поняття ефективного потоку кількості руху **В** (чи „вихрової радіаційної напруги”), яке протилежно за знаком потоку Еліасена-Пальма. Також **В** є аналогом потоку псевдокількості руху в теорії Лагранжевої середньої та бездивергентний за умови „без прискорення”. Вирази для складових потоку **В** мають вигляд

,

де *и* – зональна складова вектору швидкості вітру;

 – параметр Коріоліса.

Базуючись на викладеному вище, в параграфі 2.3 виводиться цикл енергії на основі ТЕС. Цей цикл має декілька переваг у порівнянні з традиційним, але він не позбавлений недоліків. В присутності середнього нагріву та середнього тертя вихори не тільки зумовлюють середню меридіональну циркуляцію та змінюють зональний потік, але також змінюють й середні нагрів та тертя, які, в свою чергу, впливають на середню циркуляцію. До того ж вихори змінюють середній нагрів за рахунок конденсаційних процесів внаслідок вих­рового потоку вологи та дивергенції Еліасена-Пальма.

Тому в параграфі 2.5 пропонується удосконалити поняття трансформованої Ейлеревої середньої та ефективної кількості руху з урахуванням прихованої теплоти конденсації.

Стоун та Саластрі визначили більш загальну форму квазігеострофічного потоку Еліасена-Пальма, яка дозволяє переформулювати теореми Еліасена-Пальма та „без прискорення” таким чином, щоб явно урахувати ефект впливу вихорів на приховану теплоту конденсації. Таке узагальнення зберігає вигляд взаємозв’язку між потоком енергії стаціонарних хвиль та потоком Еліасена-Пальма.

Використовуючи формулювання Стоуна та Саластрі, можна переписати компоненти залишкової меридіональної циркуляції та ефективний потік кількості руху таким чином:

,

,

,

де *q* – питома вологість;

 *L* – прихована теплота пароутворення;

 *ср* – питома теплоємкість за сталого тиску.

Треба відзначити, що формулювання для рівнянь бюджету енергії в циклі на основі ТЕС не змінюються, але фізичний сенс деяких членів (перетворень середньої кінетичної енергії у вихрову кінетичну та середню доступну потенціальну енергії, а також потоків перших двох) в цих рівняннях стає іншим.

В табл. 1 наведені розраховані за оригінальним та удосконаленим формулюванням енергетичні бюджети для січня та липня 2002 р. для помірних широт Північної півкулі.

Таблиця 1

Бюджет енергії (Вт м–2), що розрахований за оригінальним та удосконаленим
формулюванням для помірних широт Північної півкулі

(*PZ* та *KZ* – середні доступна потенціальна та кінетична енергії, *PЕ* та *KЕ* – вихрові доступна потенціальна та кінетична енергії).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Формулювання | ∂*PZ*/∂*t* | ∂*KZ*/∂*t* | ∂*KE*/∂*t* | ∂*PE*/∂*t* | Повний |
|  | січень 2002 р. |
| оригінальне | -1,39 | 2,95 | 5,85 | -0,93 | 6,48 |
| удосконалене | -6,12 | 0,69 | 9,26 | -0,93 | 2,90 |
|  | липень 2002 р. |
| оригінальне | 11,04 | -6,28 | -1,64 | 0,36 | 3,58 |
| удосконалене | 6,56 | -3,11 | -1,23 | 0,36 | 2,58 |

Взимку процеси перетворення енергії приводять до збільшення кінетич­ної енергії (особливо її вихрової частини) та зменшенню доступної потенціальної енергії, а влітку спостерігається зворотній процес. Тому, що розрахунки здійснювалися для географічного регіону з відкритими горизонтальними границями, повний бюджет енергії не дорівнює нулю. В той же час, бюджет, який розрахований за удосконаленим формулюванням, виказує більшу балансову спроможність (див. табл. 1). Через те, що дисбаланс повного бюджету визначається потоковими членами, для циклу енергії, який ґрунтується на удосконалених рівняннях на основі ТЕС, ці члени мають реальніший вигляд.

Таким чином, уведення конденсаційного нагріву в цикл атмосферної енергії, що ґрунтується на ТЕС, усуває, декілька, невизначеності, які виникають при розрахунках, що ґрунтуються на концепції квазігеострофічного потоку Еліасена-Пальма.

В параграфі 2.6 описується схема параметризації членів джерел/стоків в рівняннях бюджетів різних видів енергії на основі даних об’єктивного аналізу. Наведені в розділах 2 та 3 оцінки показують, що одержана схема цілком адекватно відтворює ці члени.

В **третьому розділі** наводяться результати чисельних експериментів з оцінювання складових циклу енергії та кутового моменту в атмосфері, а також показується наявність зв’язку між коливаннями запасів енергії та деякими великомасштабними атмосферними процесами.

В параграфі 3.1 порівнюється енергетичний бюджет, який розрахований за чотирма схемами – цикл Лоренца, цикл на основі ТЕС, модифікований цикл Ханші та цикл в ізобаро-ізентропічній системі координат Івасакі – та деякими модифікаціями цих схем. Розрахунок здійснювався для всієї земної кулі за середніми багаторічними значеннями метеорологічних величин. Аналіз одержаних результатів показав, що найбільш показними з фізичної точки зору є схема на основі ТЕС з урахуванням прихованої теплоти конденсації, яка описана вище, та схема в ізобаро-ізентропічній системі координат, в якій також у деяких членах перетворень та потоків присутній неадіабатичний нагрів. Згідно обох цих схем цикл атмосферної енергії спрямований від середніх доступної потенціальної та кінетичної енергій до вихрових, при цьому кінцевою метою перетворень є збільшення вихрової доступної потенціальної енергії.

В параграфі 3.2 розглядається просторово-часовий розподіл запасів енергії в атмосфері. Здійснений аналіз дозволив виявити декілька цікавих фактів, зокрема зміщення в напрямку полюса максимумів вихрової енергії у холодну половину року.

В параграфах 3.3 та 3.4 аналізувалася взаємодія між змінами атмосферної енергії та динамікою кліматоутворюючих процесів: Північноатлантичного коливання та чарунки Ґедлі.

Щоб простежити зв’язок між змінами інтенсивності чарунки Ґедлі та позатропічних вихорів, використовувалося рівняння бюджету вихрової енергії (схема на основі ТЕС з урахуванням прихованої теплоти конденсації). Аналіз складових бюджету *KE* здійснювався для двох широтних поясів: 0-30є та 30-60є півн.ш. Через те, що чарунка Ґедлі має максимальну інтенсивність взимку, розрахунок складових бюджету виконувався для січня. Як міру інтенсивності чарунки Ґедлі було використано масову функцію течії на осі циркуляції. Існують певні коливання інтенсивності середньої циркуляції, причому різниці між максимумом та мінімумом може становити близько 20%, як, наприклад, спостерігалось у 1987 та 1989 роках. Треба звернути увагу на те, що в періоді максимальної інтенсивності чарунки Ґедлі в тропічному поясі спостерігається (майже завжди) зменшення запасів вихрової кінетичної енергії і, навпаки, коли інтенсивність є малою, запаси *KE* збільшуються. Аналогічна картина спостерігається й для запасів *KE* в помірних широтах. Пояснити це можна, якщо згадати, що за максимальній інтенсивності чарунки Ґедлі у субтропічній струменевій течії збільшуються запаси середньозональної кінетичної енергії. Останнє ж не завжди є причиною великих запасів *KE*.

Для того, щоб простежити механізми передавання енергії від чарунки Ґедлі до позатропічних широт, були розглянуті бюджети *KE* в січні 1987 та 1989 років. В перший з них інтенсивність циркуляції була найбільшою, потім зменшилася та досягла мінімуму у другий. Аналіз показав, що існує потік вихрової кінетичної енергії в обох випадках за рахунок перетворення з середньозональної кінетичної та вихрової доступної потенціальної енергій, а також за рахунок потоку *KE* через південну границю широтного кола. Відплив *KE* здійснюється за рахунок дисипації та потоку через північну границю. Для випадку максимальної інтенсивності чарунки Ґедлі зазначені вище перетворення в тропіках не дуже великі і майже половина енергії, що згенерувалася, переноситься в помірні широти за рахунок потоку через північну границю. До того ж, у широтному поясі 30-60є півн.ш. відзначалася й на порядок більша генерація *KE*, причиною чого можна вважати посилення субтропічної течії. Таким чином, хоч умови для підтримки позатропічних вихорів за інтенсивної чарунки Ґедлі не дуже сприятливі, але й в цьому випадку більша частина *KE* передається північніше, а сама *KE* збільшується як у тропіках, так й в помірних широтах. Коли циркуляція Ґедлі є менш інтенсивною, то майже уся вих­рова кінетична енергія, яка згенерувалася в ній, передається до помірних широт, а баланс енергії в тропіках стає від’ємним. В середніх широтах спостерігається істотне перетворення з середньої кінетичної енергії, яке майже в п’ять разів більше за аналогічну величину для попереднього випадку.

Наданий аналіз бюджетів вихрової кінетичної енергії показав, що вплив чарунки Ґедлі на вихрову енергетику позатропічних широт виявляється, поперед усе, у передаванні частини, а іноді й усієї, енергії, що згенерувалася, з тропіків на північ. Причому. у випадку слабкої інтенсивності меридіональної циркуляції може не залишитися резервів для збільшення *KE* в самих тропіках. Якщо ж чарунка Ґедлі є інтенсивною, перетворення *KZ* у *KE* є меншим (особливо у помірних широтах), ніж для випадку слабкої інтенсивності тропічної меридіональної циркуляції.

Спільний аналіз інтегральних вихрових енергій та індексів ПАК показав, що вплив Північноатлантичного коливання не є у повній мірі визначеним. Далеко не завжди певні величини індексів ПАК визначають зміни запасів вихрових енергій. Тому у параграфі 3.5 був проведений аналіз такої залежності з використанням вейвлет-розкладення, що дозволило більш визначено казати про можливий зв’язок ПАК та атмосферної енергетики.

В останні десятиріччя минулого століття виникнув новий науковий напрямок, який пов’язаний з так званим вейвлет-перетворенням. Можна без перебільшення казати, що вейвлети зробили революцію в теорії та практиці обробки нестаціонарних сигналів. Зараз вейвлети широко використовуються для розпізнавання образів; при обробці та синтезі різноманітних сигналів, наприклад, мовних та медичних; для вивчення властивостей турбулентних полів; для розв’язання задач стиску та обробки зображень та в багатьох інших випадках.

Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу складається з його розкладення по базису, який сконструйований з солітоноподібної функції (вейвлета), що має певні властивості, через масштабні зміни та переніс. Кожна з функцій цього базису характеризує як певну просторову (часову) частоту, так й її локалізацію у фізичному просторі (часі).

Таким чином, на відміну від перетворення Фур’є, яке традиційно застосовується для аналізу сигналів, вейвлет-перетворення забезпечує двовимірне розподілення одновимірного сигналу, що досліджується, при цьому частота та координата розглядаються як незалежні змінні. У результаті з’являється можливість аналізувати властивості сигналу одночасно у фізичному (час, координата) та у частотному просторах.

Для опису різноманітних метеорологічних сигналів часто використовується безперервне вейвлет-перетворення. В дисертації використовувалось так зване стаціонарне вейвлет-перетворення, тому що воно має деякі переваги перед згаданим вище, зокрема набагато краще розв’язання на великих часових масштабах, а також дозволяє більш безпосередньо ізолювати ряди голов­них компонентів. Як материнський використовувався вейвлет Добеші 15-го порядку. Відзначимо, що цей вейвлет є біортогональним та підтримує дискретне вейвлет-перетворення. Високий порядок вибраний для більш гладкого відтворення деталізованих сигналів.

Як кількісний критерій для вибору найінформативніших деталізованих компонентів вейвлет-розкладення використовувався коефіцієнт кореляції між цими компонентами індексів Північноатлантичного коливання та запасів вих­рової кінетичної енергії в помірних (*KE*,пш) та тропічних (*KE*,тр) широтах Пів­нічної півкулі. Найбільші коефіцієнти кореляції між індексами ПАК та запасами *KE* відзначалися у низькочастотній частині спектра для деталізованих компонентів *D*3 та *D*4. Компонент *D*4 цікавий тим, що період коливань цього сигналу становить від 4 до 8 років, а саме на такі тривалості припадає максимум аномалій атмосферного тиску в ПАК. Деталізований компонент *D*3 характеризує домінування протягом тривалого періоду часу додатної або від’ємної фази ПАК. Наприклад, з середини 1950-х по 1979 рік превалювала від’ємна фаза ПАК. Взимку 1979-80 року відбувся перехід до додатної фази, яка тривала до зими 1994-95 року. Протягом цього 15-річного інтервалу істот­на від’ємна фаза спостерігалася тільки у 1984-86 роках. Далі, з листопада 1995 року відбувся перехід до від’ємної фази. Всі ці коливання добре відоб­ражуються компонентом *D*3.

Спільний аналіз деталізованих компонентів *D*4 для індексів ПАК та запасів *KE* показав, що існує велика узгодженість між індексами ПАК та запасами *KE* з липня 1960 по січень 1990 р. Коефіцієнт кореляції для цього періоду становить 0,76 для ПАК-*KE*,пш та 0,70 для ПАК-*KE*,тр (для періоду 01/90-02/03 ці коефіцієнти дорівнюють -0,05 та 0,58, відповідно) Також можна казати про те, що за різкіших змін індексів ПАК відбуваються такі ж істотні зміни запасів вихрової кінетичної енергії. Взагалі, те, що зміни фаз Північноатлантичного коливання та запасів *KE* у тропіках відбуваються синхронно з періодом більше 4 років, є невеликим сюрпризом. Але тут можна згадати, що періодичність Ель Ніньо становить від 3 до 7 років, а коефіцієнт кореляції між індексами Північноатлантичного та Південного (яке визначає інтенсивність Ель Ніньо) коливань з середини 60-х років до середини 80-х років минулого століття становить 0,60, а після 1985 року і до нашого часу -0,51. Таким чином, зв’язок між змінами індексів ПАК та запасів *KE* в помірних та тропічних широтах залежить від того, у фазі чи протифазі з Північноатлантичним є Південне коливання. У першому випадку цей зв’язок є більш істотним.

Для деталізованих компонентів *D*3 (рис. 1) у період тривалої фази ПАК до січня 1980 року коефіцієнти кореляції ПАК-*KE*,пш та ПАК-*KE*,тр становлять 0,09 та 0,37, відповідно, тоді як для другої половини періоду, що розглядається, ці коефіцієнти становлять 0,76 та 0,68. Тобто, коли фаза ПАК має тенденцію до різкіших змін, її вплив на запаси вихрової кінетичної енергії як в по­мірних ширтах, так й у тропіках, є набагато істотними. Це можна пояснити тим, що у періоди, коли Північноатлантичне коливання змінює свою фазу, перебудова баричного поля охоплює більшу частину позатропічних широт, а також й тропіків Північної півкулі, причому виникає істотна меридіональність повітряних потоків і, тим самим, збільшуються запаси *KE*.

Таким чином, можна відзначити, що використаний метод достатньо добре відображує відомі фізичні закономірності динаміки великомасштабних процесів та дозволяє висвітлити їх деталізовані характеристики.

В параграфі 3.6 показано, що можна одержати прямий перехід від Щ-моменту до відносного кутового моменту через Коріолісеве перетворення, яке й визначає наявність переважно західного переносу в помірних широтах. При цьому само Коріолісеве перетворення визначається залишковою агеострофічною компонентою меридіональної складової швидкості вітру. Для шару атмосфери вище гірських хребтів вона майже точно дорівнює меридіональній складовій швидкості вітру. Хоч наведені результати не показали справжнього балансу глобального кутового моменту, але фізична інтерпретація окремих складових балансу стала чіткішою у порівнянні з традиційним формулюванням рівнянь балансу кутового моменту в атмосфері.

Рис. 1. Деталізований компонент *D*3 для індексу ПАК (зверху) та запасів *KE* в помірних (посередині) і тропічних (внизу) широтах

**В розділі 4** описується роль деяких структур телеконекції у формуванні регіональних особливостей просторово-часового розподілу головних парникових газів (вуглекислого газу, метану), а також вплив океанічної біоти на інтенсивність поглинання океаном двоокису вуглецю.

В параграфі 4.1, зокрема показано, що Східнотихоокеанське коливання може визначати наявність локальних сезонних максимумів концентрації вуглекислого газу на півночі Канади. Цей факт підтверджується як за даними спостережень, так й за результатами чисельного моделювання. Аналогічну властивість має й Північноатлантичне коливання, яке визначає концентрації парникових газів над Європою. Більш того, циркуляційні особливості, які притаманні для цього коливання, істотним чином, як це показано в параграфі 4.2, позначаються на концентраціях фітопланктону в Північній Атлантиці. Останній ж є одним з найактивніших поглиначів вуглецю в океані і, таким чином, може згладжувати негативний антропогенний вплив на глобальне дов­кілля.

Для того, що з’ясувати, наскільки істотним є вплив океанічної біоти на глобальний цикл двоокису вуглецю, була використана модель, яка відтворює сезонну динаміку вуглецевого циклу в океані з урахуванням його зональної структури та деталізує і узагальнює моделі, що розроблені Нефедовою-Тарко та Ляхиним. Ця модель була модифікована таким чином, що враховувати ді­яльність океанічної біоти, а саме, швидкість виробництва та розкладання органічної речовини в океані. Сезонна динаміка глобального вуглецевого циклу в моделі описується системою 112 нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, яка інтегрувалася методом Рунге-Кутта при заданих початкових значеннях змінних до виходу розв’язку на періодичний режим.

Результати моделювання показали, що діяльність океанічної біоти позначається як зменшення парціального тиску вуглекислого газу у верхньому квазіоднорідному шарі океану і як збільшення швидкості обміну СО2 на межі океан-атмосфера. Найактивніше ці процеси проходять у високих широтах. При цьому, в екваторіальній зоні океан є джерелом СО2, а у приполярних районах активно поглинає вуглекислий газ.

Також, на сонові цієї моделі був проведений чисельний експеримент з оцінки часу адаптації глобальної кліматичної системи на антропогенний вплив, який полягав у наступному. Припускалося, що у наступні декілька років темпи зростання концентрації вуглекислого газу зменшаться і, нарешті, відбудеться стабілізація концентрації СО2. Під часом адаптації тут розуміється період часу, протягом якого концентрація СО2 зменшиться до сучасного рівня. Виявилося, що урахування океанічної біоти в моделі приводить до істотного скорочення цього періоду, а саме з приблизно 100 років до 70.

Таким чином, результати моделювання, з одного боку, дозволили виявити декілька цікавих особливостей динаміки вуглецевого циклу в океані і, з іншого боку, показали велику чуттєвість гідродинамічних моделей до вибору вхідних параметрів. Останнє є ще одним доводом на користь використання методів нелінійної динаміки на основі теорії хаосу при моделюванні глобального клімату.

В **розділі 5** запропоновано використовувати як кліматоутворюючий фактор взаємодію між глобальними структурами телеконекції – Арктичним, Південним та Антарктичним коливанням.

В параграфі 5.1, ґрунтуючись на результатах вейвлет-розкладення ін­дексів Північноатлантичного коливання та місячних сум опадів в різних регіонах України, показано, що вплив ПАК виявляється на коливаннях з періодом більше, ніж 3 роки, а найбільші коефіцієнти кореляції між індексами ПАК та опадами відзначаються для Західної України та для періоду тривалого домінування однієї фази ПАК.

В параграфі 5.2, використовуючи аналогічну методику, досліджувався вплив Антарктичного коливання на концентрацію озону в Південній півкулі. Тут є цікавими й результати вейвлет-розкладення індексів ААК, тому що в науковій літературі відомості про довгочасові періодичності цих індексів майже відсутні. Зокрема, показано, що існують коливання з періодами 5,5, 3-4, 2-3 а близько 1 року, які характеризуються максимумами спектральної енергії. При цьому амплітуда цих коливань змінюється; в деяких випадках – істотно. Наприклад, у 1960-х роках, в період домінування від’ємної фази ААК амплітуда коливань з періодами 2-3 та близько 1 року була невеликою. Спіль­ний аналіз деталізованих компонентів вейвлет-розкладення показав, що для південних помірних широт існує стабільний додатний кореляційний зв’язок між змінами індексів ААК з періодом близько 5,5 років та вмістом озону. Навпаки, стійка від’ємна кореляційна залежність спостерігається для коливань вмісту озону у тропіках Південної півкулі та змінами індексів ААК з періодом від 2-х до 3-х років.

Результати, які описані вище, можуть бути ще одним підтвердженням того, що структури телеконекції можуть використовуватися як кліматоутворюючі фактори при складанні прогнозів регіональних кліматів.

В теперішній час існує дуже мало наукових даних та оцінок величин, які описують взаємодію глобальних структур телеконекції. Частіше за все в цьому зв’язку розглядаються Південне коливання та Північноатлантичне коливання або коливання Тихий океан – Південна Америка.

В дисертації, в параграфі 5.3 для аналізу характеристик взаємодії між структурами телеконекції застосовувався вейвлет-аналіз, а також поняття спільної інформації з теорії хаосу та причинності Грангера, що звичайно використовується в економетриці.

Спільна інформація визначає середню кількість інформації, що міститься у змінних *Х* та *Y* зі спільними густинами розподілу імовірності, і може розглядатися як нелінійний аналог кореляції між цими змінними. Вона є симетричною, невід’ємною та дорівнює нулю, якщо та тільки якщо *Х* та *Y* є незалежними.

Проте, використовуючи спільну інформацію можна одержати лише залежність між двома величинами, але не природу взаємодії. Наприклад, якщо існує нелінійна залежність між двома змінними, вона може бути наслідком того, що перша величина управляє другою або друга величина управляє першою, або величини управляють одна іншою одночасно (зворотній зв’язок). Такий причинний взаємозв’язок можна досліджувати за допомогою тесту на причинність Грангера. Згідно цієї концепції, величина *Y* є грангеревою причиною величини *Х*, якщо минулі значення *Y* можуть покращити прогнози майбутніх значень *Y*, умовно на минулих значеннях *Х* та *Y*, часовий розподіл яких відрізняється від розподілу майбутніх значень *Х*. В цьому випадку *Х* умовно (на минулих значеннях *Х*) залежить від *Y*. Надалі причинність Грангера розраховувалася для 95% рівня значимості.

Ґрунтуючись на припущенні, що фази коливань глобальних структур телеконекції залежать від спостереженого тренда глобальної температури, аналіз взаємодії проводився для різних періодів протягом 20-го сторіччя. В параграфі 5.4 спочатку використовувалися незгладжені дані про середньомісячні індекси АК, ПК та ААК, а також про відхилення глобальної температури від середнього значення за період 1961-90 років (Т). З оригінальних наборів даних були добуті ряди з 1910 по 2001 рік (за виключенням індексів ААК, які починаються з 1948 року). Для подальшого аналізу часові ряди були розбиті на три епохи: 1910-1947 (W1), 1948-1977 (С) та 1978-2001 (W2). Перша та третя епохи характеризуються глобальним потеплінням, а друга - похолоданням.

Одержані результати відображують багато відомих особливостей взаємодії між структурами телеконекції. Так, взаємодія між АК та ПК має місце, хоч вона й слабка. При цьому спільна інформація для цих коливань має тенденцію до збільшення з часом затримки під час епохи С, тимчасом як протягом епох W1 та W2 вона, скоріше, є неістотною. Несподіваним був той факт, що АК є причиною ПК, причому це простежується приблизно на однакових часах затримки (12-24 місяців) як в епоху W1, так й в епоху С.

Найбільша спільна інформація відзначалася для температури та індексів ПК. У епоху С вона майже симетрична відносно максимуму біля нульового часу затримки, тимчасом як у епоху W2 максимум зміщається у бік додатних часів затримки (приблизно 15 місяців). При цьому аномалії температури є грангеревою причиною індексів ПК.

Найбільш цікаві зворотні зв’язки простежуються для випадку Антар­ктичного коливання. По-перше, у епоху С Південне коливання є грангеревою причиною ААК з часом затримки менше за 10 місяців. Також, у епоху W2 аномалії температури змушують зміни ААК з затримкою до одного року, а само ААК є грангеревою причиною аномалій температури з затримкою більше за 24 місяці.

Деякі з одержаних результатів пояснити за допомогою відомих механіз­мів зворотних зв’язків важко. Зокрема це стосується того, що АК є грангеревою причиною ПК. Останнє можна пояснити скоріше недостатньою якістю нефільтрованих даних у присутності так званого „білого шуму”. Тому до часових рядів зазначених індексів та аномалій температури було застовосано вейвлет-розкладення і аналіз спільної інформації та причинності Грангера проводився для окремих деталізованих компонентів. При цьому використовувалися два компоненти з періодами коливань від 5 до 7 та більше 10 років, тому що для них спільна інформація є набагато істотнішою, ніж для решти.

Перший компонент цікавий тим, що приблизно таку ж періодичність мають ЕНПК та ПАК. Нелінійний взаємозв’язок між структурами телеконекції тут виглядає більш явним. По-перше, спільна інформація для індексів АК та ПК протягом трьох періодів є додатною для усіх часів затримки. Також, причинність Грангера показує, що існує зворотній зв’язок між цими індексами: для епох W1 та С на часі затримки близько 18 місяців. По-друге, простежується нелінійна залежність між індексами АК та ААК; у епоху С вона виявляється як зворотній зв’язок на часах затримки більше за 20 місяців. По-третє, зворотній зв’язок спостерігається для взаємодії між ПК та ААК; причому в цьому випадку спільна інформація досягає максимальних значень, а різниця між максимумами спільної інформації у епохи С та W2 становить близько 12 місяців. Також, для деталізованих компонентів достатньо добре простежується вплив змін клімату на структуру телеконекції. Наприклад, у епоху С скоріше аномалії температури були грангеревою причиною індексів ААК, тимчасом як у епоху потепління спостерігалася зворотна картина. Далі, у епохи потепління добре простежується зворотній зв’язок між аномаліями температури та індексами АК, тимчасом як у випадку індексів ПК він виражений не так явно.

Найбільш цікаві результати для компонента з періодом більше 10 років були одержані для епохи С. Тут спостерігається асиметричний режим для взаємодій між аномаліями температури, з одного боку, та Арктичним і Південним коливаннями, з іншого боку. Іншими словами, для випадку максимального нелінійного взаємозв’язку між Т та АК характерним є мінімальний взаємозв’язок між Т та ПК, хоч деталізовані компоненти для АК та ПК мають подібну структуру. При цьому причинність Грангера для обох випадків відзначається як у періоди максимуму, так й у періоди мінімуму. Майже аналогічно проявляють себе й спільні інформації Т-ААК і ПК-ААК, а нелінійний взаємозв’язок між АК та ААК, а також й між АК та ПК (хоч й меншою мірою) змінюється неістотно.

Таким чином, одержані результати добре пояснюють відомі механізми та зворотні зв’язки. Проте, для пояснення деяких з них потрібні подальші дослідження. Це, насамперед, стосується зворотних зв’язків між Арктичним та Антарктичним коливаннями, а також факту, що Арктичне коливання може бути грангеревою причиною Південного коливання.

З нашої точки зору, майбутні дослідження можуть бути спрямовані двома шляхами. По-перше, для пояснення окремих зворотних зв’язків потрібне чисельне моделювання за допомогою моделей загальної циркуляції атмосфери-океану. По-друге, одержані результати можуть бути використані для створення моделі змін глобального клімату, що ґрунтується на концепціях синхронізованого хаосу або динамічних нелінійних осциляторів, що взаємодіють, в якості яких можуть бути використані розглянуті в дисертації глобальні структури телеконекції.

В **шостому розділі** запропонована модифікована енергобалансова модель глобального клімату, яка ґрунтується на положеннях теорії катастроф та описує довгоперіодичні коливання палеотемператури (цикли Міланковича).

Енергобалансові моделі за своїм визначенням описують баланс енергії у відкритій фізичній системі, якою є земний клімат. Припускаючи локальну рівновагу у взагалі неврівноваженій кліматичній системі, теплова енергія одиничного об’єму кліматичної системи може бути вираженою через потік сонячного випромінювання на верхню границю атмосфери (*S*) та інтенсивність довгохвильового теплового випромінювання, що йде з верхньої границі до космосу. Модифікацією моделі є залучення як одного з можливих джерел енергії турбулентного потоку тепла, який породжується варіаціями галактичних та сонячних космічних променів.

Остаточне енергобалансові вираження записується у вигляді

 + своб.член,

де γ*а* – коефіцієнт, який враховує площу зовнішньої границі атмосфери;

 σ − стала Стефана-Больцмана;

 ∂*U*/∂*t* − швидкість генерації тепла в кліматичній системі;

  *Т* – температура;

 ;

 ;

 γ*адв* − коефіцієнт, який враховує загальну площу бокових сторін кліматичної системи;

 μ*адв* − коефіцієнт адвекції;

 *тв.п.* − вагова швидкість конденсації молекул водяної пари;

 *с* – питома теплоємкість;

 η*а* = 0,0092 K–1;

 *g* і β − коефіцієнти, які враховують потоки тепла за рахунок варіацій галактичних та сонячних космічних променів.

Очевидно, що зазначене рівняння описує сімейство функцій *F*(*T*, *a*,*b*), що залежать від двох керуючих параметрів *а* та *b*, в якому легко розпізнається так званий „потенціал” катастрофи зборки. Достатньо складну поведінку „потенціальної” функції *F*(*T*, *a*,*b*) можна охопити єдиною геометричною картинкою, яка дозволяє уявити усю різноманітність катастрофи або, іншими словами, поверхню рівноваги у тривимірному просторі з координатними осями  *T* – *a* – *b*. Канонічна форма різноманітності катастрофи зборки являє собою численність точок (*T*, *a*, *b*), що задовольняє такому рівнянню

∇*F*(*T*, *a*, *b*) = *Т*3 + *аТ* + *b* = 0.

Якщо кліматична система описується потенціальною функцією катастрофи зборки, то імовірнісна функція розподілу *P*(*x*), що не залежить від часу, пов’язана з нею простим експоненціальним шляхом

*P*(*x*, *c*) = *N* exp [–*F*(*x*, *c*)/*D*],

де *N* − нормувальна константа;

 *c* ∈ {*a*, *b*} − набір керівних параметрів;

 *D* − константа дифузії („хаотичності”).

Останнє вираження при фіксованих керівних параметрах є стаціонарним розв’язком рівняння Фоккера-Планка

.

Відзначимо три важливих обставини. По-перше, наявність в правій частині рівняння Фоккера-Планка двох членів, які відповідають за дрейф та дифузію, свідчить про те, що воно є рівнянням з двома цілковито різними часовими масштабами. Причому швидку шкалу часу *T*1, яка пов’язана зі зворотною релаксацією до локального мінімуму після збурення, зумовлює „дрейфовий” член, а дифузія – повільну шкалу часу *T*2, яка пов’язана з переходом з метастабільного мінімуму до глобального мінімуму. По-друге, Ґілмором саме для потенціалу катастрофи зборки були одержані оцінки цих різних часових шкал рівняння Фоккера-Планка. По-третє, як показав Ґілмор, швидкість, з якою пересуваються критичні точки *Tc*(*t*) потенціальної функції *F*(*T*, *c*(*t*)), може бути порівняна з похідною *dc*/*dt*, що дозволяє сформулювати умови щодо застосування інтуїтивних угод Тома та Максвела через похідні за часом від керівних параметрів. Якщо немає дифузії, може бути застосований лише принцип максимального сповільнення Тома. Більш того, критична точка, що вибирається, повинна бути однією з точок, в якій система може перебувати у початковий момент (*t* = 0). При зміні значень керівних параметрів система буде залишатися у цій точці до того часу, поки ця критична точка не зникне зовсім.

Для катастрофи зборки біфуркаційна множина або, що те ж саме, множина критичних точок описується рівнянням напівкубічної параболи

(*ac*/3)3 + (*bc*/2)2 = 0.

Виявлення петлі ґистерезису забезпечується можливістю циклічного шляху у просторі керівних параметрів (*a*, *b*), початок (*t* = 0) якого обв’язково береться з точки, яка належить до біфуркаційної множини.

Аналіз відомих експериментальних даних, які одержані в районі станції „Восток” і стосуються відхилень палеотемператури від її сучасного значення за останні 420 тисяч років, підтверджує не тільки наявність періоду ~120 тисяч років, а й ілюструє той факт, що відстань між періодичними компонентами, що відповідають міжльодовиковим періодам, у 3-4 рази більша, ніж тривалість власне самого міжльодовикового періоду. Очевидно, що останнє вказує на те, що запропонована енергобалансові модель глобального клімату міс­тить в собі принципову можливість описування довгоперіодичних коливань температури у минулому, не кажучи вже про можливість розв’язання протилежної задачі, яка пов’язана з відновленням (за допомогою існуючих експериментальних даних про коливання палеотемператури) часової еволюції чисельних значень керівних параметрів *а* та *b*, величина яких визначається такими глобальними процесами як турбулентний режим передавання тепла, що стимулюється взаємодією космічних часток з атмосферою, а також варіації альбедо та адвекції, що викликаються змінами сонячної радіації.

Для того, щоб наочно показати можливість застосування принципів, що закладені у модифіковану енергобалансову модель, для моделювання довгоперіодних коливань клімату, в дисертації проводився аналіз деталізованих компонентів вейвлет-розкладення для деяких палеопараметрів.

На рис. 2 представлена температура по керну зі станції „Восток” та деталізовані компоненти *D*3, *D*5 та *D*6. Період першого з них співпадає з періодом змін ексцентриситету, другого – нахилу екліптики, третього – прецесії, тобто трьом факторам, які згідно теорії Міланковича можуть визначати наставання льодовикових періодів на Землі. Як видно, саме ексцентриситет визначає льодовикові та міжльодовикові періоди у кліматі Землі. Але різке потепління є причиною впливу всіх трьох параметрів орбіти Землі (вертикальні лінії 1, 5 та 6 на рис. 2). Наступне таке ж різке похолодання викликане зниженням температури за рахунок кута нахилу та прецесії орбіти Землі, хоч внесок ексцентриситету орбіти спрямований на продовження потепління. Цікавим прикладом такого неоднозначного потрійного впливу є період потепління у межах 250-200 тис. років до н.е. (лінія 2). Це потепління спостерігалося трохи раніше максимуму ексцентриситету і було викликане впливом інших двох факторів. Але воно й закінчилося ненормально швидко, що також є результатом зазначених двох факторів (лінія 3). Коли ж, трохи пізніше, спостерігався спільний вплив трьох параметрів орбіти (лінія 4), то знову спостерігалася різка тенденція до потепління клімату.

Рис. 2. Температура (єС) за даними керну зі ст. „Восток” (а) та її розкладення на деталізовані сигнали *D*3 (б), *D*5 (в) и *D*6 (г)

1

 2

3

4

5

 6

тисячі років

а)

б)

в)

г)

Таким чином, проведений аналіз показав, що періоди різкого потепління клімату на Землі, по суті, визначаються спільним односпрямованим впливом трьох параметрів орбіти Землі: ексцентриситету, кута нахилу осі до ек­ліптики та прецесії.

Другим набором палеопараметрів, який зазнав вейвлет-розкладення, було ізотопне відношення кисню д18О, яке добре відтворює кількість води на Землі, яка перетворилася у кригу, і, таким чином, є мірою глобального об’єму льоду, за останні 4 мільйони років. Аналіз спектральної енергії цих даних для двох періодів – 0,0-0,8 та 0,8-4,0 мільйонів років до н.е. (розподіл здійснювався по межі Бранґеса-Матуями) – показав відомий факт, що в першому з них превалюють зміни д18О з періодом близько 100 тисяч років (ексцентриситет), а у другому – близько 41 тисяч років (нахил екліптики). Проведений аналіз деталізованих компонентів вейвлет-розкладення дозволив виявити роль, яку відіграє в коливаннях клімату зміни ексцентриситету з періодом 400 тисяч років, яким приділяється набагато менше уваги при дослідженні тривалості льодовикових періодів. Тут різка зміна в амплітуді коливань відбулася близько 1,7 мільйонів років до н.е., тобто на верхній межі перемагнічування полярності Олдувай. До цієї межі вплив таких коливань ексцентриситету проявлявся у збільшенні майже усіх локальних максимумів д18О. Починаючи з при­близно 1,7 мільйонів років до н.е. в цьому циклі незначний та істотний максимуми чергувалися і такий режим вже не так істотно впливав на коливання д18О.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми діагностики стану кліматичної системи Землі.

Зміна клімату є найважливішою проблемою людства. Дослідження свідчать про суттєві коливання клімату як протягом останніх декількох століть, так й протягом останніх мільйонів років. Ці зміни завжди справляли істотний вплив на розвиток життя на нашій планеті, а в останні тисячоріччя й на розвиток цивілізації, економіки, суспільства.

У другій половині 20-го століття стали помітними зміни клімату, які спричинені людською діяльністю, і ці зміни на фоні природних коливань посилюють їх вплив на довкілля. Очевидно, що за рахунок антропогенної дії загальна кліматична ситуація може змінитися швидше, ніж це мале місце в минулі тисячоріччя.

Тому зусилля наукового товариства спрямовані на дослідження природи кліматичних змін та їх впливу на довкілля та суспільство. При цьому чисельні експерименти здійснюються з двома головними цілями: 1) діагнозувати сучасний стан кліматичної системи та виявити внесок природних коливань та антропогенного впливу в зміни, що спостерігаються, і 2) показати сценарії розвитку клімату на декілька найближчих сторіч.

Не можна казати з цілковитою впевненістю, що обидві ці цілі досягнуті, чи навіть, що їх досягнення є близьким. Тому будь-які нові відомості теоретичного або практичного характеру по питанню, що розглядається в дисертаційній роботі, мають велику наукову цінність.

Балансові методи розрахунку бюджетів різних видів енергії та кутового моменту, які використовуються в даній роботі, дозволили вперше одержати такі результати:

- урахування прихованої теплоти конденсації в схемі на основі трансформованої Ейлеревої середньої, як це пропонується в роботі, дозволяє не тільки повніше фізично обґрунтувати процеси перетворення одного виду енергії в інший, але й дістати схему, що має більшу балансову спроможність;

- запропоновані в цій роботі формулювання параметризації членів джерел/стоків у бюджетних рівняннях енергії дозволяють дані об’єктивного аналізу, що, в свою чергу, спрощує розрахунок цих членів та більш точне оцінювання усього циклу енергії;

- здійснені чисельні експерименти по оцінці складових глобального бюджету енергії в атмосфері за різними схемами дозволили виявити дві з них (та, що базується на трансформованій Ейлеревій середній, і в ізобаро-ізентропічній системі координат), які найбільш адекватно та фізично обґрунтовано пояснюють процеси перетворення одного виду енергії в іншій;

- на основі аналізу результатів оцінки різних видів енергії показано, що атмосферна енергетика може бути гарним засобом для діагностики стану кліматичної системи, тому що реагує на зміни великомасштабних атмосферних процесів, таких як Північноатлантичне та Південне коливання або чарунка Ґедлі;

- вперше запропонована оцінка балансу кутового моменту, який враховує Коріолісове перетворення, що дозволили точніше фізично інтерпретувати окремі складові цього балансу.

Запропонована проста удосконалена модель глобального циклу вуглецю в системі „океан-атмосфера” дозволила визначити концентрації та величини обміну вуглекислого газом (одного з головних парникових газів) в різних широтних поясах земної кулі і, крім того, виявлена роль в цьому процесі океанічної біоти. Більш того, показано, що цю модель можна використовувати для визначення часу адаптації кліматичної системи на антропогенний вплив.

В роботі значна увага приділяється методам нелінійного моделювання, таким як вейвлет-аналіз, використання як характеристик взаємодії спільної інформації та причинності Грангера, теорія катастроф. Саме завдяки ним вперше одержані такі результати:

- показаний вплив Північноатлантичного та Південного коливань на вміст вихрової кінетичної енергії в атмосфері помірних та тропічних широт;

- визначені довгочасні періодичності Антарктичного коливання та показаний їх взаємозв’язок з концентрацією озону в Південній півкулі;

- показаний вплив низькочастотних флуктуацій Північноатлантичного коливання на середньомісячні суми опадів в різних регіонах України;

- визначена роль, яку відіграють коливання ексцентриситету Землі з періодом приблизно 400 тисяч років: саме вони є причиною збільшення локальних максимумів, які аж до 1 мільйона років до н.е. визначаються змінами нахилу екліптики;

- показано, що періоди різкого потепління клімату на Землі визначаються спільним односпрямованим впливом трьох параметрів орбіти Землі: ексцентриситету, кута нахилу осі до екліптики та прецесії;

- представлено модифіковану енергобалансову модель глобального клімату, описання якої звелося до потенціальної функції типу катастрофи зборки;

- показано, що в рамках енергобалансової моделі для одержання довгоперіодичних коливань палеотемператури необхідне додаткове застосування принципу максимального сповільнення Тома, який, на відміну від принципу Максвела, забезпечує наявність петлі ґестерезису на біфуркаційній множині в площині керівних параметрів;

- визначена можливість нелінійної взаємодії між основними глобальними структурами телеконекції, такими як Арктичне, Південне та Антарктичне коливання, що дозволяє їх використання для моделювання клімату, як, наприклад, нелінійної системи динамічних осциляторів, що взаємодіють.

Треба відзначити, що в цій роботі як вихідні дані використовувався реаналіз NCEP/NCAR США, архівні дані якого мають високу якість і повсюдно використовуються при дослідженнях процесів в кліматичній системі. Крім того, використовуються методи і характеристики (вейвлет-аналіз, спільна інформація, причинність Грангера, теорія катастроф), які хоч й порівняно рідко застосовуються в метеорологічній та кліматологічній практиці, але добре зарекомендували себе в інших наукових галузях та мають велику потенціальну можливість для дослідження клімату. Тому достовірність одержаних в цій роботі результатів не повинна викликати недовіру.

З нашої точки зору, запропоновані в дисертаційній роботі методи і методики можуть бути з успіхом застосовані для аналізу інших гідрометеорологічних величин та виявлення взаємодії між ними в межах глобальної кліматичної системи. Крім того, одержані в роботі теоретичні узагальнення можуть використовуватися для подальшого розвитку запропонованих в роботі моделей, що дозволить надалі поліпшити наукове розуміння процесів, що спливають в кліматичній системі та обумовлюють в ній зміни.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Хохлов В.Н. Энергетика общей циркуляции атмосферы – Одесса: «ТЭС», 2004. – 134 с.

2. Хохлов В.М. Аналіз та прогноз розвитку повітряних мас, атмосферних фронтів та баричних утворень: конспект лекцій – Одеса: ТЕС, 2004. – 125 с.

3. Гідродинамічні моделі прогнозу погоди і сіткові методи їх реалізації: Навчальний посібник / Ківганов А.Ф., Хоменко Г.В., Хохлов В.М., Бондаренко В.М. – Одеса: ТЕС, 2002. – 179 с.

4. Khokhlov V.N. Inclusion of condensation heating into the atmospheric energy cycle based on the transformed Eulerian mean // Физика аэродисперсных систем. – 2004. – Вып. 41. – С. 123-128.

5. Хохлов В.М., Глушков О.В., Русов В.Д., Ващенко В.М., Павлович В.Н., Цеменко О.О., Патлашенко Ж.І. Про довгострокові зміни фаз Антарк­тичного коливання і їхнього зв'язку зі вмістом озону в південній півкулі // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2004. – № 4. – С. 414-424.

6. Khokhlov V.N., Glushkov A.V., Tsenenko I.A. Atmospheric teleconnection patterns and eddy kinetic energy content: wavelet analysis // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2004. – Vol. 11. – No. 3. – P. 295-301.

7. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Препелица Г.П., Цененко И.А. Временная изменчивость содержания атмосферного метана: влияние североатланти­ческой осцилляции // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 7. – С. 573-575.

8. Лобода Н.С., Хохлов В.Н. Статистический анализ связи климатических факторов, полей осадков и гидрологических параметров для юго-запад­ной части Украины // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2004. – Т. 6. – С. 60-66.

9. Глушков А.В., Хохлов В.Н. Вейвлет-анализ влияния изменений параметров орбиты Земли на наблюдаемые изменения климата // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2004. – Вип. 48. – С. 50-54.

10. Глушков О.В., Хохлов В.М., Свинаренко А.А., Цененко І.О., Черниш О.Є. Про вплив параметрів орбіти на коливання клімату Землі в останні 4 мільйони років // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математич­ні науки. – 2004. – № 1. – С. 377-385.

11. Глушков А.В., Хохлов В.Н., Бунякова Ю.Я. Ренорм-групповой поход к исследованию спектра турбулентности в атмосфере // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2004. – Вип. 48. – С. 286-292.

12. Хохлов В.Н., Пономаренко Е.Л., Солонко Т.В. Моделирование глобального цикла двуокиси углерода в системе «атмосфера-океан»: поток углерода на границе атмосфера-океан // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2004. – Вип. 48. – С. 338-342.

13. Glushkov A.V., Khokhlov V.N., Loboda N.S., Ponomarenko E.L. Computer modelling the global cycle of carbon dioxide in system of “atmosphere-ocean” and environmental consequences of climate change // Environmental Informatics Archives. – 2003. – Vol. 1. – 125-130.

14. Русов В.Д., Глушков А.В., Ващенко В.М., Михалусь О.Т., Хохлов В.Н. Енергобалансова модель глобального клімату і її зв'язок із теорією ритму льодовикових періодів Міланковича. Частина 1. Теорія // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2003. – № 2. – С. 386-399.

15. Хохлов В.М. Порівняльний аналіз розрахунку складових глобального циклу енергії у атмосфері // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2003. – Вип. 47. – С. 3-7.

16. Русов В.Д., Глушков А.В., Ващенко В.М., Михалусь О.Т., Хохлов В.Н. Енергобалансова модель глобального клімату і її зв'язок із теорією ритму льодовикових періодів Міланковича. Частина 2. Принцип Тома і довгоперіодичні коливання температури в енергобалансовій моделі клімату // Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки. – 2003. – № 2. – С. 400-407.

17. Хохлов В.М. Про енергетику циркуляції Ґедлі // Наукові праці Українського Науково-дослідного Гідрометеорологічного Інституту. – 2003. – Вип. 253. – С. 18-26.

18. Глушков О.В., Хохлов В.М., Цененко І.А. Застосування вейвлет-розкладення для аналізу запасів вихрової кінетичної енергії, процесів тепло-, масо-, енерго-переносу в атмосфері // Физика аэродисперсных систем. – 2003. – Вып. 40. – С. 215-225.

19. Хохлов В.Н. Влияние Северо-Атлантического колебания на энергетику внетропических широт // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. – Вип. 46. – С. 30-34.

20. Хохлов В.Н. Испарение и осадки над Северным полушарием // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. – Вип. 45. – С. 37-43.

21. Хохлов В.М. Запаси різних видів енергії в атмосфері північної півкулі // Наукові праці Українського Науково-дослідного Гідрометеорологічного Інституту. – 2002. – Вип. 250. – С. 34-41.

22. Русов В.Д., Глушков А.В., Ващенко В.Н., Михалусь О.Т., Хохлов В.Н. О возможном генезисе фрактальных размерностей в системе турбулентных пульсаций космической плазмы – спектр ГКЛ – турбулентные пульсации в атмосфере // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. – 2002. – Вип. 250. – С. 107-114.

23. Кивганов А.Ф., Глушков А.В., Хохлов В.Н. Взаимодействие и распад солитонов в теории атмосферных образований // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. – Вип. 45. – С. 10-16.

24. Хохлов В.Н., Мансарлийский В. Запасы энергии в нижней стратосфере северного полушария // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2002. – Вип. 45. – С. 53-57.

25. Глушков А.В., Хохлов В.Н. Атмосферный влаго-тепло-перенос, телеконнекция и баланс энергии, углового момента // Физика аэродисперсных систем. – 2002. – Вып. 39. – С. 148-157.

26. Хохлов В.М. Параметризація вертикальної і горизонтальної дифузії в рівнянні бюджету кінетичної енергії // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2001. – Вип. 44. – С. 24-29.

27. Khokhlov V.N. Atmospheric moisture fluxes of the Northern Hemisphere // Environment of Siberia, the Far East, and the Arctic. – 2001. – Vol. 1. – P.73-78.

28. Хохлов В.Н. Пространственно-временное распределение осадков и испарения над Украиной // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. – 2001. – Вип. 43. – С. 44-50.

29. Глушков А.В., Хохлов В.Н. Атмосферный влагооборот, телеконнекция, ячейки Гадлея и баланс энергии, углового момента // Environment of Siberia, the Far East, and the Arctic. – 2001. – Vol. 1. – P.23-26.

30. Хохлов В.Н. Энергетический бюджет антициклонов в процессе их развития // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 38. – С. 47-53.

31. Кивганов А.Ф., Хохлов В.Н. Параметризация подсеточных эффектов в уравнениях бюджета различных видов энергии // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 38. – С. 30-41.

32. Глушков А.В., Амбросов С.В., Хохлов В.Н. Атмосферные волноводы, телеконнекция ячейки Гадлея и баланс углового момента // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 38. – С. 42-46.

33. Малиновская С.В., Даньков С.В., Дроздов А.И., Кивганов А.Ф., Полевой А.Н., Хохлов В.Н. Расчет спектроскопических параметров двухатомных ван-дер-ваальсовых молекул и ионов: атом инертного газа – ион инертного газа типа галогена в основном состоянии // Журнал прикладной спектроскопии. – 1998. – Т. 65. – № 6. – С. 935-938.

34. Loboda N., Glushkov A., Khokhlov V. Systematical establishing con­tribution of the precipitation of warm and cold seasons in forming an annual runoff of arid-zone rivers: Analysis within method of empirical orthogonal functions // Precipitation in Urban Areas. – Pontresina (Switzerland). – 2003. – P. 43-47.

35. Khokhlov V.N. Cloudiness characteristics over Northern Hemisphere: an analysis based on ISCCP D2 cloud data set // CD Preprints “Satellite Meteorology and Oceanography”. – Long Beach (USA). – 2003. – P. 21-24.

36. Khokhlov V.N. Influence of the North Atlantic Oscillation on spatial distribution of moisture characteristics // CD Preprints “Observing and Understanding the Variability of Water in Weather and Climate”. – Long Beach (USA). – 2003. – P. 57-60.

37. Khokhlov V.N. Energy content over high latitudes of Northern Hemisphere // CD Preprints “Polar Meteorology and Oceanography”. – Hyannis (USA). – 2003. – P. 73-75.

38. Glushkov A., Khokhlov V., Loboda N. Neural network & multi-fractal modelling the frustrated aquifer systems. “Underground” hydrology and global Earth angular momentum disbalance // Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region. – Kyoto (Japan). – 2003. – P. 1057-1059.

39. Khokhlov V.N., Glushkov A.V. Atmospheric teleconnection patterns and eddy kinetic energy content: wavelet analysis // Geophysical Research Abstracts. – 2004. – Vol. 6. – 04588.

40. Glushkov A., Loboda N., Khokhlov V., Ponomarenko E. Nonlinear scaled features in a global cycle of carbon dioxide in system of atmosphere-ocean and global warming effect // Geophysical Research Abstracts. – 2004. – Vol. 6. – 06913.

41. Khokhlov V. Non-linear dynamics of geophysical processes: Wavelet identifications for homologation of North Atlantic and Arctic Oscillations // Proc. 3d Int. Conf. Nonlinear Sciences. – Singapore. – 2004. – P. 82.

42. Хохлов В.Н. Отклик энергетики тропической атмосферы на Эль Ниньо // Тезисы докладов Всемирной Конференции по Изменению Климата. - Москва (Россия). – 2003. – С. 467.

43. Khokhlov V.N. Inter-annual fluctuations of atmospheric energy cycle over Northern Hemisphere // Proc. Int. Symp. Climate Change. – Beijing (China). – 2003. – P. 200-202.

44. Loboda N.S., Glushkov A.V., Khokhlov V.N. Modelling global cycle of carbon dioxide in system of “atmosphere-ocean” and global warming effect // Proc. Int. Conf. Earth System Modelling. – Hamburg (Germany). – 2003. – P. 285.

45. Glushkov A.V., Rusov V.D., Loboda N.S., Khokhlov V.N., Vaschenko V.N., Mikhalus O.T. Energy-balance model of global climate and its connection with Milankovitch's theory of ice age rhythm // Proc. Int. Conf. Earth System Modelling. – Hamburg (Germany). – 2003. – P. 54.

46. Glushkov A., Khokhlov V. Fractal features of the large-scaled low frequency atmospheric processes and formations // Proc. Int. Conf. Fractals in Hydrosciences. - Ascona (Switzerland). – 2003. – P. 6.

47. Хохлов В.Н. Сезонные колебания в атмосферном цикле энергии // Тези доповідей міжн. конф. «Гідрометеорологія і охорона навколишнього середовища – 2002». – Одеса (Україна). – 2002. – С. 93-94.

48. Khokhlov V.N., Glushkov A.V. CO2 mixing ratios fluctuations and atmospheric circulation // Proc. 12-th Conf. on Applications of Air Pollution Meteorology. – Norfolk (USA). – 2002. – P. 63-64.

49. Khokhlov V.N., Ivanov A.V. Spatial-time structure of precipitation over Northern Atlantic // Proc. International Conf. on Quantitative Precipitation Forecasting. – Reading (United Kingdom). – 2002. – Vol. 2. – P. 18.

50. Khokhlov V., Glushkov A. Vertical diffusion parameterization for kinetic energy equation // Geophysical Research Abstracts. – 2002. – Vol. 4. – 03871.

51. Khokhlov V.N., Glushkov A.V. Spatial-time structure of the energy content over tropics // Proc. 25th Conf. Hurricanes and Tropical Meteorology. – San Diego (USA). – 2002. – P.428-429.

52. Khokhlov V.N. Phytoplankton time distribution in the Northern Atlantic: Possible impact of the teleconnection pattern // Proc. 2nd GLOBEC Open Science Meeting. – Qingdao (China). – 2002. – P. 119-120.

53. Khokhlov V.N. Zonal mean precipitation and evaporation over Northern Hemisphere // Proc. Climate Conference. – Utrecht (the Netherlands). – 2001. – P. 115-116.

АНОТАЦІЇ

Хохлов В.М. Динаміка нелінійних взаємодій в глобальній кліматичній системі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора географічних наук. Спеціальність 11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія. – Одеський державний екологічний університет, Одеса, 2005.

В роботі розроблені науково-методичні основи діагнозу та прогнозу процесів, що відбуваються в глобальній кліматичній системі. Як один з комплексних показників стану кліматичної системи пропонується використовувати енергетичні характеристики атмосфери, які відображують динаміку кліматоутворюючих процесів. Аналіз просторово-часових закономірностей розподілу різних видів енергії в атмосфері показав, що урахування прихованої теплоти конденсації в схемі на основі трансформованої Ейлеревої середньої, яке запропоноване в дисертації, дозволяє повніше фізично обґрунтувати процеси перетворення одного виду енергії в інший. В роботі розроблена методика застосування вейвлет-розкладення для використання в діагнозі взаємодій усередині кліматичної системи. Ґрунтуючись на вейвлет-аналізі та поняттях спільної інформації і причинності Грангера, установлені закономірності нелінійної взаємодії між глобальними структурами телеконекції (Арктичним, Південним та Антарктичним коливаннями) за умов клімату, що змінюється. Розроблено енергобалансову модель клімату, яка ґрунтується на положеннях теорії катастроф та враховує цикли льодовикових періодів.

*Ключові слова*: кліматична система, атмосферна енергетика, нелінійна взаємодія, телеконекція, вейвлет-аналіз, теорія катастроф.

Хохлов В.Н. Динамика нелинейных взаимодействий в глобальной климатической системе. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора географических наук. – Специальность 11.00.09 – метеорология, климатология, агрометеорология. – Одесский государственный экологический университет, Одесса, 2005.

В диссертации приводятся теоретическое обобщение и новое решение научной проблемы диагностики состояния климатической системы Земли. Реализация комплексного подхода включает в себя использование балансовых методов и методов математического моделирования процессов в глобальной климатической системе, среди которых основное место занимает нелинейное моделирование.

В качестве одного из комплексных показателей состояния климатичес­кой системы предлагается использовать энергетические характеристики атмосферы. В работе предложена модификация схемы цикла энергии на основе трансформированной Эйлеровой средней, которая вводит скрытое тепло конденсации в составляющие остаточной меридиональной циркуляции и эффективного потока количества движения. Такая модификация изменяет физичес­кий смысл превращений средней кинетической энергии в вихревую кинетичес­кую и среднюю доступную потенциальную энергию, а также потоков средней и вихревой кинетической энергии. Введение конденсационного нагрева в цикл атмосферной энергии устраняет, до некоторой степени, неопределенности, возникающие при расчетах, основанных на концепции квазигеострофического потока Элиассена-Пальма, а сам бюджет энергии, рассчитанный по модифицированной схеме обладает большей балансовой возможностью.

В работе исследована взаимосвязь между изменениями атмосферной энергии и динамикой климатообразующих процессов: Североатлантического колебания и ячейки Хэдли. Показано, что влияние последней на вихревую энергетику внетропических широт проявляется, прежде всего, в передаче части, а иногда и всей, сгенерировавшейся энергии из тропиков на север. Причем, в случае слабой интенсивности меридиональной циркуляции может не остаться резервов для увеличения вихревой кинетической энергии в самих тропиках.

Совместный анализ интегральных вихревых энергий и индексов Североатлантического колебания показал, что влияние последнего не является в полной степени определенным. Поэтому в работе был проведен анализ с использованием вейвлет-разложения, который позволил сделать вывод о том, что если фазы Североатлантического и Южного колебаний изменяются синхронно с периодом 4-8 лет, то наблюдается существенная связь между изменениями индексов Североатлантического колебания и запасами вихревой кинетической энергии; когда же указанные колебания находятся в противофазе, то связь становится менее значительной. Кроме того, в случае резких изменений фазы Североатлантического колебания, его влияние на запасы вихревой кинетической энергии как в умеренных, так и в тропических широтах, становится намного значительнее, чем для случая длительного доминирования одной фазы.

В работе исследовалось взаимодействие между глобальными структурами телеконнекции (Арктическим, Южным и Антарктическим колебаниями) для разных периодов на протяжении 20-го века при помощи вейвлет-анализа, взаимной информации и причинности Грангера. Для несглаженных рядов индексов и аномалий глобальной температуры было обнаружено, что имеет мес­то, хоть и слабое, взаимодействие между Арктическим и Южным колебаниями. При этом, взаимная информация для этих колебаний имеет тенденцию к увеличению с временем задержки во время эпохи похолодания. Наибольшая взаимная информация отмечается для температуры и индексов Южного колебания. В эпоху похолодания она почти симметрична относительно максимума около нулевого времени задержки, тогда как в последнюю эпоху потепления максимум смещается в сторону положительных времен задержки. При этом аномалии температуры являются грангеровой причиной индексов Южного колебания.

Для детализированного компонента вейвлет-разложения с периодичностью 5-7 лет было показано, что существует обратная связь между индексами Арктического и Южного колебаний. В эпоху похолодания обратная связь на времени задержки около 20 месяцев найдена для индексов Арктического и Антарктического колебаний. Наиболее интересные результаты для компонента с периодом более 10 лет были получены для эпохи похолодания. Здесь наблюдается асимметричный режим для взаимодействий между аномалиями температуры, с одной стороны, и Арктическим и Южным колебаниями, с другой стороны.

В работе предложена модифицированная энергобалансовая модель глобального климата, основанная на положениях теории катастроф и описывающая длиннопериодические колебания палеотемпературы (циклы Миланковича). Результирующее энергобалансовое уравнение было сведено к потенциальной функции катастрофы сборки, зависящей от двух управляющих параметров. Показано, что в рамках энергобалансовой модели для получения длиннопериодических колебаний палеотемпературы необходимо дополнительное применение принципа максимального промедления Тома.

Вейвлет-анализ экспериментальных данных палеопараметров показал, что периоды резкого потепления климата на Земле определяются совместным однонаправленным влиянием трех параметров орбиты Земли: эксцентриситета, угла наклона оси к эклиптике и прецессии. Также, определена роль, которую играют колебания эксцентриситета с периодом 400 тысяч лет: именно они являются причиной увеличения локальных максимумов, которые определяются изменениями наклона эклиптики

*Ключевые слова*: климатическая система, атмосферная энергетика, нелинейное взаимодействие, телеконнекция, вейвлет-анализ, теория катастроф.

ANNOTATION

Khokhlov V.N. Dynamics of non-linear interactions in global climatic system. – Manuscript.

The thesis for a Doctor’s degree by speciality 11.00.09 – meteorology, climatology, agrometeorology. – Odessa State Environmental University, Odessa, 2005.

Scientific-methodical principles are developed for the diagnosis and prediction of processes passing in the global climatic system. The atmospheric energy characteristics reflecting the dynamics of climate-forming processes are proposed to be used as one of complex indicators for the climatic system status. The analysis of spatiotemporal patterns for various atmospheric energies has showed that if the latent heat of condensation is taken into account in the transformed Eulerian-mean equations, as it is suggested in the Thesis, the processes of energy conversion are more physically validated. The technique using wavelet decomposition for the diagnosis of interactions within the climatic system is developed. Basing on the wavelet analysis as well as on the concept of cross-redundancy and Granger causality, the mechanisms of non-linear interaction between global teleconnection patterns (Arctic, Southern, and Antarctic Oscillations) under conditions of climate change are stated. The energy-balance climatic model based on the aspects of catastrophe theory and taking into account the cycles of Ice Ages is developed.

*Key words*: climatic system, atmospheric energetics, Ice Age, non-linear interaction, teleconnection patterns, wavelet analysis, catastrophe theory.

Для заказа доставки данной работы воспользуйтесь поиском на сайте по ссылке: <http://www.mydisser.com/search.html>