

В.А. ПЕПЕЛЯЄВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *pepelaev@yahoo.com*.

О.М. ГОЛОДНІКОВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна.

Н.О. ГОЛОДНІКОВА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна.

ОГЛЯД МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Анотація. Наведено огляд основних підходів до вивчення кліматичних змін. Головним методом дослідження є математичне моделювання. Кліматичні моделі ґрунтуються на фізичних законах і враховують сценарії емісій парникових газів. Їх використовують для дослідження процесів, які відбуваються у кліматичній системі, та прогнозування можливого кліматичного майбутнього. Особливу увагу приділено взаємозв'язку між глобальними кліматичними моделями (GCM), регіональними кліматичними моделями (RCM) і методами зменшення масштабу. Розглянуто підхід до аналізу та відтворення кліматичних змін, який полягає у порівнянні результатів багаторазового моделювання між собою та з даними спостережень.

Ключові слова: зміна клімату, глобальна кліматична модель, регіональна кліматична модель, статистичний даунскейлінг, сценарії викидів парникових газів.

ВСТУП

Однією з найбільш чутливих до змін клімату галузей є сільське господарство. Залежно від напрямку цих змін може зростати ризик значних втрат врожайності. Вони призводять до суттєвого зростання цін на продукти харчування, що є значною загрозою продовольчій безпеці в Україні [1, 2]. Проблему мінімізації ризику втрат врожайності за поточних кліматичних умов розглянуто у [3, 4]. У цих роботах мінімізацію ризику втрат забезпечено шляхом вибору оптимальної структури посівних площ з використанням інформації про погодні умови за минулі роки. Деякі методи мінімізації ризику втрат описано в роботах [5–8]. Ці методи можна використовувати для адаптації рослинництва до майбутніх змін клімату за умови наявності достатньої інформації про характер цих змін. Нині цю інформацію можна отримати лише шляхом кількісного моделювання кліматичних змін з використанням кліматичних моделей. У цій роботі наведено огляд сучасних підходів та методів моделювання кліматичних змін.

1. КЛІМАТИЧНІ МОДЕЛІ

Кліматичні моделі є основними інструментами, доступними для дослідження реакції кліматичної системи на викиди парникових газів. Вони ґрунтуються на фізичних законах і враховують сценарії емісій парникових газів. Для дослідження процесів, які відбуваються у кліматичній системі, та прогнозування можливого кліматичного майбутнього, використовують глобальні кліматичні моделі (GCM). Незважаючи на те, що GCM є важливим інструментом генерування великомасштабної статистики у просторовому і часовому вимірах, обчислювальні обмеження нині не дають GCM змоги виконувати глобальне моделювання з високою просторовою роздільною здатністю, необхідною для отримання корисної кліматичної інформації в регіональному чи локальному масштабах.

Результати моделювання температури й опадів з використанням GCM характеризуються значними зміщеннями, які виникають внаслідок систематичних помилок у моделі. Наприклад, для чисельного інтегрування складних систем дифференціальних рівнянь, на яких ґрунтуються моделі GCM, потрібно мати інформацію про стан кліматичної системи у початковий момент часу, який не можна визначити точно, оскільки обсяг даних спостережень є замалим порівняно з числом ступенів свободи кліматичної системи. Зі свого боку, неточність у визначенні початкового стану породжує помилки в результатах моделювання кліматичної системи. Це ускладнює безпосереднє використання результатів моделювання GCM як прямих вхідних даних для більш детальних моделей. Для того, щоб усунути цей недолік, застосовують ансамблевий підхід, який полягає у проведенні паралельних розрахунків з різними комбінаціями GCM за однакового зовнішнього впливу. Для оцінювання невизначеності, зумовленої власною мінливістю кліматичної моделі, здійснюють ансамблеві розрахунки за цією моделлю за різних початкових умов.

На сучасному етапі розвитку кліматичних моделей просторова роздільна здатність GCM є недостатньою для відтворення деяких кліматично значущих локальних процесів, які можна було б використати як основу для прийняття рішень щодо адаптації до кліматичних змін. Нині типова горизонтальна роздільна здатність GCM становить 100–300 км, а найкраща — 50–100 км. Ця роздільна здатність не дає змоги глобальним моделям надавати точний опис екстремальних подій, які мають фундаментальне значення для користувачів кліматичної інформації щодо регіональних і місцевих впливів мінливості та зміни клімату [9, 10]. Теоретично GCM здатні надавати більш детальну інформацію в регіональному масштабі [11], але через великий обсяг потрібних обчислювальних ресурсів їх не використовують для моделювання регіонального клімату. Очікується, що з появою нових суперкомп'ютерних платформ і прогресом у моделюванні клімату горизонтальна роздільна здатність GCM покращиться до 1–2 км [12]. Тоді виникне реальна можливість за допомогою GCM моделювати дрібномасштабні процеси, як-от грози та зливи.

Через те, що для адаптації до зміни клімату необхідно мати відповідну інформацію на регіональному та локальному рівнях, виникла потреба у розробленні кліматичних моделей з більш високою роздільною здатністю. Регіональну інформацію можна отримати за допомогою регіональних кліматичних моделей (RCM) і методів зменшення масштабу. Моделі RCM ґрунтуються на фізичних принципах і відрізняються від GCM більш високою роздільною здатністю. Це дає змогу з їхньою допомогою реалістичніше відтворювати екстремальні явища. Вони моделюють обмежений регіон, використовуючи результати роботи GCM на бокових і поверхневих границях цього регіону як граничні умови. Цей підхід дає змогу забезпечити більш високу роздільну здатність у вибраній області та краще представляти важливі рушійні сили регіонального клімату, як-от: гірські хребти, землеустрій і міські ефекти. Ці моделі надають прогнози з набагато більшою деталізацією та точнішим представленням локальних екстремальних подій. Горизонтальна роздільна здатність сучасних RCM становить 12.5–50.0 км [13].

Перехід від глобальних кліматичних моделей до регіональних здійснюють методом зменшення масштабу, який отримав назву «даунскейлінг» (downscaling). Він дає змогу добути регіональну або локальну кліматичну інформацію із результатів роботи GCM [14, 15]. Методи даунскейлінгу включають динамічне і статистичне зменшення масштабу. Динамічний даунскейлінг використовує RCM

або локальні моделі для генерування кліматичної інформації з високою роздільною здатністю на рівні регіонів [16]. Наприклад, стандартний метод оцінювання майбутніх впливів зміни клімату на гідрологію поєднує результати роботи GCM з результатами роботи локальних гідрологічних моделей. У роботі [17] запропоновано скоротити розрив масштабу між GCM з одного боку та наявними локальними моделями вічної мерзлоти з іншого, використовуючи RCM як проміжний крок. Замість того, щоб розраховувати індекс мерзлоти на основі даних RCM, автори використали RCM лише для розрахунку граничних умов для наявної детальної моделі вічної мерзлоти.

Динамічний даунскейлінг потребує значного обсягу ресурсів обчислювальної техніки, що обмежує застосування цього методу. До того ж результати, отримані за допомогою RCM, мають систематичне зміщення, що суттєво ускладнює їхнє безпосереднє використання для адаптації до кліматичних змін. Це пояснюється тим, що масштаби процесів, які відбуваються на регіональному або локальному рівнях, та особливості земної поверхні є занадто малими і тому не можуть бути враховані в GCM [18, 19]. Для усунення похибки, яка при цьому виникає, та подолання розриву масштабу між сіткою числової моделі і бажаним масштабом, вихідні дані RCM піддають додатковому обробленню з використанням статистичного даунскейлінгу, як методу корекції зміщення [20].

Статистичний даунскейлінг використовує статистичний зв'язок між інформацією про великомасштабний клімат, отриманою за допомогою GCM або RCM, та інформацією про локальний клімат, яка ґрунтується на спостереженнях [21]. Ідея статистичного даунскейлінгу полягає у переході від функції розподілу, яка описує деяку кліматичну змінну у великому (GCM) масштабі, до еквівалентної функції розподілу у локальному масштабі, за допомогою якої можна потім легко згенерувати локальні значення для створення реалістичних часових рядів локального масштабу. В роботі [18] наголошено на тому, що ці обидві функції розподілу є нетривіальними і зазвичай не належать такому добре відомому сімейству розподілу, як гамма-розподіл. Крім того, не зроблено жодних припущень щодо форми зв'язку, що моделюється, та сімейства CDF, а застосовано непараметричні підходи. Цей підхід, зокрема, реалізовано у [22], але при цьому використано лише фіксований тип функції розподілу, а саме гамма-розподіл. Однак, статистичний даунскейлінг не може охопити зв'язки, які історично були відсутні. До того ж цей метод не можна використовувати в регіонах, в яких відсутній зв'язок між великомасштабною кліматичною характеристикою та місцевими спостереженнями [23].

2. МЕТОДИ АНСАМБЛЕВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Основним підходом до аналізу та відтворення кліматичних змін є порівняння результатів багаторазового моделювання між собою та з даними спостережень. Моделювання здійснюють за допомогою окремих кліматичних моделей із узгодженими граничними умовами та заданими темпами викидів парникових газів. Для реалізації цього підходу в 1988 р. засновано Міжурядову групу експертів з питань змін клімату (IPCC), яка проводить систематичний аналіз наукових результатів, пов'язаних зі зміною клімату, і надає рекомендації світовим лідерам щодо розроблення та вдосконалення кліматичної політики. Група IPCC не виконує оригінальні дослідження, а здійснює періодичний систематичний огляд усієї відповідної опублікованої літератури. Провідні автори звітів IPCC оцінюють доступну інформацію про зміну клімату на основі опублікованих джерел, і кожні шість-сім років IPCC випускає звіти, які містять останні

результати досліджень щодо рушійних сил зміни клімату, аналіз впливу на соціально-економічне становище та рекомендації щодо шляхів пом'якшення. Останній, шостий звіт, був оприлюднений у 2022 р.

У звітах IPCC наведено, зокрема, результати, отримані у межах проєкту взаємного порівняння пов'язаних моделей (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP), започаткованого у 1995 р. для вивчення та вдосконалення глобальних кліматичних моделей GCM. У межах цього проєкту проводять чисельні експерименти, що охоплюють багато аспектів мінливості та зміни клімату, та порівнюють моделі GCM, розроблені різними групами дослідників у різних країнах світу, як між собою, так і з даними спостережень. Кількість кліматичних центрів або консорціумів, які здійснюють моделювання та складають прогнози глобального клімату, зросла з 11 у першому проєкті CMIP1 до 19 у CMIP5 та 28 у CMIP6 [24]. Під час проведення цих експериментів генерується величезний обсяг інформації, яка дає змогу краще зрозуміти минулі, поточні та майбутні зміни клімату.

Добірку модельних імітацій за різних початкових умов, які здійснюють з використанням моделей, відмінних одна від одної, називають мультимодельним ансамблем. Відмінності у початкових умовах і формулюванні моделі призводять до різних еволюцій змодельованої системи. Члени мультимодельного ансамблю розробляються різними організаціями, які досліджують зміни клімату. Вони можуть суттєво відрізнятися за дизайном програмного забезпечення та підходом до програмування, обробленням просторової дискретизації та точним формулюванням фізичних, хімічних і біологічних процесів. Переваги використання мультимодельного ансамблю проявляються у «постійно кращій продуктивності мультимоделі під час розгляду всіх аспектів прогнозів» [25]. Завдяки вибірці невизначеностей моделювання, ансамблі забезпечують кращу основу для ймовірнісних прогнозів порівняно з ансамблями однієї моделі, що відбирає лише невизначеність у початковому стані. Взаємне порівняння моделей GCM, розроблених групами дослідників у різних країнах світу, як між собою, так і з даними спостережень, дає змогу визначити переваги та недоліки, а також оцінити систематичні помилки кожної із них.

Збільшення потужності обчислювальної техніки дало змогу дослідити внутрішню мінливість моделей та підвищити надійність оцінок реакцій кліматичної моделі, використовуючи великі ансамблі початкових умов. За такого підходу виконують багаторазові розрахунки за однією фіксованою моделлю, починаючи з безлічі різних початкових станів [24]. Зміни початкових умов призводять до різних еволюцій для окремих реалізацій системи в цілому. Однак, ансамблі початкових умов з однією моделлю не можуть охопити ті самі ступені свободи, що й ансамбль із кількома моделями, оскільки характеристики моделі суттєво впливають на поведінку моделі [26].

Ще одним поширеним методом моделювання є ансамбль збурених параметрів. Цей метод використовують для оцінювання невизначеності на основі єдиної моделі, де окремі параметри змінюють задля відображення повного діапазону їхньої невизначеності [27–30]. Далі застосовують статистичні методи для виявлення того, які параметри є головними причинами невизначеності в усьому ансамблі. Разом ансамблеві методи (ансамблі початкових умов, ансамбль збурених параметрів та мультимодельні ансамблі) дають змогу досліджувати невизначеність кліматичної моделі, яка виникає через внутрішню мінливість, початкові та внутрішні граничні умови, формулювання моделі та параметризацію [31].

Результати моделювання з використанням GCM характеризуються значними зміщеннями, які виникають внаслідок систематичних помилок у моделі. Для

розв'язання проблеми систематичного зміщення виконують міжнародні проекти взаємного порівняння динамічного масштабування, наприклад, Ensembles-Based Predictions of Climate Changes and Their Impacts (ENSEMBLES) [32, 33]. Цей проект започатковано у вересні 2004 р. Він координує розроблення системи ансамблевого прогнозування клімату для використання в діапазоні часових масштабів (сезонного, десятирічного та більш тривалого) та просторових масштабів (глобального, регіонального та локального). Ця модельна система призначена для побудови інтегрованих сценаріїв майбутніх змін клімату, які забезпечать основу для кількісного оцінювання ризику зміни клімату та його мінливості.

Для оцінювання та вдосконалення методів регіонального масштабування клімату (RCD) у 2009 р. Всесвітньою програмою дослідження клімату (WCRP) ініційовано структуру за програмою «Експеримент координованого регіонального масштабування» (CORDEX). Ця структура оцінює продуктивність регіональної кліматичної моделі за допомогою сукупності експериментів, спрямованих на створення регіональних прогнозів клімату.

Основними цілями CORDEX є такі [34]:

1. Проведення досліджень регіональних та місцевих кліматичних явищ з використанням методу зменшення масштабу.
2. Оцінювання та вдосконалення моделей і методів зменшення масштабу регіонального клімату.
3. Створення бази даних скоординованих наборів регіональних та локальних проєкцій кліматичних змін для всіх континентів.
4. Сприяння ознайомленню широких кіл користувачів регіональної кліматичної інформації з результатами, отриманими у межах програми CORDEX, та обміну отриманими результатами.

Програма CORDEX координує розроблення, пов'язані з моделюванням клімату на регіональних та національних рівнях, а також стимулює використання результатів моделювання кінцевими користувачами кліматичної інформації по всьому світу [35].

Експерименти, які проводяться у межах CORDEX, моделюють як історичний, так і майбутній регіональний клімат за різними репрезентативними шляхами концентрації парникових газів. На першому етапі програми CORDEX моделювання здійснювали з використанням динамічних моделей регіонального клімату. В останніх експериментах збільшено частку емпірико-статистичних моделей [36]. Результати досліджень за програмою CORDEX використовують як вхідні дані під час досліджень впливу змiну клімату на життя та засоби існування, а також для пошуку шляхів адаптації до нових кліматичних умов [37].

Регіон, для якого здійснюють регіональне зменшення масштабу, називають «доменом». У межах програми CORDEX виділено 14 доменів: Південна Америка, Центральна Америка, Північна Америка, Європа (CBPO), Африка, Південна Азія, Східна Азія, Центральна Азія, Австралазія, Антарктика, Арктика, Середземномор'я (MED), Близький Схід, Північна Африка (MENA), Південно-Східна Азія (SEA).

Проект EURO-CORDEX є європейським відділенням міжнародної програми CORDEX. Його метою є розроблення кліматичних сценаріїв високої роздільної здатності для Європи. Під час виконання цього проєкту досліджують ефективність відтворення окремими моделями основних просторово-часових особливостей європейського клімату. Як еталон спостережень за приземною температурою повітря та опадів використовують дані з щоденного набору даних спостережень на суші в Європі E-OBS [38, 39].

Дослідження у межах проекту EURO-CORDEX, ґрунтуються на динамічних методах даунскейлінгу [38, 40–48], та на методах емпірично статистичного зменшення масштабу [49–56]. Ці підходи до масштабування, кожен із яких має свої переваги, взаємно доповнюють один одного.

3. СЦЕНАРІЇ МАЙБУТНІХ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Для моделювання кліматичних змін на вхід кліматичних моделей має надходити інформація про обсяги майбутніх викидів парникових газів. Вони є продуктом складних динамічних систем, які залежать від таких визначальних чинників, як демографічний та соціально-економічний розвиток, а також технологічні зміни. Динаміка цих викидів характеризується значною невизначеністю. Для аналізу цієї невизначеності використовують сценарії, які є альтернативними прогнозами можливого розвитку подій у майбутньому. Ці сценарії дають змогу проводити аналіз способу, в який визначальні чинники можуть впливати на показники майбутніх викидів.

У 1992 р. IPCC запропонувала сценарії IS92 для оцінювання викидів парникових газів. Це були перші сценарії, які використовували у глобальних моделях циркуляції для розроблення сценаріїв зміни клімату. У 2000 р. IPCC опублікувала Спеціальну доповідь про сценарії викидів, в якій було запропоновано 40 нових сценаріїв (так звані SRES сценарії) [55]. Для їхньої класифікації розроблено чотири різні описові сюжетні лінії, названі «сім'ями» (A1, A2, B1 і B2). Кожна сюжетна лінія представляє різні демографічні, соціальні, економічні, технологічні та екологічні події. Кожен сценарій є конкретним кількісним тлумаченням однієї з чотирьох сюжетних ліній. Ці сценарії були використані для підготовки Четвертої доповіді IPCC про оцінку, випущену поетапно протягом 2007 р. [56].

Результати досліджень, викладені у П'ятій оціночній доповіді IPCC 2013 р. [57], ґрунтуються на чотирьох сценаріях викидів парникових газів. На відміну від сценаріїв, використаних у Четвертій оціночній доповіді, деякі із цих сценаріїв передбачають і політичні заходи, спрямовані на пом'якшення впливів на зміну клімату. Ці сценарії названо репрезентативними траєкторіями концентрацій (РТК). Вони визначаються приблизною сумарною величиною радіаційного впливу у 2100 р. порівняно з 1750 р: 2.6 Вт/м² для РТК2.6; 4.5 Вт/м² для РТК4.5; 6.0 Вт/м² для РТК6.0 і 8.5 Вт/м² для РТК8.5. Набір РТК-сценаріїв містить один сценарій скорочення викидів, який передбачає досить низький рівень впливу (РТК2.6), два сценарії стабілізації (РТК4.5 і РТК6.0) і один сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів (РТК8.5).

У Шостій оціночній доповіді IPCC (2021 р.) [58] досліджено реакцію клімату на ширший діапазон майбутніх викидів парникових газів, землекористування та забруднювачів повітря порівняно з П'ятою оціночною доповіддю IPCC (2013 р.). У цьому звіті оцінено реакцію клімату на п'ять ілюстративних сценаріїв, які охоплюють діапазон можливого майбутнього розвитку антропогенних факторів зміни клімату. Кожному набору сценаріїв відповідає свій прогноз змін у кліматичній системі. Всі сценарії починаються з 2015 р.

До складу нових сценаріїв включено такі [58]:

- сценарії з високими та дуже високими рівнями викидів парникових газів (SSP3-7.0 та SSP5-8.5) та викидів CO₂, які приблизно подвоюються порівняно з поточними рівнями до 2100 р. та 2050 р. відповідно;
- сценарії з проміжними рівнями викидів парникових газів (SSP2-4.5) та викидів CO₂, які залишаються приблизно на нинішньому рівні до середини століття;

- сценарії з дуже низькими і низькими рівнями викидів парникових газів і викидів CO₂, що скорочуються до нуля близько 2050 р., після чого спостерігатимуться різні рівні чистих негативних викидів CO₂ (SSP1-1.9 і SSP1 -2.6).

Характеристики нових сценаріїв викидів наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Зміни глобальної температури поверхні для вибраних 20-річних періодів часу та п'яти нових ілюстративних сценаріїв викидів [58]

Сценарії	2021–2040		2041–2060		2081–2100	
	Найкраща оцінка (°C)	Найбільш вірогідний діапазон (°C)	Найкраща оцінка (°C)	Найбільш вірогідний діапазон (°C)	Найкраща оцінка (°C)	Найбільш вірогідний діапазон (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 – 1.7	1.6	1.2 – 2.0	1.4	1.0 – 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 – 1.8	1.7	1.3 – 2.2	1.8	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 – 1.8	2.0	1.6 – 2.5	2.7	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 – 1.8	2.1	1.7 – 2.6	3.6	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 – 1.9	2.4	1.9 – 3.0	4.4	3.3 – 5.7

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ КЛІМАТУ В УКРАЇНІ

Дослідження кліматичних змін в Україні описано у роботах Краковської С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Білозерової А.К. та інших вчених. Зокрема, проведено дослідження проєкцій змін середніх місячних, сезонних та річних температур повітря для трьох 20-річних періодів у ХХІ ст. для всієї території України та окремо для п'яти виділених регіонів [59]. Визначено кількісні сценарії можливих змін температури повітря та режиму зволоження відносно сучасного контрольного періоду в Луганській області [60]. Розроблено можливі сценарії кліматичних умов на території Тернопільської області та отримано статистичні характеристики основних кліматичних показників — багаторічних середніх місячних та річних значень температури повітря, кількості опадів та відносної вологості повітря [61]. У роботі [62] визначено тренд кліматичних змін на території Хмельницької області за середньорічними значеннями температури та кількості опадів. У [63] проведено аналіз режиму максимальної добової температури повітря за фактичними даними за періоди, тривалість яких є більшою ніж шістьдесят років, і очікуваних — за 2021–2050 рр. для трьох метеостанцій (Ужгород, Харків, Одеса). Для кожного дня року розраховано так званий «абсолютний поріг температури» за рекомендаціями ВМО.

ВИСНОВКИ

Огляд методів моделювання кліматичних змін, наведений у цій статті, свідчить про те, що стан досліджень цієї проблеми вийшов на рівень упродовження відповідних розробок в економічну діяльність. Розроблення кліматичних сценаріїв високої роздільної здатності для Європи у межах проєкту EURO-CORDEX суттєво знизило актуальність досліджень кліматичних змін на рівні регіонів України. Вся необхідна інформація з цієї тематики з високою роздільною здатністю (12.5–50 км [13]) міститься в результатах роботи проєкту EURO-CORDEX. Натомість зростає актуальність досліджень впливу кліматичних змін на галузі економіки України.

1. Golodnikov A.N., Ermol'ev Y.M., Ermol'eva T.Y., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. I. Model for management of the economic availability of food. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9481-8>.
2. Golodnikov A.N., Ermol'ev Y.M., Ermol'eva T.Y., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. II. Models for structural optimization of agricultural production under risk. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 2. P. 217–228. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9503-6>.
3. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Reliability optimization in plant production. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 2. P. 191–196. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00450-5>.
4. Pepelyaev V.A., Golodnikova N.A. Mathematical methods for crop losses risk evaluation and account for sown areas planning. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, N 1. P. 60–67. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9592-x>.
5. Golodnikov A.N., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Estimation of reliability parameters under incomplete primary information. *Theory and Decision*. 2004. Vol. 57. P. 331–344. <https://doi.org/10.1007/s11238-005-3217-9>.
6. Zrazhevsky G.M., Golodnikov A.N., Uryasev S.P., Zrazhevsky A.G. Application of buffered probability of exceedance in reliability optimization problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 3. P. 476–484. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00263-4>.
7. Butenko S., Golodnikov A., Uryasev S. Optimal security liquidation algorithms. *Computational Optimization and Applications*. 2005. Vol. 32, Iss. 1-2. P. 9–27. <https://doi.org/10.1007/s10589-005-2052-9>.
8. Golodnikov A.N., Ermoliev Y.M., Knopov P.S. Estimating reliability parameters under insufficient information. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. Vol. 46, N 3. P. 443–459. <https://doi.org/10.1007/s10559-010-9219-9>.
9. Zongci Zh., Yong L., Jianbin H. Are extreme weather and climate events affected by global warming? *Climate Change Research*. 2014. Vol. 10, Iss. 5. P. 388–390. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1719.2014.05.012>.
10. Hewitson B.C., Crane R.G. Climate downscaling: Techniques and application. *Climate Research*. 1996. Vol. 7, Iss. 2. P. 85–95. URL: <https://www.int-res.com/articles/cr/7/c007p085.pdf>.
11. Roberts M.J. et al. The benefits of global high resolution for climate simulation: process understanding and the enabling of stakeholder decisions at the regional scale. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2018. Vol. 99, Iss. 11. P. 2341–2359. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00320.1>.
12. Schär C et al. Kilometer-scale climate models: prospects and challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2020. Vol. 101, Iss. 5. P. E567–E587. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0167.1>.
13. EURO-CORDEX Data. URL: <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>.
14. von Storch H., Zorita E., Cubasch U. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*. 1993. Vol. 6, Iss. 6. P. 1161–1171. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006:DOGCCE2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006:DOGCCE2.0.CO;2).
15. Liu Ch., Liu W., Fu G., Ouyang R. A discussion of some aspects of statistical downscaling in climate impacts assessment. *Advances in Water Science*. 2012. Vol. 23, Iss. 3. P. 427–437.
16. Giorgi F., Jones C., Asrar G.R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization Bulletin*. 2009. Vol. 58, N 3. P. 175–183. URL: <https://public.wmo.int/en/bulletin/addressing-climate-information-needs-regional-level-cordex-framework>.
17. Stendel M., Romanovsky V.E., Christensen J.H., Sazonova T. Using dynamical downscaling to close the gap between global change scenarios and local permafrost dynamics. *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56, Iss. 12. P. 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.014>.
18. Michelangeli P.-A., Vrac M., Loukos H. Probabilistic downscaling approaches: Application to wind cumulative distribution functions. *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, Iss. 11. P. 16. <https://doi.org/10.1029/2009GL038401>.

19. Wilby R.L., Fowler H.J. Regional climate downscaling. In: *Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources*. Fung F., Lopez A., New M. (Eds.). Blackwell Publishing Ltd., 2011. P. 34–85.
20. Maraun D., Shepherd T., Widmann M. et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Clim Change*. 2017. Vol. 7. P. 764773. <https://doi.org/10.1038/nclimate3418>.
21. Maraun D. et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*. 2010. Vol. 48, Iss. 3. P. 134. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>.
22. Удовенко О.І., Ківва С.Л., Ковалець І.В. Оцінка кліматичних характеристик екстремальних дощових паводків із використанням методів статистичного даунскелінгу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2014. Т. 4, № 35. С. 39–48.
23. Chen L., Li W., Zhang P. et al. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*. 2003. Vol. 14, Iss. 6. P. 648–655. URL: <http://112.126.69.253/en/article/id/20030682>.
24. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L. et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
25. Ahmed M. et al. Novel multimodel ensemble approach to evaluate the sole effect of elevated CO₂ on winter wheat productivity. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number: 7813. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44251-x>.
26. Flato G., Marotzke J., Abiodun B., Braconott P. et al. Evaluation of climate models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 741886. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.020>.
27. Murphy J., Sexton D., Barnett D., Jones G., Webb M., Collins M., Stainforth D. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*. 2004. Vol. 430. P. 768772. <https://doi.org/10.1038/nature02771>.
28. Knutti R., Furrer R., Tebaldi C., Cermak J., Meehl G. Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23, Iss. 10. P. 2739–2758. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>.
29. Lee L.A., Carslaw K.S., Pringle K.J., Mann G.W., Spracklen D.V. Emulation of a complex global aerosol model to quantify sensitivity to uncertain parameters. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011. Vol. 11, Iss. 23. P. 12253–12273. <https://doi.org/10.5194/acp-11-12253-2011>.
30. Shiogama H., Watanabe M., Ogura T., Yokohata T., Kimoto M. Multi-parameter multi-physics ensemble (MPMPE): a new approach exploring the uncertainties of climate sensitivity. *Atmospheric Science Letters*. 2014. Vol. 15, Iss. 2. P. 97102. <https://doi.org/10.1002/asl2.472>.
31. Parker W.S. Ensemble modeling, uncertainty and robust predictions. *WIREs Climate Change*. 2013. Vol. 4, Iss. 3. P. 213–223. <https://doi.org/10.1002/wcc.220>.
32. van der Linden P., Mitchell J.F.B. (Eds.). ENSEMBLES: Climate change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Exeter: Met Office Hadley Centre, 2009. 160 p. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-1/ensembles-climate-change-and-its>.
33. Mearns L.O., Gutowski W., Jones R., Leung R., McGinnis S., Nunes A., Qian Y. A regional climate change assessment program for North America. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*. 2009. Vol. 90, Iss. 36. P. 311–311. <https://doi.org/10.1029/2009EO360002>.
34. Jacob D. et al. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*. 2020. Vol. 20. 51. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>.
35. About CORDEX. URL: <https://www.icrc-cordex2016.org/index.php/about/what-is-cordex>.
36. EURO-CORDEX Simulations. URL: <https://www.euro-cordex.net/060376/index.php.en>.
37. Coordinated Downscaling Experiment - European Domain. URL: <https://euro-cordex.net>.

38. Jacob D. et al. Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX) regions. *Atmosphere*. 2012. Vol. 3, N 1. P. 181–199. <https://doi.org/10.3390/atmos3010181>.
39. Kotlarski S. et al. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*. 2014. Vol. 7, Iss. 4. P. 1297–1333. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000086790>.
40. Colin J., Déqué M., Radu R., Somot S. Sensitivity study of heavy precipitation in limited area model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2010. Vol. 62, Iss. 5. P. 591–604. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00467.x>.
41. Will A. et al. The COSMO-CLM 4.8 regional climate model coupled to regional ocean, land surface and global earth system models using OASIS3-MCT: description and performance. *Geosci. Model Dev.* 2017. Vol. 10, Iss. 4. P. 1549–1586. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-1549-2017>.
42. Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. *Climatic Change*. 2007. Vol. 81, Suppl. iss. 1. P.16. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9211-6>.
43. Samuelsson P. et al. The Rossby centre regional climate model RCA3: model description and performance. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2011. Vol. 63, Iss. 1. P. 423. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x>.
44. Giorgi F. et al. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.* 2012. Vol. 52, Iss.1. P. 729. <https://doi.org/10.3354/cr01018>.
45. Jacob D. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*. 2014. Vol. 14, Iss. 2. P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
46. Skamarock W.C., Klemp J.B. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*. 2008. Vol. 227, Iss. 7. P. 3465–3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.
47. Giot O. et al. Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework. *Geoscientific Model Development*. 2016. Vol. 9, Iss. 3. P. 1143–1152. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1143-2016>.
48. Termonia P. et al. The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium. *Climate Services*. 2018. Vol. 11. P. 4961. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.05.001>.
49. Benestad R., Parding K., Dobler A., Mezghani A. A strategy to effectively make use of large volumes of climate data for climate change adaptation. *Climate Services*. 2017. Vol. 6. P. 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.013>.
50. Maraun D. et al. VALUE: a framework to validate downscaling approaches for climate change studies. *Earth's Future*. 2015. Vol. 3, Iss. 1. P. 114. <https://doi.org/10.1002/2014ef000259>.
51. Maraun D., Widmann M., Gutiérrez J.M. Statistical downscaling skill under present climate conditions: a synthesis of the VALUE perfect predictor experiment. *International Journal of Climatology*. 2018. Vol. 39, Iss. 9. P. 36923703. <https://doi.org/10.1002/joc.5877>.
52. Hertig E. et al. Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: validation results from the perfect predictor experiment of the COST action VALUE. *International Journal of Climatology*. 2018. Vol. 39, Iss. 9. P. 38463867. <https://doi.org/10.1002/joc.5469>.
53. Soares P.M.M. et al. Process-based evaluation of the VALUE perfect predictor experiment of statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*. 2018. Vol. 39, Iss. 9. P. 3868–3893. <https://doi.org/10.1002/joc.5911>.
54. Widmann M. et al. Validation of spatial variability in downscaling results from the VALUE perfect predictor experiment. *International Journal of Climatology*. 2019. Vol. 39, Iss. 9. P. 3819–3845. <https://doi.org/10.1002/joc.6024>.
55. Nakicenovic N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios (SRES) — A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2000. 559 p.

56. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (Eds.). IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2007. 333 p.
57. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
58. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L. et al. (Eds.). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021. 2391 p. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
59. Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В. Проекції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в ХХІ столітті. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 3344. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npundgi_2016_268_6.
60. Краковська С.В. Чисельні проекції кліматичних змін в Луганській області до 2050 р. *Наукові праці УкрНДГМІ*. 2012. Вип. 261. С. 3755. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/58606>.
61. Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М. Можливі сценарії кліматичних умов у Тернопільській області впродовж ХХІ ст. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Сер. Географія*. 2014. №. 1. С. 5567.
62. Артамонов Б.Б., Шевченко С.М., Дячук А.О. Прогноз впливу кліматичних змін у Хмельницькій області на навколишнє середовище і населення. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 2. С. 8890. <https://doi.org/10.15421/40290217>.
63. Сафранов Т., Катеруша Г., Катеруша О., Яраї К. Особливості динаміки хвиль тепла в окремих містах України. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. Вип. 55. С. 232–244. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-17>.

V.A. Pepelyaev, A.N. Golodnikov, N.A. Golodnikova

REVIEW OF CLIMATE CHANGES MODELING METHODS

Abstract. This authors overview the main approaches to the analysis of climate change. Climate models are based on physical laws and take into account scenarios of greenhouse gas emissions. They are used to analyze the processes in the climate system and predict possible climate future. The authors focus on the relationship between global climate models (GCMs), regional climate models (RCMs), and downscaling methods. An approach to the analysis and reproduction of climatic changes is also considered, which compared the results of multiple simulations with each other and with observational data.

Keywords: climate change, climate models, statistical downscaling, scenarios of greenhouse gas emissions.

Надійшла до редакції 22.11.2022