

УДК 504.064.3:551.588.74:(528.837:629.783)

В. І. Лялько¹, Ю. В. Костюченко^{1,2}, І. Г. Артеменко¹, Л. М. Попадюк², Р. В. Федина², А. С. Волошаненко²

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ

Описується роль даних та технологій ДЗЗ у методиках оцінки невизначеностей балансу парникових газів та емісій вуглецю в задачах оцінки кліматичних змін на регіональному рівні. Показано, що використання даних супутникового спостереження для оцінки невизначеностей, притаманних екологічним, соціально-екологічним та соціально-економічним процесам, що беруть участь у формуванні небезпек, допоможе в оптимізації системного управління екологічними, соціальними та економічними ризиками як на державному, так і на регіональному рівні.

ВСТУП

Оцінка регіональних особливостей кліматичних змін має на меті коректну оцінку відповідних ризиків та загроз. Виходячи із прийнятої більшістю наукової спільноти думки, що кліматичні зміни великою мірою спровоковані антропогенним впливом на середовище [1], слід розглянути питання достовірності оцінок балансу вуглецю і парникових газів, що вимагає, в першу чергу, оцінок невизначеностей, притаманних відповідним методикам. Це дозволить надалі адекватно вирішувати задачі аналізу кліматичних змін, управління ризиками, адаптації та зменшення збитків, зумовлених негативним впливом кліматичних змін [2].

ТРАДИЦІЙНИЙ ПІДХІД

Узагальнений підхід до визначення антропогенних емісій вуглецю. Задачею інвентаризації є оцінити прямий вплив антропогенної діяльності на концентрацію парникових газів в атмосфері через визначення емісій. Зазвичай задача визначення емісій зводиться до оцінки кількості викидів

вуглецю за коефіцієнтами емісій [3]. Однак коефіцієнти емісії вуглецю з достатньою точністю відомі лише для викидів вуглекислого газу. В такому випадку для інвентаризації емісій інших газів, таких як CH_4 , N_2O , NO_x , CO і неметанових вуглеводнів (NMVOC), пов'язаних зі спалюванням відповідного палива, проводиться аналіз і розрахунки по секторах економіки з використанням напівемпіричних залежностей та статистичних даних, а також коефіцієнти емісій цих газів. Викиди цих газів визначають за формулою [3]:

$$E_x = mTK_x, \quad (1)$$

де E_x — величина емісії парникових газів, m — маса використаного палива, T — теплотворне значення палива, K_x — коефіцієнт емісії відповідного газу.

Основними видами палива, які є джерелами емісії згаданих газів, є вугілля, природний газ, нафта (бензин, дизельне паливо) і біомаса (дерева, відходи деревини, деревне паливо). Облік емісії можна вести як за видами палива для всіх секторів економіки, так і по секторах для певного виду палива.

Зазвичай найбільше уваги приділяється викидам двоокису вуглецю та метану. Для визначення

© В. І. ЛЯЛЬКО, Ю. В. КОСТЮЧЕНКО, І. Г. АРТЕМЕНКО,
Л. М. ПОПАДЮК, Р. В. ФЕДИНА, А. С. ВОЛОШАНЕНКО, 2013

маси вуглецю у використаному паливі m_C можна розрахувати за допомогою формули

$$m_C = mT k_C, \quad (2)$$

де m — маса використаного палива; T — теплотворне значення палива, що є критерієм його теплової цінності, тобто переводить масу спаленого палива у кількість теплоти, виділеної при його згорянні; k_C — коефіцієнт емісії вуглецю, який дає фактичний вміст вуглецю у спаленому паливі. Зазначимо, що при згорянні палива окислюється не весь вуглець. Це залежить від ефективності роботи устаткування, тому у математичних моделях слід робити поправку на неповне окислення вуглецю. Для цього використовується коефіцієнт фракції окисленого вуглецю f_C — відношення кількості вуглецю, що згорів, до загальної його кількості в паливі:

$$E_{CO_2} = 44m_C f_C / 12. \quad (3)$$

При цьому слід враховувати, що значна частина енергетичної сировини не перетворюється на енергію. Певна частина палива буде використана як сировина для виробництва інших видів продукції (наприклад пластмаси), або в неенергетичних цілях (виробництво бітуму для дорожнього будівництва). В цих процесах відсутнє окиснення вуглецю (і, таким чином — пряма емісія). Такий вуглець називається нагромадженим і виключається з розрахунків загальної емісії вуглекислого газу. При згорянні деяких видів палива методологія IPCC рекомендує вносити поправку на оцінку нагромадженого вуглецю m_{SC} [3], що рекомендовано робити в рамках підходу:

$$m_{SC} = f_{SC} m_C, \quad (4)$$

де f_{SC} — фракція нагромадженого вуглецю.

Таким чином, загальну емісію вуглекислого газу з внесенням поправки на масу нагромадженого вуглецю і з використанням рівнянь (2) і (3), знаходимо з виразу

$$E_{CO_2} = 44(m_C - m_{SC})f_C / 12. \quad (5)$$

Таким шляхом ми отримуємо можливість визначати антропогенні емісії двоокису вуглецю.

Величина емісій CH_4 , пов'язаних з відповідними витоками (наприклад у гірничодобувній промисловості), дорівнює

$$E_{CH_4} = 0.67 m k_{CH_4}, \quad (6)$$

де m — маса видобутого продукту (наприклад, вугілля в млн тонн), k_{CH_4} — коефіцієнт емісії, рівний об'єму метану (m^3) при видобуванні однієї тонни продукту (вугілля) і залежить від способу видобування. Для перетворення об'єму метану в його масу (Гт) використовується значення густини метану при тиску в одну атмосферу і температурі $20^\circ C$, яка рівна $0.67 \cdot 10^{-6}$ Гт/ m^3 .

Для розрахунку загальної антропогенної емісії в такому випадку можна запропонувати використовувати відносно простий алгоритм:

$$E_{tot} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M k_{nm} \Delta x_{nm}, \quad (7)$$

де M — сектори економіки, N — ділянки території, за якими проводиться розгляд, x — статистичні дані, що використовуються для опису впливів.

За описаним алгоритмом можна розрахувати викиди парникових газів від кінцевого спалювання кожного виду палива. Крім того, зважаючи на те, що дані x (зокрема m , що описує масу видобутого продукту, або спалюваного палива) можуть в загальному випадку розглядатися як функції часу, які описують технологічний і соціально-економічний розвиток регіонів, наведений алгоритм дозволяє прогнозувати викиди парникових газів за відомими умовами майбутнього розвитку (як, наприклад, «сценарії емісій» IPCC).

Врахування невизначеностей антропогенних емісій. Невизначеності, що притаманні описаному підходу, можуть бути значними і залежать від якості використаних статистичних даних про секторальний економічний розвиток. Але при цьому варто зазначити, що ці невизначеності будуть скоріше алеаторичними, тобто такими, що пов'язані радше із неточностями даних, недосконалістю систем збирання і методами обробки інформації.

В такому випадку можна використовувати достатньо прості правила визначення похибок і відповідних невизначеностей відносно різних оцінок. При цьому слід враховувати, що як правило розподіл x не є нормальним, а тому до використання середніх значень слід ставитися з обережністю.

Фіксуємо дві різні (бажано незалежні) оцінки емісій $E_{tot,n}^1$ і $E_{tot,n}^2$ для певного регіону n із множини N у всіх секторах економіки m для всіх досліджуваних типів парникових газів i . В такому випадку для оцінки невизначеності отриманих оцінок можемо записати вираз

$$U_n = (|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|) / (E_{tot,n}^1). \quad (8)$$

А загальна невизначеність для всього регіону N , всіх типів парникових газів дорівнює

$$U_{tot} = \sqrt{\sum_n U_n^2}. \quad (9)$$

Наведений підхід є простим, але має певні обмеження. Він, зокрема, є чутливим до вхідних даних. По-друге, використання методологічно різномірних масивів даних може призвести до великих похибок і показати занижені оцінки достовірності, особливо на значних часових проміжках. Тому при плануванні стратегічних заходів в галузі екологічної безпеки, економічних заходів з впровадження механізмів відшкодування надлишкових викидів вуглецю тощо слід використовувати більш коректні, хоча і складніші алгоритми оцінки достовірності розрахунків.

МЕТОДИ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЕМІСІЙ

Метод перерахунку радіаційних характеристик атмосфери в концентрації CO_2 з використанням даних супутникового спостереження. Як приклад можна навести базовий алгоритм визначення складу атмосфери та алгоритм перерахунку радіаційних характеристик у показники концентрації окремих газів [4–6], який було розроблено та успішно застосовано для сенсора SCIAMACHY. Його застосування дозволяє отримати концентрації CO_2 , CH_4 і O_2 за даними супутникових вимірів [7]. Цей алгоритм отримав назву алгоритму «модифікованих вагових функцій для диференційної оптичної абсорбційної спектроскопії» (Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy — WFM-DOAS).

Метод базується на застосуванні методу найменших квадратів для аналізу (зокрема, даунскейлінгу) обраних вертикальних атмосферних профілів. Параметри визначаються за прямими даними спостереження вертикальних характе-

ристик атмосфери. Логарифм лінеаризованого радіаційного переносу, що визначається моделлю атмосфери та уточнюється за даними спостережень, разом з поліномом $P_i(\mathbf{a})$ приводиться до логарифма відношення виміряного супутником випромінювання, яке пройшло крізь атмосферу, та сонячного випромінювання, тобто до отриманого нормалізованого сонячного випромінювання I_i^{obs} . Загальне рівняння алгоритму WFM-DOAS можна записати у вигляді [5]

$$\sum_{i=1}^m (\ln I_i^{obs} - \ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}))^2 \equiv \|\mathbf{RES}\|^2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Тут модель лінійного переносу випромінювання представлена у вигляді

$$\begin{aligned} \ln I_i^{mod}(\hat{\mathbf{V}}, \hat{\mathbf{a}}) = \\ = \ln I_i^{mod}(\bar{\mathbf{V}}) + \sum_{j=1}^J \left. \frac{\partial \ln I_i^{mod}}{\partial V_j} \right|_{\bar{V}_j} \times (\hat{V}_j - \bar{V}_j) + P_i(\hat{\mathbf{a}}). \end{aligned} \quad (11)$$

Індекс i відноситься до довжини хвилі i -го пікселя зображення. Компоненти V_j вектора \mathbf{V} визначають вертикальні колонки всіх газів, що мають абсорбційні лінії у обраному спектральному вікні (діапазоні зйомки). Як параметри приведення застосовуються характеристики вертикального розподілу V_j та поліноміальні коефіцієнти компонентів вектора \mathbf{a} . Також за параметр вирівнювання використано розподіл температури в атмосфері.

Параметри перерахунку визначаються як мінімум (за методом найменших квадратів) різниці між виміряним випромінюванням ($\ln I_i^{obs}$) та випромінюванням, що задане моделлю алгоритму ($\ln I_i^{mod}$), тобто довжиною вектора \mathbf{RES} (зокрема його компонентами RES_i) для кожного спектрального виміру i одночасно.

Для визначення вмісту вуглецевого газу використовується усереднена по глибині спостереження молярна фракція двоокису вуглецю, перерахована для сухого повітря, та одночасно виміряна фракція кисню. Визначення вмісту кисню значно простіше, позаяк його молярні долі добре відомі і виміряні з достатньою точністю. Таким чином, середня по глибині спостереження концентрація двоокису вуглецю XCO_2 розраховується наступним чином [5, 6]:

$$XCO_2 = \frac{CO_2^{col}}{O_2^{col}/O_2^{mf}} \quad (12)$$

Тут CO_2^{col} і O_2^{col} — отриманий абсолютний вміст CO_2 і O_2 (в молекулах на cm^2), $O_2^{mf} = 0.2095$ — очікувана (осереднена по глибині спостереження) молярна фракція кисню, приведена на сухе повітря.

Таким чином провадиться *перерахунок інтенсивності випромінювання у межах смуги поглинання окремого газу у значення тропосферної концентрації* цього газу. Відокремлення тропосфери проводиться через урахування інших, зокрема температурних показників та врахуванні атмосферного тиску через аналіз аерозолів. Детально методику перерахунку та відповідний алгоритм описано в роботі [5].

Метод перерахунку радіаційних характеристик атмосфери в концентрації CH_4 з використанням даних супутникового спостереження. Схожим чином визначається вміст інших газів, зокрема метану. При цьому в якості додаткових параметрів використовується не тільки вміст кисню, але й вміст двоокису вуглецю [4].

На відміну від описаного на попередньому етапі методу визначення вмісту вуглекислого газу, в цій версії алгоритму WFM-DOAS молярні фракції метану в сухому повітрі визначаються за вмістом CO_2 замість O_2 , що дозволяє зменшити відповідні похибки.

У версії алгоритму WFM-DOAS середня по глибині спостереження концентрація метану XCH_4 розраховується наступним чином [8]:

$$XCH_4 = \frac{CH_4^{col}}{CO_2^{col}/CO_2^{mf}}, \quad (13)$$

де CH_4^{col} і CO_2^{col} — отриманий абсолютний вміст CH_4 і CO_2 (в молекулах на cm^2), CO_2^{mf} — очікувана (усереднена по глибині спостереження) молярна фракція кисню, приведена на сухе повітря. Для CO_2^{mf} використовується константа, оцінена в 370 ppm. Тому нормалізація з вводом вуглекислого газу мало систематизує загальну помилку із зміною усереднених по глибині спостереження молярних фракцій двоокису вуглецю в сухому повітрі. Такий підхід дещо покращує використання площі моделювання CO_2^{mf} , приклад — асиміляція системи детектування вуг-

лецю. Детально методику перерахунку та відповідний алгоритм описано в роботі [8].

ЩОДО МЕТОДИКИ КОНТРОЛЮ ЕМІСІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ СУПУТНИКОВОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Визначення емісій за даними супутникового контролю концентрацій парникових газів. Розподіли атмосферних концентрацій двоокису вуглецю та метану над територією України, отримані за даними супутникових спостережень відповідно до описаних алгоритмів, представлені на рис. 1.

Виходячи з наведених даних про виміряні атмосферні концентрації, можна розрахувати викиди відповідних парникових газів. Найпростіший шлях для оцінки сумарної річної емісії за виміряними концентраціями парникових газів у повітрі може бути визначений як [3, 9]

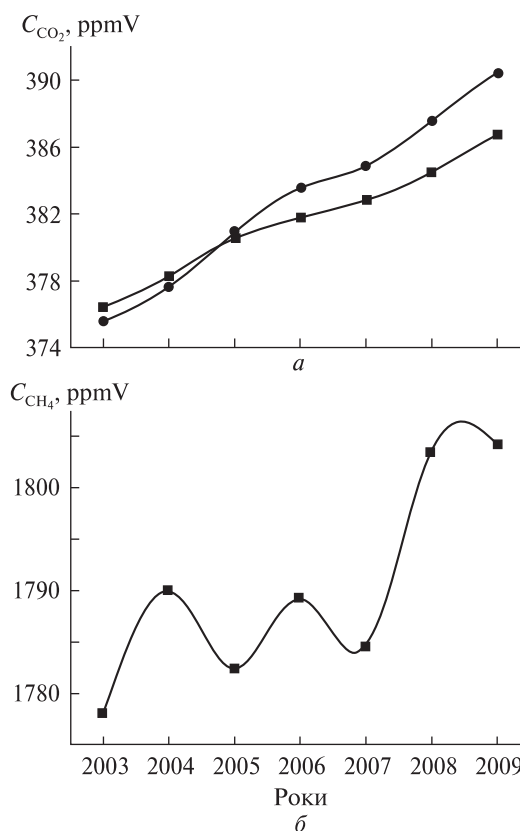


Рис. 1. Динаміка змін концентрації CO_2 (а) і CH_4 (б) парникових газів над територією України за даними супутникового спостереження (точки — дані AIRS, квадратики — дані SCIAMACHY)

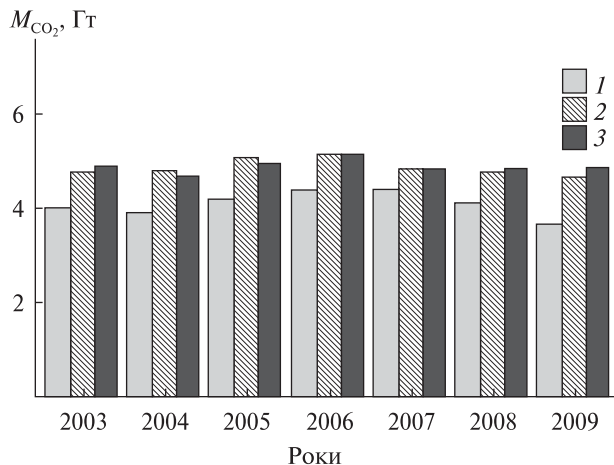


Рис. 2. Порівняння розрахунків емісій M_{CO_2} за даними: 1 — офіційної статистики (антропогенні викиди), 2 — незалежних дослідників (з урахуванням екологічних моделей та моделей вуглецевого циклу), 3 — супутникових спостережень на період 2003 — 2009 рр.

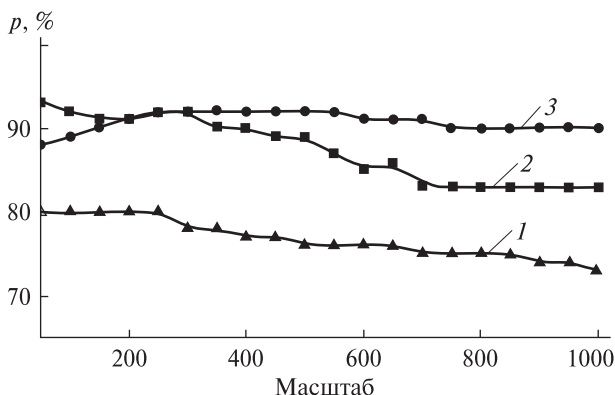


Рис. 3. Значення показників достовірності p оцінок викидів парникових газів, отриманих за даними: 1 — офіційної статистики (антропогенні викиди), 2 — незалежних дослідників (з урахуванням екологічних моделей та моделей вуглецевого циклу), 3 — супутникових спостережень

$$E_i = \sum_i \kappa_i \frac{(C_{cur} - C_{pr}) M_i}{C_{0i}} / t. \quad (14)$$

Тут C_{cur} — поточна середньорічна атмосферна концентрація парникового газу і над певною територією, яка визначається за даними поточних супутникових вимірювань, C_{pr} — попередня середньорічна атмосферна концентрація парникового газу і над певною територією, яка була визначена за даними попередніх супутникових вимірювань,

C_{0i} — середньорічна атмосферна концентрація оцінюваного парникового газу i над певною територією в доіндустріальну еру (визначається за геологічними та історичними даними), M_i — історична маса оцінюваного парникового газу в атмосфері (визначається за геологічними та історичними даними) [10]. Для двоокису вуглецю та метану значення C_0 складають відповідно 275 та 700 ppmv, а значення M_i — $220.89 \cdot 10^{10}$ тонн для CO_2 та $408.94 \cdot 10^{10}$ тонн для CH_4 [11] для сукупної земної атмосфери. Коефіцієнт κ_i визначається з урахуванням тривалості життя парникового газу та його кількості, накопиченої на момент аналізу (для короткострокових прогнозів можна вважати, що для всіх газів $\kappa_i = 1$), t — період усереднення (зазвичай — роки).

Використання цього алгоритму дозволяє проводити поточний контроль національних емісій парникових газів незалежними методами.

Наведені дані дозволяють зробити висновки про важливість врахування процесів, що відбуваються в екосистемах. Вони можуть складати від 19 до 25 % внеску в загальні емісії і мають бути відповідно відображені (див. рис. 2 і 3).

Оцінка невизначеностей розрахунків емісії за різними методиками. Середні показники невизначеності емісій складають за період 2003—2009 рр. близько 36 %, що і визначає економічні ризики на рівні 95—120 млн дол на рік. Застосування даних незалежних експертиз та методик контролю атмосферних концентрацій парникових газів, як показують наведені дані, дозволяє зменшити невизначеності на 20 % за рахунок уточнення моделей кругообігу вуглецю в екосистемах (що мають похибку 11—14 %) та застосування просторово інтегрованих даних ДЗЗ (похибка 7—10 %).

В такому випадку, враховуючи характеристики розподілу даних, можемо записати для оцінки невизначеності модифікований відносно рівняння (8) вираз:

$$U_n = (|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|) \times \left[\frac{\sigma_i \sum_{i,m} \left(\frac{|E_{tot,n}^1 - E_{tot,n}^2|}{2} - \sum_i E_{tot,n}^1 \right)}{CoVar_m} \right]^{-1}. \quad (15)$$

А загальна невизначеність для всього регіону N всіх типів парникових газів може бути розрахована за алгоритмом (9).

Якщо застосувати для оцінки невизначеності алгоритм (15) і (9), то можна отримати середнє значення підвищення достовірності даних, отримуваних традиційними методами (за рахунок зменшення відносної невизначеності), а також оцінок, отримуваних з використанням екологічних та геобіофізичних моделей обігу вуглецю в екосистемах по відношенню до методик ДЗЗ.

Розрахунки показують, що оцінки, які базуються на використанні інтегрованих моделей кругообігу вуглецю, та оцінки, отримані із застосуванням даних ДЗЗ, є значно точнішими. Показник відносної достовірності оцінки емісій парникових газів традиційними методами відносно методик ДЗЗ складає у перерахунку на економічні показники близько 8.3 млн дол/рік в середньому по періоду 2003—2009 рр.

Методи оцінки невизначеностей при аналізі потоків вуглецю. Слід зазначити, що визначальну роль у зменшенні невизначеності при контролі емісій парникових газів відіграє коректний аналіз кругообігу вуглецю та екологічні моделі, тобто формалізовані представлення процесів накопичення та перетворення вуглецевих сполук в екосистемах.

Для визначення похибки при розрахунках потоків вуглецю в моделях повного вуглецевого циклу (і, таким чином, при вивченні достовірності оцінок викидів парникових газів) слід використовувати підхід, що дає можливість оперувати статистично незалежними розподілами випадкових параметрів (отриманих, в тому числі за допомогою методів ДЗЗ).

В роботі [12] запропоновано алгоритм для визначення стандартної похибки m_y^2 потоку вуглецю $Y = f(X_i)$, який визначається як функція випадкового розподілу X_i при $i = 1, 2, \dots, k$:

$$m_y^2 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{dY}{dX_i} m_i \right)^2 + 2 \sum_{i>j} \left(\frac{dY}{dX_i} \right) \left(\frac{dY}{dX_j} \right) r_{ij} m_{X_i} m_{X_j}. \quad (16)$$

Тут r_{ij} — коефіцієнти кореляції між розподілами X_i та X_j .

Запропонований алгоритм дає змогу визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх ком-

понентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Найбільш важливим тут є те, що він дозволяє інтегрувати в єдиний підхід дані супутникового спостереження важливих параметрів екосистем.

Окремо слід оцінити сукупну відносну достовірність даних (інтегрованих до геоінформаційної системи результатів проблемно орієнтованої класифікації земних покривів та результатів аналізу атмосферних концентрацій парникових газів за даними супутникового спостереження, результатів геобіофізичного моделювання вуглецевого балансу з одного боку, та статистичних даних, отриманих традиційними методами: лісове і сільське господарство, інвентаризація, економічний моніторинг тощо — з іншого). Для цього можна використати «індекс придатності», запропонований в роботі [2], який є кількісним виразом відповідності нормованих розподілів:

$$S_{nm} = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x_{nj}^{norm} - x_{mj}^{norm})^2}, \quad x_j^{norm} = \frac{x_j - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}}. \quad (17)$$

Тут q — параметри, за якими проводиться опис; n — ділянки території дослідження; m — набори статистичних даних (наприклад, галузеві статистики); x — зафіксовані значення параметра j .

Цей метод дозволяє оцінити взаємну узгодженість розподілів даних, найбільш коректно поєднати різнорідні дані і, таким чином, мінімувати похибки.

Таким чином, застосування загальних моделей вуглецевого балансу, регіоналізованих за допомогою застосування даних ДЗЗ, дозволяє отримати розрахунки перебігу змін екологічних показників, пов'язаних із змінами клімату, і, в свою чергу, розрахувати на цій основі показники безпеки територій.

Оцінка невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних оцінок екологічних змін. За алгоритмом, описаним у роботі [13], використовуючи дані, наведені в [14—16], можна розрахувати викиди парникових газів від кінцевого спалювання кожного виду палива і, відповідно, використовуючи підхід, наведений в роботах [13, 17, 18], можна оцінити зміни пов'язаних екологічних показників (продуктивності екосистем), зважаючи на прогнозовані зміни кліматичних показників.

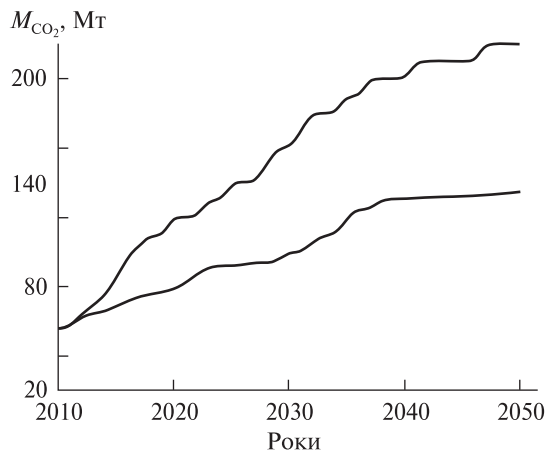


Рис. 4. Розраховані емісії M_{CO_2} викидів для України, уточнені із врахуванням даних супутникових спостережень (найменші та найбільші оцінки)

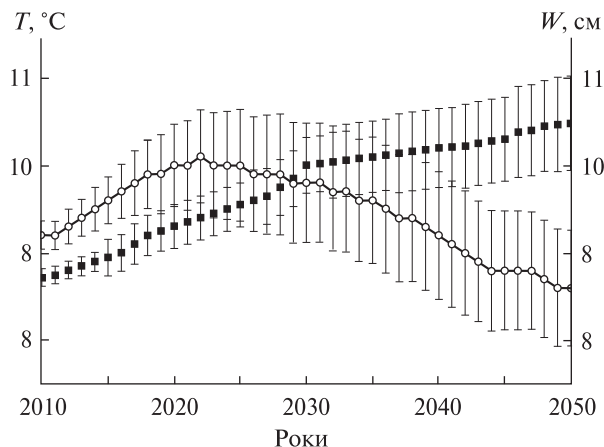


Рис. 5. Розрахункові сценарії змін середньорічних значень температури T (кружечки) та кількості опадів W (квадратики) для території України за умов середніх значень викидів парникових газів на період до 2050 р.

На рис. 4 наведено розраховані за даними [16] відповідно до методики [13] сценарії викидів для України.

Для порівняння слід розглянути глобальні сценарії емісій, які використовуються для розробки глобальних сценаріїв змін клімату. Вони базуються на сценаріях викидів [13], які розраховано на базі аналізу розвитку енергетичної галузі. Як показує аналіз, відносна невизначеність сценаріїв емісій, що використовуються ІРСС для глобальних прогнозів та розробки глобаль-

них кліматичних моделей, складає від 0.32 до 0.86; при цьому показники відносної невизначеності регіонально адаптованих оцінок емісій, що отримані на регіональному масштабі із використанням даних ДЗЗ складає від 0.12 до 0.46. Таким чином, точність прогнозування на регіональному рівні із використанням даних супутникового спостереження є більшою у 1.4—1.7 разів.

Відповідно до цього сценарію можна розрахувати середні значення змін ключових кліматичних показників [19], які надалі будуть використані у моделях екологічних змін [18, 20, 21] (рис. 5).

Також, для порівняння міри невизначеностей розглянемо сценарії, що використовуються для оцінки глобальних змін експертами ІРСС [1]. Аналіз показує, що відносна невизначеність сценаріїв кліматичних змін, розрахованих ІРСС (за показником температури) складає 0.27...0.83; при цьому невизначеність розрахункових сценаріїв змін кліматичних показників для території України за умов середніх розрахованих із використанням даних ДЗЗ значень викидів парникових газів (тобто регіонально адаптованих сценаріїв з використанням даних ДЗЗ) складає 0.12...0.48, тобто в 1.6...1.8 раза менше.

Таким чином, можна стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДЗЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (регіональних емісій і регіональних змін показників кліматичних показників) в середньому у 1.7 раза.

ВИСНОВКИ

На основі методики контролю концентрацій парникових газів засобами ДЗЗ в роботі запропоновано підхід до визначення емісій.

Проаналізовано традиційні підходи до визначення прямого антропогенного впливу на концентрацію парникових газів та вуглецю в атмосфері. Запропоновано метод та алгоритм для врахування невизначеностей при традиційних оцінках антропогенних емісій.

Також проаналізовано методи визначення атмосферних концентрацій парникових газів засобами супутникового спостереження та контролю

емісій. Проведено розрахунки емісій за даними супутникових спостережень, проведено порівняння з офіційними даними. Виявлено різницю за період 2003—2009 рр. в межах 17—23 %.

Запропоновано алгоритм для оцінки невизначеностей розрахунків емісій за різними методиками. Розрахунки за цим алгоритмом показують, що оцінки, які базуються на використанні інтегрованих моделей кругообігу вуглецю та оцінки, отримані із застосуванням даних ДЗЗ є значно точнішими. Показник відносної достовірності оцінки емісій парникових газів засобами ДЗЗ складає в середньому 0.83—0.93, тоді як традиційні методи дають 0.74—0.81.

Було проведено оцінювання невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних оцінок екологічних змін на регіональному рівні у порівнянні із відомими глобальними моделями. Отримані результати дозволяють стверджувати, що використання регіонально адаптованих за даними ДЗЗ моделей і сценаріїв підвищує точність прогнозування розвитку основних процесів, що призводять до небезпечних змін (зокрема, точність прогнозування регіональних емісій і регіональних змін кліматичних показників) в середньому в 1.7 разів.

1. Бунь Р. А., Густі М. І., Дачук В. С. і др. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. — Львів: Укр. академія друкарства, 2004. — 376 с.
2. Buchwitz M., Burrows J. P. Retrieval of CH₄, CO, and CO₂ total column amounts from SCIAMACHY near-infrared nadir spectra: Retrieval algorithm and first results, in: Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere VIII // Proc. SPIE. — 2005. — 5235. — P. 375—388.
3. Buchwitz M., de Beek R., Burrows J. P., et al. Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: Initial comparison with chemistry and transport models // Atmos. Chem. Phys. — 2005. — N 5. — P. 941—962.
4. Buchwitz M., de Beek R., Noël S., et al. Atmospheric carbon gases retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: version 0.5 CO and CH₄ and impact of calibration improvements on CO₂ retrieval // Atmos. Chem. Phys. — 2006. — N 6. — P. 2727—2751.
5. Chandler W., Rapsun M. Modeling and analysis of greenhouse gases emissions in Ukraine: Selecting and Adapting the ENPEP Program to Ukrainian Conditions and Test Modeling // Report PNNL-13874, Pacific, Northwest National Laboratory (USA) and Agency for Rational Energy Use and Ecology (Ukraine). — Kyiv. — 2001. — 44 p.
6. Cubasch U., Hasselmann K., Höck H., et al. Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model // Climate Dynamics. — 1992. — N 8. — P. 55—69.
7. Global Energy Assessment — Toward a Sustainable Future / GEA Writing Team // Cambridge University Press. — Cambridge. — 2012. — 1888 p.
8. Houghton J. Climate change and sustainable energy // Met Office, Hadley Centre. — London. — 2005. — 208 p.
9. Huntingford C., Cox P. M., Lenton T. M. Contrasting responses of a simple terrestrial ecosystem model to global change // Ecol. Modelling. — 2000. — N 134 (1). — P. 41—58.
10. Mearns L. O., Easterling W., Hays C., Marx D. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part I. The uncertainty due to spatial scale // Climatic Change. — 2001. — 172 p.
11. Nakićenović N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios: A special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: University Press, 2000. — 570 p.
12. National greenhouse gas inventory data for the period 1990—2009 // FCCC. — 2011. — 26 p.
13. Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J. and Hanson C. E. (eds) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability — Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge: University Press, 2007. — 987 p.
14. Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D., et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. — 1999. — P. 429—436.
15. Raynaud D., Barnola J. M., Chappellaz J., et al. The ice record of greenhouse gases: a view in the context of future changes // Quatern. Sci. Revs. — 2000. — N 19. — P. 9—17.
16. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reporting Instructions, The Workbook, Reference Manual // IPCC. — 1997. — Vol. 1—3.
17. Schneising O., Buchwitz M., Burrows J. P., et al. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite. Part 1. Carbon dioxide // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — N 8. — P. 3827—3853.
18. Schneising O., Buchwitz M., Burrows J. P., et al. Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite. Part 2: Methane // Atmos. Chem. Phys. — 2009. — N 9. — P. 443—465.
19. Shvidenko A., Schepaschenko D., McCallum I., Nilsson S. Can the uncertainty of full carbon accounting of forest

- ecosystems be made acceptable to policymakers? // *Climatic Change*. — 2010. — N 103. — P. 137—157.
20. *Viner D., Hulme M., Raper S. C. B.* Climate change scenarios for the assessments of the climate change on regional ecosystems // *J. Therm. Biol.* — 1995. — **20**. — P. 175—190.
21. *White T., Jonas M., Nahorski Z., Nilsson S.* Greenhouse gas inventories: Dealing with uncertainty. — Heidelberg: Springer Science+Business Media, 2011. — 343 p.

Стаття надійшла до редакції 27.11.13

*В. І. Лялько, Ю. В. Костюченко, І. Г. Артеменко,
Л. М. Попадюк, Р. М. Федина, А. С. Волошаненко*

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Описывается роль данных и технологий ДЗЗ в методиках оценки неопределенностей баланса парниковых газов и углерода в задачах оценки климатических изменений на региональном уровне. Показано, что использование данных спутникового наблюдения для оценки неопре-

деленностей, свойственных экологическим, социально-экологическим и социально-экономическим процессам, которые участвуют в формировании опасностей, поможет в оптимизации системного управления экологическими, социальными и экономическими рисками как на государственном, так и на региональном уровне.

*V. I. Lyalko, Yu. V. Kostyuchenko, I. G. Artemenko,
L. M. Popadjuk, R. M. Fedyna, A. S. Voloshanenko*

AN UNCERTAINTY ANALYSIS IN THE CLIMATIC CHANGE ESTIMATION PROBLEM ON REGIONAL LEVEL WITH THE USE OF SATELLITE OBSERVATIONS OF ATMOSPHERIC CONCENTRATION OF GREENHOUSE GASES

We consider the role of data and remote sensing methods for the estimation of uncertainty balance of greenhouse gases and carbon emissions in problems of the climate change estimation on the regional level. It is shown that the use of remote sensing data in the uncertainty estimation procedure (in the case of ecological, socio-ecological and socio-economical processes) allows one to optimize the system management of ecological, social and economical risks both on the state and regional level.