УДК 528.88:504.062.2

Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ ТА ФОРМУВАННІ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ТЕРИТОРІЙ ЗА ДАНИМИ ДЗЗ

Аналіз регіональних екологічних і кліматичних змін та пов'язаних із ними загроз на сьогодні є однією з найважливіших проблем, що постають перед суспільством. Оцінка достовірності даних, що використовують для прогнозування подібних процесів, є важливим елементом моделювання і адекватної оцінки загроз та ефективного керування ризиками, пов'язаними з такого роду змінами. Розроблено метод оцінки невизначеностей під час аналізу потоків вуглецю в екосистемах на регіональному рівні. Запропоновано метод оцінки взаємної узгодженості розподілів даних, найкоректнішого поєднання різнорідних даних та мінімізації похибок. Метод ґрунтується на алгоритмі, який дає змогу визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх компонентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Проведено оцінювання невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних з цим оцінок екологічних змін на регіональному рівні у порівнянні із відомими глобальними моделями.

Ключові слова: кліматичні зміни, дистанційне зондування Землі, невизначеності, баланс вуглецю.

Вступ. Задача адекватної оцінки загроз та ефективного керування ризиками, пов'язаними із екологічними і кліматичними змінами, лежить у царині комплексного аналізу та управління безпечним використанням природних ресурсів. Тому її вирішення потребує не тільки застосування складних сучасних математичних методів, а й новітніх технологій отримання даних, до яких належать дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [5]. Стрімкий розвиток методів ДЗЗ, який відбувся за останні десятиліття, привів до появи принципово нових методик збору і обробки даних стосовно земного покриву і процесів, що в ньому відбуваються. Просторово інтегровані спостереження в різних спектральних діапазонах дають змогу з високою достовірністю визначати екологічні й біофізичні параметри земних покривів, аналізувати відповідні показники [12]. При цьому набори отримуваних кількісних параметрів можуть бути інтегровані в сучасні екологічні моделі [4]. Разом з тим з розвитком сучасних математичних методів оцінки екологічного стану з'являється можливість встановити основні вимоги до математичної моделі, за допомогою якої визначатимуться сценарії безпечного використання природних ресурсів під час аналізу загроз і адаптації регіональних систем до кліматичних та екологічних змін [7].

В аналізі регіональних екологічних і кліматичних змін і пов'язаних з ними загроз важливою складовою є оцінка продуктивності рослинного покриву за даними супутникового знімання [5]. Глобальна модель продуктивності рослинного покриву MOD17 на базі даних спектрорадіометра MODIS є широко використовуваною і найвідомішою моделлю, розробленою на базі даних ДЗЗ [15, 10, 20]. Цей продукт є першим регулярним глобальним набором даних, що забезпечує безперервний моніторинг первинної продуктивності рослинного покриву на вкритих рослинністю територіях починаючи з 2000 р. Проте, як і для всіх глобальних моделей, з переходом до оцінок на регіональному рівні важливим аспектом є поява невизначеностей, пов'язаних з низкою умов. Тому важливим елементом покращення регіональних оцінок відповідних параметрів земного покриву є оцінка факторів, що спричинюють невизначеності, та їх внесок у загальну величину невизначеності.

Метод визначення продуктивності рослинного покриву за даними супутникового знімання. Можливість контролю показників продуктивності ґрунтується на уявленні про процеси фотосинтезу. Наземні екосистеми накопичують вуглець через процеси фотосинтезу і втрачають його у вигляді CO_2 через автотрофне (рослини та фотосинтетичні бактерії) і гетеротрофне (гриби, тварини та деякі бактерії) дихання [9]. Загальна кількість вуглецю, який асимілюється рослинним покривом через фотосинтез, отримала назву валової первинної продукції (GPP). Чиста первинна продукція (NPP) є залишком зафіксованого вуглецю після вирахування автотрофного дихання. Значна кількість зафіксованого вуглецю накопичується в живій рослинності та органічній частині ґрунтів, і звільнення цього вуглецю в атмосферу у вигляді CO_2 чи метану може істотно впливати на клімат [9]. Вуглець листової підстилки та ґрунтів також звільняється через гетеротрофне дихання (HR). Різниця між NPP та HR

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

отримала назву чистої екосистемної продукції (NEP). Якщо в екосистемах виникають порушення, такі як пожежі, вируб лісів та ін., може втрачатися значна кількість вуглецю. В результаті чистий екосистемний обмін (NEE) є різницю між NEP та втратами вуглецю унаслідок цих порушень. Накопичений чистий екосистемний обмін представлений запасом вуглецю, що зосереджується переважно в трьох головних вуглецевих пулах: рослинність, підстилка і ґрунти; разом з тим NEE визначає, чим є екосистема – стоком вуглецю чи його джерелом [14].

Супутникові засоби дають змогу отримувати інформацію про розподіл параметрів активності рослинного покриву. Зокрема, продукт MOD17A2 сенсора MODIS є 8-денною та місячною сумою валової первинної продукції і фотосинтетичної продукції (PsnNet). Річні значення GPP і NPP для продукту MOD17A3 отримують підсумовуванням цих двох параметрів за весь рік. Фотосинтетичну продукцію визначають за виразом

$$\text{PsnNet} = \text{GPP} - R_{ml} - R_{mr}, \qquad (1)$$

де R_{ml} і R_{mr} – дихання для підтримки життєдіяльності листя і коренів рослин відповідно. Дихання приросту у 8-денному PsnNet не враховують.

Річну NPP обчислюють за формулою

$$\text{NPP} = \sum_{i=1}^{365} \text{PsnNet} - (R_{mo} + R_g) = X_j, \qquad (2)$$

де R_{mo} – дихання для підтримки життєдіяльності всіх живих частин, за винятком листя і коренів (наприклад сирої деревини); R_g – дихання приросту [20]; X_j – зареєстроване із спостережень за застосованим алгоритмом значення продуктивності NPP за рік *j*.

Модель MOD17 має три джерела вхідних даних. Для кожного пікселя інформацію відносно типу земного покриву отримують з продукту MOD12Q1; добові метеорологічні дані – з моделі DAO (Data Assimilation Office); FPAR і LAI – з продукту MOD15A2.

Невизначеності в MOD12Q1, DAO, MOD15A2 і самому алгоритмі моделі можуть впливати на вихідні дані MOD17. По-перше, достовірність MOD12Q1 становить 70–80 %, і найбільші похибки характерні для подібних класів земного покриву [17]. По-друге, набір метеорологічних даних, що містяться в DAO, не є даними, отриманими за безпосередніми вимірюваннями. Як результат, можуть бути систематичні похибки у певних регіонах. Невизначеності в метеорологічних даних роблять головний внесок у нереалістичні від'ємні значення NPP на деяких невеликих ділянках. Для таких пікселів, що відповідають територіям із суворими кліматичними умовами, переоцінка лише температури, для прикладу, може бути достатньою, щоб отримати від'ємне значення NPP. Вища температура призводить до переоцінки дихання та недооцінки GPP унаслідок вищих значень дефіциту водяної пари (VPD). Як результат, якщо дихання перевищує GPP, можна отримати негативне значення NPP. Отже, алгоритм моделі MOD17 є досить чутливим до вхідних метеорологічних даних. Детальніше ці аспекти обговорені у статті [21].

Попіксельне порівняння даних MOD15A2 з наземними вимірюваннями також має досить слабку кореляцію для LAI, який має тренд до переоцінки для більшості умов [19]. В алгоритмі MOD17 FPAR безпосередньо визначає величину поглинання вуглецю, а LAI відповідає за оцінку дихання; тому переоцінений LAI, отриманий з MOD15A2, може впливати на недооцінку NPP навіть за достатньо точної оцінки FPAR.

Тим не менше, якщо використовувати ці дані, можна з високою ефективністю контролювати продуктивність рослинного покриву на територіях дослідження (рис. 1, 2).

Отримані оцінки, по-перше, можуть бути інтегровані у моделі вуглецевого балансу, що може вплинути на загальну невизначеність розрахунків вуглецевого циклу на регіональному рівні, по-друге, є необхідними під час контролю стану регіональних і локальних екосистем, що перебувають під впливом кліматичних змін. Це дасть змогу підвищити точність прогнозування екологічних і соціоекологічних ризиків, пов'язаних із кліматичними змінами. Наприклад, визначення ризику пожежі також ґрунтується на оцінках динаміки мертвої и живої речовини в рослинному покриві, яка може бути з певною точністю оцінена за показниками вуглецевого балансу [11].

Крім того, отримані результати можуть бути використані для оцінок невизначеностей розрахунків продуктивності за даними ДЗЗ на регіональному рівні, що є важливим як для екологічних задач, так і для задач визначення емісій парникових газів.

Метод оцінки невизначеностей розрахунків продуктивності рослинного покриву за даними ДЗЗ. Для оцінки відносної невизначеності оцінок продуктивності рослинного покриву за даними ДЗЗ пропонуємо порівняти значення, отримані за різної часової інтеграції: а саме річні суми середньомісячних оцінок і середньорічні оцінки. Різниця отриманих оцінок за результатами багаторічних спостережень території, що включає кілька регіонів, дає змогу визначити основні тенденції зміни показників помилок, а також системні (незмінні) помилки, складові невизначеностей, що корелюють із зафіксованими змінами регіональних кліматичних показників (тобто є відгуком регіональних екосистем на сезонні варіації кліматичних параметрів), проаналізувати складову невизначеності, яка відповідає за структуру земле-

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

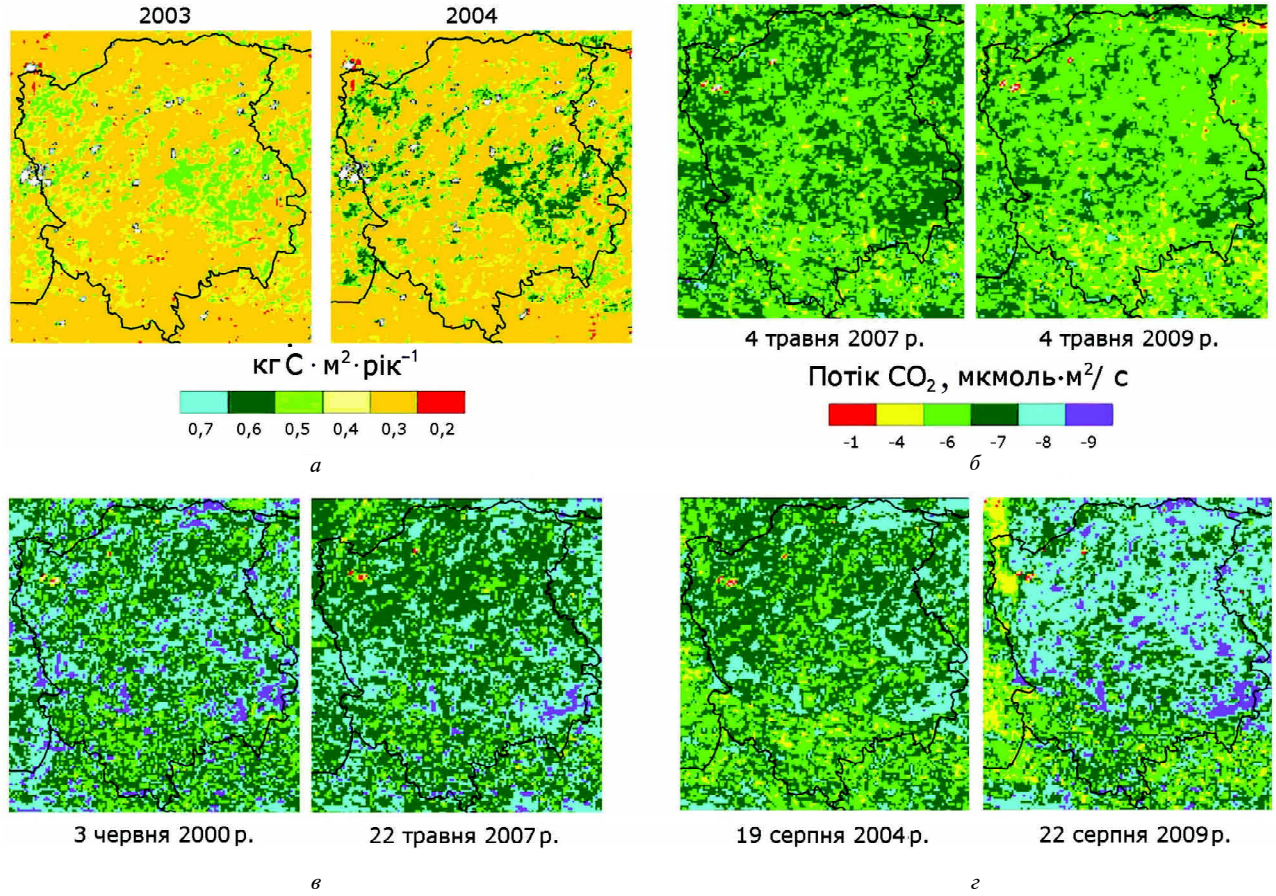

Рис. 1. Продуктивність рослинного покриву і потоки вуглецю, розраховані за даними супутникових спостережень MODIS 2000, 2007, 2009 для території Волинської обл.: *а* – NPP рослинного покриву за даними MODIS; *б–г* – потік вуглецю між атмосферою та рослинністю

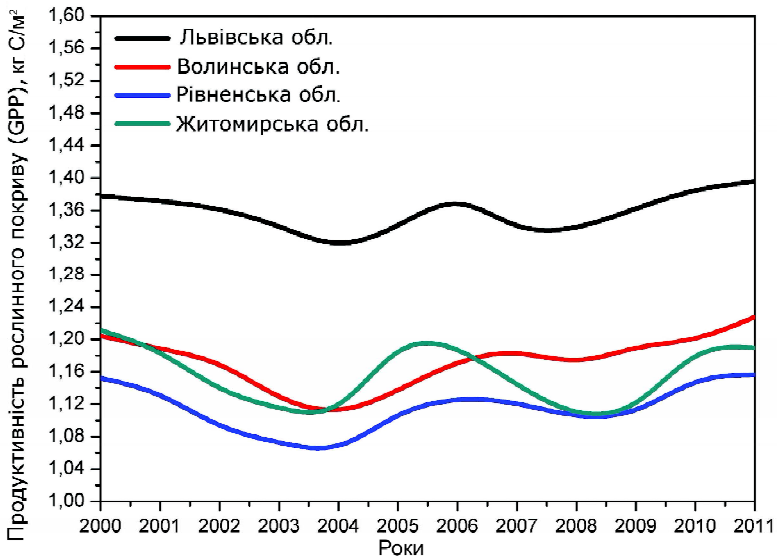

Рис. 2. Розрахунок показників продуктивності рослинного покриву (GPP) за даними супутникового знімання MODIS 2000–2011 рр.

користування (міжсезонну змінюваність земних покривів, неточність оцінки земних покривів, тощо).

Для окремого регіону m за місяць i, що належить до року спостережень j із інтервалу k, помилка визначення продуктивності U_m може бути оцінена як різниця між зафіксованим із спостережень значенням продуктивності за рік X_j та розрахованим за середньомісячних спостережень значень x_{ij} за алгоритмом

$$U_m = \frac{\sum_j \frac{1}{k}\left(\left(\sum_i x_{ij}\right) - X_j\right)}{< x_{ij} >}. \qquad (3)$$

В такому разі загальна невизначеність оцінки продуктивності за всіма регіонами m множини (території досліджень) M може бути оцінена, як

$$U_{\text{tot}} = \sqrt{\sum_m U_m^2}. \qquad (4)$$

Наведений алгоритм було застосовано для аналізу показників продуктивності Львівської, Волинської, Рівненської та Житомирської областей (басейни річок Західний Буг і Прип'ять, територія Українського Полісся) за 2000–2011 рр.

Було оцінено загальну середню по регіону похибку оцінювання продуктивності рослинного покриву.

Як видно з рис. 3, середня похибка становить від 15,7 до 18,2 %, по окремих регіонах – від 10,8 (з переважно гомогенними земними покривами, невеликою антропогенною компонентою і, таким чином, малим впливом сезонних варіацій) до 22,4 % (в регіонах, що характеризуються високими показниками продуктивності, з великим антропогенним навантаженням і великою гетерогенністю земних покривів).

Підхід до аналізу компонент сукупної невизначеності розрахунків продуктивності рослинного покриву. Розглянемо загальну невизначеність як сукупність невизначеностей, що виникають під час оцінювання стану системи за показником продуктивності. При цьому вважатимемо, що вектори істинного стану системи **x** в момент спостереження k (j, $j \in k$) визначають відповідно до загального закону [3]:

$$x_k = R_k x_{k-1} + A_k u_k + w_k, \qquad (5)$$

де R_k – "матриця еволюції системи", тобто формалізований опис довгострокових керівних впливів на розподіли показників продуктивності, що у досліджуваному випадку є функціоналами кліматичних процесів, які формують впливи на вектор $\mathbf{x}_{k-1}$ в момент $k-1$; A_k – "матриця керівних впливів", тобто індукованих навантажень на систему, які впливають на параметри продуктивності, тобто зміни землекористування та розподіли рослинного покриву по території дослідження, що вимірюються як впливи u_k на вектор **x**; w_k – випадковий процес, який визначає розподіл "шумів", тобто спотворення виміряних значень, що визначає сукупність помилок сенсорів, приладів, алгоритмів і методів визначення показників продуктивності. В такому разі невизначеність оцінки стану системи за показником продуктивності можна описати так [2]:

$$\delta x = \delta\hat{x}\frac{\partial R}{\partial t} + \delta\hat{x}\partial A + \delta w, \qquad (6)$$

де $\hat{x}$ – середні значення вимірюваного показника за ансамблем реалізацій; t – поточний час.

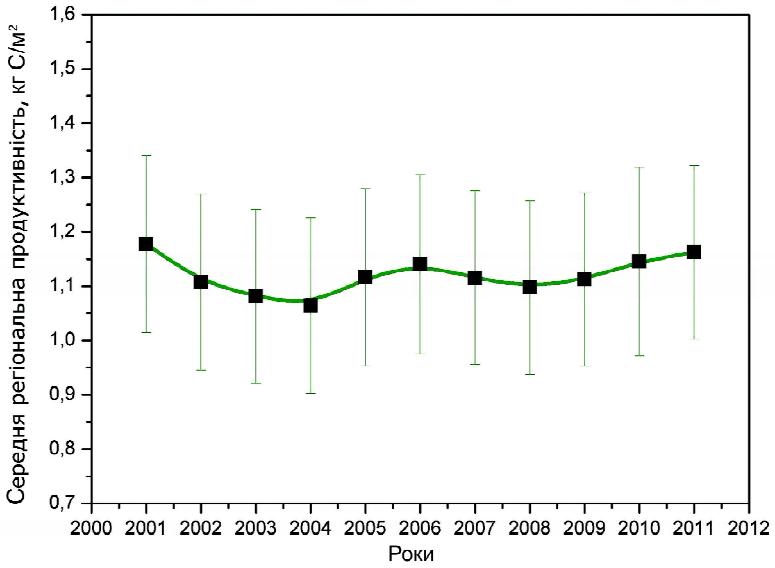

Рис. 3. Розподіл середньої по регіону (Львівська, Волинська, Рівненська та Житомирська області) продуктивності рослинного покриву за період 2001–2011 рр., за даними супутникового знімання MODIS із визначенням абсолютної похибки оцінювання

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

Визначимо формалізований опис довгострокових керівних впливів на показники продуктивності як функціонал

$$R = f(s)\cdot F(T,W,R) + \Delta, \qquad (7)$$

де $f(s)$ – функція щільності рослинного покриву (зведений показник зрідження, або деградації листяного покриву, віднесений до кущистості або розгалуженості крони); $F(T, W, R)$ – функціонал продуктивності, загалом залежний від розподілів температури, вологонасичення і радіації (практично може бути визначений за даними спостережень, зокрема ДЗЗ, або апроксимований певним розподілом окремих параметрів); Δ – коефіцієнт невизначеності [8]. Якщо вважати функцію щільності рослинного покриву гладкою однорідною алгебричною функцією, то її поведінка може бути однозначно описана за допомогою спектральних вегетаційних індексів, і для опису керівних впливів можна без втрати узагальнення записати апроксимаційне рівняння типу

$$\delta\hat{x}\frac{\partial R}{\partial t} \to \frac{\sum_i \left(x_i - \hat{x}_i\right)\sum_j \left(\delta T_j - \delta\hat{T}\right)_j}{\sqrt{\left(\sum_i x_i - \hat{x}_i\right)^2 \left(\sum_j \delta T_j - \delta\hat{T}_j\right)^2}} \times \\ \times \frac{\partial\left(1 - \dfrac{\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} T_n}{T^{\max}}\right)\left(1 - \dfrac{1}{T^{\max} - \dfrac{1}{N}\sum_n T^{\max}}\right)}{\partial t}. \qquad (8)$$

Тут T_n – температура повітря протягом періоду спостережень; $T^{\max}$ – максимальна температура протягом періоду спостережень; δT – "зведена температура":

$$\delta T = \left(1 - \frac{\dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} T_n}{T^{\max}}\right)\left(1 - \frac{1}{T^{\max} - \dfrac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} T^{\max}}\right).$$

Показник "зведеної температури" є статистичним оптимальним корелятором розподілів показників вразливості екосистем і ризиків, зокрема, продуктивності та кліматичних параметрів, який був розрахований в результаті аналізу довгострокових багатовимірних корелятивних зв'язків у мультиваріативних розподілах за допомогою еліптичних копула-функцій [6]. Таким чином, апроксимуємо кліматичні впливи змінами ходу температури. Це звичайно не є абсолютно коректним, але вибір саме цього показника може бути пояснений тим, що виміри температур є найдостовірнішими з усіх показників. Крім того, за умов високої і іноді надлишкової зволоженості досліджуваного регіону за результатами статистичного аналізу не вдалося визначити сталі достовірні багатовимірні кореляції в мультиваріативних розподілах кількості опадів. Тому до запропонованого алгоритму входять показники температур як статистично найдостовірніші розподіли вимірюваних величин.

Індуковані навантаження на систему опишемо як впливи внаслідок змін землекористування та змінення земних покривів. Відповідні невизначеності пов'язані із недосконалим урахуванням розподілу земних покривів, змін землекористування (як протягом року, так і міжрічними змінами), а також недосконалим урахуванням антропогенного навантаження на регіональному рівні.

Оцінимо такий тип невизначеності (тобто невизначеність, пов'язану із неточністю класифікації самого об'єкта спостереження) через сукупну відносну достовірність даних.

Для цього використаємо "індекс придатності", запропонований в [16], який є кількісним виразом відповідності нормованих розподілів класифікацій земних покривів за супутниковими та наземними калібрувальними даними:

$$\delta\hat{x}\partial A = \frac{\sum_i \left(x_i - \hat{x}_i\right)\sum_j \left(x_j^{\text{norm}} - \hat{x}_j^{\text{norm}}\right)}{\sqrt{\left(\sum_i x_i - \hat{x}_i\right)^2 \left(\sum_j x_j^{\text{norm}} - \hat{x}_j^{\text{norm}}\right)^2}} \times \\ \times \left(1 - \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{p,q}\left(\frac{x_p - x_p^{\min}}{x_p^{\max} - x_p^{\min}}\right)\left(\frac{x_q - x_q^{\min}}{x_q^{\max} - x_q^{\min}}\right)^2}\right). \qquad (9)$$

Тут q – ділянки території дослідження; p – набори статистичних даних (наприклад, наземні калібрувальні виміри, галузеві статистики тощо); x – зафіксовані значення досліджуваного параметра; x^{norm} – "нормалізований індекс придатності":

$$x_{\text{norm}} = \left(\sum_{p,q}\left(\frac{x_p - x_p^{\min}}{x_p^{\max} - x_p^{\min}}\right)\left(\frac{x_q - x_q^{\min}}{x_q^{\max} - x_q^{\min}}\right)^2\right)^{1/2}.$$

Цей метод дає змогу оцінити взаємну узгодженість розподілів даних, найкоректніше поєднати різнорідні дані і, таким чином, мінімізувати похибки.

Розподіл невизначеностей, які виникають через методичні похибки під час вимірювання векторів станів системи, тобто варіації випадкового процесу w_k, що визначає сукупність помилок сенсорів, приладів, алгоритмів і методів визначення показників продуктивності, визначимо за виразом

$$\delta w = \sqrt{\sum_i^n \left(\Delta x_i \frac{\partial F}{\partial x}\right)^2} + \nu'. \qquad (10)$$

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

Тут $F(x)$ – обчислювана величина за послідовністю вимірювань показника x (x_1, x_2, ... , x_n), тобто $F = F(x_1, x_2, ... , x_n)$; ν' – невизначена помилка, яку інтерпретуємо як похибку невідомої природи, що притаманна будь-яким вимірам. Величина $\frac{\partial F}{\partial x}$ і, відповідно, $\sqrt{\sum_i^n \left(\Delta x_i \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2}$ можуть бути розраховані за даними оцінок точності алгоритмів MOD17 FPAR і MOD15A2, детально обчислених і представлених фахівцями NOAA [21, 18]. Ґрунтуючись на даних [13, 18], вважаємо розподіл невизначеностей приблизно постійним – від 0,045 до 0,065.

Таким чином, загальне рівняння для оцінки складових невизначеності під час визначення продуктивності рослинного покриву можна записати у вигляді

$$\frac{\sum_j \frac{1}{k} \left(\left(\sum_i x_{ij} \right) - X_j \right)}{< x_{ij} >} =$$

$$= \frac{\sum_i \left(x_i - \hat{x}_i \right) \sum_j \left(\delta T_j - \delta \hat{T}_j \right)}{\sqrt{\left(\sum_i x_i - \hat{x}_i \right)^2 \left(\sum_j \delta T_j - \delta \hat{T}_j \right)^2}} \times$$

$$\times \frac{\partial \left(1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} T_n}{T^{\max}} \right) \left(1 - \frac{1}{T^{\max} - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} T^{\max}} \right)}{\partial t} +$$

$$+ \frac{\sum_i \left(x_i - \hat{x}_i \right) \sum_j \left(x_j^{\text{norm}} - \hat{x}_j^{\text{norm}} \right)}{\sqrt{\left(\sum_i x_i - \hat{x}_i \right)^2 \left(\sum_j x_j^{\text{norm}} - \hat{x}_j^{\text{norm}} \right)^2}} \times \quad (11)$$

$$\times \left(1 - \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{p,q} \left(\frac{x_p - x_p^{\min}}{x_p^{\max} - x_p^{\min}} \right) \left(\frac{x_q - x_q^{\min}}{x_q^{\max} - x_q^{\min}} \right)^2} \right) +$$

$$+ \sqrt{\sum_i^n \left(\Delta x_i \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2} + \nu'.$$

За цим рівнянням можна оцінювати окремі компоненти невизначеності при визначенні показників продуктивності рослинного покриву за даними супутникового спостереження.

Слід зазначити, що для перерахунків на балансові показники вуглецю це рівняння може бути з точністю до константи зведеним до форми, запропонованої в роботі [16], як алгоритм для визначення стандартної похибки m_y^2 потоку вуглецю $Y = f(X_i)$, якій обчислюють як функцію випадкового розподілу X_i при $i = 1, 2, ... , k$:

$$m_y^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{dY}{dX_i} m_i \right)^2 + 2 \sum_{i>j} \left(\frac{dY}{dX_i} \right) \left(\frac{dY}{dX_j} \right) r_{ij} m_{X_i} m_{X_j} , \quad (12)$$

де r_{ij} – коефіцієнти кореляції між розподілами X_i та X_j.

Це може бути продемонстровано за допомогою моделей, запропонованих у публікації [1]. За алгоритмом можна визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх компонентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Найважливішим є те, що він дає змогу інтегрувати в єдиний підхід дані супутникового спостереження основних параметрів екосистем.

Відмінність запропонованого підходу від алгоритму [16] полягає в тому, що при можливості кількісного оцінювання окремих компонент невизначеності, пов'язаних із ключовими факторами природного та антропогенного впливу на рослинний покрив, можна значно підвищити точність прогнозування параметрів циклу вуглецю, регіональних кліматичних параметрів, продуктивності локальних екосистем, а також підвищити достовірність оцінок регіональних екологічних ризиків.

Надалі за описаним алгоритмом було розраховано показники невизначеності та оцінено внесок окремих компонент у конкретні супутникові вимірювання (рис. 4).

Таким чином, невизначеність оцінювання продуктивності рослинного покриву за даними супутникового спостереження становить від 0,138 до 0,152. Постійною компонентою (алеаторичною невизначеністю) можна вважати похибку, пов'язану із неточністю роботи сенсора, недосконалістю алгоритму (зокрема, похибку перерахунку показників, отриманих із певною просторовою та радіометричною розрізненістю, у біофізичні індекси) та методики моніторингу (інтегрування даних знімань, отриманих в неоптимальний час для певної території), яка дорівнює в середньому 0,05 (від 0,045 до 0,065). Ця компонента є постійною і не може бути редукована користувачем.

Змінна компонента, яка відповідає коливанням регіональних кліматичних показників, становить у середньому від 0,02 до 0,035, вона може бути редукована у разі використання регіональних розрахунків кліматичних змінних.

Значна компонента невизначеності – від 0,053 до 0,074 – зумовлена недосконалим урахуванням розподілу земних покривів, змін землекористування (як протягом року, так і міжрічними змінами), антропогенного навантаження на регіональному рівні. Цей тип невизначеності має назву епістемічної. Зменшення цієї невизначеності по-

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

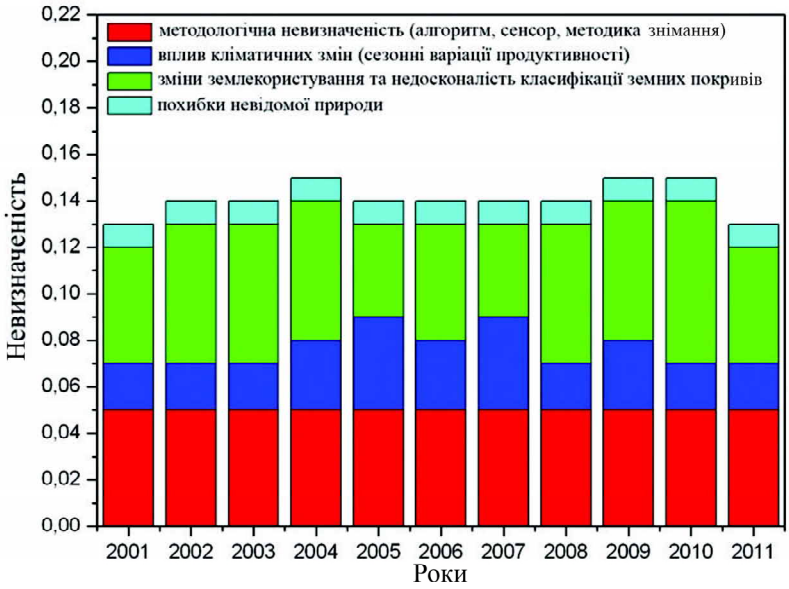

Рис. 4. Оцінка компонент невизначеності продуктивності рослинності за даними ДЗЗ

требує вдосконалення моделей земних покривів і, головним чином, проведення наземних калібрувальних і завіркових робіт.

Крім того, існує похибка величиною близько 0,01–0,005, походження якої є невідомим.

Таким чином, можна стверджувати, що інтеграція моделювання енергомасообміну в природних системах і проблемно-орієнтованого аналізу супутникової інформації та використання наземних калібрувальних і завіркових робіт у межах полігонів на території досліджень дає змогу редукувати до 55–65 % похибки оцінювання продуктивності рослинного покриву.

Висновки. Розроблено метод оцінки невизначеностей під час аналізу потоків вуглецю в екосистемах на регіональному рівні. Запропоновано метод оцінки взаємної узгодженості розподілів даних, найкоректнішого поєднання різнорідних даних і мінімізації похибок. Метод ґрунтується на алгоритмі, за яким можна визначити похибку оцінки потоків вуглецю в усіх компонентах системи за всіма даними, наявними для аналізу. Найважливішим є те, що він дає змогу інтегрувати в єдиний підхід дані супутникового спостереження важливих параметрів екосистем.

Проведено оцінювання невизначеностей сценаріїв емісій та пов'язаних з цим оцінок екологічних змін на регіональному рівні у порівнянні із відомими глобальними моделями. Згідно з отриманими результатами, 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) у середньому в 1,7 раза.

Запропоновано алгоритм оцінки показників невизначеності спостережень показників продуктивності рослинного покриву за даними супутникових спостережень. Запропоновано метод оцінки окремих компонент невизначеності оцінок продуктивності рослинного покриву за даними супутникових спостережень.

Середню невизначеність оцінювання продуктивності рослинного покриву за даними супутникового спостереження було оцінено в межах від 0,138 до 0,152. Крім того, за результатами аналізу компонент невизначеності оцінювання регіональних показників продуктивності рослинного покриву за даними ДЗЗ зроблено такий висновок: інтеграцією моделювання енергомасообміну в природних системах, проблемно-орієнтованого аналізу супутникової інформації та використання наземних калібрувальних і завіркових робіт [5] у межах полігонів на території досліджень можна редукувати до 55–65 % похибки оцінювання.

Важливим висновком є те, що точність методики інтерпретації супутникових знімків з метою класифікації земних покривів є критичною в задачах оцінки вуглецевого балансу територій. Класифікація в таких задачах передбачає визначення не лише розподілу типів рослинності, а й параметрів фотосинтезу, евапотранспірації, первинної продукції, інших показників продуктивності рослинного покриву, визначення стресів рослинності тощо. При цьому критичну роль відіграють методи крос-калібрування, наземної завірки і калібрування даних супутникових спостережень.

Подяки. Автори висловлюють подяку всім, хто сприяв проведенню цього дослідження, зокрема Міжнародному інституту прикладного системного аналізу (IIASA) за внесок, який був зроблений в рамках спільного з Національною академією наук України проекту "Комплексне моделювання управління безпечним використанням продовольчих, водних і енергетичних ресурсів з метою сталого соціального, економічного і екологічного розвитку".

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

1. *Інформаційні* технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Бунь Р.А., Густі М.І., Дачук В.С. [та ін.]; за ред. Р.А. Буня. – Львів: Укр. академія друкарства, 2004. – 376 с.
2. *Kamo T.* Теория возмущений линейных операторов. – М.: Мир, 1972. – 420 с.
3. *Aoki M.* Optimization of stochastic systems: topics in discrete-time systems. – New York; London, 1967. – 424 p.
4. *Bartell S.M.* Ecological risk estimation. Boca Raton / Bartell S.M., Gardner R.H., O'Neill R.V. – FL: Lewis Publ., 1992. – 252 p.
5. *Earth* systems change over Eastern Europe / Eds P.Y. Groisman, V.I. Lyalko. – Kyiv: Akademperiodyka, 2012. – 487 p.
6. *Embrechts P.* Modeling Dependence with Copulas and Applications to Risk Management / P. Embrechts, F. Lindskog, A. McNeil // Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance / Ed. S.T. Rachev. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – Chap. 8. – P. 329–384.
7. *Ermoliev Y.* Systemic risk and security management / Yu. Ermoliev, D. von Vinterfeldt. – Managing Safety of Heterogeneous Systems, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. – P. 19–49.
8. *WMO* Guide to Agrometeorological Practices. Chap. 5. / R. Gommes, H.P. Das, L. Mariani [et al.]. – Agrometeorological Forecasting, 2007. – 70 p. – Current version downloadable from http://www.agrometeorology.org/fileadmin/insam/repository/gamp_chapt5.pdf
9. *Heimann M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks / M. Heimann, M. Reichstein // Nature. – 2008. – V. 451. – P. 289–292.
10. *User's* Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) / F.A. Heinsch, M. Reeves, P. Votava [et al.] // Products NASA MODIS Land Algorithm. Version 2.0. – 2003. – Dec. 2.
11. *Janisch J.E.* Successional changes in live and dead wood carbon stores: implications for net ecosystem productivity / J.E. Janisch, M.E. Harmon // Tree Phys. – 2002. – V. 22. – P. 77–90.
12. *Spectral* reflectance indices as indirect indicators of ecological threats / Yu. Kostyuchenko, I. Kopachevsky, M. Yuschenko [et al.] // Sustainable Civil Infrastructures – Hazards, Risk, Uncertainty / Eds Phoon K.K., M. Beer, S.T. Quek & S.D. Pang. – Singapore: Res. Publ., 2012. – P. 557–562. – doi:10.3850/978-981-07-2219-7 P227.
13. *Morisette J.T.* A framework for the validation of MODIS land products / J.T. Morisette, J.L. Privette, C.O. Justice // Remote Sensing of Environment. – 2002. – V. 83. – P. 77–96.
14. *Contribution* of increasing CO_2 and climate change to the carbon cycle in China's ecosystems / Q. Mu, M. Zhao, S.W. Running [et al.] // J. Geophys. Res. – 2008. – V. 113. – G01018.
15. *MODIS* daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17) / S.W. Running, R. Nemani, J.M. Glassy, P. Thornton // Algorithm Theoretical Basis Document. Vers. 3.0. – 1999. – Apr. 29.
16. *Can* the uncertainty of full carbon acconting of forest ecosystem be made acceptable to policymakers? / A. Shvidenko, D. Schepaschenko, I. McCallum, S. Nilsson / Eds T. White, M. Jonas, Z. Nahorski, S. Nilsson / Greenhouse gas inventories: Dealing with uncertainty. – Heidelberg: Springer Science+Business Media, 2011. – 343 p.
17. *The MODIS* Land Cover and Land Cover Dynamics Products / A. H. Strahler, M. Friedl, X. Zhang [et al.] // Presentation at Remote Sensing of the Earth's Environment from TERRA. – L'Aquila, Italy, 2002.
18. *Investigation* of product accuracy as a function of input and model uncertainties: case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR Algorithm / Y. Wang, Y. Tian, Y. Zhang [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2001. – V. 78. – P. 296–311.
19. *Evaluation* of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland / Y. Wang, C. E. Woodcock, W. Buermann [et al.] // Ibid. – 2004. – V. 91. – P. 114–127.
20. *Improvements* of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set / M. Zhao, F.A. Heinsch, R.R. Nemani, S.W. Running // Ibid. – 2005. – V. 95. – P. 164–176.
21. *Zhao M.* Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses / M. Zhao, S.W. Running, R.R. Nemani // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – G01002. – doi:10.1029/2004JG000004

Державна установа "Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", Київ, Україна
E-mail: movchan@casre.kiev.ua

Надійшла до редакції 29.04.2013 р.

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус

Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, И.Г. Артеменко, Ю.Г. Билоус

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ФОРМИРОВАНИИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВАНИИ ДАННЫХ ДЗЗ

Анализ региональных экологических и климатических изменений и связанных с ними угроз на сегодня является одной из важнейших проблем, стоящих перед обществом. Оценка достоверности данных, используемых при прогнозировании подобных процессов, – важный элемент моделирования и адекватной оценки угроз, а также эффективного управления рисками, связанными с такого рода изменениями. Разработан метод оценки неопределенностей при анализе потоков углерода в экосистемах на региональном уровне. Предложен метод оценки взаимной согласованности распределений данных, наиболее корректного сочетания разнородных данных и минимизации погрешностей на основании алгоритма, которой позволяет определить погрешность оценки потоков углерода во всех компонентах системы по всем данным, доступным для анализа. Проведено оценивание неопределенности сценариев эмиссий и связанных с этим оценок экологических изменений на региональном уровне в сравнении с известными глобальными моделями.

Ключевые слова: климатические изменения, дистанционное зондирование Земли, неопределенности, баланс углерода.

Yu.V.Kostyuchenko, D.M.Movchan, I.G.Artemenko, Yu.G.Bilous

UNCERTAINTIES IN ESTIMATION OF THE VEGETATION PRODUCTIVITY AND THE FORMATION OF CARBON BALANCE OF THE TERRITORIES USING REMOTE SENSING

Analysis of regional environmental and climate changes and related risks is one of the major issues facing the society at the moment. Assessments of the reliability of the data used for predicting such processes are an important part of modeling and adequate assessment of the hazards and effective management of the risks associated with such changes. We have developed a method for estimating the uncertainty in the ecosystems carbon fluxes analysis at the regional level. A method for estimating the mutual consistency of data distributions, the most correct combination of heterogeneous data and minimization of errors has been proposed. The algorithm allows to determine the carbon fluxes estimation errors for all components of the system and for all data used for analysis. Uncertainty of emissions scenarios and related assessments of environmental change at the regional level in comparison with the known global models have been evaluated.

Keywords: climate changes, remote sensing, uncertainties, carbon balance.

© Ю.В. Костюченко, Д.М. Мовчан, І.Г. Артеменко, Ю.Г. Білоус