

УДК 528.88:(551.588.6:546.26)(477-15)

Д. М. Мовчан

Державна установа «Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ

ОЦІНКА ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ (ЗАХІДНЕ ПОЛІССЯ) НА ОСНОВІ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Аналізується динаміка біофізичних параметрів лісового покриву на основі даних дистанційного зондування території України (Західного Полісся) для оцінки інтенсивності поглинання вуглецю лісовим покривом. Аналізувались сезонні коливання основних біофізичних параметрів (NDVI, EVI, LAI, FPAR, ET, GPP та NPP) з 2000 по 2011 рр., отриманих на основі даних MODIS. Виявилось, що сезонні зміни параметрів рослинного покриву тісно пов'язані з сезонним розвитком рослинності протягом вегетаційного сезону. Проаналізовано коливання метеорологічних умов в дані періоди. Оцінювався кореляційний зв'язок між GPP і NPP та різними вегетаційними параметрами і кліматичними чинниками. Було розраховано та проаналізовано ефективність поглинання води (WUE) рослинним покривом як відношення GPP до евапотранспірації, та ефективність поглинання вуглецю як відношення NPP/GPP для порівняння з WUE.

ВСТУП

На сьогодні кліматичні та екологічні зміни, що відбуваються в земних системах, є надзвичайно важливими і являють собою значні виклики для всього людства [8, 9]. Такі зміни дуже тісно пов'язані з глобальним вуглецевим циклом [3]. Тому оцінка та аналіз сучасного стану, динаміки та просторового поширення стоків та джерел вуглецю є надзвичайно важливим завданням. Лісовий покрив є одним з найважливіших наземних стоків вуглецю і відіграє значну роль в зменшенні його концентрації в атмосфері. Кліматичні зміни значною мірою можуть впливати на продуктивність лісів, їхній видовий склад, частоту та інтенсивність порушень, які впливають на інтенсивність поглинання вуглецю лісовим покривом (рис. 1). Такі зміни (перш за все температури та кількості опадів) впливають на земний покрив через зміни в енергетичному та водному балансах та зміни в біогеохімічних циклах (вуглецевий, азотний та ін.). Тому вивчення

сучасного стану та динаміки параметрів лісового покриву на регіональному рівні може бути досить корисним для покращення нашого розуміння і уточнення регіональних та глобального циклів вуглецю.

На сьогодні методи, направлені на вивчення стану земного покриву, можуть бути поділені на три групи. Перша група — наземні вимірювання. Ці методи забезпечують хорошу точність даних, проте характеризуються точковими вимірюваннями. Для покриття значної території потрібно мати добре розвинену мережу вимірювальних станцій. Зазвичай дані методи є досить корисними для досліджень на локальному рівні, проте вони не дозволяють робити глобальні оцінки.

Друга група методів — дистанційне зондування, що забезпечують дані з меншою точністю і потребують валідації, проте вони можуть покривати значні території. Вони можуть бути корисними для досліджень на регіональному та глобальному рівнях. Методи дистанційного зондування забезпечують постійний і систематичний моніторинг параметрів рослинного покриву та екосистем і відіграє все більшу роль в оцінці

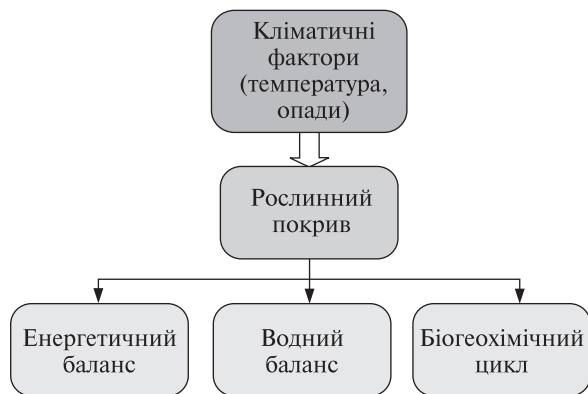


Рис. 1. Взаємозв'язок земних систем з кліматичними змінами

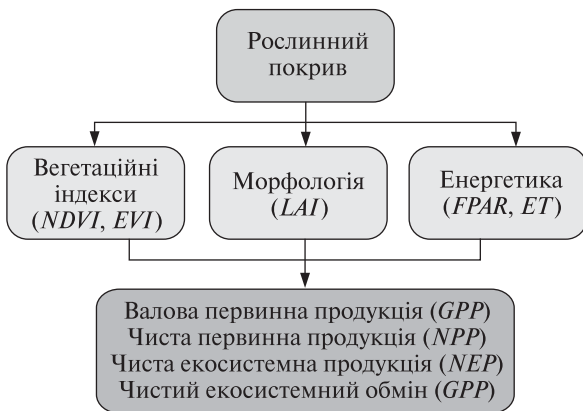


Рис. 2. Основні параметри рослинного покриву, що можуть бути оцінені методами дистанційного зондування і які використовуються для оцінки продуктивності рослинного покриву

продуктивності рослинного покриву (рис. 2) [4, 16, 19, 20].

Третя група методів — моделювання. На сьогодні ми маємо велику кількість розроблених різноманітних моделей, що описують продуктивність рослинного покриву та інших параметрів земного покриву. Це, наприклад, процесні [21], динамічні [17] та інші [2] глобальні моделі чистої первинної продуктивності. Звичайно, всі моделі є певними наближеннями, що впливає на кінцеві результати, проте ці методи можуть бути досить корисними у випадку, коли певних даних немає. Найкраще, коли всі методи вимірювань та оцінки використовуються одночасно і доповнюють один одного.

Як приклад такого об'єднання в останнє десятиліття широкого розповсюдження набуло моделювання біологічної продуктивності на основі даних ДЗЗ [15, 21, 25, 26]. Продукт MODIS, що містить дані оцінки первинної продуктивності наземної рослинності (MOD17) є широко використовуваною і найбільш відомою моделлю, розробленою на базі даних ДЗЗ [7, 19, 26]. Даний продукт є першим регулярним глобальним набором даних, що забезпечує неперервний моніторинг первинної продуктивності рослинного покриву на вкритих рослинністю територіях.

Алгоритм MOD17 забезпечує оперативний розрахунок валової (*GPP*) та чистої (*NPP*) первинної продуктивності на глобальному рівні на основі даних, отриманих з сенсора MODIS, встановленого на супутниковій платформі EOS. Даний продукт складається з двох субпродуктів: MOD17A2, що вміщує дані 8-денної композиції *GPP* і чистого фотозинтезу (PsnNet) та MOD17A3, що вміщує річні оцінки *GPP* та *NPP*. Ці дані є у вільному доступі і можуть бути отримані через Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG) (<http://www.ntsg.umd.edu>) чи через EROS Data Center Distributed Active Archive Center (EDC DAAC).

Дане дослідження сфокусоване на: 1) збирання, оцінювання та аналізування даних різних параметрів рослинного покриву, продуктивності українських лісів та кліматичних чинників; 2) пошук та оцінка залежностей між цими параметрами, 3) аналіз динаміки та трендів для українських лісів. Результати цих досліджень є важливими для покращення нашого розуміння, як кліматичні чинники та інші умови навколишнього середовища можуть впливати на продуктивність лісового покриву та ролі лісів як вуглецевого стоку. Вони також можуть бути корисними для прогнозування реакції лісів на різні сценарії кліматичних змін в майбутньому.

ДАНІ ТА ТЕРИТОРІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Територія дослідження розташовується в українській частині Західного Полісся на межі Рівненської та Житомирської областей. Географічні координати ділянки лежать у межах 50°47'—51°22' N та 26°57'—27°24' E. Рослинний покрив

дослідної території представлений переважно хвойними лісами з домінуванням світлої сосни (*Pinus silvestris*) та певними вкрапленнями мішаних сосново-дубових лісів (*Pino-Quercetia*). Грунти в основному глинисто-піщані дернові з вкрапленням торфових ґрунтів. Річна усереднена кількість опадів в регіоні складає 600—700 мм. Фотосинтетично-активна радіація протягом вегетаційного сезону складає 1600—1700 МДж/м². Середня місячна температура повітря для липня складає близько 18 °С [1].

В даному дослідженні було використано дані з двох ресурсів (табл. 1). Перший (дані ДЗЗ) — продукти MODIS, які містять оцінки цілого ряду параметрів рослинного покриву: вегетаційного індексу нормалізованої різниці (*NDVI*), покращеного вегетаційного індексу (*EVI*), індексу листової поверхні (*LAI*), частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації (*FPAR*), евапотранспірації (*ET*), валової первинної продуктивності (*GPP*) та чистої первинної продуктивності (*NPP*). Всі ці дані доступні з 8- чи 16-денним розділенням. Для *ET*, *GPP* і *NPP* є також усереднені місячні і річні оцінки. Просторове розділення складає 1 км.

Другий ресурс даних — Всесвітня метеорологічна організація (WMO), що забезпечує наземні вимірювання метеорологічних показників. Це оцінки мінімальної, максимальної, середньодобової температури повітря та кількості опадів. Було зібрано і проаналізовано набір даних за 12 років (з 2000 по 2011 рр.). Оцінка проводилася лише для активного вегетаційного сезону (середина квітня — середина жовтня).

КОРОТКИЙ ОПИС ПАРАМЕТРІВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ

Теоретична основа для емпірично визначених вегетаційних індексів отримана на базі вивчення типових сигнатур спектрального відбиття листя. Коефіцієнт відбивання ρ радіації зеленим листям у видимому діапазоні є досить низьким в результаті значного поглинання фотосинтетично активними пігментами, з максимумами поглинання в синьому (470 нм) та червоному (670 нм) діапазонах. В ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) відбувається розсіювання радіації (відби-

вання та пропускання) з незначним поглинанням, у спосіб, що залежить від структурних особливостей покриву (індексу листової площі (*LAI*), кута розміщення листя, морфології листя). Як результат, різниця між коефіцієнтами відбивання радіації у червоному (ρ_{red}) та ближньому інфрачервоному (ρ_{NIR}) діапазонах є досить чутливою до кількості зеленої біомаси і може бути використана для оцінки щільності рослинного покриву. Максимум відношення ρ_{red}/ρ_{NIR} спостерігається над територіями, щільно вкритими рослинним покривом, тоді як мінімум — над розрідженим покривом чи непокритими територіями. При низькій та середній щільності рослинного покриву контраст red/NIR забезпечується змінами як у червоному, так і у ближньому інфрачервоному діапазонах, тоді як при значній щільності лише зміни в NIR-діапазоні впливають на зростання контрасту, оскільки поглинання в червоному діапазоні досягає точки насичення за рахунок значного поглинання хлорофілом.

Вегетаційний індекс нормалізованої різниці (*NDVI*) відображає нормалізовану різницю співвідношення коефіцієнтів відбиття в червоному

Таблиця 1. Набір усереднених даних, що використовувалися в дослідженні

Параметр	Інтервал усереднення
<i>Дані ДЗЗ (MODIS)</i>	
Вегетаційний індекс нормалізованої різниці (<i>NDVI</i>)	16 днів
Покращений вегетаційний індекс (<i>EVI</i>)	16 днів
Індекс листової поверхні (<i>LAI</i>)	8 днів
Частка поглинутої фотосинтетично-активної радіації (<i>FPAR</i>)	8 днів
Евапотранспірація (<i>ET</i>)	8 днів, місяць, рік
Валова первинна продуктивність (<i>GPP</i>)	8 днів, місяць, рік
Чиста первинна продуктивність (<i>NPP</i>)	8 днів, місяць, рік
<i>Наземні дані WMO</i>	
Середньодобова температура T_{cp}	доба
Максимальна температура T_{max}	доба
Мінімальна температура T_{min}	доба
Кількість опадів W	доба

та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах [18]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}},$$

де ρ_{red} , ρ_{NIR} — коефіцієнти відбиття в червоному та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах відповідно. При розрахунку *NDVI* використовуються перший (580—680 нм — червоний) та другий (720—1000 нм — NIR) спектральні канали MODIS.

Основою для мінімізації впливу атмосфери є використання різниці між синім і червоним спектром відбивання для оцінки рівня впливу атмосфери. Ця концепція базується на властивостях аерозолів по-різному розсіювати випромінювання з різними довжинами хвиль. Загалом розсіювання в синьому діапазоні відбувається більш інтенсивно у порівнянні з червоним діапазоном. Зі зростанням концентрації аерозолу в атмосфері ця різниця теж збільшується. Дана інформація використовується для врахування впливу аерозолу в атмосфері.

EVI включає в собі дану концепцію мінімізації атмосферного впливу через індекс резистентності атмосфери *ARVI* разом з урахуванням впливу яскравості ґрунтів на *VI* через індекс *SAVI*. Додатково *EVI* розділяє впливи ґрунтового фону і атмосфери на сигнал від рослинного покриву [19]:

$$EVI = G \cdot \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L},$$

де ρ_x — повністю чи частково відкориговані від атмосферного впливу (для релеївського розсіювання та поглинання озоном) коефіцієнти відбивання земної поверхні, L — поправка на фон земного покриву для корекції нелінійної різниці розсіяння покривом NIR- та red-випромінювання, C_1 та C_2 — коефіцієнти аерозольної корекції (що використовують синій спектральний діапазон для корекції впливу аерозолів на червоний спектральний діапазон), G — коефіцієнт масштабування. Прийняті значення коефіцієнтів, що використовуються в алгоритмі MODIS при розрахунку *EVI*, дорівнюють: $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $G = 2.5$.

Індекс *LAI* листової поверхні є відношенням площі верхньої листової поверхні до площі зем-

ного покриву (для широколистяних рослин), чи площі проекції поверхні хвої до площі земного покриву (для хвойних) для даної конкретної території. *LAI* безпосередньо визначає структуру покриву і може бути використаний для прогнозування первинної продуктивності рослинного покриву та урожайності. Велика кількість моделей екосистемних процесів використовують *LAI* як вхідну змінну. *LAI* може бути вимірний наземними методами безпосереднім вимірюванням площі листової поверхні чи непрямыми вимірюваннями, такими як напівсферичне фотографування чи з використанням оптичних інструментів. Проте для оцінок *LAI* над значними територіями найбільш придатними є дані дистанційного зондування.

Частка поглинутої фотосинтетично-активної радіації (*FPAR*) визначається як частка фотосинтетично-активної радіації, що була поглинута зеленою рослинністю. *FPAR* широко використовується в екосистемному моделюванні, оскільки має важливе значення для обміну енергією, водою та вуглецем між землею поверхнею та атмосферою. Оподи та температура — найголовніші фактори, що визначають *FPAR*. Вона є важливим параметром для визначення продуктивності біомаси, оскільки розвиток рослинного покриву залежить від швидкості, з якою сонячна енергія поглинається рослинністю. *FPAR* може бути виміряна наземними методами за допомогою портативних вимірювальних приладів чи за допомогою методів дистанційного зондування (для значних територій) [5].

КОРОТКИЙ ОПИС ПРОДУКТИВНОСТІ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ І АЛГОРИТМУ МОДЕЛІ MOD17

Наземні екосистеми накопичують вуглець через процеси фотосинтезу і втрачають його як CO_2 через автотрофне (рослини та фотосинтетичні бактерії) і гетеротрофне (гриби, тварини та деякі бактерії) дихання [6]. 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 дихан-

ня. Значна кількість зафіксованого вуглецю накопичується в живій рослинності та органічній частині ґрунтів, і вивільнення цього вуглецю в атмосферу як CO_2 чи метану може мати значний вплив на клімат [6]. Вуглець листової підстилки та ґрунтів також вивільняється через гетеротрофне дихання (HR). Різниця між NPP та HR отримала назву чистої екосистемної продукції (NEP). Якщо в екосистемах виникають порушення, такі як пожежі, вирубки лісів та ін., може втрачатися значна кількість вуглецю. В результаті ми отримуємо чистий екосистемний обмін (NEE) як різницю між NEP та втратами вуглецю внаслідок 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, чи є екосистема стоком вуглецю, чи його джерелом [12].

Продукт MOD17A2 є 8-денною сумою валової первинної продукції і фотосинтетичної продукції (PsnNet). Річні значення GPP та NPP для продукту MOD17A3 отримуються сумуванням цих двох параметрів за весь рік. Фотосинтетична продукція визначається як

$$PsnNet = GPP - R_{mi} - R_{mr},$$

де R_{mi} і R_{mr} — частина, що витрачається на дихання для підтримки життєдіяльності листя і коренів рослин відповідно. Дихання приросту не враховується в 8-денному PsnNet. Річна NPP визначається як

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

де R_{mo} — частина, що витрачається на дихання для підтримки життєдіяльності всіх живих частин за виключенням листя і коренів (наприклад сирої деревини), R_g — частина для дихання приросту [26].

Модель MOD17 має три джерела вхідних даних. Для кожного пікселя інформація про тип земного покриву отримується з продукту MOD12Q1, добові метеорологічні дані отримуються з моделі DAO (Data Assimilation Office), оцінки $FPAR$ і LAI отримуються з продукту MOD15A2. Невизначеності в MOD12Q1, DAO, MOD15A2 і самому алгоритмі моделі можуть впливати на вихідні дані MOD17.

По-перше, достовірність MOD12Q1 лежить у межах 70—80 %, і найбільші похибки характерні для подібних класів земного покриву [22]. По-друге, набір метеорологічних даних, що містяться в DAO, не отримано шляхом безпосередніх вимірювань, внаслідок чого можуть мати місце систематичні похибки для певних регіонів. Невизначеності метеорологічних даних роблять головний внесок в нереалістичні значення NPP на деяких невеликих ділянках. Для таких пікселів, що відповідають територіям з суворими кліматичними умовами, переоцінка лише температури, для прикладу, може бути достатньою, щоб отримати негативне значення NPP . Вища температура призводить до переоцінки дихання і недооцінки GPP внаслідок вищих значень дефіциту водяної пари (VPD). У результаті можна отримати негативне значення NPP . Іншими словами, алгоритм моделі MOD17 є досить чутливим до вхідних метеорологічних даних. Детальніше ці аспекти були обговорені в роботі [27].

Попіксельні дані MOD15A2 досить слабо корелюють з даними наземних вимірювань для LAI , який має тренд до переоцінки для більшості умов [23]. 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 при достатньо точній оцінці $FPAR$.

РЕЗУЛЬТАТИ

Динаміка продуктивності рослинного покриву, вегетаційних параметрів та метеорологічних чинників. Було проаналізовано набір даних за 12 років (2000—2011 рр.) для даних частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації, індексу листової площі, EVI , $NDVI$, евапотранспірації, валової первинної продукції та чистої первинної продукції (рис. 3—6). Аналіз сезонної динаміки параметрів провадився для періоду активного вегетаційного сезону (дні року 105...289).

Як і очікувалося, всі параметри мають чітку сезонну динаміку, яка добре корелює з сезонним розвитком рослинного покриву. Проте в окремі роки деякі параметри мають нетипово високі чи низькі значення. Так, значення $FPAR$

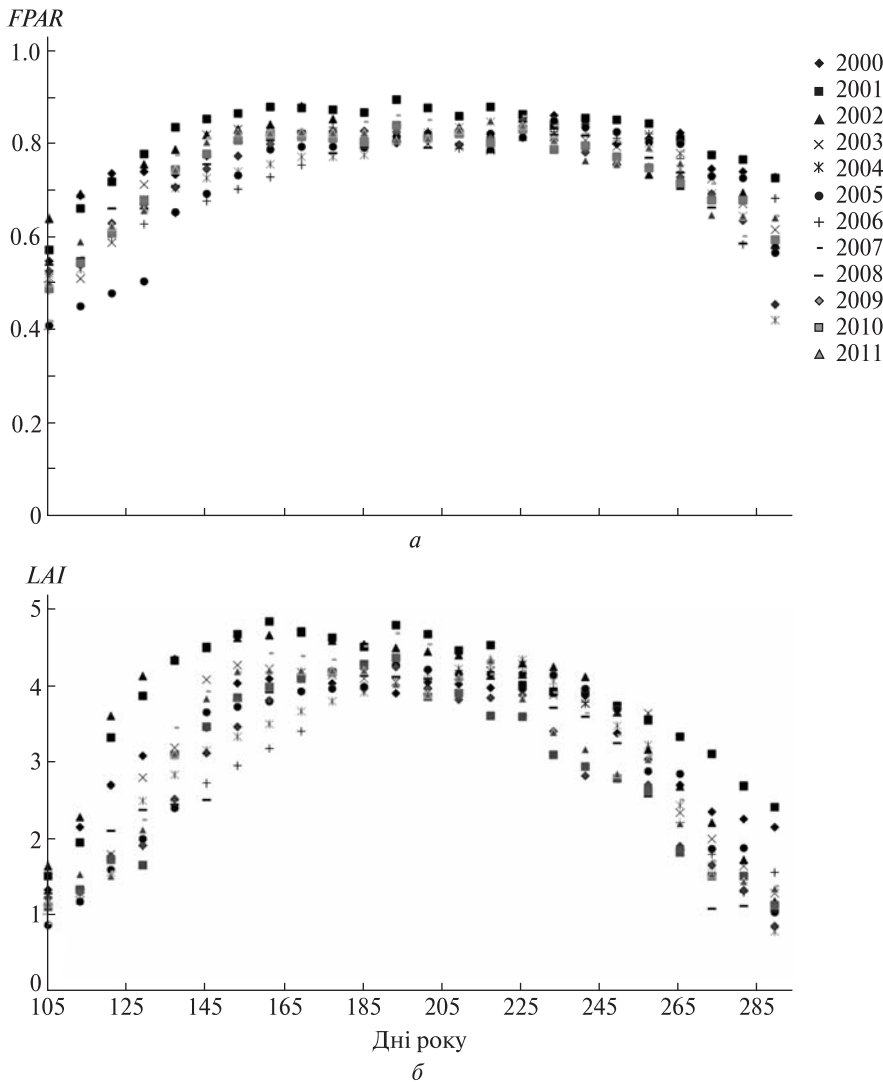


Рис. 3. Сезонна динаміка: а — частки поглинутої фотосинтетично-активної радіації, б — індексу листової площі

на початку 2001 р. та 2002 р. приблизно на 6 % перевищують середні значення. На початку 2005 р. ці значення були нетипово низькими. Це може пояснити різним температурним режимом на початку вегетаційного сезону. Тепла і рання весна (2000, 2001 та 2002 рр.) сприяла інтенсивнішому розвитку рослинного покриву і зростанню біомаси. Це призвело до зростання *LAI* і *FPAR*. Холодна і пізня весна (2005 р.) спричинила зворотний ефект.

Сезонні коливання евапотранспірації, *GPP* та *NPP* з 8-денним інтервалом показали подібну динаміку (рис. 5). Сезонні коливання величин евапотранспірації лежать у межах від 0.5 кіло-

грамів водяної пари на квадратний метр за добу ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{доба})$) на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 3—4 $\text{кг}/(\text{м}^2\text{доба})$ протягом літнього періоду (дні року 169...233).

Сезонні значення *GPP* лежать у межах від 2—4 грамів вуглецю на квадратний метр за добу ($\text{г}/(\text{м}^2\text{доба})$) на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 7—9 $\text{г}/(\text{м}^2\text{доба})$ протягом літнього періоду (дні року 169...233).

Сезонні значення *NPP* знаходяться в межах від 2—3 $\text{г}/\text{м}^2(\text{м}^2\text{доба})$ на початку та в кінці вегетаційного сезону (дні року 105, 289) до 5—6 $\text{г}/(\text{м}^2\text{доба})$ протягом літнього періоду (дні року 169...233).

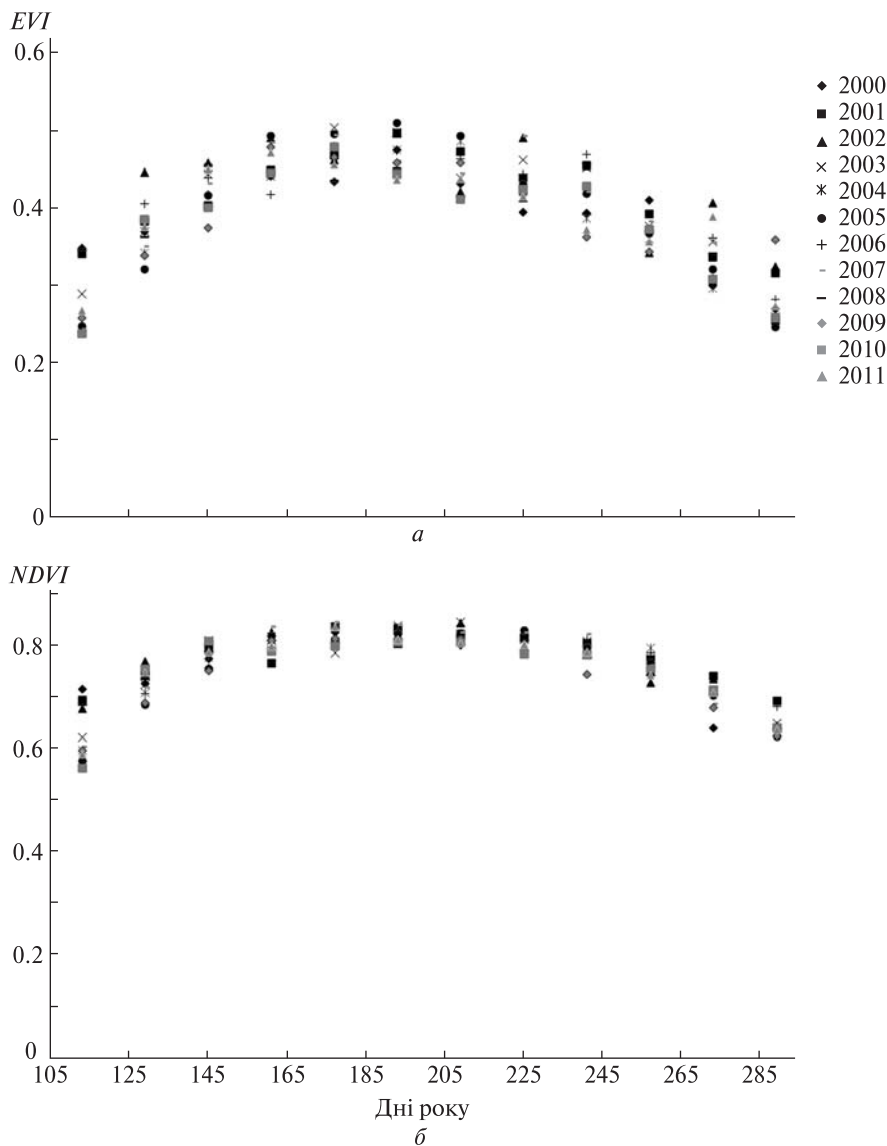


Рис. 4. Сезонна динаміка: а — індексу EVI, б — індексу NDVI

Видно, що значення $GPP \approx 5...6$ і $NPP \approx 2...3$ г/(м²доба) для літніх періодів 2002 та 2007 рр. значно нижчі, ніж у інші роки. Як було показано в роботі [24], GPP і NPP сильно залежать від коливань вегетаційних і метеорологічних показників. Тому для покращення нашого розуміння коливань GPP і NPP необхідно проаналізувати коливання метеорологічних показників для відповідної території дослідження.

Аналіз сезонних коливань максимальних і середніх температур повітря (рис. 6, а, б) показав також чітку сезонну динаміку цих параметрів.

Разом з тим у 2001, 2002 та 2007 рр. мали місце нетипово спекотні і сухі літні періоди. Особливо тривалою була посуха в 2002 р., чим можна пояснити значне зниження продуктивності рослинного покриву в цей період.

Аналіз сезонних коливань кількості опадів (рис. 6, в) показав, що опади не мають чіткої сезонної залежності. Більшість даних мають рівномірне розподілення протягом вегетаційного сезону виключаючи деякі екстремальні значення.

Наступним кроком був аналіз даних річної продуктивності рослинного покриву для тери-

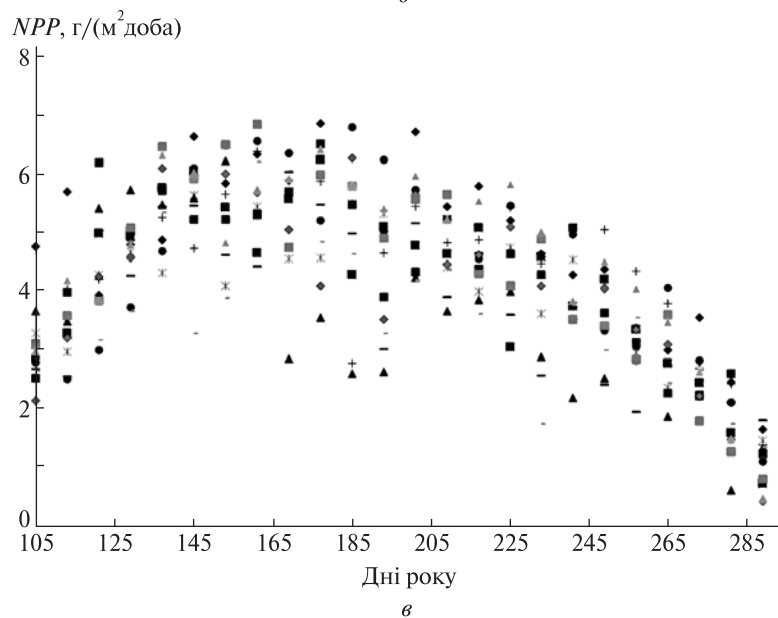
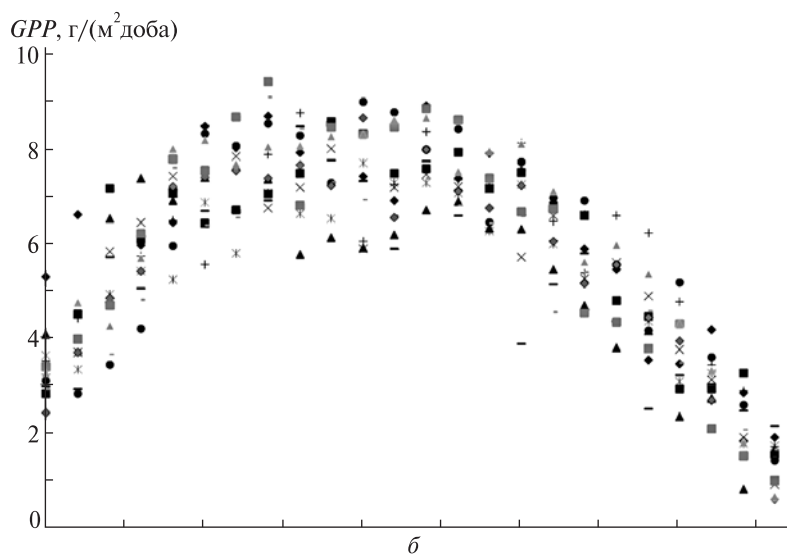
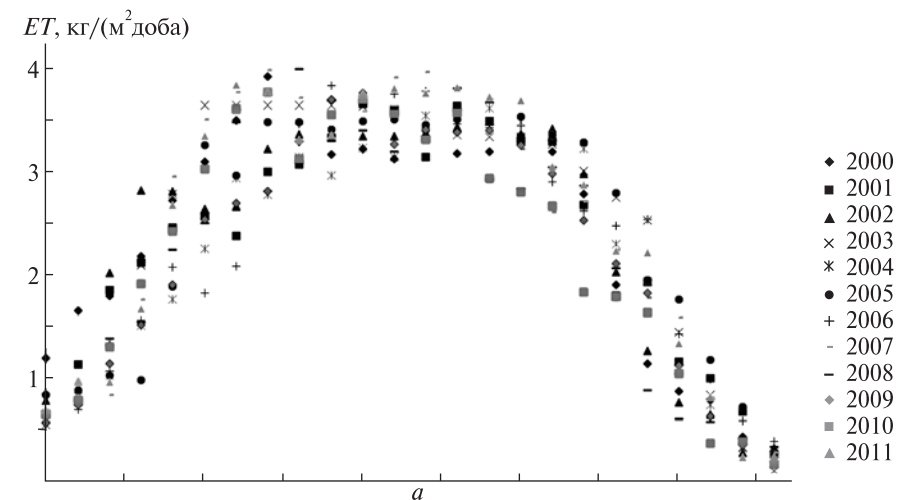


Рис. 5. Сезонна динаміка: a — евапотранспірації, b — валової первинної продукції GPP , v — чистої первинної продукції NPP

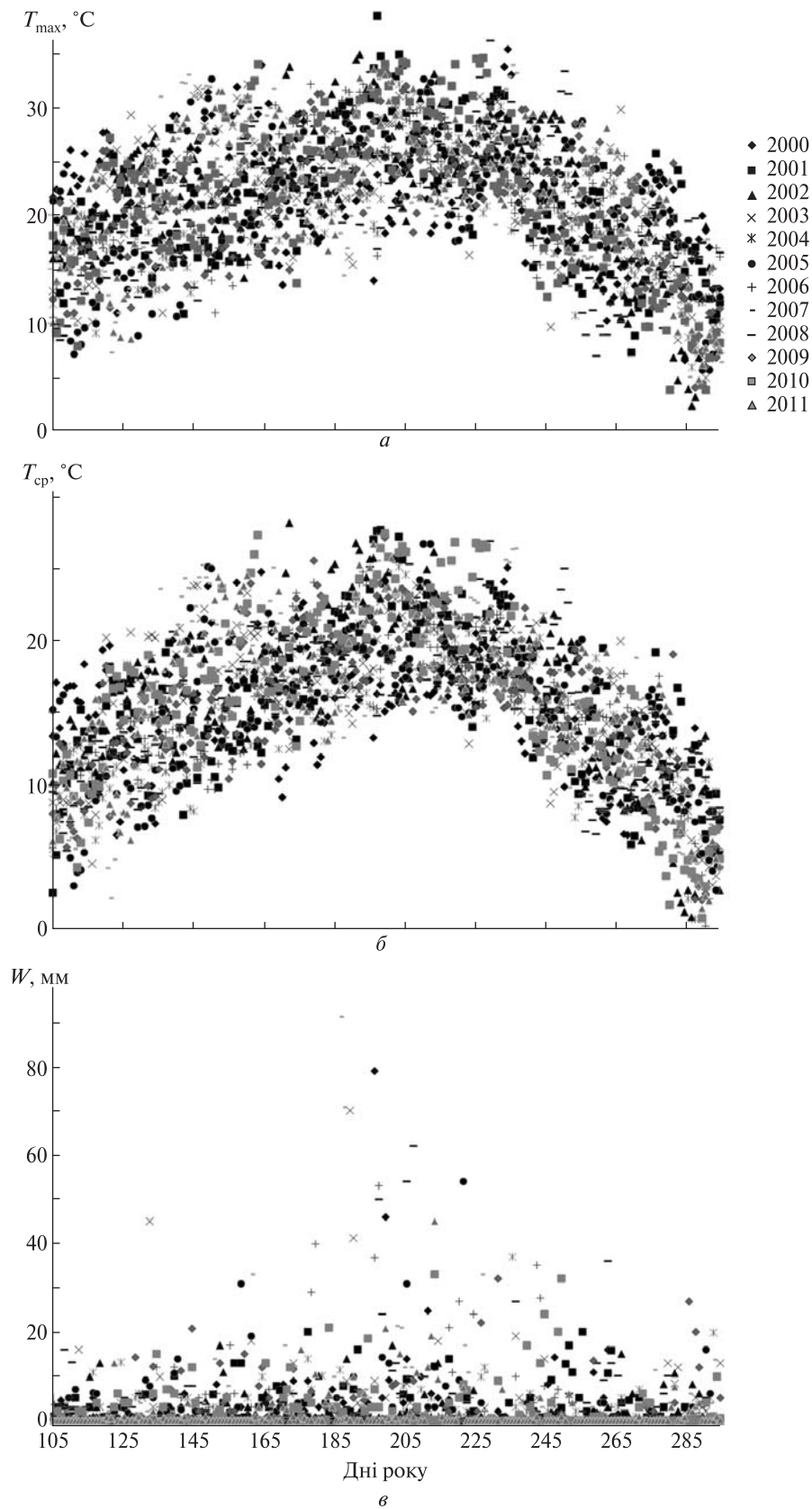


Рис. 6. Сезонна динаміка: a — максимальної температури повітря T_{\max} , δ — середньої температури повітря T_{cp} , ν — кількості опадів W для дослідного регіону

торії дослідження (табл. 2). Результати показали коливання продуктивності лісових територій в різні роки, проте без чіткої тенденції. Але ми можемо виділити два роки, коли простежувалися мінімальні значення продуктивності лісів. Це посушливі 2002 та 2007 рр.

Взаємозв'язок продуктивності лісів з вегетаційними параметрами та метеорологічними чинниками. Оцінка кореляції *GPP* та *NPP* з різноманітними вегетаційними параметрами та кліматичними чинниками (рис. 7, 8) показали існування залежності між цими параметрами.

Показник *GPP* досить добре корелює з *NDVI*, *EVI* та *LAI* ($r^2 = 0.606, 0.638, 0.654$ відповідно). Між *GPP* та *FPAR* кореляція не така сильна ($r^2 = 0.418$). Простежується досить сильна залежність *GPP* від температури повітря ($r^2 = 0.658$ для максимальної та 0.705 для середньої). Немає кореляції між *GPP* та кількістю опадів *W* ($r^2 = 0.021$). Це значить, що продуктивність рослинного покриву не має прямої залежності від кількості опадів. Проте ми знаємо, що наземний водний цикл відіграє ключову роль в динаміці рослинного покриву, вуглецевому та азотному біогеохімічних циклах [28]. Тому нам необхідно застосовувати інші параметри для відображення залежності водного та вуглецевого циклів.

Оцінка подібних залежностей для *NPP* показала слабшу кореляцію, ніж з *GPP*. Кореляція

Таблиця 2. Щорічні значення валової та чистої первинної продукції (*NPP*, *GPP*) і їхнього відношення *NPP/GPP* для дослідної території

Рік	<i>GPP</i> , кг/м ²	<i>NPP</i> , кг/м ²	<i>NPP/GPP</i>
2000	1.31667	0.78732	0.597963
2001	1.24264	0.70002	0.563333
2002	1.13898	0.59562	0.522942
2003	1.17636	0.66078	0.561716
2004	1.14353	0.64485	0.563912
2005	1.22889	0.70331	0.572313
2006	1.23007	0.70155	0.570333
2007	1.16104	0.60083	0.517493
2008	1.15462	0.62106	0.537891
2009	1.18283	0.67079	0.567106
2010	1.25416	0.71121	0.567081
2011	1.29307	0.74222	0.573998

NPP з *NDVI* та *EVI* складає 0.373 та 0.422 відповідно. Кореляція між *NPP* та *LAI* і *FPAR* складає 0.375 та 0.204 відповідно. Коефіцієнт кореляції *NPP* з температурою повітря дорівнює $r^2 = 0.365$ для максимальних температур і 0.387 для середніх. Як і у випадку з *GPP*, також немає кореляції між *NPP* та кількістю опадів *W* ($r^2 = 0.011$).

Ці більш слабкі залежності для *NPP* можна пояснити впливом невизначеностей оцінок *NPP*. В алгоритмі MOD17 величина *FPAR* безпосередньо пов'язана з поглинанням вуглецю, а *LAI* визначає дихання. Невизначеності оцінок *LAI*, отриманих з MOD15A2, можуть впливати на оцінки *NPP* навіть при достатньо точних оцінках величини *FPAR*. В роботах [23, 26] було показано, що оцінки *LAI*, отримані з MOD15A2, слабо корелюють з оцінками, отриманими з наземних вимірювань. Тому дане питання ще потребує детального вивчення.

ОБГОВОРЕННЯ

Оцінки залежності продуктивності українських лісів від різноманітних вегетаційних параметрів та кліматичних чинників показали хорошу кореляцію між продуктивністю, вегетаційними параметрами та температурою повітря. Проте немає будь-якої залежності між продуктивністю та кількістю опадів. Тому були зроблені спроби використати інші характеристики для опису взаємодії водного та вуглецевого циклів. Наприклад, накопичена ґрунтова волога є дуже важливим елементом для продуктивності рослинного покриву. Проте даний параметр є досить складним для оцінки на значних територіях за допомогою даних ДЗЗ. Натомість величина евапотранспірація (*ET*) дуже добре корелює з продуктивністю рослинного покриву ($r^2 = 0.705$ та 0.585 для *GPP* і *NPP* відповідно).

Величина *ET* є другим за величиною компонентом (після опадів) наземного водного циклу, оскільки *ET* повертає більш ніж 60 % опадів, що випадають на поверхню, назад в атмосферу у вигляді водяної пари [10] і таким чином визначає доступність вологи на земній поверхні.

Евапотранспірація включає в себе втрати води внаслідок випаровування із земної поверхні, випаровування з рослинного покриву, дихання

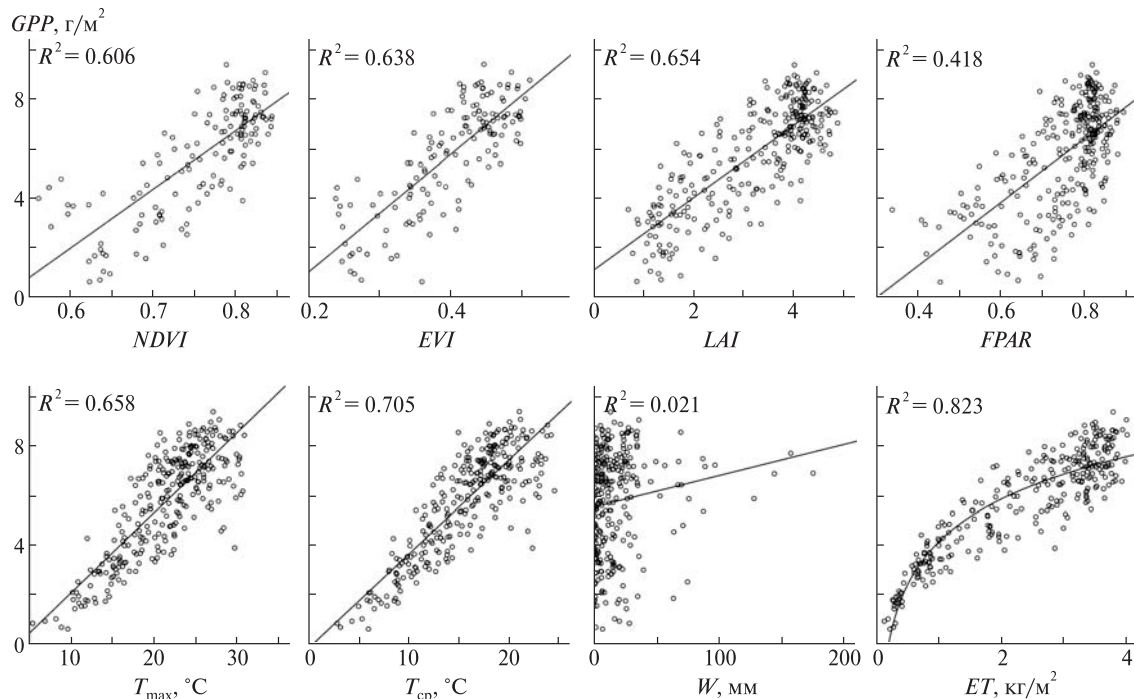


Рис. 7. Корелятивні залежності валової продукції *GPP* лісів Західного Полісся від різних кліматичних та біофізичних параметрів рослинного покриву

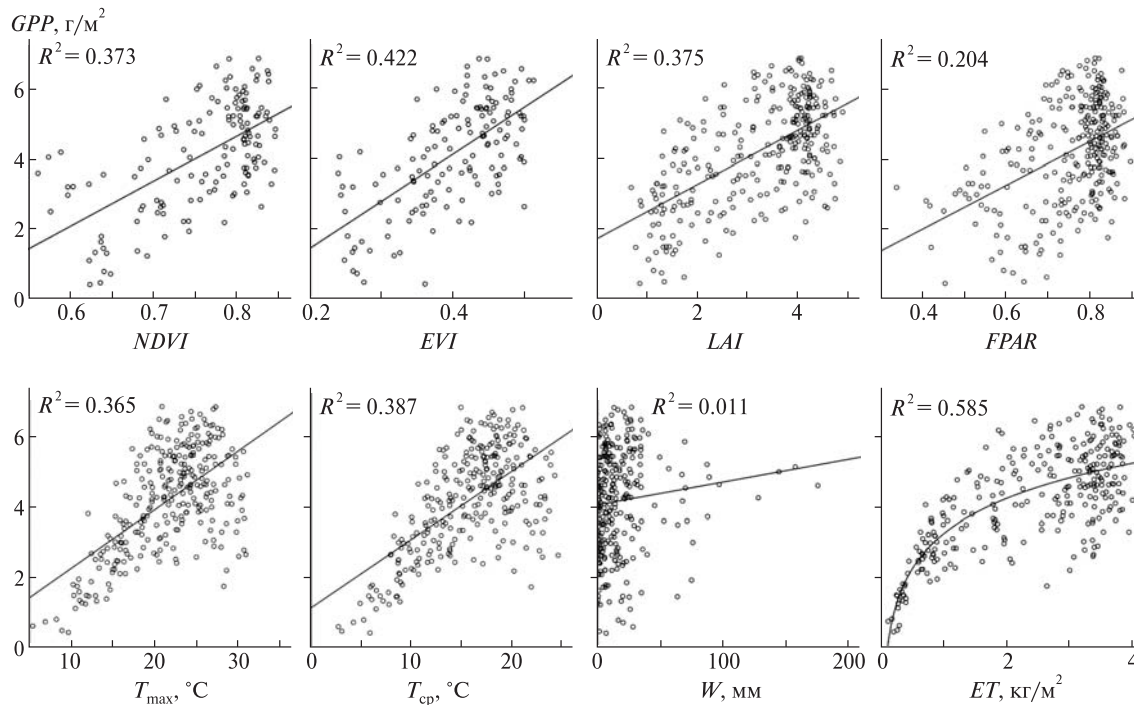


Рис. 8. Корелятивні залежності чистої продукції *NPP* лісів Західного Полісся від різних кліматичних та біофізичних параметрів рослинного покриву

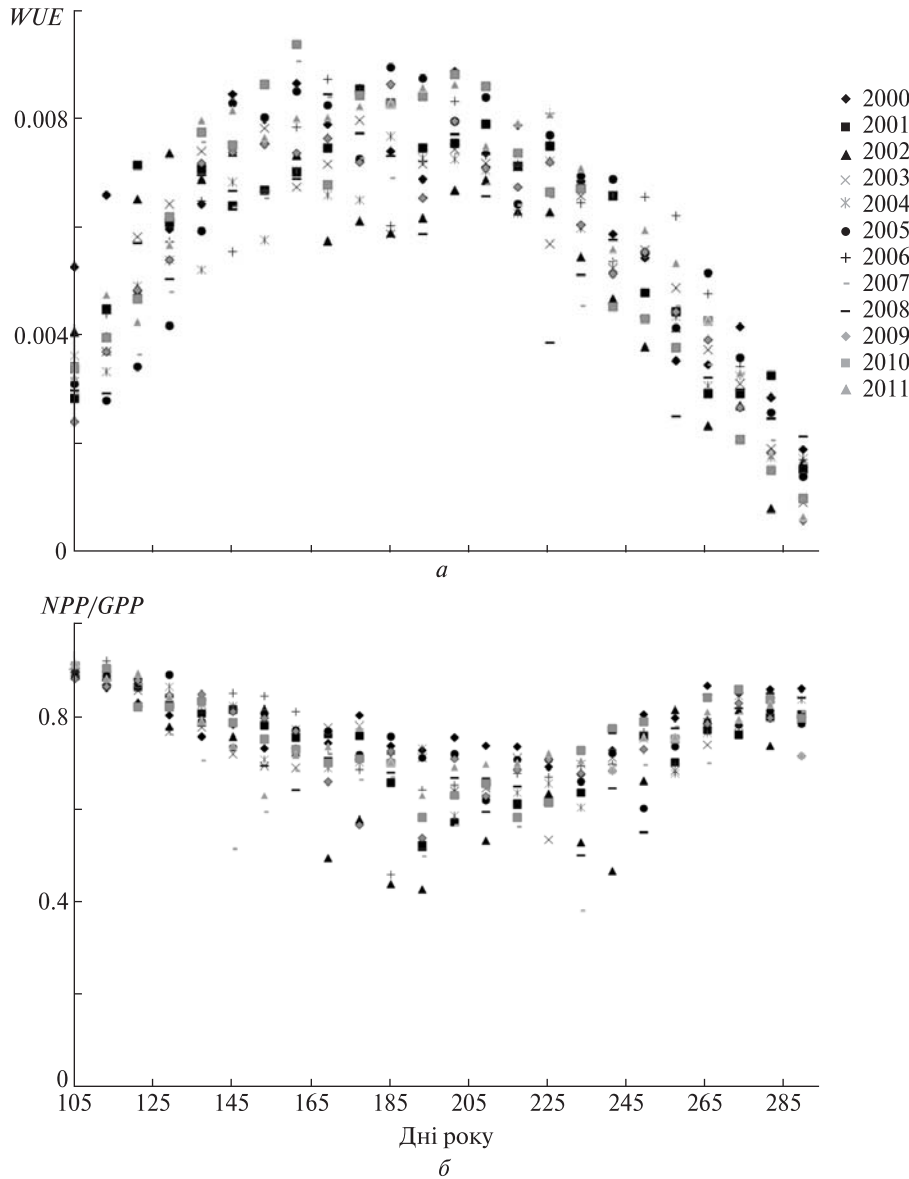


Рис. 9. Сезонна динаміка ефективності використання води (а) та ефективності поглинання вуглецю рослинним покривом (б) для дослідного регіону

рослинності і сублімації з снігової поверхні [13]. Використовуючи значення ET , ми можемо оцінити ефективність використання води (WUE). WUE характеризується кількістю поглинутого вуглецю на кількість водяної пари, втраченої внаслідок евапотранспірації [14]. Це один з найважливіших факторів, що контролюють продуктивність рослинного покриву на територіях з посушливим кліматом. Тому дослідження реакції WUE на зміни в навколишньому середовищі може покращити можливість прогнозування

впливу негативних чинників кліматичних змін на екосистеми. Є кілька шляхів розрахунку WUE [14]. В нашому випадку WUE був розрахований як відношення валової первинної продукції до евапотранспірації [11, 14]. Також було розраховано ефективність поглинання вуглецю рослинним покривом як відношення NPP/GPP .

Величини WUE і NPP/GPP показали подібну сезонну динаміку (рис. 9) і характеризуються тенденцією до зниження в літній період (дні року 169...249). Це можна пояснити реакцією рослин-

ного покриву на збільшення температури в цей період. Вищі температури призводять до інтенсифікації процесів дихання, що є фізіологічною відповіддю рослинного покриву, пов'язаною з процесами терморегуляції. У свою чергу, інтенсифікація дихання рослин призводить до більших втрат вуглецю і водяної пари через продихи в листі, що призводить до зниження продуктивності рослинного покриву.

Видно також, що величина NPP/GPP у літні періоди 2002 та 2007 рр. мала значно нижчі значення, ніж у інші роки. Це узгоджується з посухами, що мали місце в ці роки і могли призвести до зниження ефективності поглинання вуглецю рослинним покривом.

Також було розраховано кореляцію між WUE та NPP/GPP (рис. 10). Як і очікувалося, досить сильна кореляція ($r^2 = 0.748$) показує досить сильний взаємозв'язок між водним і вуглецевим циклами. Можна також помітити, що ефективність поглинання вуглецю має певний рівень насичення, після якого зростання припиняється навіть при подальшому зростанні WUE .

ВИСНОВКИ

Враховуючи сучасні глобальні кліматичні зміни та зміни в навколишньому середовищі, оцінка і аналіз сучасного стану і динаміки балансу вуглецю є надзвичайно важливим питанням.

Розвиток супутникових технологій, який відбувається протягом останніх десятиліть, дозволяє залучати для таких досліджень методи дистанційного зондування Землі. Такі методи разом з традиційними наземними вимірюваннями дозволяють покращити оцінки і наше розуміння тенденцій, що відбуваються в екосистемах взагалі і у вуглецевому балансі зокрема.

Дане дослідження було направлено на вивчення динаміки параметрів лісового покриву з використанням даних дистанційного зондування Землі для оцінки інтенсивності поглинання вуглецю рослинним покривом. Аналіз оцінок різних параметрів рослинного покриву, що були отримані з даних ДЗЗ (LAI , $FPAR$, $NDVI$ та EVI), продуктивності лісового покриву отримані на основі моделі MOD17 за даними ДЗЗ та з метеорологічних даних показав високу кореляцію продуктивності лісів з

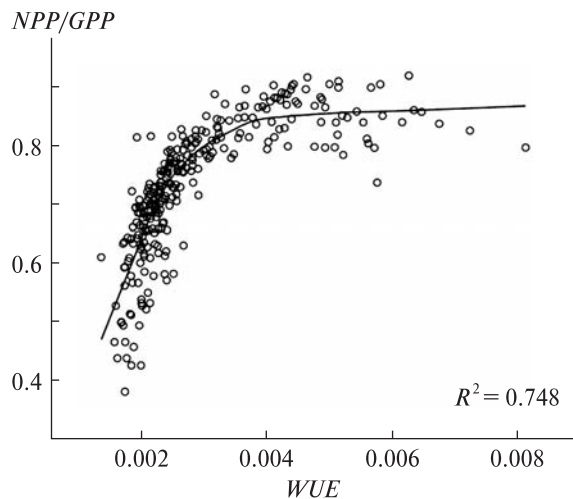


Рис. 10. Корелятивна залежність ефективності поглинання вуглецю від величини WUE

біофізичними параметрами рослинного покриву і температурою повітря. Проте не було виявлено жодної прямої кореляції продуктивності лісового покриву з кількістю опадів.

Додатковий аналіз ефективності використання вологи (WUE) все ж показав чітку залежність між продуктивністю рослинного покриву та водним циклом. Це значить, що кількість опадів для даного регіону дослідження не відіграє ключової ролі у продуктивності рослинного покриву, оскільки ґрунти можуть отримувати достатньо вологи з підземних джерел. Проте в інших регіонах (наприклад в степу) ми можемо мати зовсім іншу картину. Тому важливо розширити подібні дослідження на інші ландшафтно-кліматичні зони та інші типи рослинного покриву.

Аналіз даних також показав значний вплив високих температур на продуктивність рослинного покриву. Майбутні дослідження слід сфокусувати на оцінку впливів інтенсивності і тривалості посушливих періодів на продуктивність рослинного покриву. Це може бути досить корисним для передбачення змін в екосистемах і вуглецевому балансі, пов'язаних з кліматичними змінами.

Крім того, потрібно враховувати невизначеності оцінок, отриманих на основі даних ДЗЗ. Зокрема, як показали роботи [23, 26, 27], модель

MOD17, розроблена на основі даних ДЗЗ, має велику кількість джерел вхідних даних, що може збільшити невизначеність вихідного результату. Тому необхідно також залучати дані прямих наземних вимірювань для валідації і уточнення отриманих результатів.

Дослідження виконувалося в рамках участі в літній програмі для молодих науковців (YSSP-2012) Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA), Австрія, за фінансової підтримки Української національної членської організації. Автор висловлює вдячність всім, хто сприяв проведеному даного дослідження.

1. Національний атлас України. — Картографія, 2008. — 440 с.
2. Cramer W., Kicklighter D. W., Bondeau A., et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results // *Global Change Biology*. — 1999. — **5**. — P. 1—15.
3. Earth systems change over Eastern Europe / Ed. by P. Y. Groisman, V. I. Lyalko. — Kyiv: Akadempriodyka, 2012. — 487 p.
4. Field C. B., Randerson J. T., Malmstrom C. M. Global net primary production — combining ecology and remote-sensing // *Remote Sens. Environ.* — 1995. — **51**. — P. 74—88.
5. Gobron N., Verstraete M. ECV T10: Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (FAPAR) / Essential Climate Variables. Rome: Global Terrestrial Observing System; 2008.
6. Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // *Nature*. — 2008. — **451**. — P. 289—292.
7. Heinsch F. A., Reeves M., Votava P., et al. User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. Version 2.0, December 2, 2003. — 57 p.
8. IPCC (2001). Climate change 2001: The scientific basis: Cambridge: University Press, 2001. — 881 p.
9. IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis: — Cambridge: University Press, 2007. — 996 p.
10. Korzoun V. I., Sokolov A. A., Budyko M. I., et al. World water balance and water resources of the Earth. In: Studies and Reports in Hydrology (UNESCO), no. 25/United Nations Educational, 1978, Scientific and Cultural Organization, 75 — Paris (France); International Hydrological Decade, Moscow (USSR). USSR National Committee. — 663 p.
11. Lu X., Zhuang Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data // *Remote Sens. Environ.* — 2010. — **114**. — P. 1924—1939.
12. Mu Q., Zhao M., Running S. W., et al. Contribution of increasing CO₂ and climate change to the carbon cycle in China's ecosystems // *J. Geophys. Res.* — 2008. — **113**. — G01018.
13. Mu Q., Zhao M., Running S. W. Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm // *Remote Sens. Environ.* — 2011. — **115**. — P. 1781—1800.
14. Mu Q., Zhao M., Running W. Evolution of hydrological and carbon cycles under a changing climate // *Hydrol. Processes*. — 2011. — **25**. — P. 4093—4102.
15. Prieto-Blanco A., North P., Barnsley M. J., et al. Satellite-driven modelling of Net Primary Productivity (NPP): Theoretical analysis // *Remote Sens. Environ.* — 2009. — **113**. — P. 137—147.
16. Prince S. D., Goward S. N. Global primary production: A remote sensing approach // *J. Biogeography*. — 1995. — **22**. — P. 815—835.
17. Quegan S., Beer C., Shvidenko A., et al. Estimating the carbon balance of central Siberia using a landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and Dynamic Global Vegetation Models // *Global Change Biology*. — 2011. — **17**. — P. 351—365.
18. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, 1973. — NASA SP-351 I. — P. 309—317.
19. Running S. W., Nemani R., Glassy J. M., et al. MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17), Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.0, April 29, 1999.
20. Running S. W., Thornton P. E., Nemani R., et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System // *Methods in ecosystem science* / Eds O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney, R. W. Howarth. — New York: Springer, 2000. — P. 44—57.
21. Smith B., Knorr W., Widlowski J., et al. Combining remote sensing data with process modeling to monitor boreal conifer forest carbon balances // *Forest Ecology and Management*. — 2008. — **225**. — P. 3985—3994.
22. Strahler A. H., Friedl M., Zhang X., et al. The MODIS land cover and land cover dynamics products. Presentation at remote sensing of the Earth's environment from TERRA in l'Aquila, 2002, Italy.
23. Wang Y., Woodcock C.E., Buermann W., et al. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **91**. — P. 114—127.
24. Wu C., Nui Z., Gao S. Gross primary production estimation from MODIS data with vegetation index and photosynthetically active radiation in maize // *J. Geophys. Res.* — 2010. — **115**. — D12127. doi:10.1029/2009JD013023.
25. Xiao X., Hollinger D., Aber J., et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle-leaf forest // *Remote Sens. Environ.* — 2004. — **89**. — P. 519—534.

26. Zhao M., Heinsch F. A., Nemani R. R., et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set // Remote Sens. Environ. — 2005. — **95**. — P. 164–176.
27. Zhao M., Running S. W., Nemani R. R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses // J. Geophys. Res. — 2006. — **111**. — G01002, doi:10.1029/2004JG000004.
28. Zhao M., Running S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 // Science. — 2010. — **329**. — P. 940–943.

Стаття надійшла до редакції 01.04.13

Д. М. Мовчан

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ (ЗАПАДНОЕ ПОЛЕСЬЕ) НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Анализируется динамика биофизических параметров лесного покрова на основе данных дистанционного зондирования территории Украины (Западного Полесья) для оценки интенсивности поглощения углерода лесным покровом. Анализировались сезонные колебания основных биофизических параметров (*NDVI*, *EVI*, *LAI*, *FPAR*, *ET*, *GPP* и *NPP*) с 2000 по 2011 гг., полученных на основе данных MODIS. Оказалось, что сезонные изменения параметров растительного покрова тесно повязаны с

сезонным развитием растительности на протяжении вегетационного сезона. Проанализированы колебания метеорологических условий в данный период. Оценивалась корреляционная связь между *GPP*, *NPP* и разными вегетационными и климатическими параметрами. Рассчитана и проанализирована эффективность поглощения воды (*WUE*) растительным покровом как отношение *GPP* к эвапотранспирации и эффективность поглощения углерода как отношение *NPP/GPP* для сравнения с *WUE*.

Д. М. Мовчан

ESTIMATION OF UKRAINIAN FOREST COVER (WESTERN POLISSIA) USING REMOTE SENSING DATA

The dynamics of biophysical parameters of forest cover is analysed on the basis of remote sensing data for Ukrainian Western Polissia to estimate the intensity of carbon absorption by the forest cover. Seasonal changes of the basic vegetation cover parameters (*NDVI*, *EVI*, *LAI*, *FPAR*, *ET*, *GPP* and *NPP*) from 2000 to 2011 are analysed using MODIS data. Our results show that seasonal variations of vegetation cover parameters are closely connected with seasonal growth of vegetation. Weather variables for the periods under consideration are studied. Some correlations between *GPP* and *NPP* and different vegetation parameters and climatic factors are estimated. Water use efficiency (*WUE*) as the ratio of *GPP* to evapotranspiration (*ET*) and carbon uptake efficiency as *NPP/GPP* ratio are calculated and analysed.