

6. Егоров И. А., Сергиенко И. З. Аминокислоты и углеводы в породах докембрия. – Происхождение жизни и эволюционная биохимия. – Москва: Наука, 1975. – С. 5–26.
7. Закруткин В. Е., Калмыкова Ю. А. Аминокислоты в осадочно-метаморфических породах докембрия Приазовского блока Украинского щита // Докл. АН УССР. Сер. Б. – 1980. – № 9. – С. 14–17.
8. Корженев М. Н., Фомин Ю. А. Эволюция условий накопления пород криворожской серии по геохимическим и изотопным данным // Геол. журн. – 1992. – № 3. – С. 93–99.

Институт геохимии окружающей среды
НАН Украины и МЧС Украины, Киев

Поступило в редакцию 04.02.2008

УДК 528.88-519.6

© 2008

Д. М. Мовчан

Можливості використання даних супутникових зйомок MODIS для оцінки продуктивності різних видів рослинності та потоків CO₂ у системі рослинність — атмосфера (на прикладі території України)

(Представлено членом-кореспондентом НАН України В. І. Ляльком)

A growing number of studies has shown that the reflectance changes at 531 nm, associated with the xanthophyll cycle and the related thylakoid energization, are widespread among plant species. The photochemical reflectance index (PRI) has been related with some success to the photosynthetic light use efficiency (LUE). Such a relationship would enable to estimate the photosynthesis by remote sensing data. In this work, the analysis for opportunity using MODIS data for the estimation of processes of photosynthesis for different vegetable cover types is performed. The comparative analysis of the CO₂ absorption efficiency by different types of the vegetable cover for a part of the territory of Ukraine is carried out.

Одним з фундаментальних кліматичних показників “глобальних змін”, які мають практичне значення для людства, є зміна біологічної продуктивності наземних екосистем.

Просторові коливання значень чистої первинної продуктивності (NPP) наземної рослинності є істотними і знаходяться в межах від ~ 1000 гС/м² на рік — для вічнозелених тропічних дощових лісів, до < 30 гС/м² на рік, для пустель (Lieth, Whittaker, 1975). За умов збільшення в атмосфері концентрації CO₂ та внаслідок глобальних змін клімату величина NPP може коливатися в значних межах над різними територіями (Мунені та ін., 1997; Melillo та ін., 1993). Тому розуміння регіональних змін вуглецевого циклу вимагає більш детального аналізу процесів, які відбуваються на земній поверхні.

Важливу інформацію для оцінки цих процесів дають дані дистанційного супутникового зондування. В 1999 р. у рамках розвитку системи спостережень Землі (EOS) NASA був запущений супутник Terra, на борту якого встановлено сканер MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), за його допомогою проводиться регулярна глобальна тижнева оцінка процесів фотосинтезу та чистої річної первинної продуктивності всіх типів земного

покриву з 1-кілометровою просторовою роздільною здатністю. Для кожного з 150 млн осередків індивідуально розраховуються значення NPP (у пікселях).

Продукт NPP розроблено для забезпечення точного регулярного вимірювання продуктивності або приросту наземної рослинності; він має як теоретичну, так і практичну користь. Теоретичне використання його полягає у визначенні сезонної динаміки регіонального балансу CO₂ у межах глобального циклу вуглецю.

На сьогодні моделі глобального циклу вуглецю об'єднуються з кліматичними моделями з метою створення єдиної моделі земної системи, яка є динамічною взаємодією атмосфери, біосфери та океанів. Практичне значення цього продукту полягає в можливості оцінки приросту продуктивності економічно й соціально важливих продуктів рослинності.

Використання індексу фотохімічного відбиття (PRI) для оцінки процесів фотосинтезу. Велика кількість проведених досліджень показує, що зміни коефіцієнта відбиття рослинного покриву в смузі 531 нм пов'язані зі змінами в ксантофільному циклі рослин та залежать від активності тилакоїдів, які безпосередньо беруть участь у процесі фотосинтезу [1–4].

Помічено, що індекс PRI має певне співвідношення з коефіцієнтом ефективності використання світла (LUE). Це співвідношення можна використовувати для покращення оцінки процесів фотосинтезу за допомогою даних дистанційного зондування [1, 2, 4].

PRI — це індекс нормалізованої різниці коефіцієнта відбиття в двох вузьких смугах (531 та 570 нм), на який впливає вміст пігментів ксантофільного циклу [2]. Коли кількість світла, що потрапляє на листя рослини, більша, ніж може бути використана в процесі фотосинтезу, надлишок енергії розсіюється, щоб уникнути пошкодження фотосинтетичного апарату. При збільшенні інтенсивності освітленості відбувається перехід ксантофільних пігментів з епоксидного стану (віолаксантин) до деепоксидного, що впливає на розсіювання надлишку енергії.

Такі зміни в пігментному складі призводять до значного зниження коефіцієнта відбиття в смузі 531 нм, однак мають незначний вплив у смузі 570 нм. Тому ці довжини хвиль використовуються для розрахунку коефіцієнта PRI. При низькій інтенсивності освітленості, коли енергія майже повністю використовується в процесі фотосинтезу, PRI має високе значення. При високій інтенсивності з наявним надлишком світла зазначено PRI з низьким (негативним) значенням [1].

Розрахунок коефіцієнта PRI проводиться за формулою [4]:

$$\text{PRI} = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}, \quad (1)$$

де ρ_{531} , ρ_{570} — коефіцієнти відбиття листя в смугах 531 та 570 нм відповідно. Для того щоб отримати масштабоване значення індексу PRI з метою відображення його як величини ефективності, потрібно провести алгебраїчне перетворення:

$$s\text{PRI} = \frac{\text{PRI} + 1}{2}. \quad (2)$$

Емпірично було виведено залежність між PRI та LUE [4]:

$$\text{PRI} = \frac{0,16(\text{LUE} - 0,0096)}{0,012 + (\text{LUE} - 0,0096)}. \quad (3)$$

LUE визначається як кількість молів вуглецю, зафіксованого під дією одного моля квантів світла (PPFD), і знижується із зростанням інтенсивності світла [4].

Типова залежність фотосинтетичної маси (P) та зростання інтенсивності світла (Q_L) має такий вигляд:

$$P = \frac{P_{\max} Q_L}{k_m + Q_L}, \quad (4)$$

де P_{\max} — максимальна швидкість фотосинтезу; k_m — значення Q_L при $P = 0,5P_{\max}$. Якщо врахувати, що $LUE = P/Q_L$, то з формули (4) отримаємо

$$LUE = \frac{P_{\max}}{k_m + Q_L}. \quad (5)$$

Поєднавши рівняння (1), (3) й (4), наведемо вираз:

$$\rho_{531} = \frac{\rho_{570} \left(12,083 \frac{P_{\max}}{k_m + Q_L} + 9 \right)}{8750 \frac{P_{\max}}{k_m + Q_L} + 41}. \quad (6)$$

Це рівняння описує, як коефіцієнт відбиття листя рослини в смузі 531 нм змінюється відносно коефіцієнта відбиття в смузі 570 нм у відповідь на зміну інтенсивності освітленості. Якщо інтенсивність освітленості зростає, LUE, згідно з формулою (5), знижується, а значить, зменшується й PRI. Відзначимо, що коефіцієнт відбиття в смузі 531 нм зменшується відносно коефіцієнта відбиття в смузі 570 нм.

З формули (3) можна вивести LUE через PRI:

$$LUE = \frac{0,0024PRI + 0,001536}{0,16 - PRI}. \quad (7)$$

Численні дослідження показали, що для оцінки потоків вуглецю між рослинністю та атмосферою також може використовуватися вегетаційний індекс нормалізованої різниці (NDVI) [5–7]. NDVI є функцією частини фотосинтетично активної радіації (f_{PAR}), що була поглинута зеленою рослинністю, розраховується за формулою роботи [6]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (8)$$

де ρ_{NIR} , ρ_{RED} — коефіцієнти відбиття поверхні в близькому інфрачервоному та червоному діапазонах відповідно.

Оскільки NDVI може безпосередньо виражатися як функція AFAR, то, за допомогою NDVI та PRI, можна оцінити швидкість фотосинтезу [6, 7]:

$$\text{Швидкість поглинання } CO_2 = f(sPRI \times NDVI). \quad (9)$$

При зіставленні даних потоків CO_2 з цими індексами ($sPRI$ та NDVI) емпірично було отримано залежність [6]:

$$CO_2 = -4,3833 - 15,018 \times (NDVI \times sPRI). \quad (10)$$

Застосування методу для оцінки потоків CO_2 над територією України. Для демонстрації можливостей даного методу оцінки потоків вуглекислого газу для їх картографування у Науковому центрі аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (ЦАКДЗ)

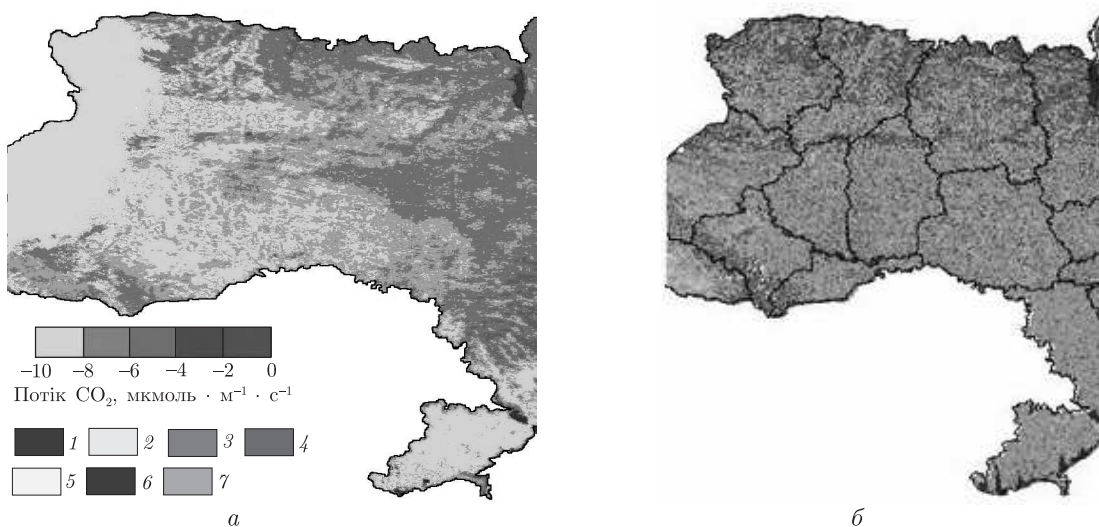


Рис. 1. Порівняння швидкості поглинання CO_2 рослинністю (а) — станом на 14 червня 2000 р., за даними знімка MODIS, з типами рослинного покриву — станом на 2000 р., за даними знімка Landsat ETM (б), для західної частини території України.

Умовні позначення: 1 — вода; 2 — хмари; 3 — хвойні ліси; 4 — листяні ліси; 5 — трави; 6 — агрозони; 7 — населені пункти

були залучені знімки низької просторової розрізненості спектро радіометра MODIS. Територією дослідження було обрано західну частину України, для якої характерними є такі види рослинного покриву: хвойні ліси, листяні ліси, трав'яний покрив та агроценози. Для аналізу був обраний знімок MODIS з просторовою розрізненістю 1 км від 14.06.2000 р, оскільки у даний період спостерігалася найменша хмарність над територією України. Також умовами відбору знімка були період, що припадає на пік розвитку вегетаційного сезону рослинності та можливість порівняння даних з даними класифікації рослинного покриву. Для порівняння було використано карту типів рослинності західної частини території України, яку побудовано на основі даних знімка Landsat ETM станом на 2000 р. [8, 9] (рис. 1, б). На основі знімка MODIS розраховано індекси PRI й NDVI та побудовано карту розподілу потоків CO_2 для західної частини України (див. рис. 1, а).

З порівняння видно, що найбільшу поглинальну здатність мають листяні ліси (близько $10 \text{ мкмоль CO}_2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$); дещо меншу (приблизно $7-8 \text{ мкмоль CO}_2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$) — хвойні ліси. Це можна пояснити тим, що червень місяць для листяних лісів є піком вегетаційного сезону, відповідно спостерігається максимум поглинання вуглекислого газу.

Але слід враховувати, що вегетаційний сезон для листяних лісів триває лише в теплу пору року, тоді як хвойні ліси поглинають CO_2 протягом усього року, а відповідно вони мають більший внесок у зниження концентрації CO_2 в приземній атмосфері. Найменшу поглинальну здатність, як видно, має трав'яний покрив (від 0 до $4 \text{ мкмоль CO}_2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$).

Агроценози дуже відрізняються між собою за здатністю поглинати CO_2 , і неможливо однозначно для них визначити середнє значення. Це можна пояснити різним видовим складом рослинності даних біомів. Так, агрозони в північних районах досліджуваної території мають високе значення поглинальної здатності, тоді як для агрозон південної частини, де переважають зернові культури, це значення наближається до значення трав'яного покриву.

Таким чином, наведений аналіз можливості використання даних дистанційного зондування, що отримуються зі супутників (зокрема, дані MODIS), для проведення оцінки параметрів наземного рослинного покриву на основі використання PRI та NDVI. Нами побудовано карту потоків CO₂ для західної частини території України, яка була порівняна з картою типів рослинного покриву, що дало змогу зробити такі висновки:

у літній період (середина червня) найбільшу поглинальну здатність для CO₂ мають листяні ліси. Проте їхня поглинальна здатність змінюється залежно від сезону;

хвойні ліси мають дещо меншу поглинальну здатність, проте вони поглинають вуглець протягом усього року, а не лише в теплий період року.

Використання отриманих даних в подальших дослідженнях дозволить покращити оцінку змін потоків CO₂, що проходять внаслідок змін рослинного покриву на певній території в результаті діяльності людини та природних процесів. Це, в свою чергу, дозволить врахувати дану складову в загальному кругообігу вуглецю та дозволить краще розуміти роль лісів як природного резервуару та регулятора кругообігу вуглецю в природі.

1. Barton C. V. M., North P. R. J. Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index. Model and sensitivity analysis // Remote Sensing Environment. – 2001. – **78**. – P. 264–273.
2. Drolet G. G., Huemmrich K. F., Hall F. G. et al. A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest // Ibid. – 2005. – **98**. – P. 212–224.
3. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Peddle D. R. et al. Remote sensing in BOREAS: Lessons learned // Ibid. – 2004. – **89**. – P. 139–162.
4. Penuelas J., Filella I., Gamon J. A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance // New Phytolog. – 1995. – **131**. – P. 291–296.
5. Whiting G. J., Bartlett D. S., Fan S. et al. Biosphere/atmosphere CO₂ exchange in tundra ecosystems: community characteristics and relationships with multispectral surface reflectance // J. Geophys. Res. – 1991. – **97**. – P. 16671–16680.
6. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A. et al. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery // J. geophys. Research. – 2001. – **106**, No. D24. – P. 579–591.
7. Rahman A. F., Gamon J. A., Fuentes D. A. et al. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery // AVIRIS Workshop, JPL/NASA, Pasadena, California, 2000.
8. Лялько В. І. Оцінка впливу природно-антропогенних змін потоків CO₂ у системі рослинність – атмосфера на формування парникового ефекту Землі // Доп. НАН України. – 2007. – № 4. – С. 130–137.
9. Лялько В. І., Артеменко І. Г., Жолобак Г. М. та ін. Дослідження впливу змін CO₂ та CH₄ в атмосфері на клімат за матеріалами космічних зйомок // Геол. журн. – 2007. – № 4. – С. 7–16.

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшло до редакції 22.01.2008