

УДК 519.6

## Спеціалізована ГІС для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону на базі даних дистанційного зондування Землі

Р. А. Бунь, М. І. Густі, В. І. Ліщенко

Державний науково-дослідний інститут інформаційної інфраструктури Національної академії наук України, Львів

*Надійшла до редакції 16.03.98*

Будується математична модель кругообігу вуглецю для Карпатського регіону з урахуванням зв'язків з сусідніми районами. Для визначення низки параметрів моделі використовуються дані дистанційного зондування Землі. Відмічається, що концентрація вуглекислого газу в атмосфері є визначальним фактором парникового ефекту на даний час. Наводиться структура спеціалізованої геоінформаційної системи для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону.

### ВСТУП

В час швидкого індустріального розвитку гостро постало питання охорони довкілля. Від природоохоронних заходів і зусиль в цьому напрямку значною мірою залежить майбутнє нашої планети. Останні десятиріччя активно здійснюється постійний екологічний моніторинг, при якому широко використовується дистанційне зондування Землі. Діють міжнародні програми комплексного дослідження планети (наприклад Mission to Planet Earth, Land Cover Use Change Program та ін.), в яких бере участь Україна, зокрема в рамках своєї програми космічних досліджень. Моніторинг також включає спостереження за концентрацією вуглекислого газу в атмосфері та моделювання біогеохімічного циклу вуглецю з метою прогнозування можливого впливу господарської діяльності на цей життєво важливий кругообіг.

Вуглець є складовою частиною органічної речовини. У великій кількості, переважно у формі вуглекислого газу, він міститься в атмосфері і здійснює постійний кругообіг. Даний біогеохімічний цикл піддається значному впливу антропогенних

факторів (спалювання викопного палива, зміни у землекористуванні, забруднення довкілля тощо [8]). Одним з наслідків господарської діяльності є так званий парниковий ефект, який загрожує глобальним потеплінням. Концентрація вуглекислого газу в атмосфері на даний час є визначальним фактором цього ефекту. Згідно з багатьма оцінками (наприклад [9]) за індустріальний період (останні 150 років) концентрація  $\text{CO}_2$  в атмосфері збільшилась від 275 ppm\* до 351 ppm і продовжує постійно збільшуватись (приблизно на 1.4 ppm за рік). Серйозність цієї проблеми обговорювалася в грудні 1997 р. в Кіото (Японія) на зустрічі представників 166 країн – членів Конвенції зміни клімату. На цій підписано угоду про зменшення емісії вуглекислого газу в атмосферу до рівня, на 50–60 % нижчого за рівень на 1990 р. Тому актуальним є питання створення методів та засобів оцінки вуглецевого балансу\*\* окремих регіонів і країн в цілому.

\* ppm – parts per million (мільйонна частка).

\*\* Вуглецевий баланс – різниця між кількістю  $\text{CO}_2$ , що викидається в атмосферу в результаті господарської діяльності людини і життєдіяльності біоти, і кількістю  $\text{CO}_2$ , що асимілюється рослинами для окремого регіону.

## ОСОБЛИВОСТІ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

В Карпатській регіоні України входять чотири західні області: Закарпатська, Львівська, Івано-Франківська і Чернівецька. Його особливість полягає в тому, що на порівняно невеликій території зосереджені різноманітні в екологічному відношенні зони. Поряд з унікальними гірськими масивами з недоторканою природою є вкрай забруднені техногеннонебезпечні райони. Від стану Карпатського регіону значною мірою залежить екологічний стан Європи.

Ця гірська екосистема відрізняється від рівнинних районів великою різноманітністю фізико-географічних умов і відіграє вона більш чітку і різноманітну захисну роль. Завдяки низькому економічному освоєнню людиною гірських районів в цих краях зберігається природний характер ландшафтів. В регіоні зосереджений значний рекреаційний потенціал. Натомість структура природних систем лісових районів Карпат протягом агрокультурного періоду зазнала значних змін, що негативно вплинуло на їхню загальноекологічну стабільність. Про це свідчать небезпечні екологічні процеси, що загострились останнім часом: катастрофічні наводки, сільові потоки, вітровали та ерозійні процеси, які спричиняють значні матеріальні збитки економіці України.

Серед цілого спектру екологічних досліджень Карпатського регіону слід відзначити задачу оцінки його вкладу у вуглецевий баланс континенту та планети в цілому. Подібні дослідження до цього часу не проводилися. В цьому регіоні зосереджені великі лісові масиви, які часто називають «зеленими легенями Європи». Тому актуальними є питання створення математичних методів та відповідних інформаційних технологій для моделювання цього процесу на регіональному рівні, оцінки вуглецевого балансу регіону, відслідковування змін екологічного стану за час індустріалізації краю, прогнозування можливих наслідків безконтрольного втручання в природу і вироблення рекомендацій щодо охорони довкілля.

При створенні математичної моделі кругообігу вуглецю для Карпатського регіону виділяємо такі основні зони (див. рис. 1): сільськогосподарські угіддя; луки, пасовища і сінокоси; широколистяні ліси; хвойні ліси. Велика площа сільськогосподарських угідь зумовлена вкладом рівнинних районів. Вказана рослинність зосереджена на ґрунтах різних типів (від родючих чорноземів до вкрай бідних і вразливих у біологічному відношенні гірських ґрунтів) і в різних кліматичних зонах, які відрізняються температурним режимом, кількістю

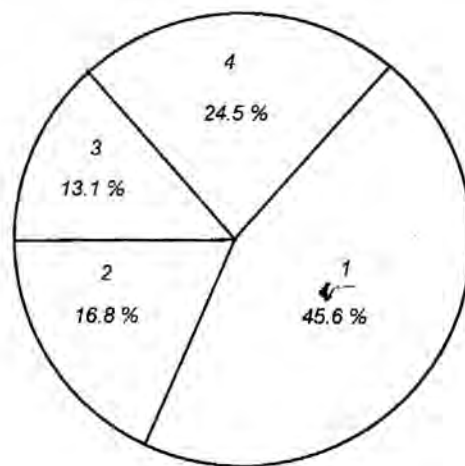


Рис. 1. Відносна площа основних зон Карпатського регіону: 1 – сільськогосподарські угіддя; 2 – луки, пасовища і сінокоси; 3 – широколистяні ліси; 4 – хвойні ліси

опадів та ін. Звичайно, поданий розподіл на зони є умовним, але він обумовлений тим, що для цих екосистем проводилися дослідження окремих біогеохімічних процесів, які є складовими частинами багатогранного процесу кругообігу вуглецю. Це відкриває можливості визначення багатьох параметрів математичних моделей.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КРУГООБІГУ ВУГЛЕЦЮ

При побудові математичної моделі кругообігу вуглецю на регіональному рівні за основу візьмемо підхід, запропонований в роботі [4]. Допускаємо, що регіональна система атмосфера – рослинність – ґрунт складається з чотирьох підсистем двох типів – трав'яних (1 і 2) та лісових (3 і 4), які взаємопов'язані між собою через атмосферу. Ці підсистеми відповідають наведеним на рис. 1 зонам. Кожну трав'яну підсистему представляємо рядом блоків: вуглець живої фітомаси рослини, вуглець підстилки і кореневих залишків, вуглець гумусу. Відповідно кожному лісову підсистему представляємо блоками: вуглець зеленої фітомаси, вуглець деревини і коренів живих рослин, вуглець підстилки і кореневих залишків, вуглець гумусу.

Схема кругообігу вуглецю на регіональному рівні має вигляд, зображений на рис. 2.

Побудуємо математичну модель біогеохімічного циклу вуглецю для Карпатського регіону. Позначимо через  $x_n$  вміст вуглецю в атмосфері над регіоном,  $x_i^{(t)}$  – вміст вуглецю в окремих блоках  $i$ -ї



Рис. 2. Діаграма потоків вуглецю: 1 – атмосфера, 2–4 – складові трав'яних екосистем (відповідно, трава, підстилка і кореневі залишки, гумус); 5–8 – складові лісових екосистем (відповідно, листя, деревина та корені, підстилка та кореневі залишки, гумус); 9 – антропогенні та неантропогенні викиди вуглецю в атмосферу; 10 – сумарний потік вуглецю з сусідніх регіонів

трав'яної або лісової екосистеми. Відповідно  $x_g^{(i)}$  – вміст вуглецю в окремих блоках трав'яних екосистем ( $x_{gr}^{(i)}$  – в живій біомасі трави;  $x_{gl}^{(i)}$  – в підстилці і кореневих залишках;  $x_{gd}^{(i)}$  – в гумусі),  $x_f^{(i)}$  – в окремих блоках лісових екосистем ( $x_{fl}^{(i)}$  – в листі;  $x_{fw}^{(i)}$  – в деревині і коренях живих рослин,  $x_{fr}^{(i)}$  – в підстилці і кореневих залишках;  $x_{fd}^{(i)}$  – в гумусі), причому  $i = 1, 2$  для трав'яних, та  $i = 3, 4$  для лісових екосистем. Позначимо через  $v_g^{(i)}$  і  $v_f^{(i)}$  швидкості надходження вуглецю з одного блоку в інший в межах окремих трав'яних і лісових екосистем відповідно. При цьому додаткові нижні індекси означають наступне:  $a$  – атмосфера,  $g$  – трава,  $l$  – листя,  $w$  – деревина і корені,  $r$  – підстилка і кореневі залишки,  $d$  – гумус. Так, позначимо  $v_{gag}^{(i)}$  – потік вуглецю з атмосфери регіону в фітомасу трав'яних рослин,  $v_{fdn}^{(i)}$  – потік із гумусу лісової підсистеми в атмосферу і т. д. З урахуванням поданих на рис. 2 діаграм потоків диференціальні рівняння, які описують кругообіг вуглецю в регіональній системі атмосфера – рослинність – ґрунт, мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dx_a}{dt} &= \sum_{i=1}^2 (-v_{gag}^{(i)} + v_{gra}^{(i)} + v_{gdn}^{(i)}) + \\ &+ \sum_{j=3}^4 (-v_{fln}^{(j)} + v_{frn}^{(j)} + v_{fdn}^{(j)}) + v + y; \\ \frac{dx_{gg}^{(i)}}{dt} &= -v_{ggr}^{(i)} + v_{gng}^{(i)}; \\ \frac{dx_{gr}^{(i)}}{dt} &= -v_{grd}^{(i)} - v_{grn}^{(i)} + v_{ggr}^{(i)}; \\ \frac{dx_{gd}^{(i)}}{dt} &= -v_{gdn}^{(i)} + v_{gdr}^{(i)}; \\ \frac{dx_{fl}^{(j)}}{dt} &= -v_{flw}^{(j)} - v_{flr}^{(j)} + v_{fln}^{(j)}; \\ \frac{dx_{fw}^{(j)}}{dt} &= -v_{fwr}^{(j)} + v_{fwn}^{(j)}; \\ \frac{dx_{fr}^{(j)}}{dt} &= -v_{frn}^{(j)} - v_{frd}^{(j)} + v_{flr}^{(j)} + v_{fwr}^{(j)}; \\ \frac{dx_{fd}^{(j)}}{dt} &= -v_{fdn}^{(j)} + v_{fdr}^{(j)}; \end{aligned} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \quad j = 3, 4.$

Перше рівняння системи відображає динаміку зміни вмісту вуглецю в атмосфері, друге, третє та четверте рівняння – в компонентах трав'яних систем, а рівняння з п'ятого по восьме – в компонентах лісових систем. У першому рівнянні  $v$  відображає притік вуглецю в атмосферу над регіоном з інших, не вказаних вище, джерел даного регіону. Такими можуть бути джерела як антропогенного, так і неантропогенного походження. Прикладом антропогенного джерела може служити вуглець, який виділяється в результаті інтенсивної господарської діяльності, а неантропогенного – лісові пожежі. Припускається, що потік  $v$  є відомим. В перше рівняння входить також змінна  $y$  – сумарний потік вуглецю з сусідніх регіонів.

Основні вирази для потоків, що фігурують в рівняннях (1), наведені в працях [5, 7]. Як приклад розглянемо потік, який відображає швидкість споживання вуглецю на побудову біомаси рослин трав'яної екосистеми. Цей потік апроксимують залежністю, яка відображає роль різноманітних факторів навколишнього середовища [5]:

$$v_{gag}^{(i)} = kZ_i Z_c Z_r Z_p Z_n s_g^{(i)} \exp\left(-\frac{b}{x_{gg}^{(i)}}\right), \quad (2)$$

де  $s_g^{(i)}$  – площа, зайнята трав'яною підсистемою,  $k$  і  $b$  – коефіцієнти, які враховують залежність продукційного процесу від біомаси рослинності.



Функції  $Z_i, Z_r, Z_t, Z_p, Z_u$  враховують вплив відповідно енергії сонячної радіації, концентрації вуглекислого газу в атмосфері, температури, забрудненості середовища і вологості ґрунту на динаміку споживання вуглецю з атмосфери.

Змінна  $y$ , що входить в рівняння (1), відображає потоки вуглецю з сусідніх регіонів. Значення цієї змінної пропорційне концентрації вуглецю в атмосфері над цими регіонами, тобто

$$y = \sum_{j=1}^M \Theta_j x_{jn}, \quad (3)$$

де  $\Theta_j$  – коефіцієнти пропорційності,  $x_{jn}$  – вміст вуглецю в атмосфері над  $j$ -м сусіднім регіоном,  $M$  – число регіонів, які межують з досліджуванним. Значення цих коефіцієнтів можна визначити наступним чином. Нехай  $L_j$  – границя  $j$ -го регіону з досліджуванним. Таку границю доцільно проводити через мережу метеорологічних станцій, які здійснюють регулярні вимірювання напрямку та сили вітру. Тобто, можна допустити, що для кожної точки границі регіону відома так звана «роза вітрів» – векторна діаграма, яка характеризує режим вітру в даному місці за даними багаторічних спостережень. Довжини векторів, що розходяться з центра діаграми, пропорційні повторюваності та сили вітрів у цих напрямках. Суму векторів «рози вітрів» позначимо через  $\omega$ . Цей сумарний потік є функцією часу (наприклад сезонні зміни) і залежить від місця спостереження.

Враховуючи сказане, для коефіцієнта  $\Theta_j$  можна записати формулу

$$\Theta_j = k_{j\theta} \int_0^{L_j} \omega(l, t) \cos \psi(l, t) dl, \quad (4)$$

де  $k_{j\theta}$  – коефіцієнт перерахунку загального вмісту вуглецю в атмосфері над  $j$ -м регіоном в усереднену за висотою його концентрацію,  $\psi$  – кут між сумарним вектором «рози вітрів» і нормаллю до границі регіону,  $dl$  – елементарна ділянка границі.

#### ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

Одним з центральних блоків моделі кругообігу вуглецю на регіональному рівні повинна бути система збору, сортування і накопичення результатів вимірювання і моделювання. Для цих цілей пропонується відповідна інформаційна база, яка буде забезпечувати модель необхідними параметрами, прив'язувати її до визначених просторово-часових умов і регулювати потік даних в моделі в залежності від зовнішніх умов.

З точки зору створення інструментарію спостереження і моделювання кінцева мета полягає в розробці такої системи, яка здатна забезпечити достатньо швидко отримання інформації (практично в режимі реального часу) про регіон в цілому і про його підсистеми, з використанням для цього як звичайних, так і аерокосмічних засобів спостереження, при незаперечній перевазі останніх. Зокрема за допомогою інформації з штучних супутників Землі можна ефективно визначати площі з однаковим рослинним покривом, забрудненість та хімічний склад атмосфери, рух повітряних мас, вологість ґрунту, температуру земної поверхні та ін. Методики отримання значень ряду основних параметрів описано в роботах [1–3, 6].

Для визначення вказаних параметрів можна використовувати одночасно як поточні дані дистанційного зондування, так і створені на даний час бази даних, як, наприклад, база даних рослинного покриву планети, розроблена спільно US Geological Survey, University of Nebraska-Lincoln та European Commission Joint Research Center або Global 30 Arc Second Elevation Data Set. Розроблено також інформаційні технології пошуку відповідних даних, які доступні в мережі «Інтернет». На жаль, вказані бази даних містять недостатній обсяг інформації щодо Карпатського регіону, тому доцільніше тут користуватися послугами українських центрів обробки аерокосмічної інформації.

Дистанційне зондування поверхні регіону надає можливість визначення, практично в режимі реального часу, багатьох параметрів моделі кругообігу вуглецю. Проте це зовсім не відкидає необхідності здійснення польових досліджень для визначення ряду параметрів протікання основних біохімічних процесів всередині конкретних екосистем.

Інша сторона проблеми, пов'язаної з використанням даних дистанційного зондування, полягає в неоднорідності рослинного покриву екосистем, типу ґрунту, кліматичних умов (температури, освітленості, кількості опадів і т. п.). Так, наприклад, для побудови точної моделі окремої екосистеми вона повинна складатись з однорідних зон за рослинним покривом і типом ґрунту, що далеко не відповідає дійсності. Тому усереднюємо ці параметри наступним чином:

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

де  $p$  – деякий параметр моделі (біомаса рослинності, кількість гумусу, температура і т. п.);  $p_i$  – параметр, визначений для  $i$ -ї однорідної ділянки;  $S_i$  – площа  $i$ -ї ділянки,  $n$  – кількість таких ділянок в зоні.

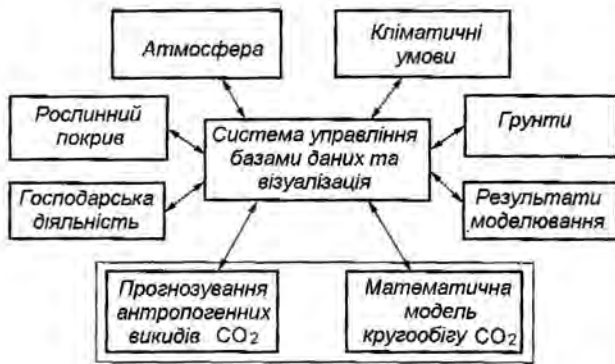


Рис. 3. Структура спеціалізованої геоінформаційної системи

**СПЕЦІАЛІЗОВАНА ГЕОІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА  
ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ  
ТА ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ**

Дані, необхідні для визначення параметрів математичної моделі та результати моделювання зручно представляти за допомогою спеціалізованої геоінформаційної системи. Такі системи широко використовуються у різних сферах життя, в тому числі для екологічного моніторингу, охорони довкілля тощо, і продемонстрували свої переваги.

Пропонуємо відповідну спеціалізовану геоінформаційну систему для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону, структура якої зображена на рис. 3. Вона включає математичну модель прогнозування антропогенних викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу за декількома сценаріями, математичну модель кругообігу вуглецю та шість тематичних перетинів, кожен з яких пановнюють даними, отриманими в результаті дистанційного зондування та польових досліджень.

Тематичні перетини та їх інформаційне наповнення, яке включає сезонні залежності параметрів, має такий вигляд.

«Атмосфера» – хімічний склад, вміст забруднюючих елементів (те ж для сусідніх регіонів), рух повітряних мас («рози вітрів» на межі з сусідніми регіонами).

«Рослинний покрив» – для найбільш характерних типів рослин визначають площу, біомасу в ярусах, питомі інтенсивності фотосинтезу, опаду та характерні точки залежностей інтенсивності фотосинтезу та опадання, а також характерні точки залежностей від температури, вологості ґрунту, освітленості, концентрації CO<sub>2</sub> в атмосфері, чутливості до забруднень.

«Ґрунти» – типи ґрунтів, а також для кожного

типу маса і якість гумусу, підстилки, питомі інтенсивності розкладу підстилки і гумусу, характерні точки залежності інтенсивності розкладу від температури та вологості ґрунту, чутливість до забруднень.

«Кліматичні умови» – температура та вологість повітря, опади, освітленість.

«Господарська діяльність» – сільськогосподарські роботи (періодичність і планування), вирубування і посадка лісів (обсяги і планування), забруднення навколишнього середовища та викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу (обсяги і планування), те ж для сусідніх регіонів, сценарії економічного розвитку.

«Результати моделювання» – концентрація CO<sub>2</sub> в атмосфері, біомаса рослин в ярусах, площа угрупувань (як функція біомаси), вуглецевий баланс.

Дані можуть оброблятися в різному часовому масштабі. В системі реалізовано також графічне представлення інформації.

**МОЖЛИВОСТІ СИСТЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ  
ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ**

Пропонована інформаційна технологія та програмні засоби моделювання кругообігу вуглецю на регіональному рівні пасамперед дають можливість оцінювати екологічну чистоту Карпатського регіону. При цьому використовуються такі вхідні дані:

- площі окремих підсистем (біогеоценозів), концентрація вуглецю в атмосфері, «рози вітрів» на границі регіону, оціночні дані про викиди вуглецю в атмосферу в результаті господарської діяльності;
- параметри залежностей, які визначають питому інтенсивність процесів біосинтезу зеленої фітомаси та її відмирання, відмирання деревини та коренів, розкладу органічної речовини та гумусу;
- параметри, які визначають функціональні залежності вказаних вище величин від температури, концентрації вуглекислого газу, вологості, освітленості та ін.

Запропоновані підходи до побудови математичної моделі кругообігу вуглецю для Карпатського регіону можна використати для формування аналогічних моделей для інших районів. Математичну модель кругообігу вуглецю для всієї планети тоді будують на основі регіональних моделей і виразів зв'язку, які відображають взаємний вплив сусідніх регіонів. Кількість регіонів, на які розділяють поверхню Землі, в принципі не обмежена. Істотним фактором при розбитті на регіони є якісна і кількісна специфіка протікання біохімічних процесів.

Практична цінність такого підходу полягає в тому, що він дає можливість врахувати неоднорідність протікання біохімічних процесів в різних регіонах планети.

1. Географическая интерпретация аэрокосмической информации: (Сб. науч. тр.) / Под ред. Л. Н. Васильева. — М.: Наука, 1988. — 131 с.
2. Григорьев А. А. Антропогенные воздействия на природную среду по наблюдениям из космоса. — Л.: Наука, 1985. — 239 с.
3. Григорьев А. А. Роль космических наблюдений в экологических исследованиях: опыт и перспективы. — Л.: Наука, 1989. — 36 с.
4. Грицик В. В., Бунь Р. А., Дачук В. С. Діакопичний підхід до моделювання біогеохімічного кругообігу вуглецю в біосфері // Доповіді НАН України. — 1997. — № 4. — С. 77—81.
5. Крапивин В. Ф., Свирижев Ю. М., Тарко А. М. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. — М.: Наука, 1982. — 272 с.
6. Мелуа А. И. Космические природоохранные исследования. — Л.: Наука, 1988. — 172 с.

7. Моисеев Н. Н., Александров В. В., Тарко А. М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. — М.: Наука, 1985. — 272 с.
8. Одум Ю. Экология. — М.: Мир, 1986. — Т. 1. — 328 с.
9. Keeling C. D., Bacastow R. B., Carter A. F., Piper S. A three dimensional model of atmospheric CO<sub>2</sub> transport based on observed winds: Analysis of observational data // Aspects of climate variability in the Pacific and western Americas / Ed. D. H. Peterson. Geophys. — 1989. — P. 165—236.

#### **SPECIALIZED GIS FOR ESTIMATING THE CARBON BUDGET OF THE CARPATHIAN REGION BASED ON THE EARTH REMOTE SENSING DATA**

*R. A. Bun', M. I. Husti, V. I. Lishchenyuk*

A mathematical carbon cycle model for the Carpathian Region is built, with the relationship between neighbouring regions taken into account. Earth remote sensing data are used for the determination of some model parameters. It is noted that the carbon dioxide concentration in the atmosphere is the controlling factor in the greenhouse effect at present. The structure of a specialized geoinformation system for estimating the carbon budget of the Carpathian Region is described.