

**МЕТОДИ ОЦІНКИ БАЛАНСУ ВУГЛЕЦЮ У ЛІСОВИХ
ЕКОСИСТЕМАХ: ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ
НАЗЕМНОГО ГАЗОМЕТРИЧНОГО КАМЕРНОГО МЕТОДУ
ДЛЯ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ**

О.О. Халаїм

Національний університет «Києво-Могилянська академія»,
м.Київ, Україна

Халаїм О.О. **Методи оцінки балансу вуглецю у лісових екосистемах: перспективи використання наземного газометричного камерного методу для Українських Карпат.** У статті зазначається актуальність досліджень потоків вуглецю в лісових екосистемах у контексті проблеми глобальної зміни клімату та необхідність польових вимірювань потоків вуглекислого газу, а також подається огляд сучасних методик оцінки балансу вуглецю у лісах. Обґрунтовується доцільність застосування камерного газометричного методу оцінки вуглецевого циклу в Українських Карпатах.

Khalaim O.O. **Methods of Carbon Balance Estimation in Forest Ecosystems: Perspectives of Chamber Gas Exchange Method Usage in Ukrainian Carpathians.** Article describes the scientific relevance of carbon fluxes research in forest ecosystems under the global climate change. The necessity of field measurements of CO₂ fluxes in Ukrainian Carpathians is provided together with a review of up-to-date methods with focus on gas exchange chamber method.

Оцінка внеску лісових біомів у глобальний цикл вуглецю в контексті проблеми зміни клімату є пріоритетним напрямком сучасних досліджень в екології. Якщо розглядати лісову екосистему з точки зору вуглецевого циклу, то вона являє собою систему блоків-резервуарів, що акумулюють всередині вуглець, та відповідних потоків, що пов'язують між собою резервуари та характеризуються різною інтенсивністю обмінних процесів (Шпаківська, 2009). Слід зазначити, що лісові

екосистеми вважаються одними з найбільш важливих депо вуглецю та забезпечують його довготривале консервування в біомасі (Лось, 2010; Пастернак, 2009; Загреба, 2013; Рожак, 2014). Для прийняття ефективних рішень в лісокористуванні та плануванні, які б сприяли більш активному процесу акумулювання вуглецю в лісах заради боротьби з проблемою зміни клімату, необхідним є використання адекватних польових методів вивчення вуглецевого циклу лісових екосистем.

Універсальною методикою оцінки балансу поглинання та емісії CO_2 лісовими екосистемами є узагальнена для різних регіонів світу методика Міжурядової групи експертів зі змін клімату (IPCC, 2006), яка, відповідно, не враховує локальні особливості потоків вуглецю в екосистемах. Вона базується на визначенні приросту та втрат біомаси і використовує дані про площу ділянки, щорічний приріст біомаси, дані про заготівлю деревини тощо (IPCC, 2006).

З метою локальної оцінки балансових потоків вуглецю в лісових екосистемах України, вітчизняними вченими сьогодні використовуються методики дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та технології ГІС (геоінформаційних систем). Вони дають можливість отримувати відкриті супутникові дані фізико-кліматичних характеристик та вегетаційних індексів по територіях вкритих лісами та оцінювати просторову динаміку комплексу лісотаксаційних та мікрокліматичних характеристик ареалу. Ці масиви даних є основою для побудови відповідних моделей інвентаризації (Загреба, 2013; Лакида, 2001; Білецький і Загреба, 2012).

Окремо вивчається роль лісових систем як фактору регулювання клімату в контексті його глобальної зміни. Вітчизняна методологія кліматорегулюючої ролі лісів заснована на проведенні розрахунків змін накопичення вуглецю та викидів парникових газів для певної площі лісу наприкінці кадастрового року та послідовного використання цього підходу в часі, з врахуванням значень приросту біомаси в одиницях сухої речовини та впливів щорічної мінливості екологічних факторів (Пастернак, 2009).

Наземні методи оцінки кількості вуглецю, що вивільнює та поглинає екосистема, дозволяють відкоригувати дані ДЗЗ та надати поправочні коефіцієнти до моделей балансу потоків CO_2 (Лялько та ін., 2015). Саме тому важливою є організація систематичних наземних польових досліджень потоків CO_2 на модельних лісових ділянках.

Основою для оцінки змін накопичення вуглецю в лісах, а також кількості CO₂, що поглинають та вивільнюють лісові екосистеми, є механізм обміну CO₂ між поверхнею землі та атмосферою (Пастернак, 2009; Загреба, 2013). Наземна оцінка емісії CO₂ з поверхні ґрунту може проводитись різними газометричними методами: камерними (англ., chamber method) та дифузійними, що включають метод турбулентної коваріації (англ., eddy covariance) (Машика, 2004).

Найпопулярнішим методом прямого вимірювання потоків CO₂ в системі «ґрунт–рослинність–атмосфера» є метод турбулентної коваріації (Baldocchi, 2001). Він передбачає дослідження потоків CO₂ за допомогою газоаналізаторів, що враховують коваріацію вертикальної та скалярної складових вихрових потоків повітря у пограничному шарі атмосфери. Інструментально він реалізується двома способами – з використанням газоаналізаторів з відкритим та з закритим оптичним шляхом. Перший спосіб уможливиле дистанційне вимірювання та використання БПЛА і є менш інвазивним, оскільки практично не вносить змін у потоки повітря і вимірює концентрації CO₂ *in situ*. Такі CO₂-газоаналізатори не є комерційно доступними. Другий спосіб передбачає забір повітря і використання широко доступного типу CO₂-газоаналізатора, але вносить деякі зміни в потоки повітря (Nagy et al., 2006).

Сильними сторонами методу турбулентної коваріації є дослідження потоків CO₂ в реальному часі, *in situ* та з низьким рівнем впливу на досліджувану екосистему, а недоліками є високий рівень статистичного шуму через просторову та часову неоднорідність концентрацій CO₂ та потоків повітря, їх висока залежність від метеорологічних умов та неможливість окремо визначити ґрунтове дихання (Wang et al., 2010).

Альтернативним, самостійним або доповнюючим, є камерний метод, за допомогою якого можна окремо оцінити ґрунтовий, ризосферний та геосистемний потік CO₂ у добре контрольованих умовах (Baldocchi, 2001). Різновидом цього методу є мікрокамерні, або кюветні техніки, коли окремі органи рослин оточують камерою. Існує два принципових варіанти – відкрита і закрита система: у першому варіанті система є проточною, повітря забирається з атмосфери або зі спеціального резервуару (англ., reference gas), проходить через камеру, газоаналізатор та повертається в атмосферу. В цьому випадку оцінка потоку CO₂ здійснюється за зміною, яка вноситься об'єктом відносно

атмосферної концентрації CO_2 . При цьому основні мікрокліматичні показники повітря (температура, вологість та об'ємний потік) залишаються незмінними. У випадку закритої системи повітря циркулює в замкнутому контурі, а потік CO_2 визначається за накопиченням зміни його концентрації в системі. Цей варіант є більш чутливим до слабких потоків CO_2 , менш вимогливим до стабільності та траєкторій руху повітря, але практично унеможливує стабілізацію мікрокліматичних параметрів. Завдяки низькому рівню статистичного шуму, цьому методу часто надають перевагу, а для зменшення інвазивності максимально скорочують час вимірювання.

У сучасних польових дослідженнях в Українських Карпатах для оцінки емісії вуглецю з поверхні ґрунту використовується метод макрореспірометрії з титриметричним закінченням (у ґрунтових монолітах 0-20 см шару ґрунту, з використанням приладу “Вуглець-Респірометр”, розробленим Спеціальним конструкторсько-технічним бюро Інституту Проблем Енергозбереження АН УРСР) (Рожак, 2014; Шпаківська, 2009). Для більш широкої оцінки потоків вуглецю до даних отриманих цим методом для домінуючих видів деревних порід є доцільним додати дані з обміну CO_2 на рівні листка (мікрокамерна, кюветна техніка), а також камеро-статистичні дані з ґрунтової емісії CO_2 з використанням інфрачервоного газоаналізатора (Лялько та ін., 2015). Завдяки доступності, зручності дизайну та експлуатації, застосування камерних методів сьогодні набуло широкого розповсюдження і має широкі перспективи в оцінці балансових потоків вуглецю Українських Карпат.

1. Білецький Б.О., Загреба Т.О. Концептуальна будова серверної геобаз даних лісовпорядкування / Б.О. Білецький, Т.О. Загреба // Матеріали восьмої наук.-практ. конф. з міжнар. участю «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика (СППР 2012)». – Київ: ППМС НАНУ, 2012. – С. 148–152.
2. Загреба Т.О. Інформаційна система для оцінювання емісії та поглинань парникових газів в лісовому господарстві / Т.О. Загреба // Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. – Київ, 2013. – С. 73–76.
3. Лакида П.И. Динамика запасов углерода в лесах Украины / П.И. Лакида // Проблемы лесоведения и лесоводства : сб. науч. тр. – Гомель, 2001. – Вып. 56. – С. 86–90.
4. Лось Н.М. Лісові екосистеми Центрального Полісся в контексті запобігання зміні клімату / Н. М. Лось // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.1. – С. 47–51.

5. Лялько В.І. Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки (Розділ 2) Експериментальне визначення стоку (абсорбції рослинами) CO₂ для основних агрокультур України / В.І. Лялько, О.О. Халаїм, О.І. Сахацький, Г.М. Жолобак, М.В. Ваколук, С.С. Дугін // Український журнал дистанційного зондування Землі, 2015. – № 4. – С. 46–74. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/ukjdzz_2015_4_8.pdf
6. Машика А.В. Сравнение двух методов измерения потока CO₂ с поверхности почвы / А.В. Машика // Материали докладов XV Коми республиканской молодежной научной конференции. Т. 2: XI молодежная научная конференция Института биологии Коми НЦ УрО РАН «Актуальные проблемы биологии и экологии». – Сыктывкар, 2004. – С. 176–178.
7. Пастернак В.П. Методологічні основи встановлення динаміки вуглецю у лісових екосистемах / В.П. Пастернак // Науковий вісник НУБіП України : зб. наук. праць. – К. : Вид-во. НУБіП України, 2009. – Вип. 135. – С. 205–210.
8. Рожак В.П. Пули і потоки вуглецю в лісових екосистемах Стрийсько-Сянської Верховини (Українські Карпати) / В.П. Рожак // Збірник наукових праць Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди. Біологія та валеологія, 2014. – Вип. 16. – С. 85–95.
9. Шпаківська І.М. Баланс вуглецю у лісових екосистемах Українських Карпат / І.М. Шпаківська // Наукові основи збереження біотичної різноманітності: Матеріали дев'ятої наукової конференції молодих учених (Львів, 1-2 жовтня 2009 р.). – Львів, 2009. – С. 46–52.
10. Шпаківська І.М. Оцінка запасів органічного вуглецю в лісових екосистемах Східних Бескидів / І.М. Шпаківська, О.М. Марискевич // Лісівництво і агролісомеліорація. – Харків : УкрНДЛГА, 2009. – Вип. 115. – С. 176–180.
11. Baldocchi D.D. Assessing ecosystem carbon balance: problems and prospects of the eddy covariance technique / D.D. Baldocchi // Ann. Rev. Ecol. and Syst., 2001. – V. 33. – 33 p.
12. IPCC 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston HS, Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (Eds). Published: IGES, Japan.
13. Nagy M.T., Janssens I.A., Yuste J.C., Carrara A., Ceulemans R. Footprint-adjusted net ecosystem CO₂ exchange and carbon balance components of a temperate forest / M.T. Nagy et al. // Agricultural and Forest Meteorology, Volume 139, Issues 3–4, 12 October 2006. – P. 344–360.
14. Wang M., Guan D.-X., Han S.-J. and Wu J.-L. Comparison of eddy covariance and chamber-based methods for measuring CO₂ flux in a temperate mixed forest / M. Wang et al. // Tree Physiology 30. – 2010. – P. 149–163.