

Т. Ю. Бедернічек

Вуглець, ґрунт і парникові гази



Громадська організація «Українська природоохоронна група»

Т. Ю. Бедернічек

Вуглець, ґрунт і парникові гази

Чернівці
Друк Арт, 2021

УДК 631.417.1: 631.433.3
Б38

Бедернічек Т. Ю.

Б38 Вуглець, ґрунт і парникові гази / Т. Ю. Бедернічек. – Чернівці : Друк Арт, 2021. – 32 с. – (Серія: «Conservation Biology in Ukraine». – Вип. 23)
ISBN 978-617-7849-86-4

Важливим джерелом парникових газів, з якого вони надходять у атмосферу, є ґрунт. За сучасними оцінками, лише через зміни землекористування, із ґрунту виділяється майже 20% від усієї кількості CO₂, що утворюється внаслідок спалення викопного палива.

У виданні розглянуто основні парникові гази, поточний і можливий внесок ґрунтів у глобальні кліматичні зміни, яку роль у цьому всьому відіграє швидкий біогеохімічний цикл вуглецю.

УДК 631.417.1: 631.433.3

На обкладинці: вимірювання потоку CO₂ із ґрунту газоаналізатором S157 (Qubit Systems, Канада) у біосферному заповіднику «Асканія-Нова» імені Ф. Е. Фальц-Фейна. Фото Т. Бедернічек.

U.S. DOE. 2008. Carbon Cycling and Biosequestration: Report from the March 2008 Workshop, DOE/SC-108, U.S. Department of Energy Office of Science.

Видання підготовлене у рамках проекту «Preservation of steppes and meadows in Voznesensky and Veselinovsky districts of the Mykolaiv region», що реалізується в Україні громадською організацією «Українська природоохоронна група» за партнерської підтримки громадської організації «NESEHNUTÍ Brno» (Чеська Республіка) і програми TRANSITION Міністерства закордонних справ Чеської Республіки.



ISBN 978-617-7849-86-4

© Т. Ю. Бедернічек, 2021
© ГО «Українська природоохоронна група», 2021

ЗМІСТ

Вступ	5
Вуглець	6
Вуглець і парникові гази	6
Потенціал глобального потепління	8
Швидкий біогеохімічний цикл вуглецю	10
Ґрунтовий резервуар вуглецю	13
Органічна речовина Ґрунту	14
Ґрунт і секвестрація вуглецю	22
Едафічна сітка Погребняка	25
Що далі?	27
Список джерел	29

ВСТУП

Важливим джерелом парникових газів, з якого вони надходять у атмосферу, є ґрунт. За сучасними оцінками, лише через зміни землекористування з ґрунту виділяється майже 20% від усієї кількості CO₂, що утворюється внаслідок спалення викопного палива. Якщо брати до уваги вплив різних способів обробітку ґрунту та систем удобрень і особливо суцільних рубок лісів та розорювання степів — цей відсоток буде значно більшим.

У цій публікації буде розглянуто основні парникові гази, поточний і можливий внесок ґрунтів у глобальні кліматичні зміни, яку роль у цьому всьому відіграє швидкий біогеохімічний цикл вуглецю та чому джунглі Амазонки — вже не «легені планети».

В Україні суцільні рубки лісу і розорення останніх цілинних степів є звичним явищем. На жаль, крім очевидної шкоди для біорізноманіття, такі заходи мають колосальний дестабілізуючий вплив на вуглецевий баланс наземних екосистем. Що ж потрібно і чого не варто робити, щоб ґрунт був поглиначем, а не джерелом парникових газів?

Вуглець

Вуглець або карбон є основним біогенним хімічним елементом на нашій планеті. Він входить до складу всіх органічних молекул і всіх живих організмів, а єдина відома нам форма життя називається «вуглецевою» або «водно-вуглецевою». Сам вуглець є одним із найпоширеніших елементів на нашій планеті, проте його переважна більшість міститься глибоко всередині Землі і практично не впливає на сучасні процеси у біосфері. Нещодавні дослідження *Fisher et al. (2020)* показали, що переважна більшість вуглецю, найімовірніше, зосереджена безпосередньо у ядрі Землі і, в такий спосіб, максимально віддалена від земної кори. Також важливо, що вуглецю на Землі є усталена кількість — він нікуди не зникає, а тими вкрай незначними кількостями цього хімічного елемента, які надходять на Землю із, наприклад, метеоритами, можна знехтувати. Отже, кількість вуглецю на планеті є постійною, а той вуглець, що міститься глибоко у земній кулі, не впливає на процеси, що відбуваються на її поверхні. Реальний вплив на формування теперішньої біосфери має лише незначна частина вуглецю планети — переважно зосередженого близько до земної кори. Тому, у контексті глобальних кліматичних змін, значно важливіше, скільки цього хімічного елемента є в атмосфері та суміжних геосферах, ніж абсолютна кількість вуглецю на Землі.

Вуглець і парникові гази

В атмосфері Землі міститься досить багато різних парникових газів. До них належать ті гази, молекули яких здатні ефективно поглинати інфрачервоне випромінювання — як те, що безпосередньо надійшло від Сонця, так і випромінювання з поверхні Землі. Саме завдяки їхній здатності поглинати інфрачервоне випромінювання (утримувати тепло), від кількості парникових газів за-

лежить температура приземних шарів атмосфери та, відповідно, склад і властивості біосфери. Часто парникові гази в цілому та спричинений ними парниковий ефект розглядають лише як щось негативне, що зовсім не відповідає дійсності. Навпаки, значною мірою саме через парниковий ефект, властивий атмосфері Землі, життя на нашій планеті стало можливим. Парниковий ефект сильно згладжує різницю температур між освітленими Сонцем і неосвітленими частинами Землі й дозволяє таким чином уникнути екстремальних коливань температури, як, наприклад, на Місяці або Марсі. Також більшість як науково-фантастичних, так і наукових сценаріїв тераформування інших планет передбачають використання парникових газів для забезпечення достатнього парникового ефекту в межах атмосфери планети.

Серед основних парникових газів у нашій атмосфері найважливішими є вуглекислий газ (CO_2), метан (CH_4) та, звісно, водяна пара. Крім них, здатністю поглинати інфрачервоне випромінювання володіють численні фреони (фторхлорвуглеводні), озон, оксиди азоту. Проте саме водяна пара, CO_2 та CH_4 відіграють визначальну роль у парниковому ефекті. Крім того, що їх у атмосфері є більше, ніж інших парникових газів, їм властиві сильні позитивні зворотні зв'язки: підвищення температури призводить до збільшення концентрації цих газів у атмосфері і навпаки (Заварзин, 2004). Наприклад, підвищення температури приземних шарів атмосфери призводить до інтенсивнішого випаровування води, а вища концентрація водяної пари в атмосфері, відповідно, до підвищення температури. Аналогічні закономірності спостерігаються і для вуглекислого газу. Його розчинність у воді сильно залежить від температури і з підвищенням температури істотно зменшується. Відповідно, чим нижча розчинність вуглекислого газу у воді — тим менше його буде поглинатись Світовим океаном, тим більше його лишатиметься в атмосфері і тим вища буде температура її призем-

них шарів¹. Насамкінець, підвищення температури призводить до руйнування клатратів (газогідратів) метану, що, відповідно, супроводжується вивільненням CH_4 в атмосферу та додатковим підвищенням температури її приземних шарів. (Бедернічек, 2017). Два з цих основних парникових газів є продуктами окиснення (CO_2) та відновлення (CH_4) вуглецю. З огляду на це, біогеохімічний цикл вуглецю має визначальний вплив на формування парникового ефекту на Землі.

Потенціал глобального потепління

Парникові гази, які містяться у атмосфері, істотно відрізняються як за концентрацією — одних може бути на порядки більше, ніж інших, так і за потенціалом впливу на глобальне потепління (Global warming potential). Цей показник залежить від здатності молекул газу поглинати інфрачервоне випромінювання, а також від часу перебування молекул конкретного газу в атмосфері. GWP відрізнятиметься для різних часових проміжків. Загальноприйнято наводити значення GWP для 20, 100 та 500 років (найчастіше використовується значення GWP_{100}). Оскільки GWP є відносним показником, він показує, у скільки разів вплив конкретного парникового газу на глобальне потепління є вищим, ніж вплив CO_2 . Останній прийнято за еталон з GWP рівним одиниці. GWP_{20} для метану складає, за різними оцінками, від 56 до 96 одиниць упродовж 20 років. Тобто в цей період вплив метану на глобальне потепління в 56—96 разів вищий, ніж вплив діоксиду вуглецю. З часом цей вплив зменшується і GWP_{100} для CH_4 вже є значно нижчим — від 21 до 40 одиниць, а GWP_{500} складає від 6.5 до 7.6 одиниць. Таке істотне зменшення значення GWP метану з часом пояснюється,

¹ З тим, на скільки сильно змінюється розчинність CO_2 у воді залежно від температури, стикався кожен. Газовані напої з холодильника легко відкрити без утворення піни, яка містить бульбашки вуглекислого газу, а теплі — практично неможливо.

зокрема, доволі нетривалим періодом перебування цього газу в атмосфері, який складає 12.4 ± 1.4 роки (Myhre et al., 2013). В інших парникових газах він може бути значно вищим. Наприклад, для закису азоту N_2O він є на порядок більшим і складає 121 ± 10 років, а GWP_{20} сягає 264 – 289 одиниць і майже не змінюється упродовж століття ($GWP_{100} = 265 – 310$).

Значення GWP застосовується для розрахунку CO_2 -еквіваленту (CO_2e) інших парникових газів. Скажімо, якщо в атмосферу було викинуто 1 тону метану, то в сторічному проміжку це еквівалентно 21 – 40 тонам CO_2 (в середньому 32 тонни). Аналогічні розрахунки можна проводити і з концентраціями парникових газів в атмосфері – підвищення концентрації CH_4 на 1 ppm² еквівалентне підвищенню концентрації CO_2 на 32 ppm. На щастя, сьогодні такий сценарій є малоімовірним, оскільки концентрація метану в атмосфері складає 1.9 ppm (Control..., 2021). Щоправда, сьогодні вона в 2.5 рази вища порівняно із доіндустріальною епохою (до 1750 року) і продовжує зростати. Тому кількісній оцінці потоків метану та управлінню ними варто приділяти значно більше уваги, ніж це робиться тепер.

Основним же парниковим газом на нашій планеті (за винятком водяної пари) є CO_2 . Його вміст майже в 200 разів вищий, ніж вміст метану, і продовжує стабільно зростати з доіндустріальної епохи. Станом на 2019 рік концентрація CO_2 в атмосфері складала 409.8 ppm і збільшується. За даними обсерваторії Мауна Лоа³ середньомісячна концентрація CO_2 в атмосфері у вересні 2021 року склала 413.3 ppm, тоді як у вересні 2020 року – 411.52 ppm.

² Для парникових газів зазвичай застосовують ppmV (одна мільйонна за об'ємом), якщо не вказано інше.

³ В обсерваторії Мауна Лоа, яка розміщена на однойменному вулкані на Гаваях на висоті 3 400 м над рівнем моря, ведеться найдовший безперервний моніторинг концентрації CO_2 в атмосфері, починаючи з 1958 року.

Понад 99% вуглецю, який міститься у атмосфері припадає саме на CO_2 . З огляду на це, досить часто як вміст вуглецю в атмосфері, так і потоки вуглецю з/в атмосферу розраховуються саме за CO_2 , нехтуючи при цьому, для спрощення, іншими парниковими газами. Хоч такий підхід не зовсім коректний, але він є цілком виправданий для кількісної оцінки біогеохімічного циклу вуглецю та ідентифікації основних потоків цього хімічного елемента.

Швидкий біогеохімічний цикл вуглецю

За оцінками 2011 року вважалось, що в атмосфері міститься 800 Гт⁴ С, наземній фітомасі 550 Гт С, у фотичній (світловій) зоні Світового океану 1 000 Гт С і в ґрунті 2 300 Гт С (рис. 1). З наведеного рисунка видно, що загалом Світовий океан містить колосальну кількість вуглецю: майже в 48 разів більше, ніж в атмосфері. Також значна кількість С (10 000 Гт С) входить до складу горючих корисних копалин. Але як вуглець у глибоководній частині Світового океану, так і той, що розміщений глибоко під землею у вигляді вугілля, нафти і газу, переважно слабо взаємодіє з атмосферою, біосферою та ґрунтом. Винятком є взаємодія між глибоководною частиною океану і його фотичною частиною, яка відбувається досить активно. До 2 Гт С щороку переходить з фотичної у афотичну зону у вигляді седиментів.

З наведеного рисунка видно, що спалення викопного палива є істотним потоком вуглецю, який складає 9 Гт С / рік. Порівняно із основними потоками вуглецю в атмосферу це наче і не багато, адже з океану в атмосферу щороку надходить 90 Гт С, а з суходолу внаслідок дихання рослин і емісії CO_2 з ґрунту 120 Гт С. Проте вважається, що екосистеми суходолу поглинають приблизно

⁴ Гт С або гігатонна вуглецю є загальноприйнятою одиницею, яку застосовують для характеристики біогеохімічного циклу вуглецю. Також, у літературі резервуари та потоки вуглецю інколи подають у Пг С (пентаграми вуглецю). 1 Гт С = 1 Пг С.

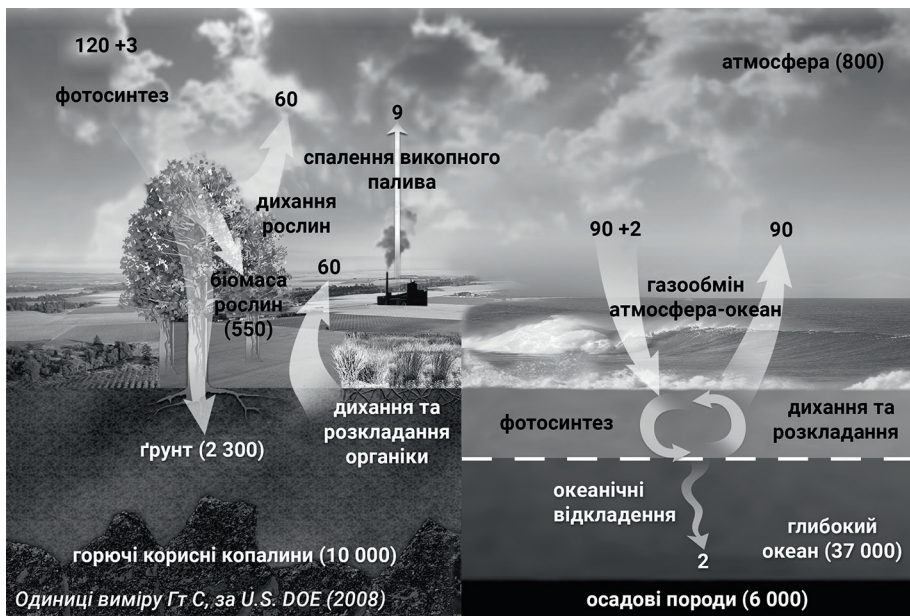


Рис. 1. Швидкий біогеохімічний цикл вуглецю за U.S. DOE (2008)

120 Гт С щороку внаслідок фотосинтезу, а екосистеми Світового океану — 90 Гт С. Надходження вуглецю в атмосферу внаслідок спалення викопного палива призводить до розбалансування швидкого біогеохімічного циклу вуглецю. Приблизно третина від щорічних викидів у 9 Гт С поглиналась екосистемами суходолу. Ще 25 % поглинав Світовий океан.

Загалом від 50 до 60 % антропогенних викидів CO_2 поглинались іншими резервуарами вуглецю, а решта — лишалась у вигляді CO_2 в атмосфері. Проте до такої оцінки швидкого біогеохімічного циклу вуглецю є одне важливе зауваження. Припущення про те, що і океану, і суходолу властивий практично нульовий вуглецевий баланс, виглядає надто неправдоподібно. І ця неправдоподібність тільки посилюється в контексті різнонаправлених процесів, які дестабілізують біогеохімічний цикл вуглецю. Наприклад, *вирубка лісів та розорювання степів призводять до різкого зменшення*

поглинання CO_2 наземними екосистемами і, водночас, сприяє інтенсивному надходженню діоксиду вуглецю з ґрунту в атмосферу. За таких умов малоімовірно, що баланс CO_2 у наземних екосистемах може бути майже нульовим.

Наприклад, донедавна Амазонія вважалась регіоном, який поглинає чи не найбільше CO_2 на планеті. Його часто називали «легені планети» і наголошували на необхідності збереження. На сьогодні Амазонія вже не є поглиначем вуглекислого газу, а навпаки — його джерелом (*Gatti et al., 2021*). Інтенсивне знеліснення цього регіону з подальшим формуванням на місці зрубів вторинних малопродуктивних екосистем призвели до різкого зменшення інтенсивності фотосинтезу на регіональному рівні. Крім того, внаслідок знеліснення були сильно порушені мікро- та мезокліматичні умови регіону, через що почалось масове всихання дерев. За таких умов припущення про нульовий вуглецевий баланс для екосистем суходолу виглядає ще менш реалістичним.

Сучасні уявлення про ту частину біогеохімічного циклу вуглецю, яка найістотніше впливає на сучасне потепління клімату, відображені у статті *Global Carbon Budget 2020* (*Friedlingstein et al., 2020*). Ця стаття є продовженням щорічної серії публікацій щодо глобальних річних бюджетів вуглецю, починаючи з 2013 року дотепер. Отже, за оцінками цих авторів в атмосфері міститься 860 Гт С, в ґрунті від 1500 до 2400 ГтС, у рослинній біомасі суходолу 450 — 650 Гт С. Щорічні викиди в атмосферу внаслідок спалення викопного палива оцінено в 9.4 Гт С, поглинання антропогенних викидів CO_2 Світовим океаном в 2.5 Гт С, а суходолом 3.4 Гт С. Важливо, що в статтях цієї серії відображено і антропогенні викиди CO_2 в атмосферу внаслідок зміни землекористування, які оцінено в 1.6 Гт С щороку. На жаль, точність таких оцінок є незадовільною.

Ґрунтовий резервуар вуглецю

Порівняно низька точність оцінок емісії CO₂ з ґрунту пов'язана із самою методологією таких оцінок, що полягає у розрахункових «бухгалтерських» моделях (Houghton, 2003). Інакше кажучи, за такого підходу розрахунково визначається, скажімо, потік CO₂ з ґрунту внаслідок суцільних рубок в широколистяних лісах Східної Європи. Але отримані дані не перевіряються (не уточнюються) в польових умовах. Тобто розрахункові дані не верифікують на підставі реальних оцінок емісії CO₂ на рубках тощо. Якщо раніше для формування приблизних оцінок такий підхід був цілком виправданий, то нині він виглядає як мінімум дещо застарілим. Упродовж останніх десяти років накопичено досить багато інформації щодо реальної емісії парникових газів з ґрунтів різних екосистем. Наприклад, Oertel et al. (2016) узагальнили наявну інформацію про емісію CO₂, CH₄ та N₂O з ґрунтів різних угідь (рілля, пасовища, сінокоси тощо) для різних кліматичних зон. Це фактичні дані, отримані внаслідок прямих вимірів у польових умовах, і їхнє використання дозволить істотно підвищити точність існуючих оцінок емісії парникових газів з суходолу. Крім того, ці автори зазначають, що доки не сформовано детальні бази даних і карти вмісту загального вуглецю, органічного вуглецю та загального азоту в ґрунтах — точність оцінок виділення парникових газів з ґрунту на регіональному та глобальному рівнях залишатиметься низькою.

На відміну від інших резервуарів вуглецю, ґрунт є дуже гетерогенним, а його дистанційна оцінка вкрай неточною. Використання супутників або дронів для збору актуальної інформації про склад та властивості ґрунту дуже обмежене в часі і просторі й переважно може бути застосоване лише до сільськогосподарських ґрунтів ранньою весною чи восени — коли рослини або ще не встигли вкрити ґрунт, або коли їх вже було прибрано. Дистанційна оцінка ґрунтів окремих екосистем — наприклад, лісів — є неможливою в принципі.

Ґрунтовий резервуар вуглецю складається з двох основних блоків — органічного та неорганічного. Перший з них представлений органічною речовиною ґрунту, яку інколи не зовсім коректно називають «гумус». Другий утворений переважно різноманітними карбонатами, здебільшого карбонатами кальцію та магнію. У дослідженнях, які пов'язані із швидким біогеохімічним циклом вуглецю або кліматичними змінами, ґрунтовим карбонатам приділяють традиційно мало уваги. Це пов'язано із кількома причинами: 1) більшість ґрунтових карбонатів потрапила у ґрунт з материнської породи, а не була утворена безпосередньо у ґрунті; 2) зміни вмісту і просторового розподілу карбонатів у ґрунті відбуваються повільно; 3) обмін між ґрунтовими карбонатами і атмосферою відбувається дуже повільно (*Zamanian et al., 2016*).

Органічна речовина ґрунту

На відміну від ґрунтових карбонатів, органічна речовина ґрунту швидко взаємодіє з атмосферою, біосферою та гідросферою і відчутно впливає на концентрацію парникових газів у атмосфері. Але вона є настільки складною і гетерогенною, що прогнозування її стану в конкретний момент часу є складним завданням.

Першою ж проблемою, з якою стикається дослідник, який починає працювати із ґрунтами, є проблема понятійна. Термін «органічна речовина ґрунту» застосовується не до однієї, а до тисяч різних речовин, які чомусь узагальнюють як «речовина», а не у множині як «речовини». Фактично органічна речовина є гетерогенною сумішшю різноманітних компонентів біотичного походження, які можуть бути різних форм та типів (*Coleman et al., 1989*). Два великих блоки, які можна виділити у складі органічної речовини ґрунту, — це живий та неживий (*Shibu et al., 2006*). До першого входять ґрунтові мікроорганізми, корені рослин, гіфи грибів тощо. До другого — власне численні хімічні сполуки, які містяться за межами живих клітин.

Динамічна рівновага, яка властива всім живим організмам, забезпечується постійними різнонаправленими процесами, які відбуваються в організмі. Процеси анаболізму або синтезу (утворення складніших речовин із простіших) відбуваються в організмі синхронно з процесами катаболізму або деструкції (розпад складніших речовин на простіші). Аналогічні процеси проходять і на рівні екосистем. Розбалансованість цих процесів складає десяті частки відсотка (Марчук, Кондратьєв, 1992). Оскільки процеси синтезу органічної речовини відбуваються дещо інтенсивніше за деструкцію, у багатьох екосистемах спостерігається накопичення цієї різниці у вигляді органічної речовини торфу, сапропелю або ж ґрунту. Фактично органічну речовину ґрунту можна назвати кінцевим продуктом численних субстрат-трофічних перетворень, які відбуваються у природних екосистемах (рис. 2).

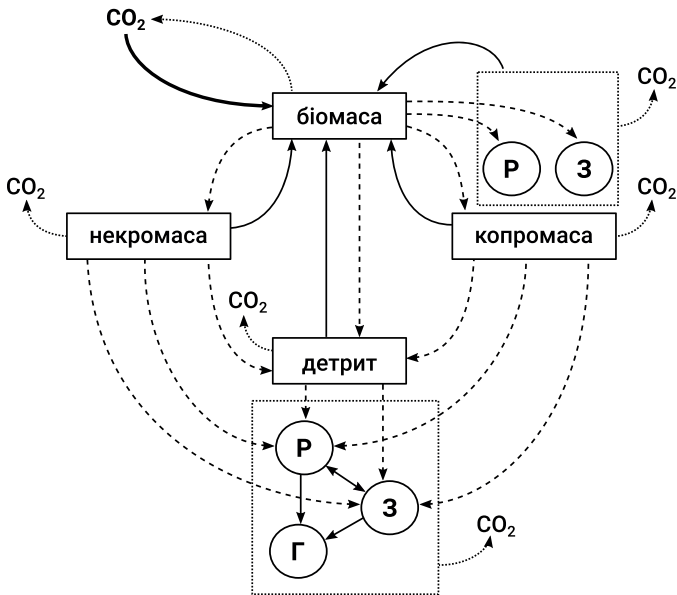


Рис. 2. Субстрат-трофічні перетворення органічної речовини у лісовій екосистемі: Р – розчинені органічні речовини, З – завислі органічні речовини, Г – гумусові речовини; суцільними лініями позначено процеси синтезу та гуміфікації, штрих-пунктиром – деструкції, за Бедернічек (2017)

Основним попередником (прекурсором) органічної речовини ґрунту є фітодетрит — відмерлі частини (листя, гілки, стовбури тощо) та продукти розкладу рослин. Інші компоненти органічної речовини ґрунту утворені продуктами, що сильно відрізняються за походженням від фітодетриту. Це продукти життєдіяльності та трупи тварин, жива та відмерла біомаса грибів та мікроорганізмів, а також різноманітні екзотичні складові, такі як медвяна роса та падь, змиви з поверхні листя, хвої та кори, камеді, виділення рослин у відповідь на напади комах тощо (Головко, 1984). Хоча на останні припадає вкрай мало вуглецю, не більше 0.1%, вони відчутно впливають на інші компоненти органічної речовини ґрунту через значну фізіологічну активність (наприклад, високий вміст ферментів та гормонів).

Загалом у складі органічної речовини ґрунту можна виділити три основні блоки: гумусові речовини (високомолекулярні, майже інертні речовини на зразок гуміну), завислі органічні речовини (органічні сполуки у колоїдній формі, різноманітні гумати і фульвати металів, фрагменти лігніну та лігноцелюлози у складі колоїдів тощо), розчинені органічні речовини (всі органічні сполуки, які фактично перебувають у розчиненій формі в ґрунті — наприклад, глюкоза, сахароза тощо). На жаль, більшість наявних даних про ґрунтовий резервуар вуглецю стосується саме валового вмісту цього елементу. За таких обставин не можна ідентифікувати скільки саме вуглецю міститься у розчиненій формі, скільки в колоїдах, скільки у складі гуміну.

У пострадянських країнах є ще один фактор, який істотно впливає на точність оцінок ґрунтового резервуару вуглецю. Він полягає в тому, що часто не зрозуміло, що саме визначалось в конкретному досліді — валовий вміст вуглецю чи вміст гумусу (органічної речовини ґрунту). В багатьох випадках відбувалась підміна одного поняття іншим або вміст одного видавали за вміст іншого. У 1890 р.

Ван Беммельн експериментально встановив, що в органічній речовині ґрунту (гумусі) ґрунтів, які він досліджував, містилось в середньому 58% вуглецю. Відповідно, знаючи вміст вуглецю в ґрунті і помноживши його на 1.724 (фактор Ван Беммельна), можна встановити приблизний вміст гумусу в ґрунті. Цей підхід був сприйнятий критично буквально одразу, а вже у 1930 р. *Waxman & Stevens (1930)* дійшли висновку, що значення цього фактора буде уточнено (змінено), коли буде накопичено достатньо інформації про природу органічної речовини ґрунту (для різних типів ґрунтів). На сьогодні відомо, що значення фактора Ван Беммельна для різних типів ґрунтів варіює у дуже широких межах — від 1.6 до 3.3 (*Бедернічек, Гамкало, 2014*). Проте в Україні, Росії, Білорусі, Казахстані та інших пострадянських країнах дотепер широко застосовується фактор Ван Беммельна, який вносить плутанину та погіршує якість і без того не надто достовірних даних щодо вмісту і запасу вуглецю в ґрунтах. Отже, для максимально точної оцінки ґрунтового резервуару вуглецю необхідно використовувати реальні дані, отримані в лабораторних умовах, а не розраховані на підставі сумнівних коефіцієнтів.

На жаль, навіть якщо відкинути усі можливі неточності та похибки, які неодмінно трапляються при оцінці вмісту та запасу вуглецю в ґрунті, і припустити, що ми точно знаємо, скільки вуглецю міститься в конкретному типі ґрунту до конкретної глибини, — цього недостатньо для оцінки реальних та потенційних взаємодій між ґрунтом, атмосферою та суміжними геосферами. Інакше кажучи, навіть детальна інформація про розмір (величину) ґрунтового резервуару вуглецю не дозволяє зробити достовірний прогноз щодо потоків вуглецю з цього резервуару в атмосферу (у вигляді CO_2) та гідросферу (у вигляді розчинених органічних речовин). Очевидно, що властивості майже інертних високомолекулярних сполук на зразок гуміну та водорозчинних вуглеводів, таких як, наприклад, глюкоза, колосально відрізняються. Гумін майже не

взаємодіє з іншими сполуками та може зберігатись у ґрунті упродовж тисяч років. Глюкоза та інші водорозчинні вуглеводи майже миттєво споживають ґрунтові мікроорганізми, тому термін перебування у ґрунті таких сполук – від кількох секунд до кількох днів. Загалом для того, щоб оцінити потік CO_2 з ґрунту в атмосферу, необхідно, крім інформації про валовий вміст вуглецю, володіти даними про склад органічної речовини ґрунту – скільки і яких органічних сполук у ній міститься. Тільки знаючи «активність» або ж «реакційну здатність» конкретного ґрунту, можна спрогнозувати, скільки CO_2 виділятиметься з нього за різних природних та антропогенних впливів. Зручним інструментом, який дозволяє це зробити, є поняття MRT (mean residence time), яке українською мовою можна передати як характерний час, або ж середній час перебування, або «життя» в ґрунті конкретної хімічної сполуки або фракції (Бедернічек, Гамкало, 2014). На рисунку 3 зображено схему,

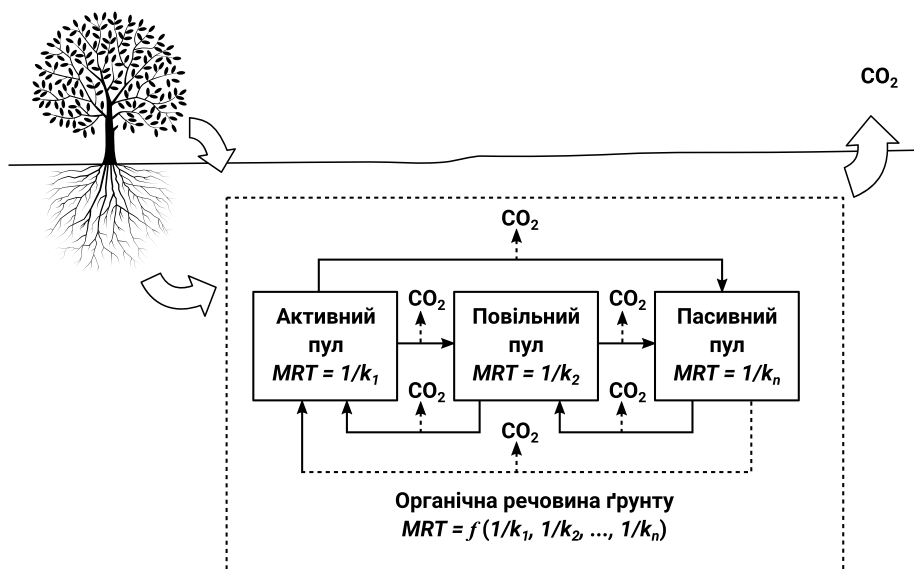


Рис. 3. Схема трансформації органічної речовини у ґрунті:
MRT – характерний час; k – константа швидкості мінералізації
($1/k \rightarrow t_{50\%}$), за Бедернічек і Гамкало (2014)

яка дозволяє скласти враження про якісний склад органічної речовини ґрунту. Такий підхід дає можливість приймати більш вмотивовані управлінські рішення щодо ґрунту як засобу виробництва, а також як резервуару вуглецю. Поділ на активний, повільний та пасивний пули органічної речовини є досить умовним, але дозволяє досить точно прогнозувати зміни стану органічної речовини ґрунту. Загалом активний пул утворений сполуками, характерний час яких не перевищує трьох років, хоч може бути і значно меншим (хвилини, години, дні). До пасивного пулу включають органічні сполуки, що перебувають у ґрунті упродовж 15–20 років, а до пасивного – сотні і навіть тисячі років. Інколи ці пули називають лабільний, стабільний, інертний. Інколи виділяють лише два пули – лабільний та стабільний (Гамкало, 2009), а до останнього включають і інертний теж. Очевидно, що чим більша деталізація, чим більше виділяють пулів органічної речовини, тим точнішою буде оцінка її властивостей та прогнози. Проте навіть ідентифікація двох пулів – активного (лабільного) та стабільного (пасивного) вже дозволить оцінити якість органічної речовини ґрунту й прогнозувати її зміни у часі та просторі. Важливо показати, що і органічна речовина ґрунту, і ґрунтовий резервуар вуглецю загалом є гетерогенними. Різні пули органічної речовини ґрунту неоднаково реагуватимуть на зміни лісокористування, клімату, різноманітні способи обробітку ґрунту та системи удобрення.

Зручним способом оцінки активного (лабільного) пулу органічної речовини ґрунту є водна екстракція за різних температур. *Ghani et al. (2003)* запропонували двоступеневий метод оцінки вмісту водорозчинної органічної речовини ґрунту за температур 20°C та 80°C, який на сьогодні є одним із найпоширеніших. Він дозволяє ідентифікувати доступні (розчинні в холодній воді) та потенційно доступні (розчинні у гарячій воді) сполуки. Важливо, що кількісно вміст екстрагованих гарячою водою органічних речовин відповідає розміру лабільного (активного) пулу органічної речовини

ґрунту. Тобто, знаючи валовий вміст вуглецю у зразку ґрунту та вміст водорозчинної (за 80°C) органічної речовини, їхню різницю можна ідентифікувати як стабільний (пасивний) пул органічної речовини. Залежно від типу ґрунту та екосистеми, у якій він міститься, розміри пулів органічної речовини ґрунту можуть істотно відрізнятись. Наприклад, за даними *Гамкало (2009)* у ясно-сірому лісовому ґрунті розмір активного (лабільного) пулу може сягати понад 40% від усієї органічної речовини ґрунту. Такий високий вміст лабільної органічної речовини в ґрунті переважно спостерігається у сільськогосподарських ґрунтах і є дещо нижчим у ґрунтах лісових, де він приурочений до верхньої приповерхневої частини ґрунтового профілю (*Бедернічек, Гамкало, 2014*). Важливо, що ґрунт може містити багато лабільної органічної речовини, яка не є довготривалим резервуаром вуглецю, як це прийнято вважати щодо ґрунту в цілому, і може швидко втрачатись внаслідок численних природних та антропогенних впливів.

Проілюструвати відмінність між лабільним та стабільним пулами органічної речовини ґрунту легко на прикладі знеліснення. Розглянемо, зокрема, клімаксну лісову екосистему — лісівники ідентифікують такі ліси як «перестійні» і вони є найбільш ласим шматком для лісозаготівлі. Отже, в такій клімаксній екосистемі процеси синтезу органічної речовини та її деструкції перебувають майже у рівноважному стані із незначним перевищенням накопичення над розкладом. Таку екосистему населяє багато рослин, тварин, грибів, мікроорганізмів через значну різноманітність трофічних (харчових) та топічних (просторових) ніш. У процесі фотосинтезу рослини утворюють органічні сполуки, значна частина яких виділяється у вигляді кореневих ексудатів у ґрунт і є субстратом для мікроорганізмів та грибів. Аж раптом всі деревні рослини одномоментно знищують шляхом проведення суцільної рубки. Очевидно, що ця екосистема втрачає майже весь свій потенціал як поглинач парникових газів на роки. Але ще дещо ціка-

ве відбувається з ґрунтом. Ґрунтові гриби та мікроорганізми, які звикли до постійного надходження доступних органічних сполук у вигляді кореневих ексудатів, раптом втрачають повністю свій субстрат. Вони швидко «доїдають» лабільну органічну речовину, яка ще залишалась в зоні їхньої досяжності, а потім починають руйнувати сполуки, що входять до стабільного пулу органічної речовини. Раніше в їх використанні не було потреби, бо лабільних органічних сполук було у надлишку. В результаті суцільної рубки лісовий ґрунт майже повністю втрачає лабільний пул органічної речовини ґрунту і частково втрачає стабільний пул органічної речовини ґрунту. Все це відбувається упродовж короткого часу — від кількох місяців до кількох років, а на відновлення ґрунтового резервуару вуглецю до того стану, в якому він був до суцільної рубки, знадобляться десятиліття. Важливо, що залежно від типу ґрунту вплив знеліснення, на ґрунт може відрізнятись. Якщо в ґрунті міститься багато лабільної органічної речовини — такий вплив буде значно сильніший. Натомість, чим більший відносний вміст у ґрунті стабільних органічних речовин — тим слабше на нього впливатимуть і знеліснення, і зміна землекористування. З цих же причин не можна узагальнити для ґрунтів різних типів — скільки CO_2 виділяється в атмосферу внаслідок суцільної рубки, оскільки ця кількість CO_2 прямо залежить від наявності доступного субстрату — лабільної органічної речовини ґрунту, яка буде використана гетеротрофами як джерело енергії.

Схожим чином реагують ґрунти степових екосистем після розорювання цілинного степу. Відомо, що упродовж перших кількох років після розорювання цілини врожайність вирощуваних на ній сільськогосподарських культур є високою, а потім різко зменшується. Однією із найважливіших причин різкого зменшення врожайності є виснаження лабільного пулу органічної речовини ґрунту, який забезпечував едафічний комфорт для мікроорганізмів, а також виступав джерелом біофільних елементів для рос-

лин. Коли лабільну органічну речовину вичерпано — ріст рослин сповільнюється, активність мікроорганізмів зменшується і вони починають споживати раніше недоступну для них стабільну органічну речовину ґрунту.

Отже, активний або лабільний пул органічної речовини ґрунту виконує одразу декілька важливих функцій — він є джерелом поживних речовин для рослин та енергії для мікроорганізмів; захищає від мікробної деструкції інші, переважно високомолекулярні сполуки органічної речовини ґрунту; виступає буфером, що дозволяє легко відновлюватись ґрунтам, які зазнали помірного впливу (наприклад, випас). Стале використання ґрунту повинно враховувати цю гетерогенність органічної речовини ґрунту й не допускати повного виснаження лабільного пулу органічної речовини ґрунту, і тим більше використання стабільного пулу органічної речовини ґрунту як джерела енергії та поживних речовин. Цього можливо досягнути шляхом ведення наближеного до природи лісівництва, а також застосування науково обґрунтованих систем ведення сільського господарства.

Ґрунт і секвестрація вуглецю

Одним із важливих завдань, яке сьогодні стоїть перед людством, є зменшення концентрації парникових газів і, перш за все, CO_2 в атмосфері. Перспективним напрямом, який дозволяє це зробити, є ґрунтова секвестрація вуглецю. Існує декілька способів, які дозволяють її досягнути. Перший — є найпростішим, найдешевшим і найбільш бажаним і полягає у невтручанні у природні процеси. Після розорення цілини або суцільної рубки лісу екосистема, переважно, здатна відновитись і вийти на попередній рівень. Переліг, сформований на місці цілини, чи вторинна лісова екосистема на місці рубки з часом почнуть акумулювати досить вуглецю в процесі фотосинтезу, збільшиться надходження органічних спо-

лук в ґрунт, поступово відбуватиметься їхнє фракціонування з виокремленням стабільних органічних сполук тощо. Мінусом такого підходу є його тривалість — на відновлення сильно порушених екосистем можуть іти десятки і навіть сотні років. Цей процес можна значно прискорити, проминувши піонерні стадії сукцесій. Наприклад, замість того, щоб чекати, як зруб покриється піонерними видами дерев, такими як осика, береза, вільха, та доки їх замінять інші види, такі як дуб чи бук, можна одразу висадити ті породи дерев, які росли на цій ділянці раніше. Проте такий підхід вимагає значних енергетичних дотацій (вибір і транспортування посадкового матеріалу, висадка дерев, рубки догляду тощо). Іншою альтернативою можуть бути рубки переформування, які, наприклад, сьогодні впроваджуються у Карпатському біосферному заповіднику у буферній зоні та зоні антропогенних ландшафтів. Раніше на значних площах на місці корінних ялицево-букових та ялицево-ялиново-букових лісів були сформовані штучні насадження ялини європейської (смеречники). Такі монокультурні ліси є нестійкими, вразливими до різноманітних шкідників і хвороб, а ґрунти під такими лісами відрізняються несприятливими водно-фізичними властивостями. Рубки переформування дозволяють сформувати на місці монокультурних насаджень ліс із кількох основних порід дерев, властивих корінним лісовим екосистемам регіону, та істотно покращити просторову структуру цих лісів, що сприятливо впливає на секвестрацію вуглецю і лісовими екосистемами та ґрунтами. Аналогічно, максимально швидке припинення використання розораної цілини, доки в ґрунті ще збережено депо насіння, та внесення насіння з суміжних непорушених ділянок цілинного степу дозволяють значно швидше відновити порушену екосистему, але це також потребує значних енергетичних витрат.

До певної межі, чим більше енергії вкласти в ґрунтовий резервуар вуглецю, тим стабільніший його пул можна поповнити. Наприклад, якщо внести сидерати у ґрунт, вони майже повністю

поповнять лабільний пул органічної речовини ґрунту. Якщо ж ці сидерати скосити і піролізувати (обвуглити), після чого внести в ґрунт — вони майже повністю перейдуть у стабільний пул органічної речовини ґрунту. Проте навіть за умов, коли стабільних органічних сполук у ґрунті достатньо, це не скасовує потребу у лабільних органічних сполуках, які виконуватимуть функцію буфера та захищатимуть стабільну органічну речовину ґрунту від зовнішніх впливів. Ґрунтова секвестрація вуглецю буде тим ефективнішою, чим вищий відносний вміст стабільної органічної речовини ґрунту.

Передумовою не лише ефективної ґрунтової секвестрації вуглецю, але й сталого ведення сільського та лісового господарства загалом є моделювання й прогнозування стану ґрунту за різних впливів у близькій та далекій перспективі. Найпопулярнішою на сьогодні такою моделлю динаміки або обороту вуглецю в ґрунті є RothC-26.3, розроблена на базі найстарішого у світі Ротамстедського сільськогосподарського стаціонару у м. Ротамстед, Великобританія (Coleman et al., 1997). Також широко застосовується модель DNDC (DeNitrification—DeComposition). Переважно згадані вище моделі застосовують паралельно, оскільки вони працюють з різними функціональними пулами органічної речовини ґрунту, і такий підхід істотно підвищує інформативність отриманих даних (Singh, Benbi, 2020). Навіть в РФ розроблена та впроваджена модель динаміки органічної речовини ROMUL (Chertov et al., 2001). На жаль, в Україні, незважаючи на наявність численних багаторічних сільськогосподарських стаціонарів, власних моделей динаміки органічної речовини ґрунту розроблено не було, а використання закордонних моделей RothC-26.3, DNDC та їхніх аналогів зведено до мінімуму. Через це, зокрема, прогнози щодо стану ґрунтового резервуару для України виглядають непевними й переважно базуються на експертній думці конкретних науковців і, відповідно, є непорівнюваними з аналогічними ґрунтами та умовами у інших країнах.

Едафічна сітка Погребняка

Ефективне і стає ведення сільського та лісового господарства, як і планування ефективних заходів із біотичної та ґрунтової секвестрації вуглецю у межах конкретної території можливе лише із врахуванням конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Видатний український лісівник та еколог Петро Погребняк тривалий час вивчав оптимальні умови розвитку лісів у різних природних зонах України. Його цікавило, який тип лісу в яких умовах найкраще функціонує і, відповідно, де і які ліси оптимально вирощувати. Результати його багаторічних досліджень на значних площах дозволили йому сформулювати принцип едафічної сітки, яка відображає типи лісорослинних умов. Едафічна сітка Погребняка є двовимірною системою координат, у якій вісь абсцис називається трофогенним рядом і змінюється від оліготрофних (дуже бідних) до мегатрофних (дуже родючих) ґрунтів. Вісь ординат називається гігrogenним рядом і показує, наскільки вологими є умови — від дуже сухих (ксерофітних) до мокрих (гідрофітних).

Кожній ділянці суходолу властивий конкретний тип лісорослинних умов і її можна класифікувати відповідно до принципів едафічної сітки Погребняка (рис. 4). Наприклад, мезотрофні гігромезофітні умови (вологий сугруд) можуть змінитись за якихось істотних зовнішніх впливів. Глобальні кліматичні зміни здатні призвести до істотного зменшення вологості і в такому разі тип лісорослинних умов може змінитись з гігромезофітних до мезофітних (з C_3 на C_2). Якщо ж вологість локально зростає — тип лісорослинних умов зміниться з C_3 на C_4 . Схожі зміни можливі і у трофогенному ряді. Проте усі ці зміни, за винятком якихось катастрофічних, можливі, переважно, в межах однієї одиниці як у гігrogenному, так і трофогенному рядах. Оліготрофні умови не можуть стати мегатрофними, а ксерофітні умови — гідрофітними.

Гігrogenний ряд		Трофогенний ряд			
Умови		А оліго- трофічні	В олігомезо- трофічні	С мезо- трофічні	Д мега- трофічні
	Тип	бір	субір	сугруд	груд
0 ксерофітні	дуже сухий	↑ A ₀	← B ₀	----- C ₀	----- D ₀
1 мезоксерофітні	сухий	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
2 мезофітні	свіжий	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
3 гігромезофітні	вологий	A ₃	B ₃	C ₃	D ₃
4 гігрофітні	сирий	A ₄	B ₄	C ₄	D ₄
5 гідрофітні	мокрый	A ₅	B ₅	C ₅	D ₅

Рис. 4. Едафічна сітка Погребняка, за Бедернічек (2017)

Едафічна сітка є дуже зручним способом, який дозволяє не лише категоризувати ґрунти відповідно до типів лісорослинних умов, а і досить точно прогнозувати зміни їхніх властивостей за різних сценаріїв кліматичних змін. Скажімо, якщо оцінити інтенсивність потоку CO₂ з поверхні темно-сірого ґрунту в мезофітних, гігромезофітних та гігрофітних мезотрофних умовах, то застосувавши принцип space-for-time substitution, можна робити достовірні прогнози, якою буде емісія конкретного темно-сірого ґрунту, якщо вологість зросте і умови з гігромезофітних стануть гігрофітними тощо (Blois et al., 2013). Аналогічно вивчення впливу зміни землекористувань, способів обробітку ґрунту, систем удобрення, систем рубок також доцільно проводити у межах едафічної сітки Погребняка. Її застосування істотно підвищить точність оцінок та достовірність прогнозів реакції наземних екосистем і, зокрема, ґрунтового пулу вуглецю на кліматичні зміни.

Що далі?

Ґрунтова емісія CO_2 є значним і недооціненим потоком цього парникового газу в атмосферу. Дані, на яких базується наближена оцінка цього потоку, є розрахунковими і часто не враховують реальну оцінку емісії CO_2 з поверхні ґрунту. Відповідно, станом на сьогодні, ми навіть приблизно не можемо сказати, скільки діоксиду вуглецю надходить в атмосферу з ґрунтів України.

Вкрай необхідною є реальна оцінка емісії CO_2 з поверхні ґрунту в атмосферу. Її доцільно виконувати на основі мережі довготривалих сільськогосподарських стаціонарів Національної академії аграрних наук України, а також мережі постійних пробних площ, закладених у різних типах лісорослинних умов, за різних способів лісокористування. Такий підхід дозволить не лише оцінити реальний стан речей, а й отримати вкрай важливі дані для прогнозування наслідків кліматичних змін у майбутньому.

Варто категорично відмовитись від діяльності, яка сильно дестабілізує ґрунтовий резервуар вуглецю. В лісовому господарстві такою діяльністю є суцільні рубки. В сільському господарстві — розорення цілинних ділянок степів. Одним із можливих механізмів, які можуть бути застосовані для стримування такої діяльності, є введення штрафних санкцій за викиди понаднормових кількостей CO_2 , які неодмінно відбуваються тривалий час після суцільних рубок, та розорювання цілинних ділянок степу.

Емісія CO_2 з ґрунту «внаслідок зміни користування» є лише одним із аспектів. Вуглекислий газ надходить з ґрунту в атмосферу постійно і залежить від типу лісорослинних умов, типу ґрунту, способу обробітку, системи удобрення тощо. Підміна понять «ґрунтова емісія CO_2 » і «емісія CO_2 внаслідок зміни землекористування» є неприпустимою.

Чим далі, за едафічною сіткою Погребняка, фактичний тип екосистеми перебуває від оптимального типу лісорослинних умов для цієї території — тим менш стійкою є така екосистема та тим більше затрат енергії необхідно на її збереження. Саме тому ідея заліснення степу є абсолютно безглуздою, економічно не вигідною та екологічно шкідливою.

Список джерел

- Blois J.L., Williams J.W., Fitzpatrick M.C., et al. (2013) Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110:9374 – 9379. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220228110>
- Chertov, O.G., Komarov, A.S., Nadporozhskaya, M., et al. (2001) ROMUL – a model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling. *Ecol Modell* 138:289–308. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00409-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00409-9)
- Coleman, D.C., Oades, J.M., Uehara, G., (1989). *Dynamics of Soil Organic Matter in Tropical Ecosystems*. University of Hawaii Press, Honolulu
- Coleman, K., Jenkinson, D.S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klir, J., Korschens, M., Poulton, P.R., Richter, D.D., 1997. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma* 81, 29–44.
- Control methane to slow global warming – fast. *Nature* 596, 461 (2021) <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02287-y>
- Fischer, R. A., Cottrell, E., Hauri, E., Lee, K. K. M., & Le Voyer, M. (2020). The carbon content of Earth and its core. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(16), 8743 – 8749. <https://doi.org/10.1073/pnas.1919930117>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M.W., et al. (2020) Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst Sci Data* 12: 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Gatti, L.V., Basso, L.S., Miller, J.B. et al. (2021) Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595, 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Ghani, A., Dexter, M., Perrott, K.W. (2003) Hot-water extractable carbon in soils; a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 35 (9): 1231–1243 [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00186-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00186-X)

- Houghton, R.A. (2003), Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. *Tellus B*, 55: 378-390.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.2003.01450.x>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang (2013) *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., et al. (2016) Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Geochemistry* 76:327–352.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>
- Riebeek, H. (2011) *The Carbon Cycle*.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>
- Shibu, M.E., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Aggarwal, P.K. (2006) Quantitative description of soil organic matter dynamics—A review of approaches with reference to rice-based cropping systems. *Geoderma* 137:1–18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.008>
- Singh, P., Benbi, D. K. (2020). Modeling Soil Organic Carbon with DNDC and RothC Models in Different Wheat-Based Cropping Systems in North-Western India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1–20.
- Waxman, S.A., Stevens, K.R. (1930) A critical study of the methods for determining the nature and abundance of soil organic matter. *Soil science*. 30: 97–116.
- Zamanian, K., Pustovoytov, K., Kuzyakov, Y. (2016) Pedogenic carbonates: Forms and formation processes. *Earth-Science Rev* 157:1–17.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003>

- Бедернічек, Т., Гамкало, З. (2014). *Лабільна органічна речовина ґрунту: теорія, методологія, індикаторна роль*. Київ, Кондор.
- Бедернічек, Т. (2017). Резервуари і потоки карбону в наземних екосистемах України. *Вісник НАН України*, 1, 100–108.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15407/visn2017.01.098>
- Заварзин, Г.А. (2004). *Лекции по природоведческой микробиологии*. Москва, Наука.
- Гамкало, З.Г. (2009). *Екологічна якість ґрунту*. Львів, Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
- Головко Э.А. (1984). *Микроорганизмы в аллелопатии высших растений*. Киев, Наукова думка.
- Марчук, Г.И., Кондратьев, К.Я. (1992). *Приоритеты глобальной экологии*. Москва, Наука.

Наукове видання

Бедернічек Тимур Юрійович

Вуглець, ґрунт і парникові гази

Редактор Людмила Звенигородська
Макетування Анатолій Ротт

Підписано до друку 23.11.2021. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Roboto. Друк офсетний.
Ум. друк. арк. 2,09. Тираж 300 прим. Зам. 211392

Видавець ТОВ «Друк Арт»
58018 Чернівці, вул. Маловокзальна, 2Д, т. 585-432
Ліцензія про державну реєстрацію ДК № 2741 від 15.01.2007 р.
Виготовлювач ФОП Варвус В. В.

