

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-276>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/276>

УДК 631.1:631.4

## ПЕРСПЕКТИВИ МІЖНАРОДНИХ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КРУГООБІГУ ВУГЛЕЦЮ В СИСТЕМІ «ГРУНТ-РОСЛИНА-АТМОСФЕРА»

Ю.О. Тараріко<sup>1</sup>, докт. с.-г. наук, В.П. Лукашук<sup>2</sup>, канд. с.-г. наук

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0001-8475-240X>; e-mail: [urtar@bigmir.net](mailto:urtar@bigmir.net);

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;  
<https://orcid.org/0000-0003-0081-0962>; e-mail: [vita\\_lukashuk@ukr.net](mailto:vita_lukashuk@ukr.net)

**Анотація.** Україна розташована на широті Франції, північної частини Сполучених Штатів Америки і південних районів Канади, має аналогічні з цими країнами природні умови. Різні за ґрунтово-кліматичними умовами регіони ведення землеробства в Україні можуть розглядатися як аналоги подібних за природними умовами сільськогосподарських територій в інших частинах світу. Ґрунти з високим вмістом вуглецю є більш продуктивними і здатні краще фільтрувати і очищати воду. Вода, яка утримується в ґрунті, є джерелом для 90 % світової сільськогосподарської продукції. Один із головних блоків досліджень – вивчення співвідношень основної, побічної продукції врожаю, а також кореневих і рослинних решток на різних агрофонах із використанням перспективних сортів і гібридів сільськогосподарських культур. Використання оптичних експрес-методів доцільно здійснювати за етапами органогенезу польових культур, що дозволить встановити залежності між ними, розробити критерії та індикатори для ефективного регулювання кругообігу азоту і вуглецю в системі «ґрунт-рослина-атмосфера», розробити моделі формування і трансформації кореневих та інших рослинних залишків з урахуванням мінливих агрометеорологічних факторів, сівозмін, особливостей галузевої структури аграрного виробництва, сортів і гібридів польових культур. У перспективі це дозволить визначитися зі спрямованістю селекційної роботи з метою збільшення обсягів накопичення кореневої маси і досягнути гарантовано бездефіцитного балансу органічного вуглецю в ґрунті. Також дослідження дозволять цілеспрямовано і ефективно регулювати кругообіг вуглецю і азоту як на рівні окремих аграрних виробничих систем, так і в масштабах однотипних сільськогосподарських територій і регіонів з урахуванням усієї множини змінних факторів, в т. ч. особливостей галузевої структури виробництва, змін клімату та ін.

**Ключові слова:** ґрунт, ґрунтова волога, вуглець, система «ґрунт – рослина – атмосфера», зміни клімату, викиди  $N_2O$

**Актуальність дослідження.** Відомо, що ґрунти з високим вмістом вуглецю є більш продуктивними і здатні краще фільтрувати і очищати воду. Вода, яка утримується в ґрунті, є джерелом для 90 відсотків світової сільськогосподарської продукції. Ґрунтовий органічний вуглець має велике значення в процесі зміни клімату. У всьому світі запаси вуглецю в метровому шарі ґрунту оцінюються в 1,417 гігатонн (ГТ) – майже у два рази більше, ніж в атмосфері і в десятки разів більше рівнів щорічних антропогенних викидів. Нераціональне використання земель супроводжується викидами великих обсягів парникових газів. В результаті деградації однієї третини ґрунтів у світі викиди вуглецю в атмосферу склали 78 ГТ. Подальше скорочення запасів ґрунтового вуглецю в результаті нераціонального землекористування завдає зусиллям щодо обмеження зростання глобальної температури в цьому столітті, щоб уникнути негативних наслідків зміни клімату.

Відновлення ґрунтів на сільськогосподарських і деградованих землях може видалити до 51 ГТ вуглецю з атмосфери [1; 2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Останнім часом проведено досить значний комплекс різнопланових досліджень стосовно кругообігу вуглецю в системі «ґрунт-рослина-атмосфера». Дослідженням цих питань займалися Скрильник С.В., Кравець Т.Ф. [3], В.В. Дегтярьов [4], Трофименко П.І. [5] та ін. Однак питання розробки моделей оптимізації кругообігу біогенних елементів і розробки агротехнологій, систем землеробства і систем аграрного виробництва, які були б здатні акумулювати більше вуглецю, скоротити викиди  $N_2O$  і підвищити ефективність використання ґрунтової вологи, вивчені недостатньо.

**Мета дослідження** полягає в тому, що для перспективи міжнародних комплексних досліджень кругообігу вуглецю в системі «ґрунт-рослина-атмосфера» буде встановлено

© Тараріко Ю.О., Лукашук В.П., 2021

залежності, які дозволяють розробити моделі оптимізації кругообігу біогенних елементів і запропонувати агротехнології, системи землеробства і системи аграрного виробництва, здатні акумулювати на 50% більше вуглецю, на 50% скоротити викиди  $N_2O$  і на 25% підвищити ефективність використання ґрунтової вологи.

**Матеріали та методи дослідження.** Застосовано теоретичні методи наукового дослідження: аналіз і синтез, порівняння, класифікація і узагальнення.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Україна розташована на широті Франції, північної частини Сполучених Штатів Америки і південних районів Канади, має аналогічні з цими країнами природні умови [6]. Площа України становить 603,7 тис. км<sup>2</sup>. Протяжність території між крайніми точками з півночі на південь складає 893 км. Незважаючи на відносно незначну відстань рівень зволоження коливається від надлишкового (600–700 мм) на півночі до недостатнього (250–300 мм) в сухому Степу на півдні [7]. При цьому Україна характеризується переважно рівнинним рельєфом, високоякісними ґрунтами, зокрема родючими

чорноземами, які займають 68% всіх орних земель [8]. Отже, різні по ґрунтово-кліматичних умовах регіони ведення землеробства в Україні можуть розглядатися як аналоги подібних за природними умовами сільськогосподарських територій в інших частинах світу (рис. 1).

Очевидно, що підвищуючи врожайність сільськогосподарських культур агротехнічні заходи позитивно впливають на накопичення органічних залишків в кореневмісному шарі ґрунту. Перш за все це оптимізація живильного і водно-повітряного режимів ґрунтового покриву, поліпшення його фізико-хімічних і агрофізичних параметрів. Проте на відміну від наземної біомаси точно оцінити обсяги накопичення органічного вуглецю в кореневмісному шарі значно складніше [10; 3; 11]. Важливо також враховувати саме тривалість впливу прогресивних або деструктивних агротехнологій та систем землеробства на ґрунт. Наприклад, під впливом систематичного застосування збалансованих доз органічних і мінеральних добрив запаси органічної речовини і доступних форм макро- і мікроелементів можуть зростати в 1,5–2 рази, що, своєю чергою, супроводжується відповідним

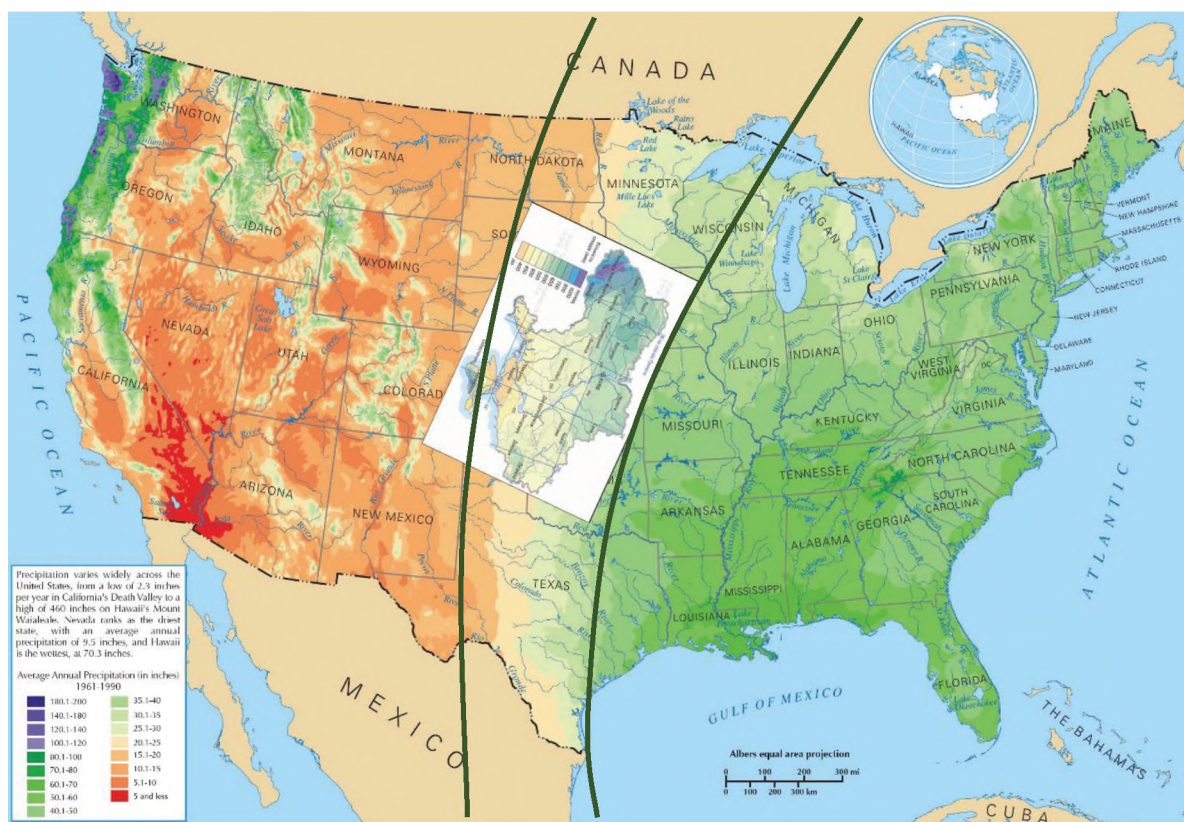


Рис. 1. Аналогічні за умовами зволоження сільськогосподарські території України і Сполучених Штатів Америки

Джерело: [9]

збільшенням продуктивності посівів щодо вихідного природного фону родючості [12; 13]. Навпаки, негативний баланс вуглецю призводить до погіршення практично всіх основних параметрів ґрунту, знижується ефективність мінеральних добрив і внаслідок падіння продуктивності сівозміни ще в більшій мірі загострюється дефіцит рослинних рештків в кореневмісному шарі [14; 4]. У зв'язку з цим ефективність різних агротехнологій або їх елементів доцільно вивчати в тривалих стаціонарних дослідках [15; 16]. Це системи застосування добрив, обробітку ґрунту, сівозміни, зрошення та осушення. Так само варіанти цих дослідів можна розглядати як елементарні моделі аграрного виробництва певної спеціалізації з відповідними рівнями рециркуляції вуглецю, азоту та інших біогенних елементів. Наприклад, варіанти з тривалим застосуванням відходів тваринництва на добриво імітують галузеву структуру з розвиненим тваринництвом; систематичне внесення тільки мінеральних добрив, заорювання соломи і зеленої маси сидератів характерно для рослинницької спеціалізації; застосування біогумусу моделює біоенергетичну спрямованість виробничої системи з отриманням біогазу та т. д. [17; 18].

Більшість експериментальних полігонів (по Україні їх понад 100) закладені в другій половині минулого століття і завдяки наявності довгих рядів інформації по врожайності культур і зміні основних параметрів ґрунтового покриву дозволяють досить об'єктивно оцінювати результати тривалого застосування різних систем землеробства або їх складових, в т. ч. за обсягами накопичення соломи, кореневої біомаси та післяжнивних решток. Більш того, основна перевага такого підходу полягає в можливості простежити закономірності трансформації накопиченої в ґрунті за вегетаційний період органічної маси в гумусові речовини і вуглекислий газ [5]. Це ж стосується зв'язаного ґрунтовими мікроорганізмами органічного і внесеного з мінеральними добривами мінерального азоту. Отже, дослідження доцільно проводити на експериментальній і інформаційній базі агротехнічних дослідів, розміщених у найбільш характерних і контрастних по ґрунтово-кліматичних умовах сільськогосподарських регіонах.

Відомо, що одним із головних блоків досліджень має стати вивчення співвідношень основної, побічної продукції врожаю, а також корневих і рослинних залишків на різних агрофонах з використанням перспективних сортів і гібридів сільськогосподар-

ських культур. Це необхідно для отримання відповідних рівнянь регресії. Важливо також встановити взаємозв'язок між фенологічними показниками на різних етапах росту і розвитку рослин (висота, площа листового апарату і ін.) і динамікою розвитку їх кореневої системи, змістом у ґрунті різних сполук азоту та інших елементів живлення, реакцією ґрунтового розчину, запасами вологи та ін.

Найважливішим фактором зростання і розвитку рослин, в т. ч. за допомогою впливу на спрямованість процесів трансформації органічного вуглецю і різних форм азоту ґрунту, є водно-повітряний режим рослини. В цьому аспекті, з одного боку, необхідно встановити значення інтенсивності росту, розвитку і проникнення в глибші горизонти ґрунтового профілю кореневої системи. З іншого боку, вимагає розуміння можливість підвищення вологоутримуючої здатності ґрунту внаслідок збільшення вмісту органічної речовини в ньому.

Відомо, що інтенсивність емісії  $N_2O$  залежить від активності засвоєння рослинами і ґрунтовими мікроорганізмами мінерального азоту ( $N-NO_3 + N-NH_4$ ), в т. ч. мінеральних добрив. У разі його дефіциту останні заповнюють недостачу шляхом руйнування ґрунтової органічної речовини з відповідним збільшенням викидів  $CO_2$  в атмосферу. Тобто, емісія обох газів взаємопов'язана і безпосередньо залежить від співвідношення вуглецю свіжої органічної речовини і мінерального азоту –  $3:N$ . Отже, для визначення оптимальних інтервалів співвідношення  $C:N$  також потрібні відповідні дослідження.

Для більш глибокого розуміння спрямованості процесів трансформації органічного вуглецю і різних форм азоту важливо також встановити коефіцієнти гуміфікації (депонування) рослинних залишків, активність процесів нітрифікації, целюлозно розкладницьку і протеолітичну здатність ґрунту, активність ферментів поліфенолоксидази і пероксидази, а також провести безпосереднє пряме вимірювання обсягів емісії  $CO_2$  і  $N_2O$ . Отже, одночасне вимірювання і визначення зазначених вище показників, в т. ч. з використанням оптичних експрес – методів, доцільно здійснювати за етапами органогенезу польових культур, що дозволить встановити залежності між ними, розробити критерії та індикатори для ефективного регулювання кругообігу азоту і вуглецю в системі «ґрунт – рослина – атмосфера», розробити моделі формування і трансформації корневих та інших рослинних залишків з урахуванням

мінливих агрометеорологічних факторів, сівозмін, особливостей галузевої структури аграрного виробництва, сортів і гібридів польових культур. У перспективі це дозволить визначитися зі спрямованістю селекційної роботи з метою збільшення обсягів накопичення кореневої маси і досягнення гарантовано бездефіцитного балансу органічного вуглецю в ґрунті.

Доцільність застосування такого підходу підтверджується раніше проведеними дослідженнями (рис. 2).

Наприклад, встановлено, що зміст стабільних гумусових сполук у чорноземі типовому не змінюється, а сезонна динаміка лабільної органічної речовини в ґрунті залежить від обсягів надходження рослинних залишків, перш за все кореневої маси, і активності їх мінералізації. Перший етап – під час росту культури і після збирання врожаю відбувається первинна деструкція свіжої кореневої маси, яка поступово відмирає протягом вегетаційного періоду з накопиченням проміжних продуктів розкладання. На другому етапі, що належить до осінньо-зимового періоду, а також до початку вегетації наступної культури, відбувається значне підвищення активності мінералізації і швидке розкладання лабільних органічних сполук, що утворилися з рослинних залишків попередньої культури. Очевидно, що ця фракція гумусових речовин є важливим резервом елементів живлення і енергетичним матеріалом для ґрунтових мікроорганізмів, що забезпечує сприятливі умови росту і розвитку культурних рослин у першій половині вегетації, коли їх коренева система розвинена недостатньо.

Можливо саме вихідна кількість детриту, поряд з іншими факторами, що впливають на

продуктивність посівів, значною мірою визначає рівень врожайності наступної культури.

Азотний режим ґрунту визначається, головним чином, виносом азоту врожаєм і спрямованістю трансформації органічних сполук (рис. 3).

За зимовий період і в першій половині вегетації у всіх культур сівозміни відбувається мінералізація лабільної органічної речовини, що утворилася з рослинних рештків попередника, з одночасним накопиченням легкогідролізованих сполук азоту, які в подальшому мінералізуються до нітратного і аміачного азоту. Саме в цей період рослини засвоюють його найбільш активно і дози азотних мінеральних добрив необхідно встановлювати з розрахунку на запланований урожай.

У перспективі проведені дослідження дозволять цілеспрямовано і ефективно регулювати кругообіг вуглецю і азоту, як на рівні окремих аграрних виробничих систем, так і в масштабах одноманітних сільськогосподарських територій і регіонів з урахуванням усієї множини змінних факторів, в т. ч. нових сортів і гібридів, особливостей галузевої структури виробництва, змін клімату та ін. (рис. 4)

Для проведення кореневого фенотипування в польових умовах пропонується використання методу НВЧ-радіометрії [19–22]. На відміну від поширених польових методів НВЧ-радіометр є пасивним недеструктивним методом дослідження. Сучасний СВЧ-радіометр (Microwave Radiometry) становить собою ефективний апаратний засіб дистанційного обстеження територій і акваторій, котрими цікавиться розробник.

НВЧ-радіометрія базується на відомому радіофізичному явищі: сухі об'єкти та

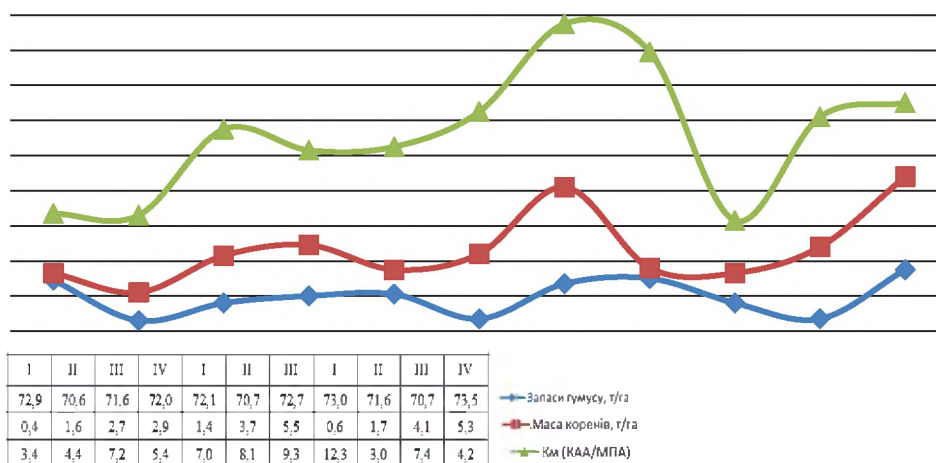


Рис. 2. Динаміка накопичення кореневої маси, запасів органічної речовини в ґрунті і активність його мінералізації протягом 3 років

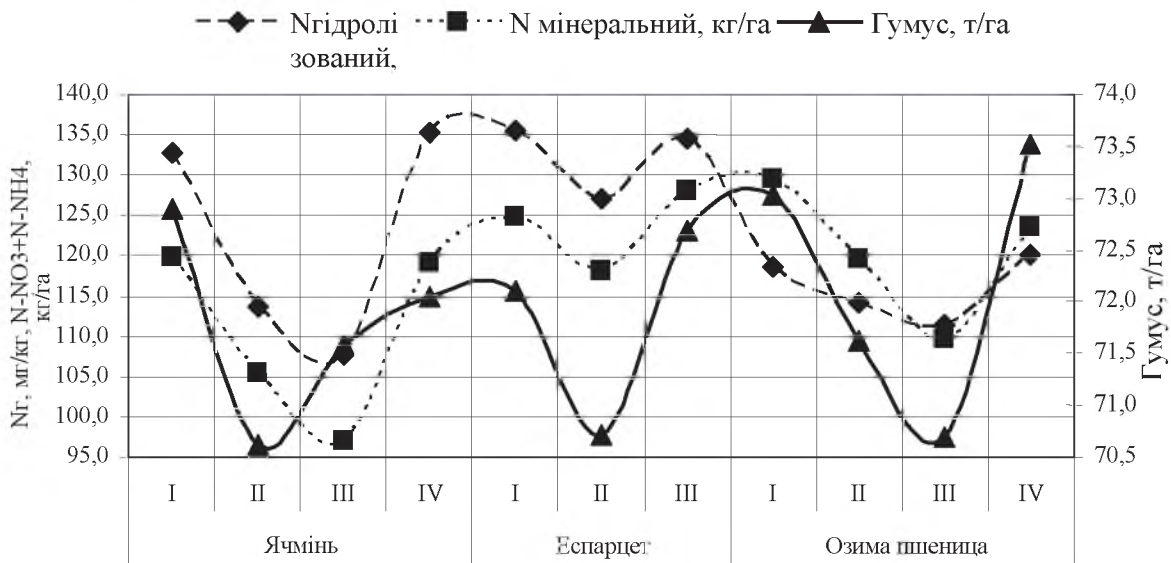


Рис. 3. Динаміка запасів гумусу та азоту в чорноземі типовому в ланці сівозміни

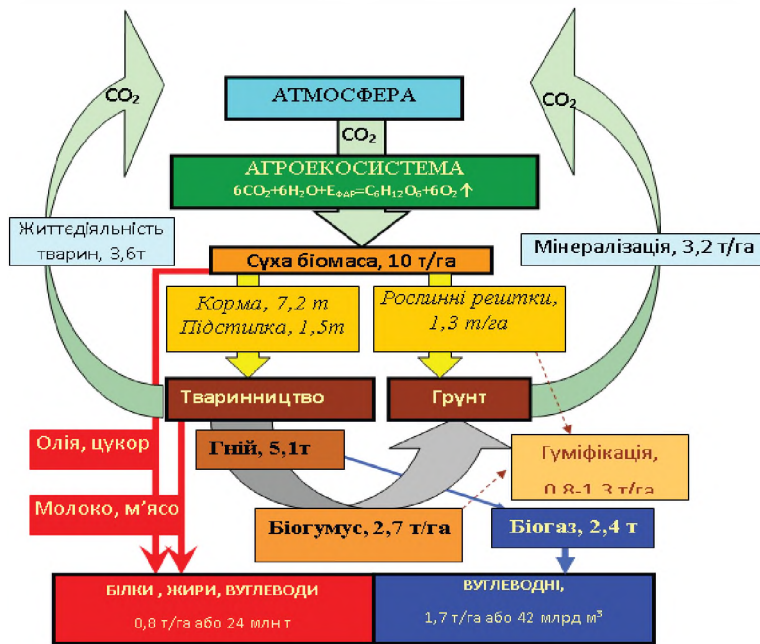


Рис. 4. Модель розподілу органічного вуглецю рослинної біомаси між продовольством, біоенергією, ґрунтом і емісією  $\text{CO}_2$

об'єкти, насичені вологою, мають у сантиметрових діапазонах різну величину власного випромінювання. При цьому інформаційно корисною ділянкою радіодіапазону є спектр довжин електромагнітних хвиль приблизно від 2 см до 20–22 см. Отже, йдеться не про обробку відбитого сигналу (по типу радіолокації), а про вимірювання і обробку власного характеристичного випромінювання обстежуваних об'єктів.

Для сільськогосподарського використання може бути рекомендований розроб-

лений раніше вимірювальний комплекс: багатоканальні СВЧ-радіоприймачі, фотометрія, методи картування і оцінки інформації. В якості носіїв можуть застосовуватися наземні платформи і безпілотні літальні радіокеровані засоби. В якості системи, що обробляє отриманий сигнал, може використовуватися зростаюча пірамідальна мережа (ЗПМ). У ЗПМ мережева пам'ять самоналаштовується на структуру вхідної інформації, в результаті чого досягається оптимізація рішення і, на відміну від

нейронних мереж, адаптація досягається без надмірності мережі.

У ЗПМ вдається не тільки знайти залежності, що забезпечують рішення задачі, але і створити логічні описи залежностей в нотатії логіки висловлювань і в явному вигляді пояснити прийняте рішення. ЗПМ є динамічною структурою, яка перебудовується залежно від того, яка надходить до неї інформація.

За рахунок асоціативності та ієрархічності мережі ЗПМ дозволяє обробляти великі обсяги даних в реальному часі, а також одночасно за універсальним алгоритмом обробляти і знаходити закономірності в різнотипних даних (як числових, так і номінальних). Цим досягається незалежність використання програмного комплексу підтримки прийняття рішень від проблемної області.

Зазначене обладнання (апаратні і програмні засоби) успішно застосовувалися протягом кількох років для оцінки водного фактора, рівня ґрунтових вод, забруднення ґрунтів і водоїм органікою, нафтопродуктами, для оцінки ступеня мінералізації і інших вимірів – у різних кліматичних і ґрунтових зонах. Конкретному визначенню ступеня розвитку кореневої маси в польових умовах повинна передувати невелика за обсягом дослідницька лабораторна робота.

Вартість одиниці інформації, що забезпечується СВЧ-радіометричним комплексом при використанні спецавтомашин або безпілотників, нижче, ніж вартість витрат при проведенні контактних робіт або використанні інших засобів. Запропонований комплекс, як цілісна вимірювальна система, не має рівних практично за всіма показниками. Він є найбільш ефективним, дешевим і технологічним серед відомих.

**Висновки.** Отже, методологія оцінки обсягів накопичення доступних форм азоту, кореневої маси та інших рослинних рештків, виявлення закономірностей їх трансформації, з урахуванням органічних добрив, в стабільні органічні речовини і парникові гази ґрунтується на проведенні вимірювань низки показників в процесі вегетації перспективних сортів і гібридів на агрофонах, що моделюють різну спеціалізацію аграрного виробництва. Залежності, встановлені між цими показниками, дозволять розробити моделі оптимізації кругообігу біогенних елементів і запропонувати агротехнології, системи землеробства і системи аграрного виробництва, здатні акумулювати на 50% більше вуглецю, на 50% скоротити викиди  $N_2O$  і на 25% підвищити ефективність використання ґрунтової вологи.

### Бібліографія

1. Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017. <http://www.fao.org/about/meetings/soil-organic-carbon-symposium/key-messages/ru/>
2. Kudeyarov V.N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration // Eurasian Soil Science. 2015. Т. 48. № 9. С. 923–933.
3. Бацула О.О., Скрильник С.В., Кравець Т.Ф. Вплив добрив і рослинних решток на гумусний стан ґрунтів. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1998. Вип. 55. С. 115–121.
4. Дегтярьов В.В. Колоїдно-хімічна характеристика гумусово-аккумулятивного ґрунтоутворення і родючості природних й агрогенних чорноземів Лівобережного Лісостепу та Степу України : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. с.-г. наук : спец. 06.01.03 «Агроґрунтознавство і агрофізика». Київ, 2010. 41 с.
5. Трофименко П.І., Трофименко Н.В. Інтенсивність емісії  $CO_2$  з ґрунтів Полісся під час вегетації культур та домінантність зумовлюючих її чинників. *Меліорація і водне господарство*. Міжв. тем. наук. зб. 2018. № 1(107). С. 47–54.
6. Атлас мира: Максимально подробная информация / руководители проекта: А.Н. Бушнев, А.П. Притворов. Москва : АСТ, 2017. С. 28–96. ISBN 978-5-17-10261-4.
7. Украинская Советская Социалистическая Республика : энцикл. справ. / гл. ред. А.В. Кудрицкий и др. Киев : УСЭ. 1987. 516 с.
8. Атлас почв Украинской ССР / под. ред. Крупского Н.К., Полупана Н.И. Киев : Урожай, 1979. 160 с.
9. Average precipitation in the lower 48 states of the USA.png. <https://translate.google.com/?hl=uk&sl=en&tl=uk&text=Average%20precipitation%20in%20the%20lower%2048%20states%20of%20the%20USA.png&op=translate>
10. Бацула О.О., Чесняк Г.Я. Розрахунок балансу гумусу в ґрунті та норм органічних добрив для його бездефіцитного вмісту. *Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті*. Київ : Урожай, 1987. С. 103–107.
11. Берестецкий О.А., Возняковская Ю.М., Доросинский Л.М. Биологические основы плодородия почв. Москва : Колос, 1983. 287 с.

12. Балаєв А.Д. Вміст гумусу та лабільних органічних речовин за різного використання чорнозему типового. Науковий журнал «Рослинництво та ґрунтознавство». 2019. [V. 1.] № 286, С. 173–179.
13. Лыков А.М. Воспроизводство плодородия почв в Нечерноземной зоне. Москва : Колос, 1982. 142 с.
14. Александрова Л.Н. Органическое вещество почв и процессы его трансформации. Ленинград : Наука, 1980. 286 с.
15. Довгострокові стаціонарні польові досліді України. Реєстр атестатів. Харків : Вид. «Друкарня №13». 2006. 120 с.
16. Стаціонарні польові досліді України. Реєстр атестатів. Київ : Аграр. наука, 2014. 146 с.
17. Формування систем аграрного виробництва на осушуваних землях Центрального Полісся // Рекомендації. Київ : ЦП «Компринт», 2016. 142 с.
18. Меліоровані агроєкосистеми. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М.М., 2017. 696 с.
19. Kondratyev K. Ya., Johannessen O. M., Melentyev V. V. High Latitude Climate and Remote Sensing. John Wiley-Praxis Series in Remote Sensing. PRAXIS Publishing Ltd. Chichester, West Sussex, England. 1996. Chichester, UK. 200 p.
20. Радиометрическая система для сбора и обработки информации о влажности почвогрунтов с борта беспилотного летательного аппарата. Сидоров И.А. и др. / 56-я Научно-техническая конференция, посвященная 60-летию МИРЭА : сборник трудов. Москва : МИРЭА, 14–24 мая 2007 года.
21. Состояние и перспективы радиофизических исследований атмосферы и подстилающей поверхности. Г.Г. Шукин и др. / Труды ГГО, 2009, вып. 560, С. 143–167.
22. Westwater, E. R., S. Crewell, C. Mätzler, and D. Cimini. Principles of Surface-based Microwave and Millimeter wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere, Quaderni Della Societa Italiana di Elettromagnetismo, 1(3), September 2005. P. 50–90.

#### References

1. Proceedings of the Global Symposium on Soil Organic Carbon (2017). Retrieved from <http://www.fao.org/about/meetings/soil-organic-carbon-symposium/key-messages/ru/> [in Russian]
2. Kudeyarov, V.N. (2015). Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. Eurasian Soil Science, T. 48, 9, 923–933.
3. Batsula, O.O., Skrylnyk, S.V., & Kravets, T.F. (1998). Vplyv dobryv i roslynnykh reshtok na humusnyi stan gruntiv [Influence of fertilizers and plant residues on the humus condition of soils]. Ahrokhimiia i ґruntovnavstvo, 55, 115–121. [in Ukrainian]
4. Dehtiarov, V.V. (2010). Koloidno-khimichna kharakterystyka humusovo-akumulatyvnoho gruntoutvorennia i rodiuchosti pryrodnykh y ahrohennykh chornozemiv Livoberezhnoho Lisostepu ta Stepu Ukrainy [Colloid-chemical characteristics of humus-accumulative soil formation and fertility of natural and agrogenic chernozems of the Left-Bank Forest-Steppe and Steppe of Ukraine]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kyiv. [in Ukrainian]
5. Trofymenko, P.I., & Trofymenko, N.V. (2018). Intensyvnist emisii SO<sub>2</sub> z gruntiv Polissia pid chas vehetatsii kultur ta dominantnist zmovliuiuchykh yii chynnykiv [Intensity of CO<sub>2</sub> emissions from Polissya soils during crop vegetation and dominance of its determining factors]. Melioratsiia i vodne hospodarstvo, 107, 47–54. [in Ukrainian]
6. Bushnev, A.N., & Prytvorov, A.P. (2017). M. Atlas myra: Maksymalno podrobnaia ynformatsiia [Atlas of the world: The most detailed information]. Moskva : Yzdatelstvo ACT. [in Russian]
7. Kudrytsky, A.V. (1987). Ukraynskaia Sovetskaia Sotsyalystycheskaia Respublyka : Entsyklopediia. Spravochnik. [Ukrainian Soviet Socialist Republic : Encyclopedia. Directory]. Kyiv. [in Ukrainian]
8. Krupskoho, N.K., & Polupana, N.Y. (1979). Atlas pochv Ukraynskoi SSR [Atlas of soils of the Ukrainian SSR]. Kyiv. [in Ukrainian]
9. Average precipitation in the lower 48 states of the USA. png. Retrieved from <https://translate.google.com/?hl=uk&sl=en&tl=uk&text=Average%20precipitation%20in%20the%20lower%2048%20states%20of%20the%20USA.png&op=translate> [on English]
10. Batsula, O.O., & Chesniak, H.Ia. (1987). Rozrakhunok balansu humusu v hrunti ta norm orhanychnykh dobryv dlia yoho bezdefitsytnoho vmistu. Zabezpechennia bezdefitsytnoho balansu humusu v hrunti. [Calculation of the balance of humus in the soil and the norms of organic fertilizers for its deficient content. Ensuring a deficit-free balance of humus in the soil]. Kyiv : Urozhai. [in Ukrainian]

11. Berestetskyi, O.A., Vozniakovskaia, Yu.M., & Dorosynskyi, L.M. (1983). Byolohycheskye osnovy plodorodiya pochv [Biological bases of soil fertility]. Moskva : Kolos. [in Russian]
12. Balaiev, A.D. (2019). Vmist humusu ta labilnykh orhanichnykh rehovyn za riznogo vykorystannia chornozemu typovoho [Content of humus and labile organic substances with different use of typical chernozem]. Naukovyi zhurnal Roslynnnytstvo ta gruntoznavstvo, 286, 173–179. [in Ukrainian]
13. Lyikov, A.M. (1982). Vosproizvodstvo plodorodiya pochv v Nechernozemnoy zone [Reproduction of soil fertility in the Non-Chernozem zone]. Moskva : Kolos. [in Russian]
14. Aleksandrova, L.N. (1980). Organicheskoe veschestvo pochv i protsessy ego transformatsii [Soil organic matter and its transformation processes]. Lviv : Nauka. [in Russian]
15. Dovhostrokovyi statsionarni polovi doslidy Ukrainy. Reiestr atestativ [Long-term stationary field experiments in Ukraine. Register of certificates]. (2006). Kharkiv : Drukarnia. [in Ukrainian]
16. Statsionarni polovi doslidy Ukrainy. Reiestr atestativ [Stationary field experiments in Ukraine. Register of certificates]. (2014). Kyiv : Ahrararna Nauka. [in Ukrainian]
17. Rekomendatsii. Formuvannia system ahrarnoho vyrobnytstva na osushuvanykh zemliakh Tsentralnoho Polissia [Recommendations. Formation of systems of agricultural production on drained lands of Central Polissya]. (2016). Kyiv : TsP Komprint. [in Ukrainian]
18. Meliorovani ahroekosystemy [Reclaimed agroecosystems]. (2017). Nizhyn : PPLysenko, M.M. [in Ukrainian]
19. Kondratyev K.Ya., Johannessen, O.M., & Melentyev, V.V. (1996). High Latitude Climate and Remote Sensing. John Wiley-Praxis Series in Remote Sensing. Chichester : Publishing Ltd.
20. Sidorov, I.A., Belousov, O.B., Shutko, A.M., Novochihin, E.P., Gorbachev, D.A., & Archer, F. (2007). Radiometricheskaya sistema dlya sbora i obrabotki informatsii o vlazhnosti pochvo-gruntov s borta bespilotnogo letatel'nogo apparata [Radiometric system for collecting and processing information on soil moisture from aboard an unmanned aerial vehicle]. 56-ya Nauchno tehnikeskaya konferentsiya, posvyaschennaya 60-letiyu MIREA : Sbornik trudov. Moskv : MIREA. [in Russian]
21. Schukin G.G., Stepanenko V.D., Obraztsov S.P., Karavaev D.M., Zhukov V.Yu., & Ryibakov, Yu.V. (2009). Sostoyanie i perspektivy radiofizicheskikh issledovaniy atmosfery i podstilayushey poverhnosti [Status and prospects of radiophysical studies of the atmosphere and the underlying surface]. Trudy GGO, 560, 143–167. [in Russian]
22. Westwater, E.R., Crewell S., Mätzler C., & Cimini D. (2005). Principles of Surface-based Microwave and Millimeter wave Radiometric Remote Sensing of the Troposphere. Quaderni Della Societa Italiana di Elettromagnetismo, 1(3), 50–90.

**Ю.А. Тарарико, В.П. Лукашук**

**Перспективы международных комплексных исследований круговорота углерода  
в системе «почва-растение-атмосфера»**

***Аннотация.** Украина расположена на широте Франции, северной части Соединённых Штатов Америки и южных районов Канады, имеет аналогичные с этими странами природные условия. Различные по почвенно-климатическим условиям регионы ведения земледелия в Украине могут рассматриваться как аналоги схожих по природным условиям сельскохозяйственных территорий в других частях света. Почвы с высоким содержанием углерода являются более продуктивными и способны лучше фильтровать и очищать воду. Вода, удерживаемая в почве, служит в качестве источника для 90% мировой сельскохозяйственной продукции. Один из главных блоков исследований – это изучение соотношений основной, побочной продукции урожая, а также корневых и растительных остатков на различных агрофонах с использованием перспективных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. Использование оптических экспресс – методов целесообразно осуществлять по этапам органогенеза полевых культур, что позволит установить зависимости между ними, разработать критерии и индикаторы для эффективного регулирования круговорота азота и углерода в системе «почва – растение – атмосфера», разработать модели формирования и трансформации корневых и других растительных остатков с учётом изменяющихся агрометеорологических факторов, севооборотов, особенностей отраслевой структуры аграрного производства, сортов и гибридов полевых культур. В перспективе это даст возможность определиться с направленностью селекционной работы с целью увеличения объёмов накопления корневой массы и достижения гарантировано бездефицитного баланса органического углерода в почве. Также исследования позволят целенаправленно и эффективно регулировать круговорот углерода и азота как на уровне отдельных аграрных производственных систем, так и в масштабах однообразных сельскохозяйственных территорий и регионов с учётом всего множества изменяемых факторов, в т.ч. особенностей отраслевой структуры производства, изменений климата и др.*

***Ключевые слова:** почва, почвенная влага, углерод, система «почва-растение-атмосфера», изменения климата, выбросы N<sub>2</sub>O*



Yu.O. Tarariko, V.P. Lukashuk

**Prospects for international integrated research  
of the carbon cycle in the system “soil-plant-atmosphere”**

**Abstract.** Ukraine is located about at the latitude of France, the northern part of the United States and southern Canada and has similar to these countries natural conditions. Different in terms of soil and climate conditions, the regions of agriculture in Ukraine can be considered as analogues of similar natural conditions of agricultural areas in other parts of the world. Soils with a high carbon content are more productive and able to better filter and purify water. Water contained in the soil serves as a moisture source for 90% of world agricultural production. One of the main areas of research is the study of the ratios of main products and by-products of yield, as well as root and plant residues when having different soil fertility and using promising varieties and hybrids of crops. The use of optical express methods should be carried out according to the stages of organogenesis of field crops, which will enable to specify the relationships between them, to develop criteria and indicators for effective regulation of nitrogen and carbon cycle in the system “soil-plant-atmosphere”, to develop models of formation and transformation of root and other plant residues taking into account changing agrometeorological factors, crop rotations, features of the branch structure of agricultural production, varieties and hybrids of field crops. In the future, this will enable to determine the areas in the selection aimed at accumulating root mass and achieving guaranteed deficit-free balance of organic carbon in the soil. The research will enable to purposefully and effectively regulate the cycle of carbon and nitrogen, both at the level of individual agricultural production systems and on the scale of the same type of agricultural areas and regions, taking into account the whole set of variables, including features of the sectoral structure of production, climate change, etc.

**Key words:** soil, soil moisture, carbon, “soil-plant-atmosphere” system, climate change,  $N_2O$  emissions