

УДК 528.88.042:528.852.5

Дистанційне визначення величини фотосинтетичного стоку органічного вуглецю (Ph) в агроценозі пшениці озимої залежно від строкатості ґрунтового покриття

П. І. Трофименко¹, В. І. Зацерковний¹, І. С. Зобнів¹, Н. В. Трофименко¹,
О. П. Сябрук^{2*}, В. О. Забалуєв³

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», Харків, Україна

³Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 19.06.2022 Отримано після доопрацювання 02.10.2022 Затверджено до видання 13.10.2022 Доступно онлайн 01.12.2022	У статті представлено результати досліджень зв'язку диференціації ґрунтового покриття та даних дистанційної ідентифікації величини фотосинтетичного стоку органічного вуглецю (Ph) на посівах пшениці озимої, та розробку нових і вдосконалення існуючих моделей накопичення біомаси сільськогосподарських культур, з метою формування структури цих моделей за різних кліматичних умов та на різних типах ґрунтів. У ході дослідження розроблено моделі величин стоку вуглецю в агроценозі пшениці озимої на супіщаних та легкосуглинкових ґрунтах ($PhCO_{2LIG}$ та PhC_{LIG}), середньо- та важкосуглинкових ґрунтах ($PhCO_{2HEAV}$ та PhC_{HEAV}), а також проведено оцінку точності моделей. Експериментальними дослідженнями виявлено та підтверджено територіальну узгодженість значень величин стоку органічного вуглецю $PhCO_{2LIG}$ на посівах пшениці з геоморфологічними ознаками якості супіщаних та легкосуглинкових ґрунтів, зокрема гранулометричним складом, глейовістю та глеюватістю. Встановлено, що на 95,2 % значення похибки дистанційної ідентифікації Ph біомаси пшениці озимої на різних ґрунтах зумовлені врожайністю зерна, соломи та кореневої маси. Із урахуванням особливостей настання діагностичних, для дистанційної ідентифікації, значень фотосинтетичного стоку органічного вуглецю і фаз органогенезу пшениці озимої розроблено рекомендовані середньорічні часові вікна замови знімку Sentinel 2A у розрізі природно-кліматичних зон України. Таким чином, пропонується розробити подібні моделі для інших супутників, які здійснюють створення зображення в діапазонах SWIR3 та SWIR2, близьких до 2080–2350 нм та 1550–1750 нм відповідно. Це дозволить отримувати більше зображень, необхідних для діагностики стоку вуглецю на посівах пшениці озимої.
Ключові слова: дистанційна ідентифікація; диференціація ґрунтового покриття; діапазони SWIR; моделювання; пшениця озима; фотосинтетичний стік вуглецю	

* E-mail: syabryk86@gmail.com

Форма цитування: Дистанційне визначення величини фотосинтетичного стоку органічного вуглецю (Ph) в агроценозі пшениці озимої залежно від строкатості ґрунтового покриття / П. І. Трофименко, В. І. Зацерковний, І. С. Зобнів (та ін.). *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2022. Вип. 93. Харків: ННЦ "ІГА ім. О.Н. Соколовського". С. 43-53.
<https://doi.org/10.31073/acss93-05>

1. Вступ

Кругообіг біогенних елементів, перш за все вуглецю, є важливою частиною функціонування біосфери. Останніми десятиріччями антропогенний вплив часто призводить до відчутного порушення реального природного балансу в агроландшафтах. Нині спостерігається істотне підсилення цього впливу, яке супроводжується явищами глобального потепління та парникового ефекту. Тому, усе частіше провідні науковці світу розглядають ґрунти та рослинний покрив як дієві інструменти зниження концентрації парникових газів атмосфери.

У випадках кількісного оцінювання вуглецевого циклу або окремих його ланок об'єктивність параметрів балансу біогенних парникових газів характеризується високим рівнем невизначеності [1]. Наявність супутникових засобів діагностування, завдяки суттєвим технічним можливостям, підвищує об'єктивність та точність означених оцінок. Серед очевидних переваг слід зазначити можливість відстежування впливу локальних чинників на певних ділянках земної поверхні, що зумовлюють перебіг та розвиток досліджуваних процесів, і в разі необхідності виключити їхню дію, зосередившись лише на окремих із них.

До недоліків необхідно віднести високу часову дискретність космічних знімків, внаслідок чого отримані у такий спосіб дані для проведення балансових підрахунків, можуть виявитися непридатними. Результати раніше проведених досліджень свідчать, що найбільш «корисними» є знімки, зроблені у час з 9-00 до 11-00 годин, коли значення емісії CO_2 з ґрунту приблизно відповідають середньодобовим значенням, що важливо під час інвентаризації діоксиду вуглецю [2]. Зрозуміло, що забезпечити отримання періодичних космічних зображень, навіть із використанням декількох супутникових систем, доволі проблематично. Натомість безпосереднє дистанційне визначення показника біомаси

рослинних співтовариств, в тому числі й агроценозів дозволяє встановити величину «чистої» органічної речовини стоку без необхідності врахування кількісних та часових осциляцій на окремих етапах її формування. У контексті зазначеного, достатньо цікавим є моделювання геопросторового поширення обсягів стоку CO_2 на посівах сільськогосподарських культур.

Одним з найбільш актуальних викликів сьогодення є пошук науковцями й землекористувачами технологій дистанційної ідентифікації обсягів емісії та асиміляції органічного вуглецю на посівах сільськогосподарських культур на різних ґрунтах. Науковою спільнотою опубліковано значну кількість досліджень, результати яких висвітлюють алгоритми дистанційного зондування стану ґрунтів та посівів [3-6]. Застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) забезпечує сталі врожаї, дозволяє мінімізувати вуглецевий і нітрогенний слід [7, 8], спричинений вирощуванням сільськогосподарських культур, та уповільнити розвиток небезпечних процесів у біосфері. Саме тому останніми роками екологічно стабілізувальна роль агроландшафтів у кругообігу елементів біосфери, поряд із традиційно пріоритетною (перш за все, для виробників) функцією вирощування продукції, постійно зростає. Однак, раніше проведені дослідження поширення вмісту вуглецю у ґрунті, в умовах його екранованості рослинністю (2019), а також маси асимільованого рослинами вуглецю (2021) та встановлені відповідні емпіричні залежності [Ошибка! Источник ссылки не найден.-11] не дозволяють зробити остаточний висновок про рівень їхньої достовірності.

Слід зауважити, що отримання вище означеної інформації традиційними (наземними) способами зазвичай виконано шляхом проведення постійних або періодичних моніторингових спостережень інструментальними методами [2, 12]. Проте, значна кількість та виключна динамічність зумовлюючих інтенсивність фотосинтетичної асиміляції CO_2 рослинами факторів, які мають річні, сезонні та добові осциляції, часто є наслідком отримання необ'єктивних параметрів вуглецевого стоку. Одним із відомих шляхів є врахування величин зв'язування діоксиду вуглецю біомасою рослин на основі даних про врожайність культур.

У представленому дослідженні йдеться про розробку нових та удосконалення існуючих моделей накопичення біомаси сільськогосподарських культур, з метою формування структури цих моделей за різних кліматичних умов та на різних типах ґрунту.

Як відомо, розробка подібних геопросторових моделей у сільському господарстві вимагає від авторів значних зусиль щодо забезпечення необхідного рівня їхньої достовірності. Останнє можливо у випадку наявних польового та лабораторного етапів досліджень, які передують розробці зазначених моделей. Важливою також є обов'язкова верифікація самих моделей та якісна перевірка їхньої ефективності в умовах агроландшафту.

Не менш принциповим є максимальна мінімізація матеріально-технічних і фінансових витрат на розробку, оптимізацію, підтримку та впровадження для розв'язання прикладних задач виробництва. Розробка подібних математичних моделей є важливою науковою проблемою. Її вирішення дозволяє об'єктивно оцінити ґрунт як засіб виробництва рослинницької продукції та врахувати його роль як дієвого важеля регулювання концентрації парникових газів атмосфери, зокрема CO_2 .

Зважаючи на вище зазначене, виключно цінною є інформація про територіальну диференціацію величин основної та побічної продукції і кореневої маси сільськогосподарських культур — з одного боку та поширення ареалів ґрунтів — з іншого. За допомогою геостатистичного аналізу та інтерпретації такої інформації можливо розробити геопросторові моделі фотосинтетичного стоку вуглецю (Ph) в умовах агроландшафту. Їх застосування дозволяє отримати дані про територіальне поширення, просторову й часову варіабельність величини (Ph) та закономірності формування її значень на різних культурах і ґрунтах.

Під фотосинтетичним стоком (Ph) розуміли масу фотосинтетично зв'язаного вуглецю (C-CO_2) поточного періоду вегетації окремої сільськогосподарської культури, яку витратили рослини для формування власної біомаси у вигляді діоксиду (CO_2) або еквівалентної маси карбону (C).

Враховуючи те, що пшениця озима вирощується на значних площах на всій території України, а період її вегетації (за виключенням періоду промерзання ґрунту) становить не менш як 10 місяців, під час розробки моделей її обрано як індикаторну сільськогосподарську культуру.

Крім того, пшениця озима є однорічною культурою, тому величини Ph та NPP (чистої рослинної продуктивності) для неї можуть бути близькими, а тому, отримані результати досліджень — достатньо інформативними.

Зауважимо, що важливою для проведення розрахунків балансу органічної речовини є інформація про прямі втрати біомаси сільськогосподарських культур, які відбуваються щорічно під час вилучення з кругообігу певної частини органічного вуглецю (у вигляді врожаю). Тому, під час здійснення дистанційного визначення обсягів емісії або стоку органічної речовини, картографічна інформація про структуру біомаси пшениці (зерно, соломка, коренева маса) є надто важливою.

Не менш важливим аспектом розробки означеної геопросторової моделі є достатньо висока диференційованість ґрунтового покриву України. Відомо, що в межах країни нараховують близько 8 тисяч ґрунтових відмін. При цьому кількість агровиробничих груп ґрунтів становить 222 [13]. Значна диференціація ґрунтового покриву створює додаткові перешкоди у разі встановлення закономірностей утворення біомаси сільськогосподарських культур в умовах виробництва на значних площах.

Представлення такої інформації у вигляді детальних картосхем стало можливим завдяки застосуванню методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та засобів геоінформаційних технологій (ГІТ). Зауважимо, що їх побудова допомагає виробникам оптимізувати баланс поживних речовин у рослинництві, сприятиме уповільненню втрат органічного вуглецю ґрунтами та дозволяє створити найкращі умови його фіксації сільськогосподарськими культурами.

2. Матеріали і методи досліджень

Дослідження проведено впродовж 2017-2021 рр. та включало польовий та камеральний етапи розробки комплексної моделі дистанційної ідентифікації обсягів стоку органічного вуглецю у вигляді CO₂ та C біомасою пшениці озимої.

Польові дослідження виконано на території Житомирського району Житомирської області, на землях ТОВ «Вега-Агро» (с. Осівці) на площі 223,3 га (Рис. 1). Ця територія розташована в межах Житомирського Полісся на межі з зоною Лісостепу України і відрізняється винятковою ґрунтовою неоднорідністю. Шифри агрогруп ґрунтів в Україні, їхні назви, а також назви та шифри ґрунтів, згідно з класифікацією FAO, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1
Досліджувані ґрунти

ґрунти	Агрогрупа	Назва і шифр за класифікацією FAO (WRB)
Ясно-сірі і сірі лісові супіщані	29в	Eutric podzoluvisols (Pde)
Ясно-сірі і сірі лісові глеюваті легкосуглинкові	33г	Gleic Greyzems (GRg)
Темно-сірі опідзолені і чорноземи опідзолені поверхнево глеюваті легкосуглинкові	47г	Haplic Greyzems (GRh)
Темно-сірі опідзолені і чорноземи опідзолені поверхнево глейові легкосуглинкові	48г	Haplic Greyzems (GRh)
Ясно-сірі і сірі лісові глеюваті супіщані	33в	Gleic Greyzems (GRg)
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові глейові супіщані	14в	Eutric podzoluvisols (Pde)
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові поверхнево глеюваті зв'язно-піщані	18б	Eutric podzoluvisols (Pde)
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові поверхнево глеюваті супіщані	18в	Eutric podzoluvisols (Pde)
Лучно-болотні, мулуваті-болотні і торфувато-болотні неосушені	141	Mollic Gleysols (GLm)
Дернові глибокі глейові легкосуглинкові та їх опідзолені відміни	178г	Eutric Planosols (PLe)

Закладання тестових ділянок зондування (всього 29 ділянок) для побудови моделі та її верифікації проводили на основі несучільної мережі на найбільш поширених ґрунтах, у тому числі: 15 ділянок безпосередньо відібрано для розробки математичних залежностей складових моделі — врожайності зерна та соломи пшениці озимої. Решту (14) використано як верифікаційні [14] тестові ділянки. Для локалізації ареалів ґрунтів використано карту агровиробничих груп ґрунтів М 1 : 10 000.

На дослідному полігоні виконували польові дослідження в агроценозі пшениці озимої (сорт «Богдана»). На тестових ділянках за загально прийнятою методикою [15] відбирали проби рослин у фазі повної стиглості та провели лабораторний аналіз на визначення продуктивності пшениці озимої. Висота рослин на момент дослідження становила від 95 до 108 см.

Для дистанційної ідентифікації параметрів урожаю використано спектрозональний знімок Sentinel 2A, зроблений 04.08.2017 року: S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MPS__20170804T111320_A011058_T35UPR об 9¹⁵, WGS 84, формату «jpeg».

Проведення геоінформаційного аналізу здійснено в середовищі Arc Map 10.4 та передбачало застосування інструменту Raster calculator. Розрахунок індексу NDSI (Normalized Difference Soil Index) — нормалізований диференційований ґрунтовий індекс виконано за формулою:

$$\text{NDSI} = \text{float} \frac{\text{SWIR} - \text{NIR}}{\text{SWIR} + \text{NIR}} \quad (1)$$

де: SWIR — відображення в інфрачервоному діапазоні 1550–1750 нм (band 11); NIR — відображення в інфрачервоному діапазоні 2080–2350 нм (band 12). Геостатистичний аналіз передбачав застосування функції кригінгу (kriging).

Під час побудови картосхем кореневої маси, зерна та соломи, біомаси та вуглецево-асиміляційного потенціалу пшениці озимої використано метод контрольованої класифікації (manual classification) із встановленням рівних інтервалів (equal intervals).

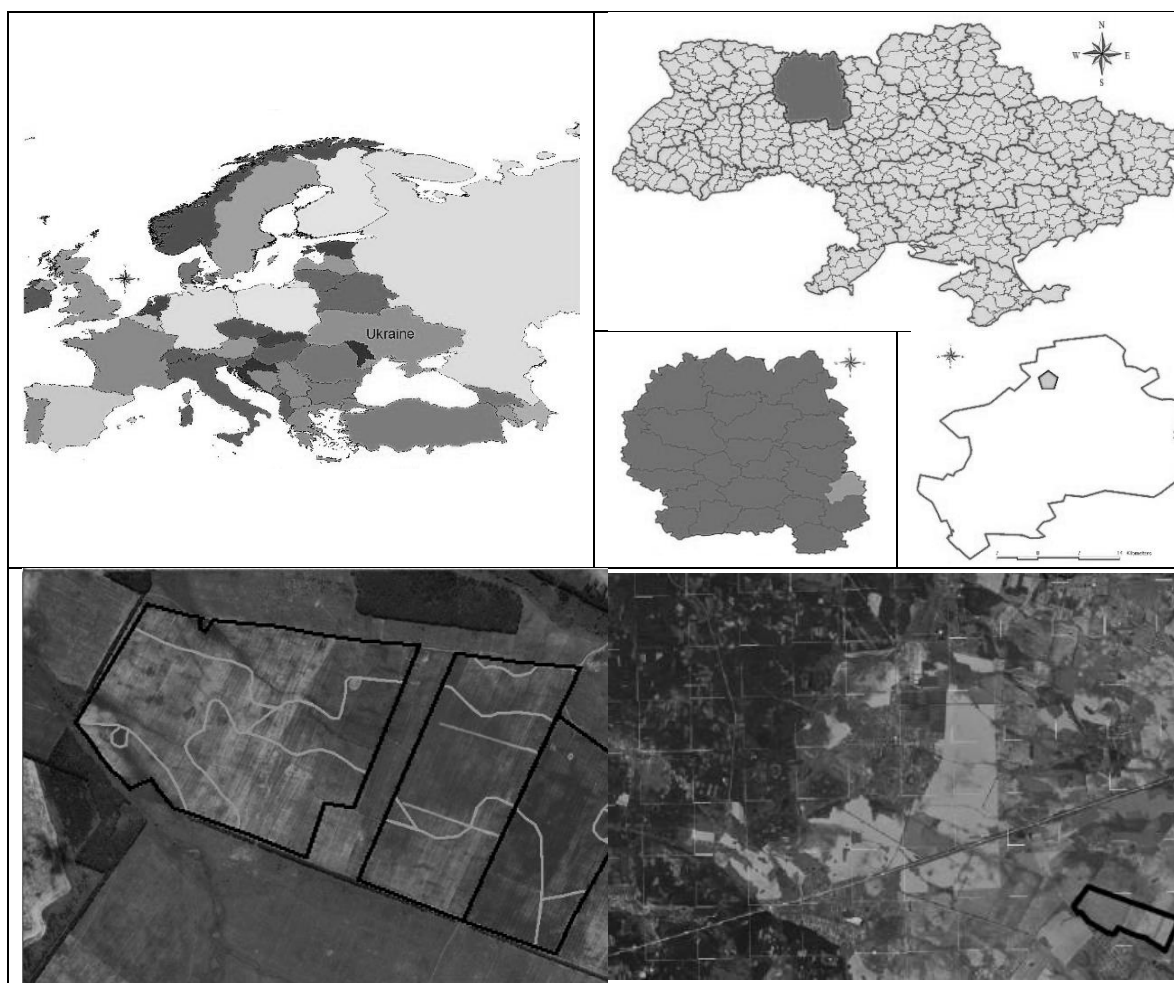


Рис. 1. Місцезположення території досліджень, 50° 21' 11" пн. ш., 29° 28' 15" сх. д.

3. Результати досліджень

У програмі досліджень передбачено розробку моделей накопичення біомаси пшениці озимої та маси стоку C-CO₂ (Ph), який використано на її формування.

Як вихідні складових майбутньої моделі використано розроблені емпіричні залежності врожайності зерна та соломи пшениці (формули 2, 3) [14]:

$$Y_{\text{ЗЕРНО}} = 113,29 \cdot \text{NDSI} - 19,736 \quad (2)$$

де Y_{ЗЕРНО} — врожайність зерна пшениці озимої, т/га, NDSI (Normalized Difference Soil Index) — нормалізований диференційований ґрунтовий індекс.

$$Y_{\text{СОЛОМА}} = -167,09 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{11}\text{TOA} + 39,709 \quad (3)$$

де $Y_{\text{СОЛОМА}}$ — врожайність соломи пшениці озимої, т/га, ρ_{11} TOA — Top of Atmosphere Reflectance 11-го каналу.

Структурно-логічну схему побудови моделі наведено на рисунку 2.

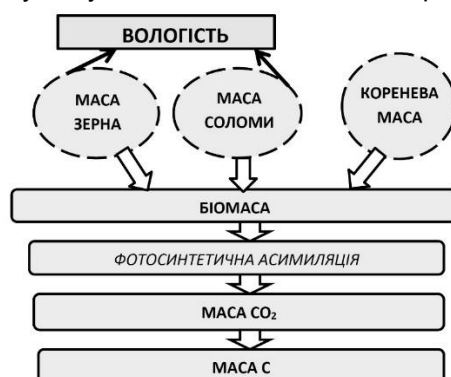


Рис. 2. Структурно-логічна схема розробки моделей обсягів стоку C-CO₂ (Ph).

Картосхему врожайності зерна пшениці озимої, побудовану на основі рівняння 2, представлено на рисунку 3.

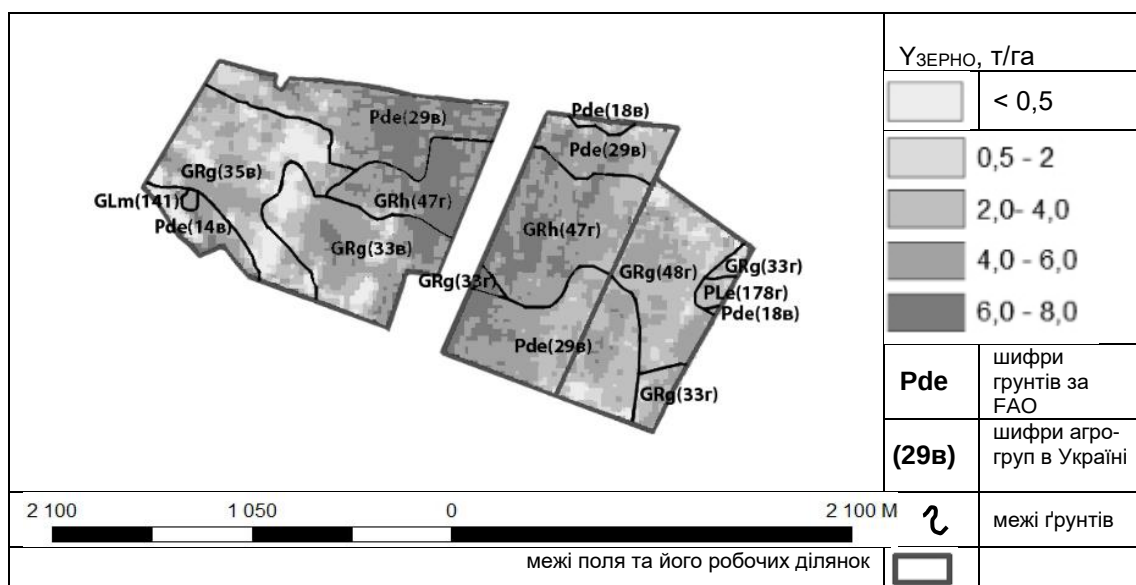


Рис. 3. Картосхема врожайності зерна пшениці озимої, т/га, 1р = 20х20 м. (побудовано за формулою 2)

Наведені дані свідчать, що у центральній частині полігону локалізовано найвищу врожайності зерна.

Під час розробки, як складові моделі, використано загально відомі регресійні рівняння Ф.І. Левіна (1977) [16] (рівняння 4) та Г.Я. Чесняка (1987) [Ошибка! Источник ссылки не найден.7, 18] (рівняння 5) для визначення кореневої маси пшениці озимої:

$$Y_{\text{дп}} = 0,7y + 10,2 \quad (4)$$

де $Y_{\text{дп}}$ — маса коренів пшениці озимої, ц/га; y — врожайність зерна пшениці озимої на дерново-підзолистому ґрунті;

$$Y_{\text{ч}} = 0,71y + 10,0 \quad (5)$$

де $Y_{\text{ч}}$ — маса коренів пшениці озимої, ц/га на чорноземі типовому, y — врожайність зерна пшениці озимої.

Використовуючи вихідні рівняння (формули: 1, 2, 3, 4, 5) шляхом алгебраїчних перетворень отримуємо моделі геопросторового поширення маси корневих решток на посівах пшениці озимої (ф. 6, 7):

$$Z_{\text{wheat}_{\text{LIG}}} = 79,303 \cdot \text{NDSI} - 12,7952 \quad (6)$$

де $Z_{\text{wheat}_{\text{LIG}}}$ — модель визначення маси коренів (для супіщаних та легкосуглинкових ґрунтів), ц/га

$$Z_{\text{wheat}_{\text{HEAV}}} = 80,434 \cdot \text{NDSI} - 13,0126 \quad (7)$$

де $Z_{\text{wheat}_{\text{HEAV}}}$ — модель визначення маси коренів (для середньо- та важкосуглинкових ґрунтів), ц/га.

Модель за формулою 6 ($Zwheat_{LIG}$) пропонується застосовувати для визначення кореневої маси пшениці озимої на ґрунтах супіщаного та легкосуглинкового гранулометричного складу, а модель за формулою 7 ($Zwheat_{HEAV}$) на ґрунтах середньо- та важкосуглинкового гранулометричного складу.

Отримані моделі, окрім безпосереднього алгоритму побудови геопросторової моделі кореневої маси пшениці озимої на різних ґрунтах, виконують допоміжну роль і, разом із масою зерна та соломи (наземної частини), дозволяють розробити модель загальної біомаси пшениці озимої.

У загальному вигляді модель біомаси пшениці озимої та її вуглецево-асиміляційного потенціалу, має такий вигляд:

$$M_{BIO} = a \cdot NDSI - b \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{11} TOA + c \quad (8)$$

де M_{BIO} — біологічна продуктивність посівів пшениці озимої, т/га; a , b — значення множників при змінних моделі; c — вільний член.

Параметри рівняння (a , b , c) змінюють свої значення залежно від декількох основних чинників: типу та гранулометричного складу ґрунту, агробіологічних характеристик сорту, величини врожайності пшениці озимої у фазі повної стиглості та інших. Розроблена модель фотосинтетичного стоку вуглецю ($PhCO_{2LIG}$) біомасою пшениці озимої (суха речовина) враховує значення вологості зерна та соломи.

Модель геопросторового поширення біологічної продуктивності посівів пшениці озимої для ґрунтів супіщаного та легкосуглинкового гранулометричного складу має такий вигляд:

$$M_{BIOLIG} = 175,5995 \cdot NDSI - 137,0138 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{11} TOA + 2,9906 \quad (9)$$

де M_{BIOLIG} — біологічна продуктивність посівів пшениці озимої на супіщаних та легкосуглинкових ґрунтах (суха речовина), т/га.

Модель геопросторового поширення величини фотосинтетичного стоку вуглецю для ґрунтів супіщаного та легкосуглинкового гранулометричного складу ($PhCO_{2LIG}$) (у перерахунку на CO_2) наведено нижче:

$$PhCO_{2LIG} = 1,65 \cdot M_{BIOLIG} \quad (10)$$

де $PhCO_{2LIG}$ — величина фотосинтетичного стоку CO_2 посівів пшениці озимої на супіщаних та легкосуглинкових на ґрунтах, т/га; 1,65 — коефіцієнт асиміляції (еквівалент маси CO_2 для формування одиниці маси органічної речовини).

Модель просторового поширення біомаси посівів пшениці озимої (суха речовина) для ґрунтів середньосуглинкового та важкосуглинкового гранулометричного складу має такий вигляд:

$$M_{BIOHEAV} = 176,7304 \cdot NDSI - 137,0138 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_{11} TOA + 2,7732 \quad (11)$$

де $M_{BIOHEAV}$ — біомаса посівів пшениці озимої на середньо- та важкосуглинкових ґрунтах (суха речовина), т/га.

Модель геопросторового поширення величини фотосинтетичного стоку вуглецю на середньо- та важкосуглинкових ґрунтах ($PhCO_{2HEAV}$) (у перерахунку на CO_2) виглядає так:

$$PhCO_{2HEAV} = 1,65 \cdot M_{BIOHEAV} \quad (12)$$

де $PhCO_{2HEAV}$ — величина фотосинтетичного стоку CO_2 пшениці озимої на середньо- та важко суглинкових ґрунтах, т/га; 1,65 — коефіцієнт асиміляції (еквівалент маси CO_2 для формування одиниці маси органічної речовини).

Модель стоку вуглецю на посівах пшениці озимої на ґрунтах супіщаного та легкосуглинкового гранулометричного складу (PhC_{LIG}) після спрощень має вигляд:

$$PhC_{LIG} = 0,45 \cdot M_{BIOLIG} \quad (13)$$

де PhC_{LIG} — величина фотосинтетичного стоку вуглецю посівів пшениці озимої на ґрунтах супіщаних та легкосуглинкових ґрунтах, т/га.

Модель стоку вуглецю на посівах пшениці озимої для ґрунтів середньосуглинкового та важкосуглинкового гранулометричного складу (PhC_{HEAV}) має вигляд:

$$PhC_{HEAV} = 0,45 \cdot M_{BIOHEAV} \quad (14)$$

де PhC_{HEAV} — величина фотосинтетичного стоку вуглецю посівами пшениці озимої на середньо- та важкосуглинкових ґрунтах, т/га.

Картосхему геопросторової диференціації кореневої маси та загальної біомаси пшениці озимої представлено на рисунках 4 та 5.

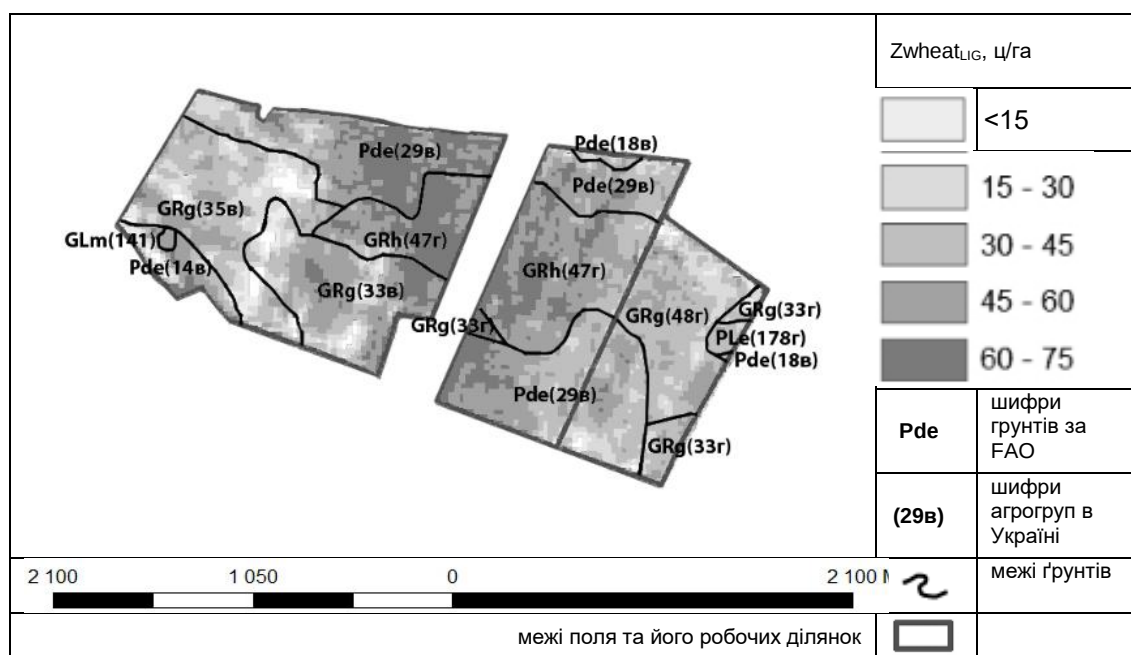


Рис. 4. Геопросторова диференціація кореневої маси пшениці озимої ($Zwheat_{LIG}$) ц/га, (побудовано за ф. 5) $1p = 20 \times 20$ м

Дані, представлені на рисунках, свідчать, що найвищі значення біомаси пшениці, врожайності та кореневої маси загалом зосереджені у центральній частині тестового полігону.

У межах середньої ділянки земельного масиву чітко виділяється пробний прокіс (test cat), проведений фермером (див. рис. 5).

Картосхему геопросторової диференціації величини стоку вуглецю $PhCO_2$ LIG на посівах пшениці озимої в умовах агроценозу ґрунтів супіщаного та легкосуглинкового гранулометричного складу представлено на рисунку 6.

На картосхемі диференціація маси стоку CO_2 біомасою пшениці за загальними морфологічними ознаками ґрунтів в цілому узгоджується з рівнем їхньої родючості (див. рис. 3). Зокрема, зі зміною гранулометричного складу ґрунтів із супіщаного на легкосуглинковий, спостерігається підвищення дистанційно визначених значень $PhCO_2$ LIG. А за наявності у ґрунтах ознак глейовості, навпаки — зниження.

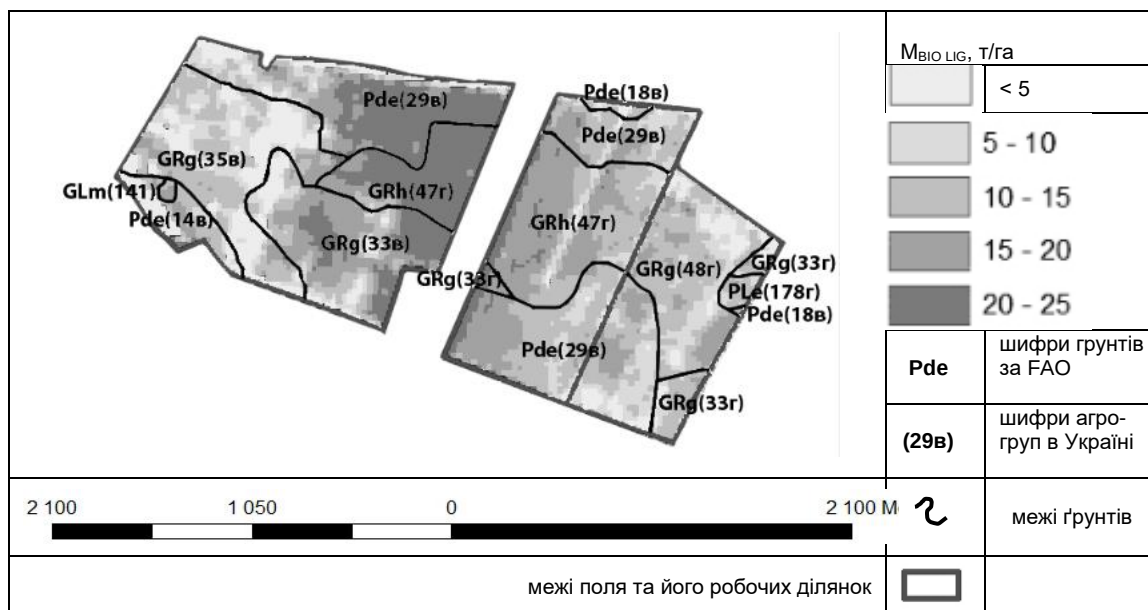


Рис. 5. Геопросторова диференціація біомаси пшениці озимої (суха речовина), т/га, (побудовано за ф. 8) $1p = 20 \times 20$ м

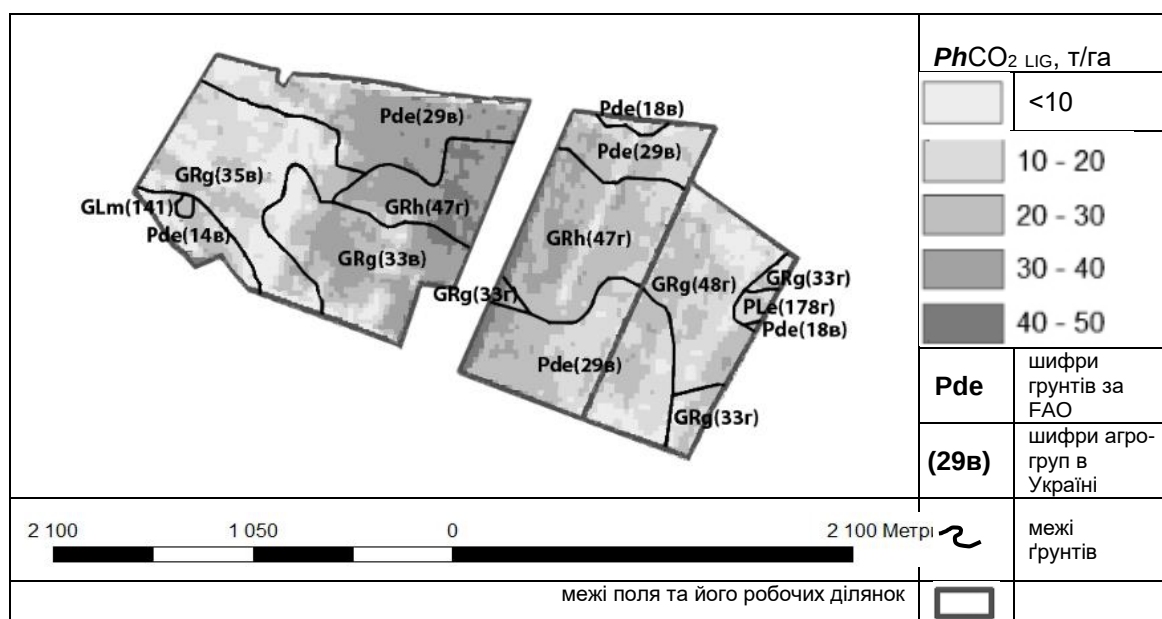


Рис. 6. Геопросторова диференціація стоку діоксиду вуглецю біомасою пшениці озимої, т/га, (побудовано за ф. 11), 1р = 20х20 м

У ґрунтах супіщаного гранулометричного складу з ознакою глеюватості та, відповідно, із більшою продуктивністю, спостерігається підвищення значень $PhCO_{2LIG}$, що є логічним (Табл. 2). Виняток становлять органігенні та органо-мінеральні ґрунти (141), GLm, які не підпадають під параметри моделі.

Разом з тим, у більшості ґрунтів спостерігається значна диференціація біомаси культури та невідповідність величині балу бонітету відносно врожайності пшениці озимої, що пояснюється впливом на значення її продуктивності умов рельєфу та інших.

За результатами досліджень встановлено, що модель дистанційної ідентифікації геопросторового поширення величини стоку $PhCO_2$ пшениці озимої дозволяє детально оцінити здатність її біомаси щодо зниження концентрації діоксиду вуглецю в межах ареалів різних ґрунтів.

Таблиця 2

Середньозважені значення величини вуглецевого стоку ($PhCO_{2LIG}$) на досліджуваних ґрунтах, отримані дистанційно

Назва і код агропромислової групи ґрунтів та шифр за FAO	Бал бонітету за пшеницею	Величина $PhCO_{2LIG}$ т/га
Ясно-сірі і сірі лісові супіщані ґрунти (29в), Pde	15	16,6
Ясно-сірі і сірі лісові глеюваті легкосуглинкові ґрунти (33г), GRg	16	21,2
Темно-сірі опідзолені і чорноземи опідзолені поверхнево-глеюваті легкосуглинкові (47г), GRh	16	29,4
Темно-сірі опідзолені і чорноземи опідзолені поверхнево-глейові легкосуглинкові (48г), GRh	22	15,0
Ясно-сірі і сірі лісові глеюваті супіщані ґрунти (33в), GRg	18	23,3
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові глейові супіщані ґрунти (14в), Pde	11	17,4
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові поверхнево-глеюваті зв'язно-піщані ґрунти (18б), Pde	13	15,5
Дерново-підзолисті і підзолисто-дернові поверхнево-глеюваті супіщані ґрунти (18в), Pde	11	19,1
Дернові глибокі глейові легкосуглинкові ґрунти та їх опідзолені відміни (178г), PLe	22	13,3

У процедурі оцінювання точності моделі передбачено проведення обрахунків параметрів точності окремих її складових та оцінювання точності моделі в цілому на

прикладі найбільш поширеної на досліджуваній ділянці агрогрупи ґрунтів 29в — ясно-сірі і сірі лісові супіщані (29в) — Eutric podzoluvisols (Pde).

Результати обчислень окремих складових моделі представлено в таблиці 3. Як свідчать наведені дані, 95,9 % похибок дистанційної ідентифікації значень Ph пшениці озимої на різних ґрунтах залежать від точності визначення врожайності зерна, соломи та кореневої маси пшениці озимої.

Таблиця 3

Параметри точності складових моделі геопросторового поширення величини $PhCO_2 LIG$ пшениці озимої на ясно-сірому і сірому лісових супіщаних ґрунтах

Складові моделі		Похибки та спосіб їх визначення	
		RMSE, %	спосіб визначення
врожайність зерна	модель 2	14,5	наземна верифікація
врожайність соломи	модель 3	15,3	наземна верифікація
коренева маса	моделі 6, 7	14,5-15,0	обраховано на основі врожайності
вологість зерна	коефіцієнт - 0,14	0,71*	розраховано
вологість соломи	коефіцієнт - 0,18	0,56*	розраховано
асиміляція CO_2	коефіцієнт - 1,65	0,60*	розраховано
перерахунок CO_2 у C	коефіцієнт - 0,2727	0,04*	розраховано

Примітка. Значення похибок складових моделі визначено з дотриманням існуючих вимог [19, 20].

Оцінку загальної точності моделі проведено на основі растру геопросторової моделі (див. рис. 5) усього діапазону значень величини $M_{BIO LIG}$ — від низьких до високих (12 значень). Вихідні значення для обрахунку величини похибки (значення $\rho_{11}TOA$ (SWIR), $\rho_{12}TOA$ (NIR); $M_{BIO LIG}$) отримано попіксельно з допомогою інструменту «identify». У подальшому обраховано середні значення $M_{BIO LIG}$ (16,57 т/га) та середньої похибки $\Delta M_{BIO LIG}$ (3,94 т/га) та середню відносну похибку (у відсотках 23,8 %).

Враховуючи комплексний характер моделі та допустимі значення похибок дистанційної ідентифікації окремих її складових, оцінене значення її точності є достатньо високим. Виходячи із можливості уточнення параметрів окремих складових моделі з метою її оптимізації, доцільність її впровадження є достатньо виправданою.

Застосування розроблених моделей потребує спектральної знімки Sentinel 2A, зроблений на досліджувану територію у період «фаза воскової стиглості» – «фаза повної стиглості» пшениці озимої, підданий геометричній, радіометричній та атмосферній корекції.

Із урахуванням особливостей настання означених фаз органогенезу пшениці озимої встановлено орієнтовні середньорічні часові діапазони для замовлення знімку у розрізі природно-кліматичних зон України (Табл. 4).

Таблиця 4

Рекомендовані терміни замовлення знімку Sentinel 2A для дистанційної ідентифікації величини фотосинтетичного стоку вуглецю (Ph) в Україні

Природно-кліматична зона	Оптимальний період
Полісся	25.06–01.08
Лісостеп	20.06–25.07
Степ	10.06–15.07

Слід зауважити, що у випадках підвищеної вологості біомаси пшениці, коли її значення перевищують параметри таблиці 2, розроблені моделі можуть бути оптимізовані шляхом коригування значень коефіцієнтів вологості.

4. Висновки

1) Упродовж досліджень установлено, що за допомогою моделювання отримання картосхем біомаси та величин стоку органічного вуглецю Ph пшениці озимої може здійснюватися в автоматизованому режимі, що виключає необхідність проведення перманентних або періодичних спостережень за інтенсивністю асиміляції CO_2 рослинами.

2) Визначено, що розробка вихідних моделей може здійснюватися на основі несучільних спостережень, що значно здешевлює їх проведення.

3) Доведено, що незважаючи на певну часову дискретність отримання зображень земної поверхні з однієї супутникової системи, важливою перевагою застосування означених моделей є відсутність потреби використання часового ряду знімків у різні періоди

вегетації культур. Вважаємо перспективною розробку подібних моделей для інших супутників, які продукують зображення в SWIR та NIR діапазонах, близьких відповідно до 2080–2350 нм та 1550–1750 нм, що дозволить отримувати більше необхідних знімків.

Список використаних джерел

1. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. United Nations Framework Convention on Climate Change. IPCC, 2006. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/>.
2. Трофименко П.І., Іванік О.М., Трофименко Н.В. Методологія моніторингу CO₂ в системі «ґрунт – атмосфера – рослина» та добовий біологічний колообіг вуглецю ґрунтів агроландшафтів Полісся України *Таврійський науковий вісник Херсонського національного аграрного університету*. 2019. № 110. Ч 2. С. 232–243. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.110-2.30>
3. Оцінка деградації земель на основі глобальних та національних супутникових наборів даних у рамках програми ООН / Н. Кусуль, А. Колотій, А. Шелестов [та ін.]. // 9-й IEEE Інтер. конф. з інтелектуального збору даних та передових обчислювальних систем: технології та додатки (IDAACS). 2017. С. 383–386. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095109>
4. Супутниковий моніторинг посівів в Україні / А.Ю. Шелестов, Б.Я. Яйлимов, Г.О. Яйлимова [та ін.]. *Космічна наука і техніка*. 2020. № 26. С. 27–37. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.030>
5. Дистанційна діагностика врожайності зернової соломки на основі сценаріїв площі ґрунту / П.І. Трофименко, В.І. Зацерковний, О.В. Зубова, Ф.І. Борисов. // XVII Міжнародна конференція з геоінформатики. Теоретичні та прикладні аспекти. Київ, 2018. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193445839>.
6. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану поверхні Землі / Б.Я. Яйлимов, М.С. Лавренюк, А.Ю. Шелестов [та ін.]. *Космічна наука і техніка*. 2018. № 24(4). С. 24–37. <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.026>.
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Soil Partnership [Official site]. URL: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/en/>.
8. Institute for Environmental IT Hamburg. Definition, goals, mythology and standards. URL: <https://www.ifu.com/en/product-carbon-footprint/>.
9. Космічний моніторинг балансу парникових газів з метою уточнення їхньої інвентаризації / В.І. Лялька, О.І. Сахацький, Ю.В. Костюченко [та ін.]. *Космічна наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 2. С. 3–14. URL: www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2012-18/knit-2012-18-2
10. Трофименко П.І., Трофименко Н.В., Зобнів І.С. Білявський Ю.А. Геопросторова диференціація ґрунтового покриву та величина потенціалу асиміляції вуглекислого газу посівами озимої пшениці // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і спеціалістів, присвяченої 65-річчю Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавчих та агрохімічних досліджень імені О.Н. Соколовського». 2021. С. 124–126.
11. Applying the models of soil screening and organic carbon content in the soils of Ukrainian Polissia based on the vegetation indices / P.I. Trofymenko, I.A. Radion, V.V. Degtyarjov [et al.] // XIIIth International conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects». Kyiv, 2019. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193445839>.
12. Трофименко П.І., Трофименко Н.В., Зацерковний В.І., Борисов Ф.І. Моніторинг обсягів викидів ↔ засвоєння CO₂ в системі «ґрунт–атмосфера–рослина» // Матеріали XII Міжнародної наукової конференції «Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану навколишнього середовища». Київ, 2018. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57193445839>.
13. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру». Київ, 2012. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-%D0%BF#Text>.
14. Использование данных дистанционного зондирования для оценки продуктивности озимой пшеницы в условиях Житомирского Полесья / П.И. Трофименко, В.И. Зацерковный, Е.В. Зубова [и др.]. *Вестник Белорусской сельскохозяйственной академии*. 2018. № 2. С. 161–168.
15. Доспехов Б.А. Техника полевого эксперимента. Москва: Агропромиздат, 1985. 350 с.
16. Левин Ф.И. Количество растительных остатков в почвах под полевыми культурами и его определение по выходу основной продукции. *Агрохимия*. 1977. № 8. С. 36–43.
17. Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті. За ред. О.О. Бацули. Київ: Урожай, 1987. 128 с.
18. Чесняк Г.Я., Бацула О.О., Дерев'янко Р.Г. Параметри гумусного стану ґрунтів. // Забезпечення бездефіцитного балансу гумусу в ґрунті. Київ: Урожай, 1987. С. 77–91.
19. Тейлер Дж. Введение в теорию ошибок / Л.Г. Деденко. Пер. Москва: Мир, 1985. 272 с.
20. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Ленинград: Наука, 1985. 112 с.

UDC 528.88.042:528.852.5

Remote determination quantity of photosynthetic flow of organic carbon (Ph) in the agrocenosis of winter wheat depending on the variegated soil cover

P. Trofymenko¹, V. Zatserkovnyy¹, I. Zobniv¹, N. Trofimenko¹, O. Siabruk^{2*}, V. Zabaluyev³,

¹Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

²National Scientific Center “Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O.N. Sokolovsky”, Kharkiv, Ukraine

³National University of life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*E-mail: syabryk86@gmail.com

The article presents the results of research on the relationship between soil differentiation and remote identification of the amount of photosynthetic runoff of organic carbon (Ph) in winter wheat crops. scientific work is devoted to the development of new and improvement of existing models of accumulation of biomass of agricultural crops, in order to form the structure of these models under different climatic conditions and on different types of soils. Models were developed during the research of carbon runoff values in the agrocenosis of winter wheat on sandy and light loam soils ($PhCO_{2LIG}$ and PhC_{LIG}), medium and heavy loam soils ($PhCO_{2HEAV}$ and PhC_{HEAV}) have been developed, and their accuracy has been assessed.

Experimental studies have established and confirmed territorial consistency of the values of organic carbon runoff $\text{PhCO}_{2\text{LIG}}$ on wheat crops with geomorphological features of the quality of sandy and loamy soils, in particular the particle size distribution, gleying of soil and gley soil, was revealed. It is established that 95.2 % of the value of the error of remote identification of Ph of winter wheat biomass is due to the values of grain yield, straw and root mass. Taking into account the peculiarities of diagnostic phases of photosynthetic runoff of organic carbon phases of organogenesis of winter wheat for remote identification, the recommended average annual time windows of the Sentinel 2A image order in terms of natural and climatic zones of Ukraine have been developed. Thus, it is proposed to develop similar models for other satellites that produce images in the SWIR and NIR bands close to 2080-2350 nm and 1550-1750 nm, respectively. This will provide more images needed to diagnose carbon runoff in winter wheat crops.

Keywords: remote identification; soil cover differentiation; winter wheat; photosynthetic carbon runoff; modeling; SWIR; NIR ranges.

Citing: Trofymenko, P., Zatserkovnyy, V., Zobniv, I., Trofimenko, N., Siabruk, O., & Zabaluyev, V. (2022). Remote determination quantity of photosynthetic flow of organic carbon (Ph) in the agrocenosis of winter wheat depending on the variegated soil cover. *AgroChemistry and Soil Science*, 93, 43-53. [doi:10.31073/acss93-05](https://doi.org/10.31073/acss93-05). [in Ukrainian].