

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ГАЛИЦЬКА МАРИНА АНАТОЛІВНА

УДК 631.95:633:[620.925:58]:631.417.1 (292.485:477)

**АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА КОЛООБІГУ КАРБОНУ НА ПОСІВАХ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ**

03.00.16 – екологія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата сільськогосподарських наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана у Полтавській державній аграрній академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Інженерної академії України
Писаренко Павло Вікторович,
Полтавська державна аграрна академія,
завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля

Офіційні опоненти: доктор сільськогосподарських наук, член-кореспондент НААН України, професор
Патика Микола Володимирович,
Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри екобіотехнології та біорізноманіття

доктор біологічних наук, професор
Жуков Олександр Вікторович,
Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, професор кафедри ботаніки і садово-паркового господарства

Захист відбудеться 29 вересня 2021 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.804.02 у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25, корпус 1, ауд. 342.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Дніпровського державного аграрно-економічного університету за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25.

Автореферат розісланий 28 серпня 2021 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат біологічних наук

Н. В. Гончар

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Боротьба зі зміною клімату і запобігання зміні клімату – це система заходів, спрямована на скорочення викидів парникових газів і стримування процесу зростання середньої глобальної температури атмосфери Землі. Перелік таких заходів визначено міжнародними угодами – Рамковою конвенцією ООН про зміну клімату, Кіотським протоколом до неї, Паризькою кліматичною угодою, а на національному рівні – Концепцією реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 07.12.2016 № 932-р.

Використання біоенергетичних культур, таких як міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*) та просо прутіподібне (*Panicum virgatum* L.) є привабливою альтернативою відновлюваним джерелам традиційного викопного палива, що здатне компенсувати зростаючий попит на енергоносії, та одночасно пом'якшити наслідки енергетичної кризи, такі як кліматичні зміни та емісія парникових газів. Указані культури також розглядаються як екологічно чисте рішення для вирощування їх на забруднених, маргінальних та малопродуктивних сільськогосподарських ґрунтах (Laurent *et al.*, 2015; Mantineo *et al.*, 2009; Roozeboom *et al.*, 2019). Біомаса як відновлюване джерело енергії набуває дедалі більшого поширення у світі для скорочення емісії парникових газів. Серед екологічних впливів біоенергетичних культур на навколишнє середовище особливий інтерес мають зміни запасів органічного вуглецю, оскільки вони пов'язані з емісією вуглекислого газу та з його депонуванням. Останнім часом оцінка емісії CO₂ з ґрунтів є особливо актуальною, оскільки тісно залежить від прогресуючого глобального потепління. У зв'язку з цим актуальним є дослідження емісійно-депонувального потенціалу карбону енергетичних культур міскантуса гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та проса прутіподібного (*Panicum virgatum* L.), який обумовлений довгостроковим вирощуванням цих культур, а також їх впливом на відновлення екосистемних функцій ґрунту. У зв'язку з цим важливо оцінити особливості емісії діоксиду карбону з поверхні ґрунтів під час довготривалого вирощування енергетичних культур, а також з'ясувати роль екологічної якості органічної речовини ґрунту як субстрату процесу мінералізації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дисертаційна робота виконана згідно планів досліджень за завданнями міжнародного Україно-нідерландського проекту Pellets for Power: Sustainable biomass import from Ukraine. Project code: DBI01010 (2010–2013 pp.), проекту НДДКР «Розробка оптимальних енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу відновлюваних джерел енергії в умовах Лісостепу України» (№ ДР 0117U000397, 2017–2019 pp.) та відповідно до державних науково-технічних програм «Розробка технологій виготовлення та внесення альтернативних видів органічних добрив в умовах дефіциту гною» (№ ДР 0116U005148, 2016–2025 pp.) – керівник та відповідальний виконавець; «Оцінка запасу депонованого органічного карбону сільськогосподарських угідь

та вплив типу землекористування на запас органічної речовини ґрунту» (№ ДР 0116U005149, 2016–2025 рр.) – керівник та відповідальний виконавець.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – встановити закономірності функціонування багаторічних систем біоенергетичних культур міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.) як факторів депонування вуглецю в ґрунті.

Для реалізації зазначеної мети передбачалося вирішення таких завдань:

- встановити еколого-кліматичні особливості, за яких функціонують багаторічні системи біоенергетичних культур;
- оцінити роль культури, глибини шару ґрунту, року та віку вегетації у варіюванні емісії оксиду вуглецю ґрунтом та депонування карбону в ґрунті;
- визначити закономірності варіювання емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в насадженнях енергетичних культур;
- оцінити роль кліматичних чинників у варіюванні емісії оксиду вуглецю та у депонуванні вуглецю в ґрунті;
- встановити закономірності формування продуктивності насаджень енергетичних культур;
- оцінити стійкість динаміки систем біоенергетичних культур.

Об'єкт дослідження – функціонування енергетичних культур міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.) як фактора депонування вуглецю в ґрунті.

Предмет дослідження – агроекологічні закономірності формування продуктивності енергетичних культур, а також емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті.

Методи дослідження: *теоретичного аналізу* – для узагальнення результатів наукових досліджень закордонних та вітчизняних науковців відповідно до мети та об'єкту досліджень; *стаціонарного польового дослідження* – для визначення основних ґрунтових та агрохімічних показників, у тому числі емісії CO₂ та депонування органічного вуглецю; *дисперсійний аналіз* (множинний дисперсійний аналіз, множинні лінійні моделі) – для оцінки ступеня впливу кожного із досліджуваних факторів на емісійно-депонувальні процеси карбону; *кореляційно-регресійного аналізу* – для перевірки гіпотез про статистичні властивості причинно-наслідкових екологічних зв'язків; *математично-статистичний та математичного моделювання* – для оцінки достовірності одержаних результатів, виявлення кореляційних зв'язків, оцінки балансу концентрації CO₂ та секвестрації C_{орг} в ґрунті.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи, що визначають новизну отриманих наукових результатів, полягають у тому, що:

уперше:

- встановлені кількісні характеристики емісії оксиду вуглецю у залежності від агроекологічних режимів у насадженнях біоенергетичних культур міскантусу та свічграсу;
- оцінена взаємодія агроекологічних факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті;

- обґрунтовано значення насаджень енергетичних культур як фактору депонування вуглецю в ґрунті;

удосконалено:

- процедуру порівняльного аналізу внеску різних факторів у варіювання емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті;

- спосіб визначення інтенсивності дихання ґрунту;

- спосіб визначення біологічної активності ґрунту;

набула подальшого розвитку теорія стійкості екологічних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень формують теоретичну основу для розрахунку і обліку балансу парникових газів Національним центром обліку викидів парникових газів в Україні під час проведення інвентаризації викидів парникових газів, пов'язаних зі зміною землекористування, висвітлення кліматичних питань при державному плануванні та виконанні стратегічної екологічної оцінки відповідно до Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку». Одержані результати переконливо вказують, що насадження енергетичних культур на маргінальних землях виконують екосистемні сервіси, які зводяться не тільки для вирішення енергетичних проблем, але є важливим інструментом депонування оксиду вуглецю в ґрунті. Створення енергетичних культур є одним з шляхів вирішення проблеми зростання концентрації оксиду вуглецю в атмосфері, який є найбільш придатним в промислових регіонах України з високою площею маргінальних земель.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено в освітній процес Полтавського державного аграрного університету при викладанні дисциплін «Моніторинг довкілля», «Екологія ґрунтів», «Глобальні екологічні виклики та шляхи їх подолання» за спеціальністю 101 «Екологія».

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним дослідженням авторки виконаним впродовж 2016–2020 рр. Здобувачем особисто заплановано програму досліджень, визначено мету та завдання, проаналізовано літературні джерела за обраною дисертаційною тематикою, згідно з науковими методиками та рекомендаціями проведено польові та лабораторні дослідження, узагальнено експериментальний матеріал, здійснено математично-статистичний аналіз отриманих даних, що дало можливість сформулювати наукові положення, висновки та рекомендації виробництву. За результатами досліджень підготовлено та опубліковано розділи монографій, наукові статті, отримано патенти, запроваджено науковий супровід результатів дослідження в освітній процес.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи і результати досліджень доповідалися та обговорювалися на щорічних засіданнях кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля Полтавської державної аграрної академії; міжнародній конференції «Applied Biotechnology in Mining» (Дніпро, 2018); всеукраїнській науково-практичній конференції на посвяту 90-річчя кафедри землеробства і агрохімії імені В.І. Сазанова факультету агротехнологій та екології Полтавської державної аграрної академії (Полтава, 2018); міжнародних науково-практичних

інтернет-конференціях «Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти» (Полтава, 2018–2021); другій міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку» (Полтава, 2020); всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції, присвяченій пам'яті видатного вченого ботаніка П.Є. Сосіна (Полтава, 2020); міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні тенденції сучасних наукових досліджень» (Мюнхен, Німеччина, 2020).

Публікації. Матеріали досліджень, що викладені в дисертації, опубліковано в 23 наукових працях, серед яких 2 публікації надруковані у журналах, які внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 4 статті у наукових фахових виданнях України, 3 патенти на корисну модель, 1 свідоцтво авторського права на науковий твір, розділи у трьох колективних монографіях, 8 тез доповідей і матеріалів наукових конференцій.

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота викладена на 176 сторінках комп'ютерного тексту, складається зі вступу, 7 розділів, висновків, рекомендацій виробництву, списку використаних джерел і додатків. Вона містить 11 таблиць, 46 рисунків. Список використаних посилань налічує 244 джерела, 215 з яких англійською мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

ДЕПОНУВАЛЬНО-ЕМІСІЙНІ ПРОЦЕСИ КАРБОНУ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ (аналітичний огляд літератури)

У розділі розглянуто фіторемедіаційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України, роль ґрунту в колообігу карбону та роль рослин у накопиченні ґрунтового органічного вуглецю та емісії вуглекислого газу. Аналіз сучасної наукової літератури дозволив обґрунтувати актуальність та напрямки наукових досліджень.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводились протягом 2014–2020 рр. на базі «Колекції енергетичних культур» Полтавської державної аграрної академії. Також окремі дослідження здійснювалися в сертифікованій науковій лабораторії агроекологічного моніторингу Полтавської державної аграрної академії.

Польові дослідження проводилися в умовах Полтавської області, що територіально відноситься до центральної частини України зони Лісостепу та характеризується різноманітністю ґрунтових умов та помірно-континентальним кліматом. Дослідження емісії та секвестрації діоксиду карбону ґрунтом в залежності від урожайності енергетичних культур проводили упродовж 2016–2019 рр. у стаціонарному досліді колекції енергетичних культур Полтавської державної аграрної академії, закладеному у 2014 році. Відбір проб здійснювався щороку упродовж дослідного періоду в травні.

Лабораторно-аналітичні дослідження проводилися у Полтавській державній аграрній академії на базі лабораторії агроекологічного моніторингу ПДАА (свідоцтво про атестацію №042-19). Відбір проб ґрунтів на вивчення динаміки емісії С-СО₂ та накопичення С_{орг} проводили згідно з вимогами ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019 «Охорона довкілля. Якість ґрунту. Загальні вимоги до відбирання проб (ГОСТ 17.4.3.01-2017, ІДТ)», ДСТУ ГОСТ 17.4.4.02:2019 «Охорона довкілля. Якість ґрунту. Методи відбирання та підготування проб для хімічного, бактеріологічного, гельмінтологічного аналізу (ГОСТ 17.4.4.02-2017, ІДТ)», які встановлюють основні вимоги щодо виконання відбору проб (17.4.3.01:2019, 2019; 17.4.4.02:2019, 2019).

ЕКОЛОГО-КЛІМАТИЧНІ РЕЖИМИ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Найменша середньодекадна температура була встановлена для листопада 2020 року (-4,6 °С), а найбільша – для серпня 2017 року (27,3 °С). Кліматична весна (час, коли середня температура перевищує 0 °С) відбувається у період з другої декади лютого (2016 рік) до першої декади квітня (2018 рік). Середня річна температура варіює в межах від 9,3 (2018 р.) до 10,8 (2017 рік) °С. Головною причиною подібності або відмінності між роками за показником річного ходу температур є настання кліматичної весни. Так, для 2018 року спостерігався тривалий період до настання кліматичної весни, за яким відбулось досить стрімке потепління. У свою чергу, для 2020 року весна була ранньою, але інтенсивність потепління було значно більш повільною. Відповідно, інші роки займають проміжне положення у градієнті часу настання весни та різкості зростання температури навесні.

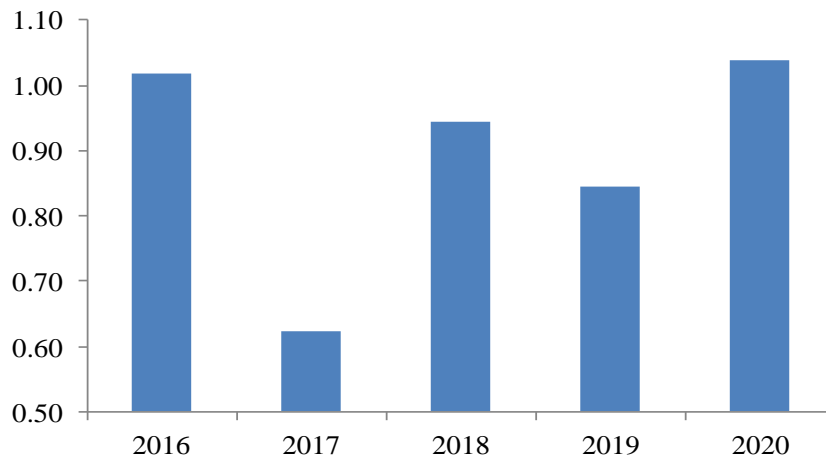


Рис. 1. Середньорічні значення гідротермічного коефіцієнту Селянінова протягом періоду вегетації проса прутоподібного та міскантусу гігантського, 2016–2020 рр. (ось абсцис – роки, ось ординат – гідротермічний коефіцієнт Селянінова)

Найбільша кількість опадів за декаду становила у 2016 році 106,4 мм (3 декада січня), у 2017 році – 45,5 мм (1 декада січня), у 2018 році – 78,8 мм (3 декада липня), у 2019 році – 41,4 мм (1 декада жовтня), та у 2020 році – 49,8 мм (1 декада червня). Як бачимо, випадіння максимальної кількості опадів протягом року є дуже нерівномірним та малоповторюваним рік від року. За

період досліджень (180 декад) декади без опадів спостерігалися 19 разів (10,6 % часу): по три декади без опадів за рік було в 2016, 2019 та у 2020 роках, 4 декади без опадів було у 2018 році та 6 декад без опадів було в 2017 році. Близькі до оптимального значення за ГТК погодні умови були у 2016, 2020 та у 2018 (ГТК близький до 1) (рис. 1).

Отже, ґрунтово-кліматичні умови за температурним чинником та кількістю опадів, місця проведення досліджень відповідають біології багаторічних злакових трав.

ІНТЕНСИВНІСТЬ ЕМІСІЇ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТИПУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Інтенсивність емісії вуглекислого газу ґрунтом, під час проведення досліджень коливалась в дуже широких межах, що свідчить про вплив неоднорідних умов для їх перебігу. В цілих умовах (контроль) емісія оксиду вуглецю варіює у межах від 50,7 до 110,6 мг/кг/год. Найбільший рівень емісії оксиду вуглецю під насадженням світчграсу встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює $170,4 \pm 2,32$ мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 118,8 до 220,6 мг/кг/год. У шарі ґрунту 10–20 см інтенсивність емісії менша на 18,6 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить $138,7 \pm 1,76$ мг/кг/год у діапазоні від 83,4 до 160,9 мг/кг/год. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю знижується ще більше. Вона менша, ніж у шарі 0–10 см на 40,3 % та менша, ніж у шарі 10–20 см на 26,7 %. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю становить $137,0 \pm 1,89$ мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 40,5 до 134,9 мг/кг/год.

Під насадженнями міскантусу емісія оксиду вуглецю варіює у межах від 72,4 до 298,1 мг/кг/год. Діапазон варіювання цього показника становить 225,7 мг/кг/год. Найбільший рівень емісії оксиду вуглецю під насадженням міскантусу встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює $204,8 \pm 3,44$ мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 156,1 до 298,1 мг/кг/год. У шарі ґрунту 10–20 см інтенсивність емісії менша на 24,6 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить $154,5 \pm 1,94$ мг/кг/год у діапазоні від 101,4 до 217,6 мг/кг/год. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю знижується ще більше. Вона менша, ніж у шарі 0–10 см на 42,0 % та менша, ніж у шарі 10–20 см на 23,1 %. У шарі ґрунту 20–30 см емісія оксиду вуглецю становить $118,8 \pm 2,43$ мг/кг/год та знаходиться в діапазоні від 72,4 до 298,1 мг/кг/год. Культура, глибина шару ґрунту, рік та рік вегетації визначають 95 % варіювання емісії оксиду вуглецю ґрунтом (табл. 1).

Культура є статистично вірогідним предиктором швидкості емісії оксиду вуглецю та здатна пояснити 49,0 % варіювання цього показника (рис. 2). Ґрунт під цілинною рослинністю характеризується найменшим рівнем виділення оксиду вуглецю (у середньому становить $74,70 \pm 0,90$ мг/кг/год). Під світчграсом емісія оксиду вуглецю зростає на 83,3 % (у середньому становить $136,95 \pm 1,89$ мг/кг/год), що статистично вірогідно відрізняється від контролю ($F = 6067,9, p < 0.001$).

Таблиця 1

Результати оцінки впливу культури, глибини шару ґрунту, року та року вегетації на емісію оксиду вуглецю ґрунтом за методом Загальної лінійної моделі
($R_{adj}^2 = 0.95$, $F = 728.2$, $p < 0.001$)

Предиктор	Сума квадратів	Ступені вольності	Середня сума квадратів	F-відношення	p-рівень
Вільний член	18582064	1	18582064	143691	<0.001
Рік (Р)	211576	2	105788	818	<0.001
Веgetаційний рік (В)	38834	2	19417	150	<0.001
Культура (К)	1558288	2	779144	6025	<0.001
Шар ґрунту (Ш)	868071	2	434036	3356	<0.001
Р×В	28545	4	7136	55	<0.001
К×Рік	102731	4	25683	199	<0.001
В×К	42251	4	10563	82	<0.001
Ш×Р	70858	4	17714	137	<0.001
Ш×В	11554	4	2888	22	<0.001
Ш×К	80815	4	20204	156	<0.001
Помилка	152856	1182	129	–	–

Емісія оксиду вуглецю з ґрунту під міскантусом також перевищує контроль на 113,3 % (у середньому становить $159,35 \pm 2,34$ мг/кг/год), що статистично вірогідно відрізняється від контролю ($F = 11221.0$, $p < 0,001$). Інтенсивність емісії оксиду вуглецю з ґрунту під міскантусом перевищує цей показник під просом на 16,4 %. Ця відмінність є статистично вірогідною ($F = 785.6$, $p < 0,001$).

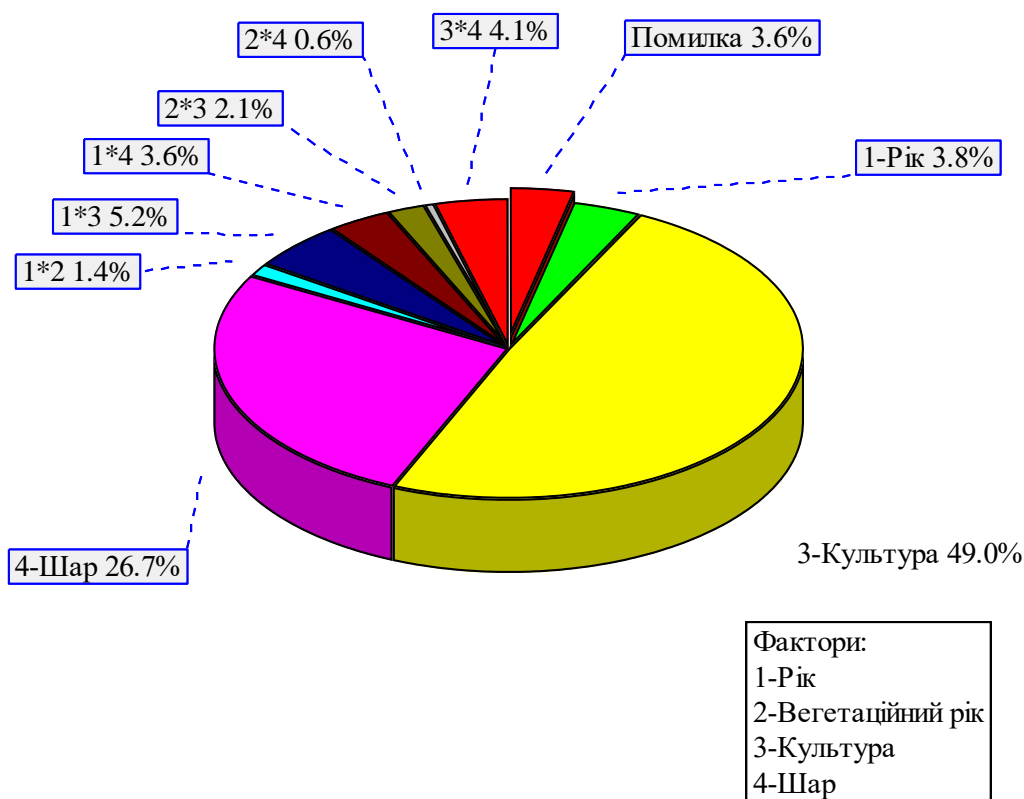


Рис. 2. Внесок впливу культури, глибини шару ґрунту, року та року вегетації, а також їх взаємодії у варіацію емісії оксиду вуглецю ґрунтом

Рік також є статистично вірогідним предиктором інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Цей показник здатний пояснити 3,8 % варіації емісії оксиду вуглецю. Найменшою середня інтенсивність емісії була в 2018 році, ще більшою вона була у 2019 році, та найбільшою – в 2020 році. Спостережуваний патерн можна пояснити відмінностями температурного режиму різних років. Збільшення інтенсивності емісії викликане потеплінням протягом періоду спостереження. Найменшою середня річна температура була в 2018 році, а найбільшою – у 2020 році, що повністю пояснює міжрічні коливання інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Протягом віку вегетації інтенсивність емісії оксиду вуглецю зростає. У третій рік вегетації емісія оксиду вуглецю становить $117,97 \pm 2,22$ мг/кг/год. На четвертий рік вегетації цей показник збільшується на 3,12 % до рівня $121,66 \pm 2,35$ мг/кг/год, що статистично вірогідно вище контролю ($F = 21.3, p < 0,001$). На п'ятий рік зростання становить 11,3 % порівняно з контролем ($131,37 \pm 2,94$ мг/кг/год), або 7,9 % порівняно з попереднім роком. Це зростання порівняно з попереднім роком є статистично вірогідним ($F = 147.8, p < 0,001$). Глибина шару ґрунту здатна пояснити 26,7 % варіювання інтенсивності емісії оксиду вуглецю. Зі зростанням глибини інтенсивність емісії оксиду вуглецю знижується. У шарі ґрунту 0–10 см інтенсивність емісії оксиду вуглецю становить в середньому $158,11 \pm 2,59$ мг/кг/год. У шарі 10–20 см цей показник зменшується на 24,1 % та становить $119,95 \pm 2,10$ мг/кг/год. Це зменшення є статистично вірогідним ($F = 2279.7, p < 0,001$). У шарі 20–30 см зменшення порівняно з верхнім шаром становить 41,2 %, а з попереднім – 22,5 % ($92,95 \pm 1,71$ мг/кг/год). Цей показник достовірно вірогідно відрізняється від інтенсивності емісії у більш високому шарі ґрунту ($F = 1141.9, p < 0,001$). Відмінності в інтенсивності емісії оксиду вуглецю між шарами ґрунту можна пояснити температурним градієнтом: верхні шари здатні прогріватися на більшу температуру. Також швидкість окиснення органічної речовини, внаслідок чого утворюється оксид вуглецю, тим більша, чим більш доступним є кисень. Доступність кисню зменшується зі зростанням глибини ґрунту. Також з глибиною зменшується вміст органічної речовини, що також уповільнює інтенсивність її окиснення.

ДЕПОНУВАННЯ КАРБОНУ ПІД ЧАС ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

В цілих умовах (контроль) депонування карбону в ґрунті варіює у межах від 0,92 до 2,66 %. Найбільший рівень депонування карбону під цілиною встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює $2,17 \pm 0,010$ % та знаходиться в діапазоні від 1,93 до 2,66 %. У шарі ґрунту 10–20 см вміст карбону менший на 12,2 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить $1,90 \pm 0,033$ % у діапазоні від 1,28 до 2,64 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону знижується ще більше. Воно менше, ніж у шарі 0–10 см на 28,10 % та менше, ніж у шарі 10–20 см на 18,10 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону в ґрунті становить $1,56 \pm 0,026$ % та знаходиться в діапазоні від 0,92 до 2,17 %. Під насадженнями світчграсу депонування карбону в ґрунті варіює у межах від 1,03 до 3,23 %. Найбільший рівень депонування карбону під насадженням

світчграсу встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює $2,31 \pm 0,024$ % та знаходиться в діапазоні від 1,62 до 2,96 %. У шарі ґрунту 10–20 см вміст карбону менший на 6,5 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить $2,16 \pm 0,045$ % у діапазоні від 1,03 до 3,23 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону в ґрунті знижується ще більше. Воно менше, ніж у шарі 0–10 см на 25,0 % та менше, ніж у шарі 10–20 см на 29,9 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону в ґрунті становить $1,62 \pm 0,022$ % та знаходиться в діапазоні від 1,11 до 2,38 %. Під насадженнями міскантусу депонування карбону в ґрунті варіює у межах від 1,67 до 3,41 %. Діапазон варіювання цього показнику становить 2,44 %. Найбільший рівень депонування карбону під насадженням міскантусу встановлений у шарі ґрунту 0–10 см, який дорівнює $2,42 \pm 0,037$ % та знаходиться в діапазоні від 1,67 до 3,41 %. У шарі ґрунту 10–20 см вміст карбону менший на 5,5 %, ніж у шарі 0–10 см, та становить $2,29 \pm 0,034$ % у діапазоні від 1,19 до 3,52 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону в ґрунті знижується ще більше. Воно менше, ніж у шарі 0–10 см на 28,5 % та менше, ніж у шарі 10–20 см на 24,3 %. У шарі ґрунту 20–30 см депонування карбону в ґрунті становить $1,73 \pm 0,024$ % та знаходиться в діапазоні від 1,08 до 2,58 %.

Культура, глибина шару ґрунту, рік та рік вегетації визначають 60 % варіювання депонування карбону в ґрунті (табл. 2).

Таблиця 2

Результати оцінки впливу культури, глибини шару ґрунту, року та року вегетації на вміст вуглецю у ґрунті за методом Загальної лінійної моделі
($R_{adj}^2 = 0.60$, $F = 58.1$, $p < 0.001$)

Предиктор	Сума квадратів	Ступені вольності	Середня сума квадратів	F-відношення	p-рівень
Вільний член	4935	1	4935	75161	<0.001
Рік (Р)	3.28	2	1.64	25.0	<0.001
Веgetаційний рік (В)	1.51	2	0.75	11.5	<0.001
Культура (К)	17	2	8.45	129	<0.001
Шар ґрунту (Ш)	93	2	46.6	710	<0.001
Р×В	0.29	4	0.07	1.10	0.35
К×Рік	1.82	4	0.45	6.91	<0.001
В×К	1.55	4	0.39	5.90	<0.001
Ш×Р	0.76	4	0.19	2.90	0.02
Ш×В	0.58	4	0.15	2.22	0.05
Ш×К	2.07	4	0.52	7.89	<0.001
Помилка	77.6	1182	0.07	–	–

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Вік рослинного угруповання в дослідженому діапазоні не впливає на продуктивність надземної фітомаси в контрольних умовах (цілина) ($F = 0.21$, $p = 0.81$), тому показники фітомаси можна розглядати як однорідні у віковому контексті. Надземна продуктивність цілинного рослинного покриву варіює в діапазоні від 0,73 до 1,80 т/га та у середньому становить $0,95 \pm 0,032$ т/га.

Надземна фітомаса світчграсу варіює у межах від 5,1 до 16,7 т/га. З віком наземна продукція світчграсу статистично закономірно зростає ($F = 28.9, p < 0.001$). У 3-х річному насадженні надземна продукція становить $11,1 \pm 0,51$ т/га та варіює у межах від 5,1 до 16,7 т/га. У 4-х річному насадженні надземна продукція становить $13,9 \pm 0,35$ т/га та варіює у межах від 10,4 до 19,5 т/га. Вона вища, ніж надземна продукція 3-х річного віку на 25,1 %. У 5-ти річному насадженні надземна продукція становить $15,3 \pm 0,29$ т/га та варіює у межах від 10,5 до 18,7 т/га. Вона вища, ніж надземна продукція 4-х річного віку на 9,7 %. Надземна продукція міскантусу варіює у межах від 11,5 до 25,2 т/га. З віком надземна продукція міскантусу статистично закономірно зростає ($F = 60.9, p < 0.001$). У 3-х річному насадженні надземна продукція становить $15,3 \pm 0,38$ т/га та варіює у межах від 11,5 до 21,6 т/га. У 4-х річному насадженні надземна продукція становить $17,7 \pm 0,35$ т/га та варіює у межах від 14,2 до 25,2 т/га. Вона вища, ніж надземна продукція 3-х річного віку на 15,6 %. У 5-ти річному насадженні надземна продукція становить $21,0 \pm 0,36$ т/га та варіює у межах від 16,4 до 24,7 т/га. Вона вища, ніж надземна продукція 4-х річного віку на 18,4 %.

Культура, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання надземної продукції енергетичних культур (табл. 3).

Таблиця 3

Результати оцінки впливу культури, року та віку вегетації на надземну продукцію енергетичних культур за методом Загальної лінійної моделі
($R_{adj}^2 = 0.95, F = 476.2, p < 0.001$)

Предиктор	Сума квадратів	Ступені вольності	Середня сума квадратів	F-відношення	p-рівень
Вільний член	47144	1	47144	17710	<0.001
Рік (P)	445	2	223	84	<0.001
Веgetаційний вік (B)	720	2	360	135	<0.001
Культура (K)	21016	2	10508	3947	<0.001
P×B	19	4	5	2	0.13
K×Рік	216	4	54	20	<0.001
B×K	403	4	101	38	<0.001
Помилка	1028	386	3	–	–

Тип культури є найбільшим фактором, який визначає варіювання надземної фітомаси. Цей фактор визначає 89,3 % варіювання цього показнику з урахуванням контролю та 41,6 % для тільки енергетичних культур. Найменший рівень надземної продуктивності встановлений для контрольних умов з цілинним рослинним покривом. Світчграс перевищує контрольну продуктивність у 14,2 рази, а міскантус – у 1,9 разів. Відповідно, міскантус є більш продуктивним за світчграс у 1,3 рази. Фактор року визначає 1,4 % варіювання врожайності для усіх культур та 15,3 % для енергетичних культур окремо. Протягом періоду досліджень надземна фітомаса рослинних угруповань монотонно зростала. Найменшою фітомаса була в 2018 році. Приріст фітомаси порівняно з попереднім роком у 2019 році становив 15,0 %, а в 2020 році – 10,5 %. Відмінності у фітомасі між роками, які становлять загальний тренд для усіх типів рослинного покриву, можна пояснити

особливостями забезпечення водними ресурсами кожного року. Загальний рівень опадів за рік або за окремі фенологічні етапи не можуть пояснити встановлені відмінності між роками. Так, загальний рівень опадів за 2018 рік становить 621 мм, за 2019 рік – 403 мм, а за 2020 рік – 526 мм. Кількість опадів за вегетаційний період також не може пояснити відмінність у фітомасі. Найбільший об'єм опадів за вегетаційний період встановлено для 2018 року (342 мм), дещо менший він був 2020 році (286 мм) та найменшим він був у 2019 році (210 мм). Чутливим предиктором міжрічних відмінностей є швидкість зростання кумулятивних опадів у процесі активної вегетації рослин в період з квітня по кінець червня. Так, швидкість зростання кумулятивних опадів за відповідний період у 2018 році становила 14,7 мм за декаду, в 2019 році – 18,3 мм за декаду, а в 2020 році – 29,5 мм за декаду (рис. 3).

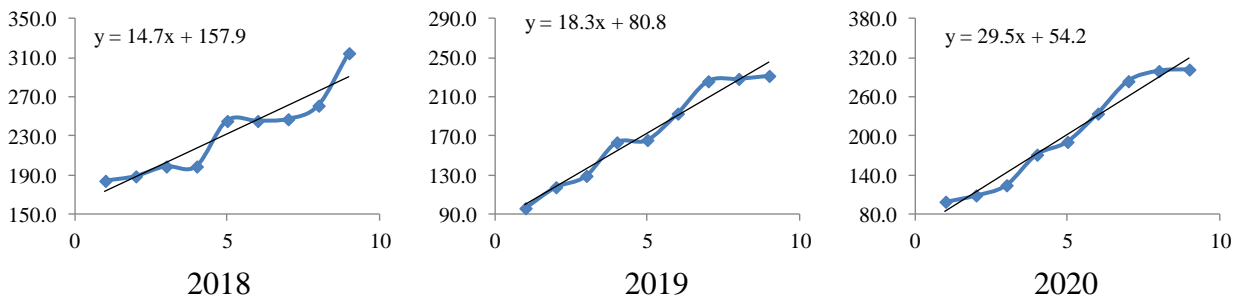


Рис. 3. Швидкість зростання кумулятивних опадів за період квітень–червень кожного року (ось абсцис – порядок декад з першої декади квітня, ось ординат – кумулятивні опади з початку року на відповідну декаду, лінія – апроксимація залежності кумулятивних опадів від часу, який виражений у порядку декад)

Між цими показниками та надземною фітомасою рослинних угруповань встановлена кореляційна залежність, яка дорівнює 0,94, що вказує на значний рівень впливу інтенсивності опадів в період активної вегетації трав'янистих рослин на надземну фітомасу угруповань.

Вік вегетації визначає 2,2 % варіації надземної фітомаси рослинного покриву та 23,7 % варіації цього показнику для енергетичних культур окремо. З віком рослинного угруповання його фітомаса в цілому зростає. Для 3-х річних угруповань фітомаса в середньому становить $9,1 \pm 0,56$ т/га. Для 4-х річних угруповань збільшення фітомаси становить 18,8 % порівняно з попереднім роком. Для 5-ти річних угруповань збільшення фітомаси становить 14,2 % порівняно з попереднім роком. Ріст багаторічних рослин є причиною збільшення фітомаси їх угруповань.

Взаємодія року та вегетаційного віку не є статистично вірогідними предикторами для надземної продуктивності енергетичних культур, що вказує на їх незалежність. Для кожного віку вегетації спостерігається подібний патерн реагуванні на міжрічні відмінності. Незалежно від віку, спостерігається тренд збільшення надземної фітомаси у ряду 2018→2019→2020. Така незалежність вказує на те, що рослинні угруповання різного віку реагують подібним чином на загальні особливості, які характерні для кожного року в цілому. Цими особливостями найбільш вірогідно є кліматичні умови. Як це було вказано для фітомаси у цілому, такою причиною може бути швидкість випадіння опадів у

період активного формування фітомаси трав'янистими рослинами. Між швидкістю зростання кумулятивних опадів за період квітень–червень кожного року та надземною фітомасою рослинних угруповань різного віку існує сильний кореляційний зв'язок, який характеризується коефіцієнтом кореляції 0,57. Енергетичні культури відрізняються у своїй реакції на міжрічну варіацію кліматичних умов від цілинної рослинності. Для цілинної рослинності максимум фітомаси спостерігався у 2019 році, тоді як фітомаса у 2018 та 2020 роки була меншою, та не відрізнялась між собою. Для світчграса та міскантуса спостерігалась чітка тенденція до зростання фітомаси протягом періоду досліджень. Рослини розрізнялись за рівнем фітомаси, тоді як загальний тренд мінливості був подібним: нахил відповідної лінії тренду не відрізнявся між культурами. Таким чином, характер відгуку енергетичних культур на вплив факторів середовища є подібним між різними культурами. Контрольний тип рослинності (цілина) та енергетичні культури розрізняються за показниками надземної фітомаси залежно від віку угруповань. Цілинний рослинний покрив не відрізняється за надземною фітомасою в залежності від віку ($F = 0.21$, $p = 0.81$). Надземна фітомаса енергетичних культур збільшується з віком насадження. Швидкість нарощування фітомаси уповільнюється з часом для світчграса, але збільшується з часом для міскантуса.

СТІЙКІСТЬ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕМІСІЇ ТА ДЕПОНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ В НАСАДЖЕННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

Наведені результати у попередній частині роботи вказують на те, що такі екологічні показники, як емісія оксиду вуглецю, вміст органічного вуглецю в ґрунті та продуктивність надземної фітомаси змінюються щороку. Зміни показника у наступному році порівняно з поточним можна охарактеризувати таким чином:

$$\Delta I/\Delta t = I_{i+1} - I_i, \quad (1)$$

де $\Delta I/\Delta t$ – швидкість зміни показника (E – емісія оксиду вуглецю; C – вміст вуглецю в ґрунті; Y – надземна фітомаса культури); I_{i+1} – значення показнику в наступному році; I_i – значення показнику в поточному році.

Ми припустили, що динаміка змін досліджуваних показників у часі визначається поточним станом системи. Для перевірки цієї гіпотези необхідно довести, що статистично вірогідними є регресійні рівняння, який мають вигляд:

$$\Delta E/\Delta t = b_{01} + b_{11} \times E + b_{21} \times C + b_{31} \times Y \quad (2)$$

$$\Delta C/\Delta t = b_{02} + b_{12} \times E + b_{22} \times C + b_{32} \times Y \quad (3)$$

$$\Delta Y/\Delta t = b_{03} + b_{13} \times E + b_{23} \times C + b_{33} \times Y, \quad (4)$$

де $\Delta E/\Delta t$, $\Delta C/\Delta t$, $\Delta Y/\Delta t$ – швидкість змін у часі емісії оксиду вуглецю, вмісту вуглецю в ґрунті та надземної фітомаси культури відповідно; b_{01} , ..., b_{33} – регресійні коефіцієнти.

Стан системи, за якого швидкість змін параметрів дорівнює нулю, є стаціонарним станом. Його можна знайти, якщо вирішити систему рівнянь:

$$\begin{cases} 0 = b_{01} + b_{11} \times E + b_{21} \times C + b_{31} \times Y \\ 0 = b_{02} + b_{12} \times E + b_{22} \times C + b_{32} \times Y \\ 0 = b_{03} + b_{13} \times E + b_{23} \times C + b_{33} \times Y \end{cases} \quad (5)$$

Якщо при відхиленні системи із стаціонарного стану система намагається повернутися в нього, тоді такий стаціонарний стан називається стійким. Якщо система виходить ще далі від стаціонарного стану, він називається не стійким. Для стаціонарного стану можна визначити якобіан, який характеризує динамічні властивості системи в стаціонарному стані та є нічим іншим, як системою часткових похідних. Найбільше за модулем власне число якобіану вказує на стійкість стаціонарного стану. Якщо це число є від'ємним, тоді стаціонарний стан є стійким. Якщо це число є позитивним, тоді цей стан є не стійким. Якщо це число є раціональним, тоді повернення (за умов стійкості) або відхилення (за умов не стійкості) до або від стаціонарного стану відбувається монотонно. Якщо це число є комплексним, тоді повернення (за умов стійкості) або відхилення (за умов не стійкості) до або від стаціонарного стану відбувається за коливальною траєкторією.

Нами встановлено, що регресійні моделі, які описують швидкість змін у часі параметрів системи від їх поточного стану, є статистично вірогідними. Ці моделі здатні пояснити від 17 до 87 % мінливості швидкості у часі параметрів моделі. Статистично вірогідними предикторами швидкості змін емісії оксиду вуглецю з поверхні ґрунту є усі дослідженні параметри системи у поточний час. Попарний аналіз впливу вказує на те, що поточні показники емісії та продуктивності фітомаси сприяють прискоренню емісії оксиду вуглецю, а вплив вмісту карбону в ґрунті навпаки, негативно впливає на швидкість цього показника (рис. 4).

У результаті множинного регресійного аналізу ми одержали систему рівнянь, які характеризують динаміку контрольної системи:

$$\Delta E/\Delta t = -30.47 + 0.34 \times E - 0.78 \times C - 0.89 \times Y \quad (6)$$

$$\Delta C/\Delta t = 1.05 + 0.00 \times E - 0.62 \times C + 0.13 \times Y \quad (7)$$

$$\Delta Y/\Delta t = 5.03 - 0.03 \times E - 0.91 \times C - 0.08 \times Y \quad (8)$$

Ця система має рішення, яке відповідає стаціонарному стану: $E = 97,6$ мг/кг/год, $C = 2,28$ %, $Y = 1,36$ т/га. Якобіан для стаціонарного значення має вигляд:

$$\begin{array}{ccc} 0.34 & -0.78 & -0.89 \\ 0.00 & -0.62 & 0.13 \\ -0.03 & -0.91 & -0.08 \end{array} \quad (9)$$

Власні числа якобіана дорівнюють: $-0,37+0,24i$; $-0,37-0,24i$; $0,39$. Таким чином, найбільше власне число є позитивним, тому стаціонарний стан системи не є стаціонарним. Розрахунки показують, що реактивність системи сіножаті є позитивною та становить $0,65$, що вказує на реактивний характер динаміки.

Матриця чутливості до стійкості має вигляд:

$$\begin{array}{ccc} & E & C & Y \\ E & 0.92 & -0.01 & -0.05 \\ C & 0.69 & 0.00 & -0.04 \\ Y & -1.55 & 0.01 & 0.08 \end{array} \quad (10)$$

У цьому випадку, мова йде не про стійкість як таку, а не стійкість. І вона саме обумовлена переважно за рахунок впливу емісії оксиду карбону на інші показники системи, включно з самою емісією. Такий результат можна

інтерпретувати як відсутність ендогенних механізмів регуляції емісії оксиду вуглецю в екосистемі данного типу.

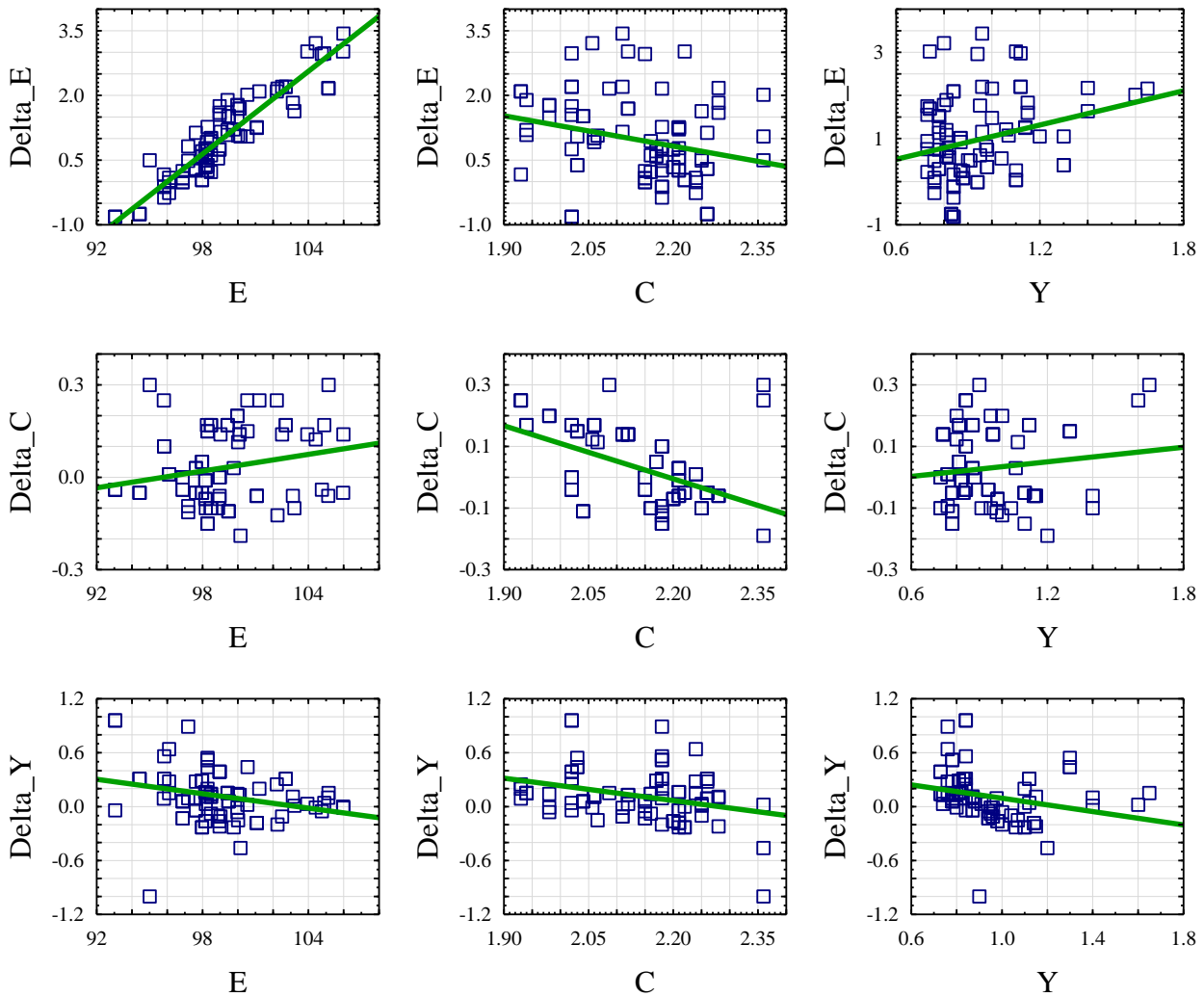


Рис. 4. Попарні залежності швидкості змін у часі параметрів системи від їх поточного стану для сіножаті на цілині. Ось ординат – поточні значення параметрів системи: E – емісія оксиду вуглецю; C – вміст вуглецю в ґрунті; Y – надземна фітомаса культури. Ось абсцис – швидкість зміни параметрів у часі

У результаті множинного регресійного аналізу ми одержали систему рівнянь, які характеризують динаміку системи світчграсу:

$$\Delta E / \Delta t = -7.38 + 0.19 \times E - 1.72 \times C - 1.13 \times Y \quad (11)$$

$$\Delta C / \Delta t = 2.13 - 0.01 \times E - 0.45 \times C + 0.04 \times Y \quad (12)$$

$$\Delta Y / \Delta t = -16.92 + 0.18 \times E + 0.52 \times C - 0.78 \times Y \quad (13)$$

Ця система має рішення, яке відповідає стаціонарному стану: E = 163,4 мг/кг/год, C = 2,63 %, Y = 16,84 т/га. Якобіан для стаціонарного значення має вигляд:

$$\begin{pmatrix} 0.19 & -1.72 & -1.13 \\ -0.01 & -0.45 & 0.04 \\ 0.18 & 0.52 & -0.78 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Власні числа якобіана дорівнюють: -0,68, -0,23, -0,13. Таким чином, найбільше власне число є від'ємним, тому стаціонарний стан системи є стаціонарним. Розрахунки показують, що реактивність системи світчграсу є

позитивною та становить 0,96, що вказує на реактивний характер її динаміки. Матриця чутливості до стійкості має вигляд:

	E	C	Y	
E	3.10	0.02	0.84	(15)
C	-27.78	-0.15	-7.55	
Y	-7.17	-0.04	-1.95	

Її аналіз вказує на те, що головним механізмом підтримання стійкості системи є стабілізуючий вплив емісії оксиду вуглеця та надземної фітомаси на депонування вуглецю в ґрунті.

У результаті множинного регресійного аналізу ми одержали систему рівнянь, які характеризують динаміку системи міскантусу:

$$\Delta E/\Delta t = -4.04 + 0.16 \times E - 1.02 \times C - 1.07 \times Y \quad (16)$$

$$\Delta C/\Delta t = 2.04 - 0.01 \times E - 0.34 \times C + 0.05 \times Y \quad (17)$$

$$\Delta Y/\Delta t = -18.79 + 0.19 \times E + 0.17 \times C - 0.79 \times Y \quad (18)$$

Ця система має рішення, яке відповідає стаціонарному стану: $E = 179,9$ мг/кг/год, $C = 2,84$ %, $Y = 18,89$ т/га. Якобіан для стаціонарного значення має вигляд:

0.16	-1.02	-1.07	(19)
-0.01	-0.34	0.05	
0.19	0.17	-0.79	

Власні числа якобіана дорівнюють: $-0,57 + 0,01i$; $-0,20 + 0,08i$; $-0,20 + 0,08i$. Таким чином, найбільше власне число є від'ємним, тому стаціонарний стан системи є стаціонарним. Слід відзначити, що власні числа є комплексними, тому повернення системи у стан рівноваги буде відбуватися за коливальною траєкторією. Розрахунки показують, що реактивність системи міскантусу є позитивною та становить 0,61, що вказує на реактивний характер її динаміки. Матриця чутливості до стійкості має вигляд:

	E	C	Y	
E	3.48	0.33	1.71	(20)
C	32.82	-2.09	5.54	
Y	0.20	-0.72	-1.40	

Її аналіз вказує на те, що головним механізмом підтримання стійкості системи є стабілізуючий вплив емісії оксиду вуглеця та надземної фітомаси на депонування вуглецю в ґрунті.

ВИСНОВКИ

1. Середня річна температура за період досліджень варіювала в межах від 9,3 до 10,8 °С. Сумарна кількість опадів за рік варіювала у діапазоні від 402,9 до 798,9 мм. Випадіння максимальної кількості опадів протягом року було дуже нерівномірним та малоповторюваним рік від року. За період досліджень декади без опадів спостерігалися 10,6 % часу. Погодні умови були близькими до оптимального значення для енергетичних культур за гідротермічним коефіцієнтом у 2016, у 2018 та у 2020 роках (ГТК близький до 1). Дефіцит вологи спостерігався у 2017 та у 2019 роках.

2. Культура, глибина шару ґрунту, рік та вік вегетації визначають 95 % варіювання емісії оксиду вуглецю ґрунтом та 60 % варіювання депонування карбону в ґрунті. Культура є статистично вірогідним предиктором екологічних процесів та здатна пояснити 49,0 % варіювання швидкості емісії оксиду вуглецю та 8,5 % варіювання депонування карбону в ґрунті.

3. Ґрунт під сіножаттю характеризується найменшим рівнем емісії оксиду вуглецю ($74,70 \pm 0,90$ мг/кг/год) та найменшим рівнем депонування вуглецю ($1,87 \pm 0,017$ %). Порівняно з контролем під насадженням світчґрасу емісія оксиду вуглецю зростає на 83,3 %, а під міскантусом зростає на 113,3 %. Порівняно з контролем під насадженням світчґрасу депонування карбону в ґрунті зростає на 7,1 %, а під насадженням міскантуса зростає на 15,4 %.

4. Міжрічне варіювання інтенсивності емісії оксиду вуглецю обумовлене температурним режимом різних років. Зростання середньої річної температури викликає загальне збільшення емісії оксиду вуглецю ґрунтом під усіма типами рослинного покриву. Найчутливішою до міжрічного коливання температурного режиму є емісія оксиду вуглецю під насадженнями міскантуса, дещо менш чутливою є емісія з насаджень світчґрасу. Цілинний покрив є найбільш резистентним до варіювання кліматичних умов. Емісія оксиду вуглецю зростає з віком вегетаційного покриву, що обумовлене накопиченням біомаси в ґрунті більш старих за віком плантацій. Найбільше з віком зростає емісія оксиду вуглецю під насадженнями міскантуса. Патерни зміни вмісту вуглецю в ґрунті, які пов'язані з астрономічним роком, не залежать від вегетаційного віку. Вміст вуглецю в ґрунті зростає разом з віком вегетації плантацій міскантуса.

5. Глибина шару ґрунту здатна пояснити 26,7 % варіювання інтенсивності емісії оксиду вуглецю та є найбільш значним фактором, який здатний пояснити 53,4 % варіювання депонування карбону. Зі зростанням глибини інтенсивність емісії оксиду вуглецю знижується. Відмінності в інтенсивності емісії оксиду вуглецю між шарами ґрунту можна пояснити температурним градієнтом, змінами доступності кисню та вмісту органічної речовини. Відмінності між шарами ґрунту за емісійною здатністю зростають з віком насаджень та є найбільш вираженими для насаджень міскантуса, а найменш вираженими для сіножаті.

6. Насадження світчґрасу перевищує контрольну продуктивність у 14,2 рази, а міскантус – у 18,9 разів. Відповідно, міскантус є більш продуктивним за світчґрас в 1,3 рази. Культура, рік та вік вегетації визначають 60 % варіювання надземної продукції енергетичних культур. Відмінності у фітомасі між роками для усіх типів рослинного покриву визначаються водним режимом, чутливим індикатором якого є швидкість зростання кумулятивних опадів у процесі активної вегетації рослин в період з квітня по кінець червня. З віком рослинного угруповання його фітомаса зростає. Характер відгуку енергетичних культур на вплив факторів середовища є подібним між різними культурами.

7. Динаміка змін у часі емісії оксиду вуглецю, вмісту в ґрунті вуглецю та надземної фітомаси визначається поточним станом системи. Система, яка сформована на сіножаті, має рівноважний стан який не є стійким. Причиною відсутності стійкості є слабкі ендогенні механізми регуляції емісії оксиду

вуглецю в екосистемі даного типу. Система, яка формується в насадженнях світчграсу та міскантусу, має стаціонарний стан, який є стійким та реактивним.

8. Головним механізмом підтримання стійкості системи світчграсу та міскантусу є стабілізуючий вплив емісії оксиду вуглецю та надземної фітомаси на депонування вуглецю в ґрунті. Стійкий прогнозований рівень депонованого вуглецю є більшим, ніж спостережуваний, що вказує на стійку тенденцію до зростання депонування вуглецю під насадженнями світчграсу та міскантусу.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

Результати дослідження можуть бути використані для розробки «Національної цифрової растрової карти вмісту та концентрації ґрунтового органічного вуглецю в ґрунтах України» для шару 0–30 см як складової частини Глобальної карти ґрунтового органічного вуглецю Глобального ґрунтового партнерства й Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), а також для розрахунку і обліку викидів парникових газів Національним центром обліку викидів парникових газів в Україні, під час проведення інвентаризації викидів парникових газів, пов'язаних зі зміною землекористування.

Також рекомендовано при висвітленні кліматичних питань під час державного планування та при виконанні стратегічної екологічної оцінки відповідно до Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку». Одержані результати переконливо вказують, що насадження енергетичних культур на маргінальних землях виконують екосистемні сервіси, які зводяться не тільки для вирішення енергетичних проблем, але є важливим інструментом депонування оксиду вуглецю в ґрунті.

Агровиробникам в промислових регіонах України з високою площею маргінальних земель рекомендовано для відтворення родючості ґрунту та вирішення проблеми зростання концентрації оксиду вуглецю в атмосфері закладення багаторічних біоенергетичних плантацій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у закордонних наукових виданнях які внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science

1. Taranenko A., Kulyk M., **Galytska M.**, Taranenko S. Effect of cultivation technology on switchgrass (*Panicum virgatum* L.) productivity in marginal lands in Ukraine. Acta Agrobot. 2019; 72(3): 1786. <https://doi.org/10.5586/aa.1786> (Проведення польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовка матеріалу до друку).

2. Kulyk M., **Galytskaya M.**, Plaksiienko I., Kocherga A., Mishchenko O. Switchgrass and lupin as phytoremediation crops of contaminated soil. International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM. Bulgaria, Sofia, 2020. Т. 20, Vol 5.1 : 779-784. DOI:10.5593/sgem2020/5.1/s20.098. (Проведення польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовка матеріалу до друку).

Публікації у наукових фахових виданнях України

3. Kulyk, M., **Galytska, M.**, Samoylik, M., & Zhornyk, I. Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine. *Agrology*. 2019. 2(1). P. 65-73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020> (Проведення польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовка матеріалу до друку).

4. Колеснікова Л. А., **Галицька М. А.**, Піщаленко М. А., Бараболя О. В., Чубук Д. І., & Литвишко О. А. Реакція сільськогосподарських рослин на забруднення ґрунту нафтою. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. № 4. С. 100-107. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.04.12> (Проведення польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовка матеріалу до друку).

5. **Галицька М. А.**, Писаренко П. В., Кулик М. А. Гуміфікаційно-мінералізаційні процеси як показник акумуляції карбону в ґрунтах. *Таврійський науковий вісник : Сільськогосподарські науки*. Херсон : Вид. дім «Гельветика», 2018. Вип. 102. С. 130-136. (Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку).

6. Taranenko, A. O., Kulyk, M. I., **Galytska, M. A.** & Taranenko, S. V. Influence of different methods of switch-grass cultivation on soil organic matter dynamics and biomass productivity. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*. 2020. (3). P. 135-149. doi: 10.31210/visnyk2020.03.15 (Проведення польових досліджень, обчислення результатів, формування висновків, підготовка матеріалу до друку).

Монографії (розділи монографії)

7. Kulyk M. I., Kurylo V. L., Kalinichenko O. V., **Galytska M. A.** Plant energy resources : agroecological, economic and energy aspects : monograph / Edited by authors. Poltava: Astraya, 2019. 119 p. http://dspace.pdaa.edu.ua:8080/bitstream/123456789/8787/1/Plant%20energy%20resources_Monograf.pdf (Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку).

8. Писаренко П. В., **Галицька М. А.**, Корчагін О. П. Екологічні аспекти відновлювальних джерел енергії в умовах Лісостепу України / Оптиміальні енергетичні системи з урахуванням наявного потенціалу відновлюваних джерел енергії у Лісостепу України : колективна монографія / За заг. ред. М. І. Кулика, О. В. Калініченка. Полтава: ПП «Астрая», 2019. С. 13-36. (Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку).

9. **Галицька М.А.**, Кулик М.І., Горб О.О. Збереження балансу парникових газів при вирощуванні енергетичних культур внаслідок непрямой зміни землекористування в умовах Лісостепу / Розробка та вдосконалення енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу альтернативних джерел енергії : колективна монографія / за ред. О.О. Горба, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава: ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. С. 216-226. (Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку).

10. **Галицька М.А.**, Жорник І.І., Молчанова А.В. Характеристика та прогалини законодавства України у сфері альтернативної енергетики / Розробка

та вдосконалення енергетичних систем з урахуванням наявного потенціалу альтернативних джерел енергії : колективна монографія / за ред. О.О. Горба, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава: ТОВ НВП «Укрпромторгсервіс», 2017. С. 281-292. (*Опрацювання та аналіз наукової літератури, підготовка до друку*).

11. **Галицька М. А.** Динаміка зміни органічного вуглецю ґрунту при вирощуванні енергетичних культур: наслідки для залишків парникових газів та родючості ґрунту / Енергоефективність та енергозбереження: економічний, техніко-технологічний та екологічний аспекти : колективна монографія / За заг. ред. П. М. Макаренка, О. В. Калініченка, В. І. Аранчій. Полтава: ПП «Астрая», 2019. С. 376-380.

Патенти

12. **Галицька М. А.**, Поспелов С. В., Кулик М. І., Писаренко П. В. Спосіб визначення інтенсивності дихання ґрунту. Пат. 131104 Україна, МПК G01N 33/24 (2006.01) / Заявка № u 2018 06284; заявл. 05.06.2018; дата публікації 10.01.2019, Бюл. № 1.

13. **Галицька М. А.**, Поспелов С.В., Кулик М. І., Горб О. О. Спосіб визначення біологічної активності ґрунту. Пат. 130474 Україна, МПК G01N 33/24 (2006.01)/ Заявка № u 2018 06231; заявл. 04.06.2018; дата публікації 10.12.2018, Бюл. № 23.

14. Кулик М. І., **Галицька М. А.**, Рожко І. І. Спосіб допосівної обробки насіння проса прутоподібного. Пат. № 125096; № заявки u2017 12598; заявл. 18.12.2017, опублік. 25.04.2018, Бюл. № 8.

15. А. с. № 76724 на науковий твір: Ботаніко-біологічні особливості та потенціал урожайності енергетичних культур, автори: М. І. Кулик, **М. А. Галицька**, І. І. Рожко (Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 76724 від 8.02.2018).

Матеріали й тези доповідей на конференціях

16. Maksym Kulyk, **Maryna Galytska** and Iryna Zhornyk. Plants for phytoremediation and biofuel production. *Applied Biotechnology in Mining: Proceedings of the International Conference* (Dnipro, April 25-27, 2018). Dnipro: National Technical University «Dnipro Polytechnic», 2018: 49. URL.: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152916> (*Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки*).

17. **Галицька М. А.**, Лесшен Я. П. Оцінка життєвого циклу органічного вуглецю та азоту ґрунту при вирощуванні енергетичних культур. *Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти*: матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет-конференції, (28 листопада 2018 року, м. Полтава). Полтава, 2018. С. 52-55. (*Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки*).

18. **Галицька М. А.** Накопичення ґрунтового органічного вуглецю та наслідки для викидів парникових газів ґрунту. *Актуальні питання*

землеробства і агрохімії: історія і сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції на посвяту 90-річчя кафедри землеробства і агрохімії імені В.І. Сазанова факультету агротехнологій та екології Полтавської державної аграрної академії (27-28 листопада 2018 р., м. Полтава) Полтава: ПДАА, 2018. С. 80-84. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

19. **Галицька М. А.**, Калініченко А. В. Зменшення викидів CO₂ шляхом системного застосування технології No-till в сільгоспвиробництві. *Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспекти*: матеріали II міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (28 листопада 2018 року, м. Полтава). Полтава, 2018. С. 204-207. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

20. **Галицька М.А.**, Рустімбаєв Б.Є. Оцінки життєвого циклу органічного вуглецю ґрунту при вирощуванні енергетичних культур: наслідки для залишків парникових газів та якості ґрунтів. *Ефективне функціонування екологічно-стабільних територій у контексті стратегії стійкого розвитку: агроекологічний, соціальний та економічний аспект*: матеріали III міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (12 грудня 2019 року, м. Полтава) Полтава, 2019. С. 112-116. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

21. **Галицька М.А.**, Тараненко А.О., Самойлік М.С., Диченко О.Ю. Депонування органічного вуглецю при вирощуванні енергетичних культур на малопродуктивних ґрунтах. *Біорізноманіття: теорія, практика, формування здоров'язбережувальної компетентності у школярів та методичні аспекти вивчення у закладах освіти*: матеріали Всеукр. наук.-практ. онлайн-конф., присвячена пам'яті видатного вченого ботаніка П.Є. Сосіна (30 жовтня 2020 р., м. Полтава). Полтав. нац. пед. ун-т імені В. Г. Короленка / За заг. ред. проф. Гриньової М.В. Полтава, 2020. С. 162-165. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

22. **Галицька М.**, Кулик М., Міленко О., Тараненко А. Вплив фотосинтезу та фотосинтетичної продуктивності на інтенсивність асиміляції вуглецю при вирощуванні міскантусу (*miscanthus x giganteus*). *Actual trends of modern scientific research: abstracts of the 5th International scientific and practical conference* (November 8-10, 2020, Munich, Germany) MDPC Publishing. Munich, Germany. 2020. Pp. 13-18. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-actual-trends-of-modern-scientific-research-8-10-noyabrya-2020-goda-myunhen-germaniya-arhiv/> (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

23. **Галицька М.А.**, Кулик М.І., Колеснікова Л.А. Інтенсивність асиміляції карбону при вирощуванні енергетичних культур в умовах Лісостепу

України. *Екологічні проблеми навколишнього середовища та раціонального природокористування в контексті сталого розвитку*: збірник матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції (26 червня 2020 року, м. Полтава). Полтава, 2020. С. 127-131. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, опрацьовано та узагальнено їх результати, сформульовано висновки).

АНОТАЦІЯ

Галицька М.А. Агроекологічна оцінка колообігу карбону на посівах енергетичних культур в умовах лісостепу України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата сільськогосподарських наук за спеціальністю 03.00.16 – екологія. – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, 2021.

У результаті досліджень, проведених впродовж 2014–2020 рр. на базі «Колекції енергетичних культур» Полтавської державної аграрної академії Міністерства освіти і науки України, встановлено закономірності функціонування багаторічних систем біоенергетичних культур міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus*) та проса прутоподібного (*Panicum virgatum* L.) як факторів депонування вуглецю в ґрунті. Встановлені еколого-кліматичні особливості, за яких функціонують багаторічні системи біоенергетичних культур. Оцінені роль культури, глибини шару ґрунту, року та віку вегетації у варіюванні емісії оксиду вуглецю ґрунтом та депонування карбону в ґрунті.

Визначено закономірності варіювання емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в насадженнях енергетичних культур. Надано оцінку ролі кліматичних чинників у варіюванні емісії оксиду вуглецю та депонуванні вуглецю в ґрунті; встановлені закономірності формування продуктивності насаджень енергетичних культур; оцінено стійкість динаміки систем біоенергетичних культур.

У результаті дослідження одержані результати, які характеризуються науковою новизною. Уперше встановлені кількісні характеристики емісії оксиду вуглецю у залежності від агроекологічних режимів у насадженнях біоенергетичних культур міскантусу та свічграсу. Оцінена взаємодія агроекологічних факторів у впливі на емісію оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті. Обґрунтовано значення насаджень енергетичних культур як фактору депонування вуглецю в ґрунті. Удосконалено процедуру порівняльного аналізу внеску різних факторів у варіювання емісії оксиду вуглецю та депонування вуглецю в ґрунті, спосіб визначення інтенсивності дихання ґрунту, спосіб визначення біологічної активності ґрунту. Набула подальшого розвитку теорія стійкості екологічних систем.

Ключові слова: депонування, емісія, глобальні зміни клімату, маргінальні землі, енергетична безпека, стійкість екосистем.

АННОТАЦИЯ

Галицкая М. А. Агроэкологическая оценка круговорота углерода на посевах энергетических культур в условиях лесостепи Украины. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук по специальности 03.00.16 – экология. – Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, Днепр, 2021.

Диссертация посвящена изучению закономерностей функционирования многолетних систем биоэнергетических культур мискантуса гигантского (*Miscanthus × giganteus*) и проса прутьевидного (*Panicum virgatum* L.) как факторов депонирования углерода в почве. Установлены эколого-климатические особенности, при которых функционируют многолетние системы биоэнергетических культур; оценены роль культуры, глубины слоя почвы, года и возраста вегетации в варьировании эмиссии оксида углерода почвой и депонирования углерода в почве; определены закономерности варьирования эмиссии оксида углерода и депонирования углерода в насаждениях энергетических культур; оценена роль климатических факторов в варьировании эмиссии оксида углерода и депонировании углерода в почве; установлены закономерности формирования продуктивности насаждений энергетических культур; оценена устойчивость динамики систем биоэнергетических культур.

В результате исследования получены результаты, характеризующиеся научной новизной. Впервые установлены количественные характеристики эмиссии оксида углерода в зависимости от агроэкологических режимов в насаждениях биоэнергетических культур мискантуса и свичграса. Оценено взаимодействие агроэкологических факторов в воздействии на эмиссию оксида углерода и депонирования углерода в почве. Обосновано значение насаждений энергетических культур как фактора депонирования углерода в почве. Усовершенствована процедура сравнительного анализа вклада различных факторов в варьирования эмиссии оксида углерода и депонирования углерода в почве, способ определения интенсивности дыхания почвы, способ определения биологической активности почвы. Получила дальнейшее развитие теория устойчивости экологических систем.

В работе установлено, что эмиссия оксида углерода увеличивается с возрастом вегетационного покрова, может быть объяснено накоплением биомассы в почве более старых по возрасту плантаций. Больше всего с возрастом растет эмиссия оксида углерода под насаждениями мискантуса. Паттерны изменения содержания углерода в почве, связанные с астрономическим годом, зависят от вегетационного возраста. Содержание углерода в почве растет вместе с возрастом вегетации плантаций мискантуса. Показано, что глубина слоя почвы способна объяснить 26,7 % варьирования интенсивности эмиссии оксида углерода и является наиболее значительным фактором, который способен объяснить 53,4 % варьирования депонирования углерода. С ростом глубины интенсивность эмиссии оксида углерода

опускается. Различия в интенсивности эмиссии оксида углерода между слоями почвы можно объяснить температурным градиентом, изменениями доступности кислорода и содержания органического вещества. Различия между слоями грунта с эмиссионной способностью растут с возрастом насаждений и наиболее выражены для насаждений мискантуса, а наименее выражены для сенокосов. Показано, что насаждения свитчграса превышает контрольную производительность в 14,2 раза, а мискантуса – в 18,9 раза. Соответственно, мискантус является более продуктивным чем свитчграс в 1,3 раза. Культура, год и возраст вегетации определяют 60 % варьирования надземной продукции энергетических культур. Различия в фитомассе между годами, которые составляют общий тренд для всех типов растительного покрова, определяются особенностями обеспечения водными ресурсами каждого года. С возрастом растительного группировки его фитомасса возрастает. Характер отклика энергетических культур на воздействие факторов среды является подобным между различными культурами. Впервые установлено, что динамика изменений во времени эмиссии оксида углерода, содержания в почве углерода и надземной фитомассы определяется текущим состоянием системы. Система, которая сформирована на сенокосе, имеет равновесное состояние, которое не является устойчивым. Причиной отсутствия устойчивости есть слабые эндогенные механизмы регуляции эмиссии оксида углерода в экосистеме данного типа. Система, которая формируется в насаждениях свитчграса и мискантуса, имеет стационарное состояние, которое является устойчивым и реактивным. Показано, что главным механизмом поддержания устойчивости системы свитчграса и мискантуса является стабилизирующее влияние эмиссии оксида углерода и надземной фитомассы на депонирование углерода в почве. Устойчивый прогнозируемый уровень депонированного углерода является большим, чем наблюдаемый, что указывает на устойчивую тенденцию к росту депонирования углерода под насаждениями свитчграса и мискантуса.

Ключевые слова: депонирование, эмиссия, глобальные изменения климата, маргинальные земли, энергетическая безопасность, устойчивость экосистем.

SUMMARY

Galitskaya M. A. Agroecological assessment of the carbon cycle of energy crops in the forest-steppe conditions of Ukraine. – Qualification scientific work on the right of manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of agricultural sciences on the specialty 03.00.16 – ecology. – Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, 2021.

As a result of research conducted during 2014-2020 on the basis of the "Collection of Energy Crops" Poltava State Agrarian Academy of the Ministry of Education and Science of Ukraine, it was established Miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) and Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as factors of carbon deposition in the soil.

Ecological and climatic features under which long-term systems of bioenergy cultures function are established. The role of culture, soil layer depth, year and age of vegetation in variation of carbon monoxide emission by soil and carbon deposition in soil are evaluated;

The regularities of variation of carbon monoxide emission and carbon deposition in energy crops are determined. An assessment of the role of climatic factors in the variation of carbon monoxide emissions and in the deposition of carbon in the soil is given; established patterns of formation of productivity of plantations of energy crops; the stability of the dynamics of bioenergy crop systems is estimated.

As a result of research the results which are characterized by scientific novelty are received. For the first time, quantitative characteristics of carbon monoxide emission depending on agroecological regimes in plantations of bioenergy crops miscanthus and candlegrass have been established. The interaction of agroecological factors in the influence on carbon monoxide emission and carbon deposition in the soil is estimated. The importance of energy crops as a factor of carbon deposition in the soil is substantiated. The procedure for comparative analysis of the contribution of various factors to the variation of carbon monoxide emission and carbon deposition in the soil, the method of determining the intensity of soil respiration, the method of determining the biological activity of the soil have been improved. The theory of stability of ecological systems was further developed.

Keywords: deposition, emissions, global climate change, marginal lands, energy security, ecosystem stability.